

وضعیت جریان در محل تغییر شیب ناگهانی سرریزها

علی عطارزاده^۱، امیررضا زرّاتی^۲، احمد شانه‌ساززاده^{۳*}

۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد دانشکده عمران، دانشگاه امیرکبیر، تهران

۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۰۴

چکیده- سرریزهای ریزش آزاد (شوت)، یکی از سازه‌های مهم بسیاری از سدها است. در سرریز سدهای بلند، بیشتر مواقع برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون با ایجاد یک رمپ و پله روی سرریز، هوادهی به جریان انجام می‌شود. ایجاد رمپ روی سرریز سبب فاصله افتادن بین جت آب و بستر شده و باعث وارد شدن هوا به جریان می‌شود. برای بررسی هوادهی، بررسی وضعیت جریان روی رمپ و به عبارتی محل تغییر ناگهانی شیب، حائز اهمیت است. در این پژوهش با استفاده از مدل عددی FLUENT، مشخصه‌های جریان در محل تغییر شیب ناگهانی سرریز، بررسی شده است. نتایج مدل عددی، مانند فشار در بستر، فشار در عمق، پروفیل سرعت و پروفیل سطح آب با نتایج حل تحلیلی جریان ایده‌آل و همچنین داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل عددی می‌تواند به خوبی سطح آب و فشارهای دینامیکی را محاسبه کند. در مورد دو پارامتر مهم پروفیل سرعت و توزیع فشار در بستر، نتایج حل عددی نسبت به حل تحلیلی تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. با توجه به مقایسه‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که در تمام زوایای تغییر شیب، در قسمت کانال سرریز و نیز محل تغییر شیب، نتایج فشار در بستر در مدل عددی نسبت به نتایج تحلیلی تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین این قاعده روی رمپ سرریز به‌ویژه در زوایای کم، درست است. بیشینه‌ی خطای نتایج فشار در بستر در مدل عددی ۵ تا ۱۰ درصد است. حل عددی، پروفیل سرعت را به درستی با خطای حدود ۵ درصد ارائه می‌دهد. روی کانال و رمپ به ترتیب قبل و بعد از تغییر ناگهانی، طول تأثیر شیب بر فشار بستر به زاویه تغییر شیب و عمق نرمال بالادست وابسته است. سرانجام، نتایج پروفیل سطح آب حاصل از حل عددی و تحلیلی تقریباً بر هم منطبق است که این انطباق به معنی تأثیر بسیار کم لزجت، گرانش و عامل آشفتگی بر پروفیل سطح آب است.

واژگان کلیدی: هواده سرریز، تغییر شیب ناگهانی، فشار دینامیکی، FLUENT، حل عددی، پروفیل سرعت، پروفیل سطح آب

۱- مقدمه

احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون وجود دارد. بین روش‌های جلوگیری از کاویتاسیون در سرریز، استفاده از هواده اقتصادی‌ترین روش است. هواده سرریز معمولاً شامل یک رمپ و یک پله است. در شکل ۱، هواده سرریز به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. در این شکل محل تغییر

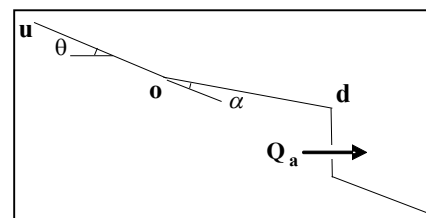
یکی از سازه‌های مهم سد، سرریز و تأسیسات وابسته به آن است. بنابراین هنگام مطالعه و طراحی پروژه‌های سدسازی و پروژه‌های مشابه، باید به هیدرولیک سرریز توجه شود. در سرریز سدهای بلند، به خاطر سرعت بالای جریان،

برای حل توابع تحلیلی (توابعی که در معادله لاپلاس صدق می‌کنند) بوده و در شرایطی که وضعیت مرزهای جریان پیچیده باشد جواب‌های بسیار خوب و منحصر به فردی را برای حل تحلیلی معادلات جریان سیالات ارائه می‌دهد. برای نمونه می‌توان به تحلیل جریان در پنجه سرریزها [۴، ۵، ۹] و تحلیل جریان در محل تغییر شیب ناگهانی سرریز در سدها [۱۲] اشاره کرد. با استفاده از این روش، زراتی و همکاران با ایده‌ال فرض کردن جریان عبوری از روی سرریز و طولانی فرض کردن طول رمپ، با استفاده از تکنیک ریاضی نگاشت همدیس در محل تغییر شیب ناگهانی سرریز، به روش تحلیلی، توزیع فشار دینامیکی در کف و در عمق را به دست آوردند [۱۲].

روش دیگر برای تحلیل میدان جریان، استفاده از مدل عددی است که بر خلاف مدل تحلیلی از فرضیات ساده‌کننده کمتری در استفاده می‌کند و با در نظر گرفتن اغلب نیروهای مؤثر بر جریان، معادلات حاکم بر جریان را حل می‌کند.

مطالعات زیادی درباره‌ی جریان پر سرعت روی سرریزها در قالب سه روش تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. در سال ۱۹۶۵، Cassidy بر اساس جریان پتانسیل، به صورت دوبعدی فشار روی تاج سرریز را بررسی کرد که نتایج آن تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت [۲]. Kjellesvig و Olsen در سال ۱۹۹۸ با استفاده از معادلات رینولدز میانگین‌گیری شده در زمان (RANS) و نیز معادلات $k-\epsilon$ استاندارد به روش حجم محدود، جریان عبوری از روی سرریز را به صورت دوبعدی و سه‌بعدی تحلیل کردند [۶]. Unami و همکاران در سال ۱۹۹۹ با ترکیب دو روش حجم محدود و المان محدود، جریان سطح آزاد روی سرریز را به صورت دوبعدی با شبکه نامنظم مثلثی شکل مدل کردند [۸]. Bruce و همکاران در

شیب ناگهانی سرریز، نقطه o ، زاویه شیب سرریز با θ و زاویه تغییر شیب با α نشان داده شده است. در این شکل، uo معرف بخشی از کانال سرریز و od معرف منطقه رمپ است که به میزان α از امتداد سرریز، برای هوادهی به زیر جریان، منحرف شده است. برای تعیین میزان هواگیری و طول تأثیر هواده و عملکرد هواده، بررسی وضعیت جریان قبل از محدوده هوادهی، یعنی روی رمپ و به بیان بهتر در محل تغییر شیب ناگهانی سرریز، (ناحیه بالادست و پایین دست نقطه o در شکل ۱) یک پیش نیاز ضروری است.



