

بهینه‌سازی سازه‌ی خروجی لوله در کانال‌های غیر فرسایشی

مهدی مسیبی برزی^۱، محمدرضا چمنی^۲، میلاد لطیفی علویجه^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-آب

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-آب، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

milad.latifi@yahoo.com

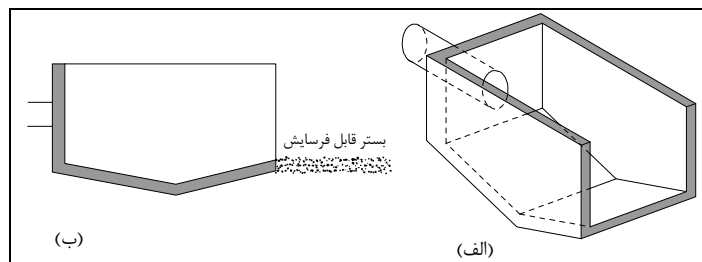
خلاصه

یکی از روش‌های بررسی جریان سیال و مشاهده پدیده‌ها در سازه‌های هیدرولیکی، استفاده از روش‌های عددی و دینامیک سیالات محاسباتی است. با استفاده از روش‌های عددی امکان شبیه‌سازی جریان در سازه‌های هیدرولیکی امکان به‌سازی آنها فراهم می‌شود. سازه‌های خروجی لوله به دلیل گستردگی استفاده از آنها نیاز به به‌سازی دارند. خارج شدن جریان آب از یک لوله مخصوصا با جریان فوق بحرانی می‌تواند مخرب باشد و در کانال‌ها فرسایش ایجاد کند. به همین دلیل، جریان خروجی از یک لوله وارد سازه‌ای به نام سازه خروجی لوله می‌گردد تا مقطع آن از دایره به مستطیل تغییر کرده و انرژی آن مستهلک گردد. در مطالعات موجود سازه‌های خروجی لوله، جریان فوق بحرانی و کانال قابل فرسایش است. سازه خروجی لوله به منظور استفاده در شبکه جمع‌آوری روان آب سطحی باید تا حد امکان مؤثر و دارای اندازه‌ی کوچک باشد. در این تحقیق، سازه‌ی خروجی لوله با سطح آزاد و از نظر ابعاد و میزان استهلاک انرژی و همچنین یکنواختی پروفیل خروجی از آن به‌سازی شده است. با تعیین پارامترهای مؤثر هندسی و شبیه‌سازی سازه‌ی خروجی لوله با دبی‌های متفاوت، بیش از ۳۵۰۰ مدل رایانه‌ای شبیه‌سازی شد. از میان شبیه‌سازی‌های صورت گرفته تعدادی که دارای پروفیل سرعت یکنواخت در عرض بودند و در لوله پس‌زدگی ایجاد نمی‌کردند، انتخاب شدند. به منظور مقایسه مدل‌های انتخاب شده برای انتخاب بهترین سازه خروجی لوله، از راندمان استهلاک انرژی استفاده شده است.

کلمات کلیدی: سازه‌ی خروجی لوله، دینامیک سیالات محاسباتی، بهینه‌سازی.

۱. مقدمه

خروجی لوله^۱ سازه‌ای است که جریان داخل لوله را وارد کانالی با سطح مقطع مستطیلی و یا دوزنقه‌ای می‌کند. شکل (۱)، یک طرح ساده‌ی خروجی لوله بدون بلوک و دیواره برای عدد فرودهای پایین است. جریان لوله‌ی ورودی می‌تواند تحت فشار یا با سطح آزاد بوده و همچنین کانال این سازه می‌تواند غیرمنشوری و یا قابل فرسایش باشد. این سازه دارای دو نقش مهم است. اولین نقش آن تبدیل سطح مقطع جریان از دایره‌ای به شکل کانال پایین‌دست است، به‌صورتی که جریان در انتهای سازه در عرض آن به‌صورت یکنواخت پخش شده باشد. دومین نقش این سازه مستهلک کردن انرژی جریان ورودی به کانال است. در صورتی که سازه‌ی خروجی لوله برای لوله‌ها و کانال‌های زیرزمینی استفاده شود، این سازه باید به عنوان یک چاهک آدم‌رو^۲ ساخته و طراحی شود.