شکل (۱) محل تغییر شیب ناگهانی سرریز برای هوادهی (Q_a نماد دبی هوا است) [۱۲]

تغییر ناگهانی شیب سرریز ممکن است دلایل دیگر مثلاً در محل اتصال تند آب به حوضچه آرامش و یا متأثر از پیروی از شیب طبیعی زمین باشد.

فرض تراکم‌ناپذیری برای سیالی مانند آب، در فشارهای متعارف درست است. فرض غیرلزجی و غیرچرخشی بودن در جریان‌هایی که با حالت غیرچرخشی شروع به حرکت کرده و با عدد رینولدز بالا جریان می‌یابند، به جز در نزدیکی مرز صلب (که شیب سرعت که عامل تنش برشی است زیاد است) فرض قابل قبولی است؛ بنابر این می‌توان زمینه را برای حل تحلیلی جریان فراهم کرد. فرض ایده‌آل بودن جریان، معادلات حاکم بر سیالات را که در شرایط مختلف مرزی پیچیده و غیرخطی و حل آن‌ها مشکل و وقت گیر است به شکل ساده و قابل حل در می‌آورد. یکی از روش‌های حل تحلیلی جریان در محل تغییر ناگهانی شیب، روش نگاشت همدیس است که یک روش کارآمد

ناگهانی سرریز از نرم افزار FLUENT ویرایش 6.0 استفاده شد. FLUENT یک نرم افزار عمومی حل میدان جریان است که به صورت دوبعدی یا سه بعدی و بر اساس روش حجم محدود، میدان جریان را تحلیل می کند. محاسبه تراز سطح آب در جریان های با فشار غیرهیدرواستاتیک از نظر عددی از جمله مسائل مشکل در هیدرولیک کانال های باز است.

۲-۱-۱- معادلات حاکم

در نرم افزار FLUENT از معادله پیوستگی و شکل کامل معادله ناویر استوکس (RANS) در تحلیل جریان استفاده می شود. در این نرم افزار برای حل میدان جریان آشفته از مدل های آشفته مختلف می توان استفاده کرد؛ از کاربردی ترین آن ها، مدل دو معادله ای $k - \varepsilon$ است که در این پژوهش نیز با توجه به نتایج مطلوب این مدل از آن استفاده شد.

در تعیین سطح آزاد جریان از روش VOF استفاده شد. یکی از روش های VOF موجود در نرم افزار، الگوی بازسازی هندسی^۲ است. در این روش که به روش یانگز نیز معروف است، جریان به صورت غیرماندگار تحلیل می شود. در شبکه های نامنظم این روش دقت مناسبی دارد و در شبکه های منظم رفتار آن قابل قبول است [۱۱].

۲-۱-۲- هندسه و شرایط مرزی و اولیه میدان جریان

از آن جا که نتایج آزمایشگاهی زراتی و همکاران [۱۲] معیار سنجش نتایج عددی قرار گرفت، هندسه میدان جریان به صورتی ترسیم شد که بیشترین تطابق را با این مدل آزمایشگاهی داشته باشد. در مدل آزمایشگاهی، یک تند آب با شیب $(V):1/9(H)$ یا حدود $27/75$ درجه و طول 14 متر و عرض 20 سانتی متر و ضریب زبری مانینگ تقریبی $0/009$ استفاده شد. جریان از یک منبع هوایی به وسیله یک سرریز

سال ۲۰۰۱ جریان عبوری از روی یک سرریز اوجی استاندارد را به صورت فیزیکی و عددی مدل کردند. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی دوبعدی در قائم جریان آشفته با استفاده از معادلات $k - \varepsilon$ استاندارد به روش حجم محدود که با نرم افزار FLOW-3D انجام شده است به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. در این نرم افزار برای تعیین پروفیل سطح آب از تکنیک حل معادله VOF^۱ استفاده شده است و پروفیل فشار روی سطح سرریز به نتیجه پروفیل فشار مدل فیزیکی روی تاج سرریز نزدیک بوده است [۱].

در سال ۱۳۸۱ حیدری جریان آشفته عبوری روی سرریز اوجی را با نرم افزار FLUENT به صورت دوبعدی در قائم بررسی کرد [۱۴].

در این پژوهش با بهره گیری از مدل عددی و استفاده از معادلات حاکم بر سیالات در شکل کامل آن و همچنین استفاده از مدل آشفته، وضعیت جریان در محل تغییر شیب ناگهانی سرریزها (دو طرف نقطه ۵ روی رمپ و شوت در شکل ۱) بررسی و با نتایج مدل تحلیلی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. مشخصه های بررسی شده عبارتند از: توزیع فشار دینامیکی در بستر، توزیع فشار دینامیکی در عمق، پروفیل سرعت و پروفیل سطح آب. لازم به توضیح است که این مشخصات فقط در اطراف محل تغییر شیب ناگهانی (یعنی نقطه ۵ در شکل ۱) بررسی شده است. نکته دیگر این که در این پژوهش فشار، همان فشار دینامیکی است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل عددی

برای بررسی عددی میدان جریان در محل تغییر شیب

در حل میدان جریان با توجه به این که در نزدیکی محل تغییر شیب ناگهانی سرریز، فشار دینامیکی و به اختصار، فشار، مقادیر بالایی دارد و شیب فشار نزدیک دیواره بسیار زیاد است از تابع دیواره نامتعادل^۱ که در آن اثر شیب فشار نیز در قانون دیواره لحاظ می شود استفاده شد [۳]. در قسمت ورودی آب و هوا به میدان جریان، به طور جداگانه شرط مرزی ورودی سرعت در نظر گرفته شد. سرعت جریان با توجه به دبی و ضریب زبری مانینگ 0.09 و عرض فلوم آزمایشگاهی 0.2 متر و بر اساس رابطه مانینگ به دست آمد و به صورت یکنواخت در عمق به برنامه داده شد.

مشخصات قسمت ورودی آب در ابتدای کانال در مدل عددی در چهار وضعیت مطابق با مطالعات زراتی و همکاران [۱۲]، در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول V_0 و y_0 به ترتیب سرعت و عمق نرمال جریان در بالادست محل تغییر ناگهانی شیب با توجه به مقدار دبی جریان و عرض سرریز [معادل 0.2 متر] است. مشخصات قسمت ورودی هوا نیز برابر مشخصات قسمت ورودی آب تعریف شد. لازم به توضیح است که هر ردیف ناظر بر یک آزمون است.

جدول (۱) مشخصات جریان ورودی آب

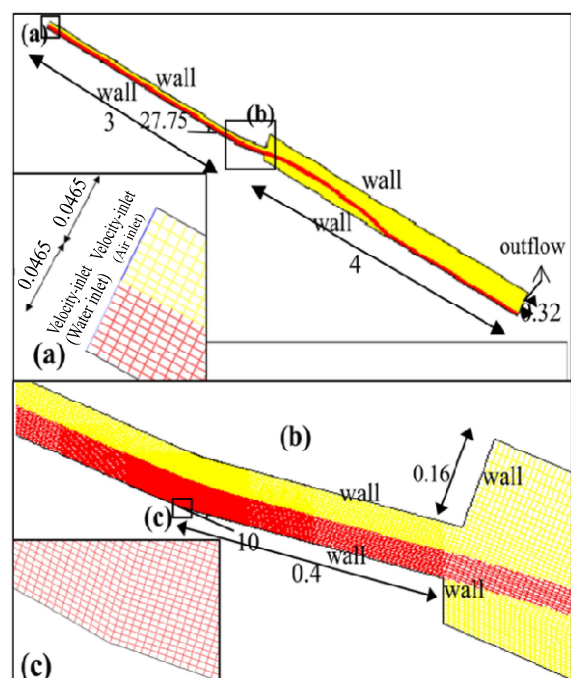
Q(lit/s)	V_0 (m/s)	y_0 (cm)
49.9	6.8	3.67
57.95	7.15	4.05
63.84	7.35	4.34
71	7.63	4.65

در شکل (۲)، برای نمونه مشخصات هندسه میدان و شرایط مرزی برای حالت جریان عبوری 71 لیتر بر ثانیه و رمپ با تغییر شیب 10° درجه نشان داده شده است. همانطور که در نمای (b) از شکل (۲) ملاحظه می شود با نزدیک شدن به محل تغییر شیب، با توجه به تغییرات شدید مشخصه ها در این محل، شبکه محاسباتی ریزتری در نظر گرفته شده است.

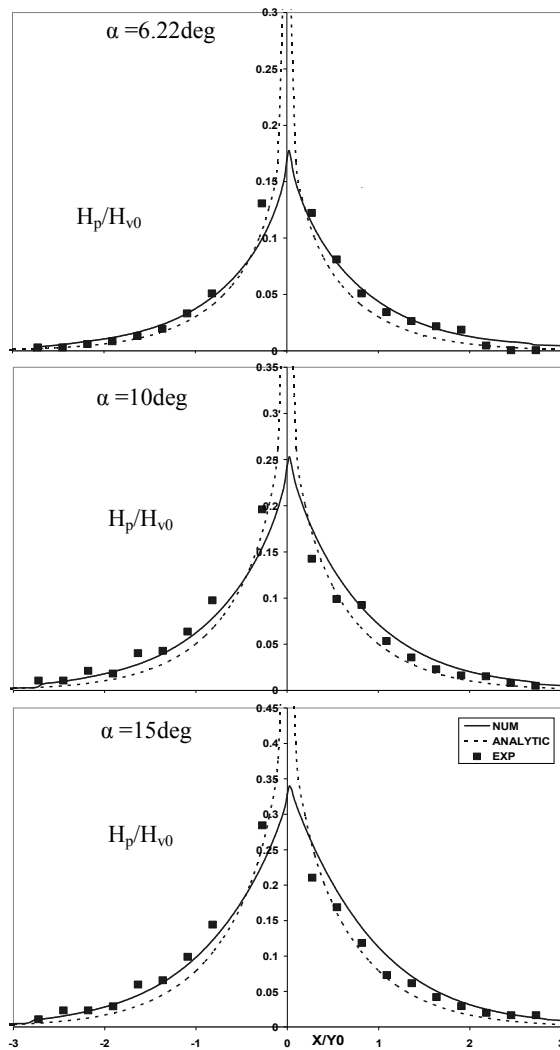
جانبی وارد تندآب می شد و از عمق بحرانی ابتدای تندآب پس از حدود هشت متر به عمق نرمال می رسید. برای اطمینان از رسیدن جریان به عمق نرمال و توسعه لایه مرزی، رمپی به طول 0.4 متر با زوایای $6/22^\circ$ ، 10° و 15° درجه در فاصله ای حدود 9 متر از شروع تندآب نصب شده است [۱۲].

در این پژوهش با توجه به این که در راستای عرض فلوم آزمایشگاهی، تغییرات مشخصه های میدان جریان ناچیز بود، از مدل عددی به صورت دوبعدی استفاده شد. همچنین فاصله از محل ورودی میدان جریان تا محل تغییر شیب ناگهانی سرریز طوری در نظر گرفته شد که جریان آب قبل از رسیدن به محل تغییر شیب ناگهانی به طور کامل توسعه یافته باشد.

در شکل ۲، نوع مرز و شبکه بندی میدان جریان در مدل عددی برای نمونه در حالت رمپ با تغییر شیب 10° درجه و دبی 71 لیتر بر ثانیه نشان داده شده است. شرط مرزی دیوار برای کف کانال و کف رمپ در نظر گرفته شد.



شکل (۲) نوع مرز و شبکه بندی میدان جریان در مدل عددی در حالت رمپ با تغییر شیب 10° درجه و دبی 71 لیتر بر ثانیه (ابعاد به متر است).



شکل (۳) مقایسه توزیع فشار در کف کانال (چپ) و رمپ (راست) با استفاده از سه روش تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی در دبی ۴۹/۹ لیتر بر ثانیه و در زوایای تغییر مختلف شیب

در هر دو شکل (۳) و (۴)، در سه مدل تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی، فشار در محل تغییر شیب، افزایش و با دور شدن از محل تغییر شیب کاهش یافته تا به مقدار صفر برسد؛ علت را می‌توان چنین توضیح داد که تغییر شیب ناشی از ایجاد رمپ با توجه به این‌که به سمت میدان جریان در کانال، منحرف شده، به‌عنوان یک مانع در برابر جریان تلقی می‌شود، بنابراین سبب تغییر مسیر خط جریان

در این پژوهش تمام نتایج مربوط به قبل از انتهای رمپ و به‌طور مشخص اطراف محل تغییر شیب است و مشخصه‌های جریان بعد از لبه رمپ بررسی نمی‌شود.

۲-۱-۳- کنترل مقدماتی نتایج مدل عددی

برای اطمینان از نتایج به دست آمده از حل عددی میدان جریان، پروفیل سرعت به‌دست آمده از مدل در یک کانال مستقیم مستطیلی و طولانی با پروفیل محاسباتی مقایسه شد. نتایج نشان داد که با شرایط در نظر گرفته شده، توزیع لگاریتمی سرعت و عمق آب به‌درستی مدل شده و نحوه اجرای مدل درست است. همچنین حساسیت نتایج به ابعاد شبکه استفاده شده، ارزیابی و در همه‌ی اجراها ابعاد شبکه تا اندازه‌ی مناسب ریز شد تا نتایج حل عددی مستقل از اندازه شبکه باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- توزیع فشار (دینامیکی) در بستر

پس از اجرای برنامه، نتایج فشار دینامیکی در بستر روی کانال و رمپ (به ترتیب ناحیه قبل و بعد از محل تغییر ناگهانی شیب) در دو دبی ۴۹/۹ و ۷۱ لیتر بر ثانیه و در زوایای تغییر شیب بستر ۶/۲۲، ۱۰ و ۱۵ درجه به‌دست آمد و سپس با نتایج مدل تحلیلی و آزمایشگاهی [۱۵ و ۱۲] مقایسه شد [شکل (۳) و (۴)].

برای بررسی بهتر نمودارها، همه‌ی نتایج بی‌بعد شده است؛ فاصله از محل تغییر شیب ناگهانی x ، با مقدار عمق نرمال جریان Y و مقدار هد معادل فشار دینامیک $H_p = p/(\rho g)$ نیز با توجه به ماهیت آن با استفاده از $H_{v0} = V_0^2/(2g)$ بی‌بعد شده است. در این شکل‌ها مقادیر مثبت روی محور افقی نشان‌دهنده بستر روی رمپ و مقادیر منفی نشان‌دهنده بستر کانال سرریز قبل از رمپ است.

می‌شود که میزان این تغییرات با زاویه تغییر شیب متناسب است. این تغییرات در محل تغییر شیب ناگهانی، زیاد و با دور شدن از آن در روی رمپ و کانال کم می‌شود تا در نهایت دوباره خطوط جریان موازی شوند و فشار دینامیکی صفر شود.

نسبت به نتایج تحلیلی تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. این مطلب در قسمت رمپ سرریز نیز به‌ویژه در زوایای کمتر درست است. بیشینه‌ی خطای نتایج عددی حدود ۵ تا ۱۰ درصد است. نکته دیگر این است که در حل تحلیلی در محل تغییر شیب ناگهانی، مقادیر فشار با نرخ شدید و غیرمعمول زیاد می‌شود؛ از نظر ریاضی، این نقطه یک نقطه تکین است و عمل نگاشت همدیس در آن نامعتبر است [۱۲ و ۱۵] و از نظر هیدرودینامیک نیز با توجه به تغییر شیب ناگهانی، جریان در این نقطه ممکن است از فرض ایده‌آل بودن مقداری فاصله گرفته باشد؛ پس نتایج تحلیلی در این نقطه دارای خطا است.

فاصله محلی که در روی رمپ و کانال فشار دینامیکی صفر دارد تا محل تغییر شیب را می‌توان طول تأثیر تغییر شیب در رمپ و کانال و به شکل کوتاه شده، طول تأثیر نامید. بر اساس نتایج فشار در بستر در شکل‌های (۳) و (۴)، طول تأثیر رمپ در رمپ و کانال، در زوایای تغییر شیب مختلف طبق جدول (۲) به‌دست آمده است.

جدول (۲) مقادیر طول تأثیر رمپ در رمپ و کانال در زوایای تغییر

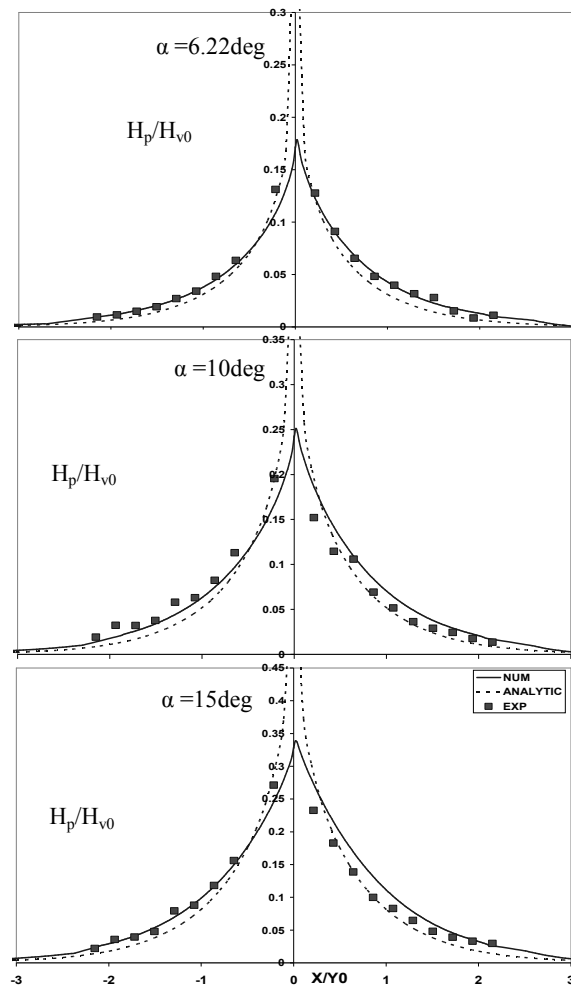
شیب مختلف

	در رمپ	در کانال
$\alpha(\text{deg})$	l/y_0	l/y_0
۶/۲۲	۳/۳۶	۳/۴
۱۰	۳/۴۸	۳/۶۱
۱۵	۳/۶۵	۳/۸۸

بر اساس این نتایج می‌توان طول تأثیر رمپ در رمپ و کانال را به صورت زیر تخمین زد:

$$\frac{l}{y_0} = 3.15 + 0.033\alpha \quad \text{در رمپ:}$$

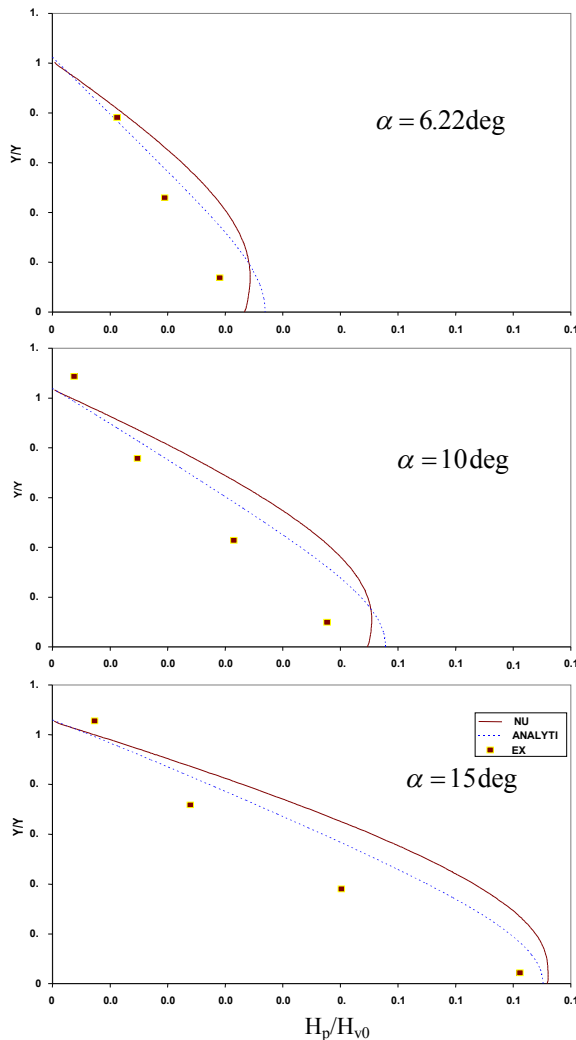
$$\frac{l}{y_0} = 3.06 + 0.0546\alpha \quad \text{در کانال:}$$



شکل (۴) مقایسه توزیع فشار در کف کانال (چپ) و رمپ (راست) با استفاده از سه روش تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی در دبی ۷۱ لیتر بر ثانیه و در زوایای تغییر مختلف شیب

با مقایسه نتایج حل عددی و تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی می‌توان گفت در تمام زوایای تغییر شیب، در قسمت کانال سرریز و محل تغییر شیب، نتایج عددی

به محل تغییر شیب و آشفتگی جریان در این نقطه و موجی بودن سطح آب و ورود مقداری هوا به جریان آب، نتایج آزمایشگاهی نیز مقداری خطا دارد.



شکل (۵) مقایسه توزیع فشار (دینامیکی) در عمق مقطعی در روی رمپ برای روش تحلیلی و عددی با نتایج آزمایشگاهی در دبی ۵۷/۹۵ لیتر بر ثانیه و با زوایای تغییر شیب مختلف

۳-۳-۳ پروفیل سرعت

نتایج پروفیل سرعت حاصل از حل عددی با دبی جریان عبوری ۵۷/۹۵ و ۶۳/۸۴ لیتر بر ثانیه و در سه زاویه تغییر شیب

l ، طول تأثیر در رمپ یا کانال است. این روابط نشان می‌دهند که طول تأثیر رمپ در کانال و رمپ به زاویه تغییر شیب و عمق نرمال بالادست وابسته است.

نکته دیگر این است که مقادیر فشار دینامیکی در محل تغییر شیب در زوایای تغییر شیب مورد بحث، بر اساس مقدار تغییر شیب، حدود ۱۳ تا ۲۴ برابر فشار استاتیکی در آن نقطه است.

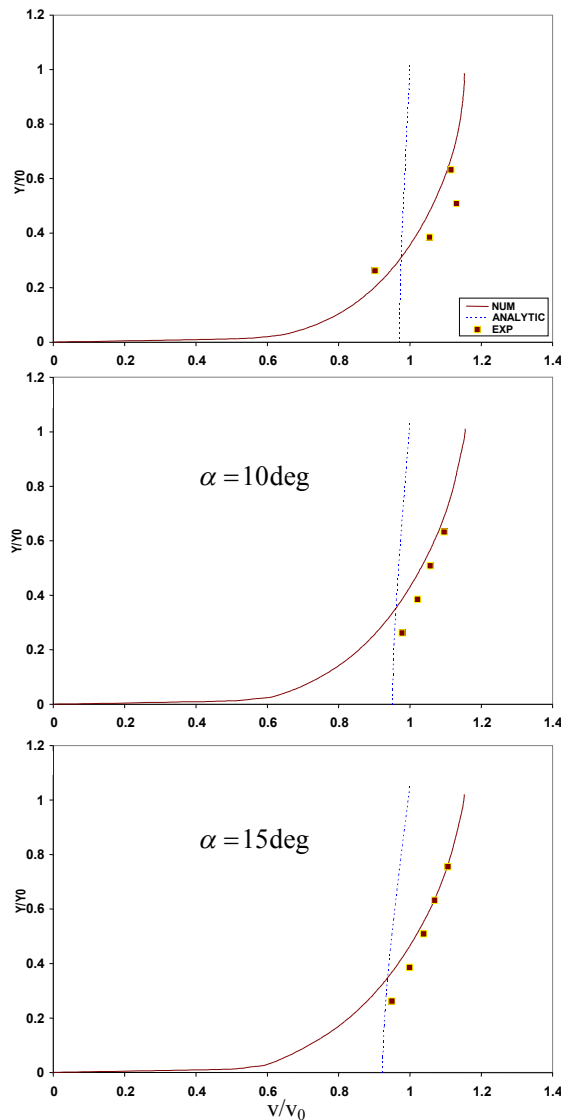
۲-۳ توزیع فشار در عمق

نتایج توزیع فشار در عمق از حل عددی در حالتی که دبی جریان عبوری معادل ۵۷/۹۵ و ۶۳/۸۴ لیتر بر ثانیه است و در سه زاویه تغییر شیب ۶/۲۲، ۱۰ و ۱۵ درجه در شکل‌های (۵ و ۶) با نتایج حل تحلیلی و مدل آزمایشگاهی [۱۲ و ۱۳] مقایسه شده است. این نتایج مربوط به مقطعی روی رمپ است که در دبی‌های ۵۷/۹۵ و ۶۳/۸۴ لیتر بر ثانیه، x/y_0 آن به ترتیب ۰/۶۱۷ و ۰/۶ است که با توجه به داده‌های آزمایشگاهی در این مقطع، انتخاب شده است.

در این نمودارها که برای بررسی بهتر نتایج، فاصله از کف با Y_0 و هد فشار دینامیک با H_{v0} بی‌بعد شده است. در کل تطابق خوبی بین نتایج هر سه حالت وجود دارد. در این نمودارها، در کف، فشار، معادل فشار در بستر در این نقطه است و با نزدیک شدن به سطح آب مقدار آن کاهش یافته و در نهایت در سطح آب به صفر می‌رسد. مقادیر فشار دینامیکی در کف در مقطع مورد نظر در زوایای تغییر شیب مورد بحث، بسته به مقدار تغییر شیب، حدود ۵ تا ۱۱ برابر فشار استاتیکی کف در مقطع مورد نظر است.

در این نمودارها نتایج به دست آمده از حل عددی [برای فشار در عمق] بیشتر از نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی است که این اختلاف در نتیجه با افزایش زاویه تغییر شیب رمپ بیشتر می‌شود و در حالاتی به حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد می‌رسد. با توجه به نزدیک بودن این مقطع

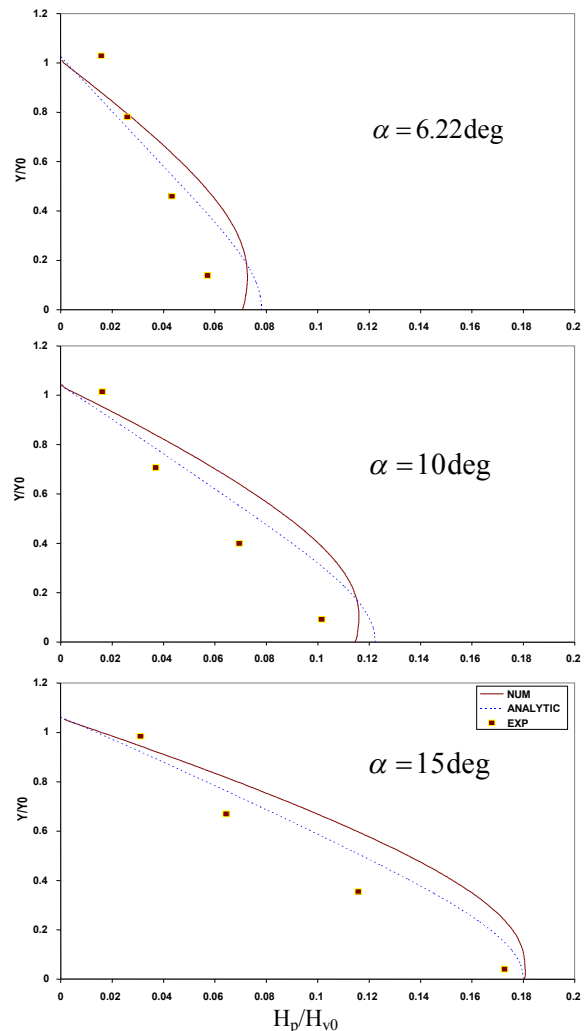
به دلیل فرض ایده آل بودن سیال و لغزشی گرفتن مرز دیواره، ارائه چنین پروفیل سرعت به دست آمده از حل تحلیلی به این شکل انتظار می رود و مقادیر سرعت در عمق، نزدیک به یکنواخت است.



شکل (۷) مقایسه پروفیل سرعت مقطعی روی رمپ در روش تحلیلی و عددی با نتایج آزمایشگاهی در دبی ۵۷/۹۵ لیتر بر ثانیه و در زوایای تغییر شیب مختلف

همان طوری که ملاحظه می شود در حل تحلیلی در مقطع مورد نظر در نزدیکی بستر، سرعت کمتر از V_0 و در

۶/۲۲، ۱۰ و ۱۵ درجه با نتایج حل تحلیلی و مدل آزمایشگاهی [۱۲ و ۱۳] در شکل های (۷) و (۸) مقایسه شده است.

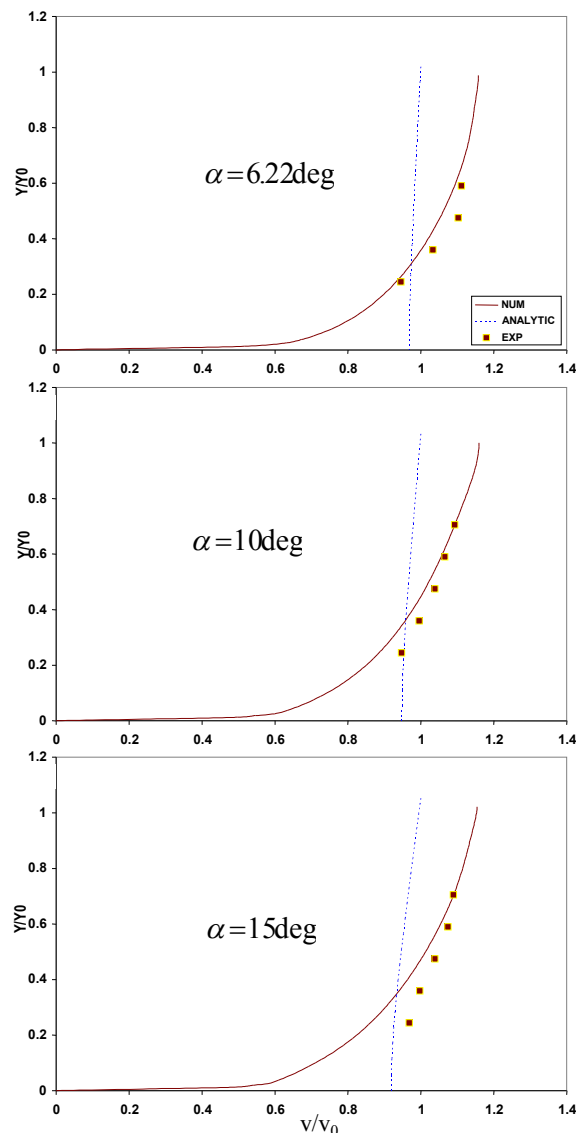


شکل (۶) مقایسه توزیع فشار (دینامیکی) در عمق در مقطعی روی رمپ روش تحلیلی و عددی با نتایج آزمایشگاهی در دبی ۶۳/۸۴ لیتر بر ثانیه و در زوایای تغییر شیب مختلف

این نتایج مربوط به مقطعی روی رمپ است که در دبی های ۵۷/۹۵ و ۶۳/۸۴ لیتر بر ثانیه، آن به ترتیب ۰/۶۱۷ و ۰/۶ است. برای بررسی بهتر، نتایج توسط V_0 و Y_0 بی بعد شده است.

در پروفیل سرعت حاصل از حل تحلیلی باید گفت که

انجام شده است.



شکل (۸) مقایسه پروفیل سرعت در مقطعی روی رمپ در روش تحلیلی و عددی با نتایج آزمایشگاهی دبی ۶۳/۸۴ لیتر بر ثانیه و در زوایای تغییر شیب مختلف

در پروفیل سطح آب، به دست آمده از حل تحلیلی، عمق آب در محل تغییر شیب بیشترین مقدار خود را دارد و با دور شدن از این محل عمق کاهش یافته تا به عمق نرمال جاری در کانال و رمپ برسد. این مقدار بیشینه، اندازه‌ای بین ۱/۰۵ تا ۱/۱۲ برابر عمق بالادست دارد که به میزان

سطح آب سرعت کمی بیشتر و برابر V_0 می‌شود. همچنین لازم به توضیح است که در این حل در مقاطع دورتر در سراسر عمق، سرعت ثابت و برابر V_0 است. با توجه به رابطه برنولی (که در حل تحلیلی استفاده شده) و در نظر گرفتن این مطلب که در حل تحلیلی در سطح آب، فشار دینامیکی، صفر و سرعت V_0 در نظر گرفته شده است؛ در مقاطع نزدیک به محل تغییر شیب، در کف، که فشار دینامیکی زیاد است؛ سرعت کمتر از V_0 به دست می‌آید.

لازم به توضیح است این وضعیت با افزایش زاویه تغییر شیب شدیدتر می‌شود یعنی سرعت در کف با افزایش زاویه تغییر شیب کمتر می‌شود.

در حالت حل عددی بر خلاف حل تحلیلی، تطابق خوبی بین نتایج حالت عددی با مدل آزمایشگاهی وجود دارد و بیشترین اختلاف حدود ۵ درصد است که مواردی همچون ورود هوا به جریان و احتمال خطا در مدل $k-\epsilon$ در محاسبه مقادیر تنش آشفتگی بین لایه‌های جریان و در کف، می‌تواند عامل این اختلاف باشد.

۳-۴- پروفیل سطح آب

نتایج پروفیل سطح آب به دست آمده از حل عددی در حالت دبی جریان عبوری ۵۷/۹۵ لیتر بر ثانیه و در سه زاویه تغییر شیب ۶/۲۲، ۱۰ و ۱۵ درجه با نتایج حل تحلیلی [۱۲ و ۱۳] در شکل (۹) مقایسه شده است. در این نمودار مبدأ مختصات در محل تغییر شیب، محور X در راستای بستر رمپ و محور Y عمود بر بستر رمپ است که برای بررسی بهتر، نمودارها با Y_0 بی‌بعد شده است. در مدل آزمایشگاهی، یافتن پروفیل سطح آب به دلیل بالا بودن آشفتگی جریان و وجود قطرات ریز آب و نیز حباب‌های هوا در سطح آب، ممکن نبوده است؛ بنابراین فقط مقایسه بین نتایج مدل عددی و تحلیلی

۴- نتیجه گیری

با توجه به مقایسه‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که در تمام زوایای تغییر شیب، در قسمت کانال سرریز و نیز محل تغییر شیب، نتایج فشار در بستر در مدل عددی نسبت به نتایج تحلیلی تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین این قاعده روی رمپ سرریز به‌ویژه در زوایای کم درست است. بیشینه‌ی خطای نتایج فشار در بستر در مدل عددی ۵ تا ۱۰ درصد است.

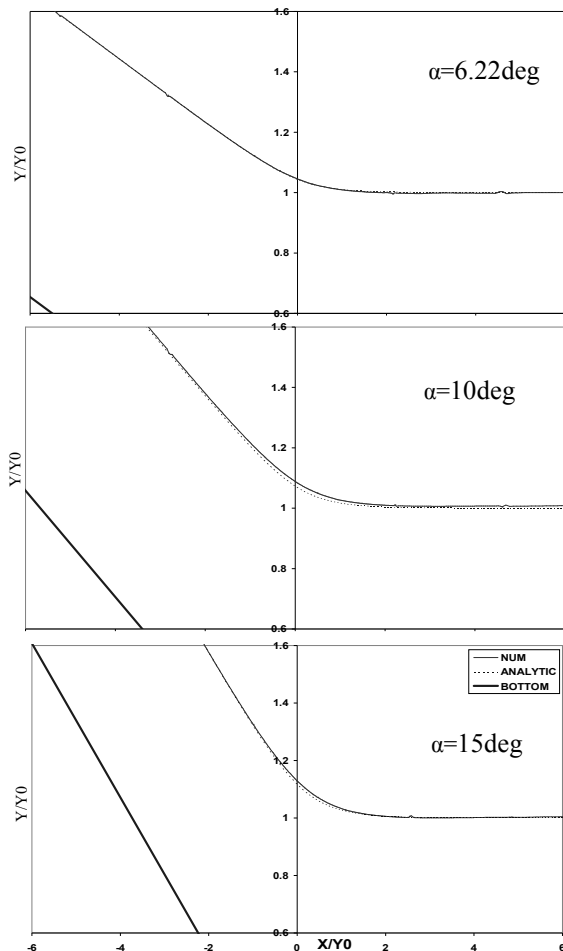
نکته دیگر این است که در نقطه تغییر شیب که در مدل تحلیلی تکین محسوب می‌شود؛ مقادیر فشار در بستر حاصل از حل تحلیلی، بیشتر از نتایج آزمایشگاهی است که نشان می‌دهد فرضیات حل تحلیلی در محل تغییر شیب معتبر نیست. همچنین روی رمپ و کانال، فاصله نزدیک‌ترین نقطه روی بستر با فشار دینامیک صفر تا محل تغییر شیب یا همان طول تأثیر، به زاویه تغییر شیب و عمق نرمال بالادست وابسته است که معادله‌ای برای آن پیشنهاد شد. نتایج فشار دینامیکی در عمق نیز در دو حالت عددی و تحلیلی تطابق خوبی با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد و بیشترین اختلاف، ۵ تا ۱۰ درصد است. حل تحلیلی با توجه به ایده‌آل فرض کردن جریان، توانایی محاسبه تنش‌های برشی بین لایه‌ها و کف را ندارد و بنابراین پروفیل سرعت را به‌طور صحیح ارائه نمی‌دهد؛ عکس حل عددی که با در نظر گرفتن همه‌ی عوامل مؤثر بر جریان مانند لزجت، گرانش و تنش آشفتگی، پروفیل سرعت نزدیک به واقعیت با خطای حدود ۵ درصد را ارائه می‌دهد.

نتایج پروفیل سطح آب به دست آمده از حل عددی و تحلیلی تقریباً بر هم منطبق است که این انطباق به معنی تأثیر بسیار کم لزجت، گرانش و معادلات $k-\epsilon$ بر پروفیل سطح آب است.

دو پارامتر مهم پروفیل سرعت و توزیع فشار در شرایط

تغییر شیب وابسته است. علت این افزایش ۵ تا ۱۲ درصدی عمق، وجود رمپ در امتداد مسیر جریان در کانال تندآب است که باعث افزایش عمق روی رمپ می‌شود.

در این نمودار، نتایج حالت عددی با نتایج حالت تحلیلی تقریباً بر هم منطبق است و در بعضی نواحی نمی‌توان آن‌ها را از هم تمیز داد. همچنین این انطباق به معنی تأثیر بسیار کم لزجت، گرانش و معادلات $k-\epsilon$ بر پروفیل سطح آب است که در مدل تحلیلی در نظر گرفته نمی‌شود ولی در مدل عددی لحاظ می‌شود.



شکل (۹) مقایسه نتایج پروفیل سطح آب به دست آمده از دو روش تحلیلی و عددی در دبی ۵۷/۹۵ لیتر بر ثانیه و زوایای تغییر شیب مختلف

- [6] Olsen, N.R.B., Kjellesvig, H.M., Three dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity, USA, J. Hydr. Res., Vol 36(5), 1998, pp 775-784
- [7] Rodi, W., Turbulence models and their application in hydraulics, IAHR, 1993
- [8] Unami, K., Kawachi, T., Munir Babar, M., Itagaki, H., Two dimensional numerical model of spillway flow, USA, J. Hydr. Eng., ASCE, 1999, 125(4) pp 369-375
- [9] Vallentine, H.R., Applied hydrodynamics, Second Edition, London, better worths & co publishers, 1967
- [10] Woods, L.C. (1959), compressible subsonic flow in two dimensional channels with mixed boundary condition, Quart. J. Mechanic And Applied Mathematics, Vol. VII, Part 3, p.263-282
- [11] Youngs, D. L., Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion. In K. W. Morton and M. J. Baines, editors, Numerical Methods for Fluid Dynamics. Academic Press, 1982.
- [12] Zarrati, A.R., Yee Chung Jin, Shaneh sazzadeh, A., Ahadi, F., Potential flow solution for a free surface flow past a sudden slope change, Canadian, J. of. Civil. Engineering, 2004, Vol 31

[۱۳] احدی خواجه بلاغ فضائل، "تحلیل جریان در محل تغییر شیب تنداب‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیر کبیر، تهران، ۱۳۷۷.

[۱۴] حیدری، م؛ "شبیه‌سازی جریان روی سرریز اوجی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۱.

[۱۵] شانه‌ساززاده، ا، "فشار دینامیکی جریان در محل تغییر شیب ناگهانی سرریز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۷۲.

پیچیده جریان سطح آزاد با توزیع فشار غیرهیدرواستاتیک به درستی با مدل عددی محاسبه شده است؛ هر چند تراز سطح آب و توزیع فشار در مناطق کمی دورتر از نقطه تغییر شیب به‌خوبی با مدل تحلیلی نیز پیش‌بینی شده است.

۵- علائم

α : زاویه تغییر شیب ناگهانی

θ : زاویه امتداد سرریز با افق

V_0 : سرعت متوسط جریان در بالادست محل تغییر شیب

ناگهانی

Y_0 : عمق نرمال جریان در بالادست محل تغییر شیب

ناگهانی

H_p : هد آبی معادل فشار دینامیک $p / (\rho g)$

H_{v0} : هد ناشی از V_0 (معادل $\frac{V_0^2}{2g}$)

x : فاصله از محل تغییر شیب ناگهانی

l : طول تأثیر رمپ در رمپ یا کانال

۶- مراجع

- [1] Bruce, Savage, M., Michael, Johnson, C., Flow over ogee spillway: physical and numerical model case study, USA, J. Hydr. Eng., ASCE, 2001, 127(8) pp 640-649
- [2] Cassidy, J.J., Irrotational flow over spillways of finite height, USA, J. Eng. Mech., Division ASCE, 1965, 91(6), pp 155-173
- [3] FLUENT 6.0 User's Guide, Copy Right © 2001, Fluent Inc., December 2001
- [4] Henderson, F.M., Flow at the toe of a spillway, II. The solid toe spillway, La houille blanche, Jan- Feb 1963, pp. 42-50
- [5] Henderson, F.M., Flow at the toe of a spillway, I. The open toe spillway, La houille blanche, Nov 1962, pp. 728-750

«Research Note»

Flow Condition at Sudden Slope Change of Chutes

A. Attarzadeh¹, A.R. Zarrati², A. Shanehsazzadeh^{3*}

1- M.Sc. of Civil Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Prof. of Civil Engineering, Amir Kabir University of Tech, Tehran, Iran

3- Assist. Prof. of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir

Abstract:

One of the important parts of many large dams is flood release chute spillway. Aerators are installed on chute spillways to prevent cavitation phenomenon under very high speed water flow. An aerator consists of a ramp providing a sudden slope change that separates water from the bed and permits air to mix with water. For the study of flow condition in aeration zone and for having an insight knowledge about the aeration, the study of flow condition on the ramp is a prerequisite. The change in the slope of the bed is common in spillways due to the change in the topographical slope and at the connection of the spillway and the stilling basin.

In the present study, the flow condition at the place of sudden slope change was numerically simulated by FLUENT software. FLUENT is powerful software in simulation of water flow, in which the effects of turbulent are well considered. In this software, the Navier-Stokes equations are numerically solved. Volume of fluid method is applied to simulate the free surface water accurately. The results of the model in terms of pressure distribution at bed, pressure distribution in depth, velocity profile and water surface profile were compared with the results of an analytical model of streamline method as well as with the available experimental data. The analytical model is a streamline method based on conformal mapping with the basic assumption of ideal flow. The results of the model were compared in various slopes and water velocities. The study showed that numerical model can predict water surface profile and dynamic pressure properly and the results of numerical model are more accurate as compared to analytical model for the two important parameters of pressure distribution at the bed and the velocity profile. The pressure distribution was reasonably predicted by the numerical model at the bed of channel before the ramp for all the studied degrees and at the bed on the ramp for smaller degrees. The maximum error was nearly 5-10 percent. The velocity profile calculated by the numerical model was very close to the experimental data and the maximum error was nearly 5 percent. The analytical method was found quite capable in prediction of dynamic pressure and water surface profile, and less accurate in predicting the velocity profile. The study also showed that before and after the slope change, the influence length, where the dynamic pressures are significant, is dependent on the degree of sudden slope change and also on the amount of normal depth. Furthermore, the water surface profiles calculated by the numerical model and the analytical model were quite coincident, showing that the effects of gravity, viscosity and turbulence parameters on the water surface profile are insignificant.

Keywords: Aeration ramp, chute, Sudden slope change, Hydrodynamic pressure, FLUENT, Numerical solution, Streamline method, Aerator.