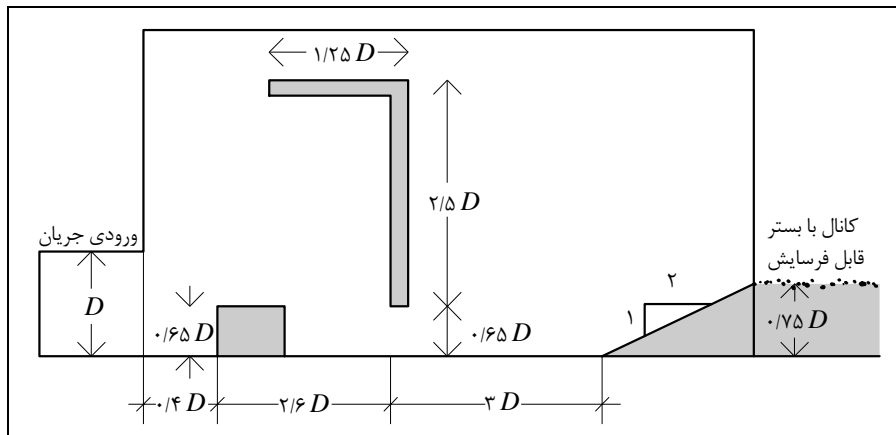
شکل ۱- نمونه‌ای از خروجی لوله، پیشنهادی (USBUR؛ الف) نمای سه بعدی، (ب) نمای جانبی

¹ Pipe outlet

² Manhole

۲. تاریخچه

دفتر عمران ایالات متحده (USBR) (۱۹۷۸) در گزارشی به نام مونوگراف^۱ ۲۵ مطالعاتی در زمینه‌ی حوضچه‌های آرامش انجام داد [۱]. در قسمتی از این گزارش به طراحی حوضچه‌ی آرامشی پرداخته شده است که جریان ورودی آن از یک لوله تأمین شده و انتهای آنها بستر قابل فرسایش قرار دارد. جریان در لوله‌ی ورودی حوضچه‌ی آرامش زیربحرانی و یا فوق‌بحرانی است و بر اساس عدد فرود طبقه‌بندی شده است. گوئل و ورما^۲ (۲۰۰۱) با بهینه‌سازی مدل USBR، مدل‌هایی ارائه دادند که استهلاک انرژی بیشتر و طول کمتری داشت و برای عدد فرود ۱/۷ تا ۵/۵ است [۲]. آنها برای بهینه‌سازی از یک شاخص بی‌بعد برای آب‌شستگی پایین‌دست حوضچه استفاده کردند. آنها مدلی به نام M-24 با دو ردیف بلوک گوه‌ای شکل و یک دیواره ارایه دادند که ۶ برابر قطر لوله ورودی طول دارد. که نسبت به حوضچه‌ی آرامش شماره ۵ پیشنهادی USBR کارایی بیشتری داشت. شکل (۲) سازه‌ی خروجی لوله طرح M-12 را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- سازه‌ی خروجی لوله طرح M-12 ارایه شده توسط گوئل و ورما

مدل بهینه‌ی به‌دست آمده در این تحقیق بسیار مشابه مدل M-12 آنها است. گوئل و ورما (۲۰۰۶) سازه‌های خروجی لوله برای فرودهای ۱/۷ تا ۷ معرفی کردند [۳]. گوئل و ورما ۱۶ مدل ارایه کردند که دارای طول‌هایی برابر ۶، ۸ و ۱۲ برابر قطر لوله ورودی بودند. آنها نشان دادند که مدل‌هایی با طول‌های ۱۲ و ۶ برابر قطر لوله ورودی، بهترین مدل‌ها هستند و کمترین شاخص آب‌شستگی را دارند. آنها سازه‌های خروجی لوله مناسب برای کانال‌های غیر فرسایشی را مشخص نکردند.

۳. مدل‌سازی و شبیه‌سازی سازه‌ی خروجی لوله

برای مدل‌سازی سازه‌های خروجی لوله از نرم‌افزار Gambit استفاده شد. در محل ورودی آب به سازه از شرط مرزی جریان جرم ورودی^۳ استفاده شد و سقف سازه به عنوان مرز خروجی با شرط فشار^۴ و با فشار یک بار یا فشار هوای آزاد در نظر گرفته شد. شرط مرزی در سقف در واقع اتصال سازه را با هوای آزاد ایجاد می‌کند. انتهای سازه با مرز خروجی با شرط فشار و با فشار هوای آزاد با فاصله‌ی مناسب از پله‌ی انتهایی معرفی شد. به منظور کاهش حجم محاسبات و به دلیل تقارن سازه نیمی از آن مدل‌سازی شد و صفحه تقارن به عنوان شرط مرزی تقارن^۵ معرفی شد. سایر دیواره‌ها با شرط مرزی دیواره معرفی شدند. برای شبیه‌سازی جریان در سازه از نرم‌افزار Fluent استفاده شد. در این شبیه‌سازی از روش عددی حجم محدود^۶ استفاده می‌شود. به منظور شبیه‌سازی از شبکه بر پایه سلول^۷ و مدل ناماندگار یا وابسته به زمان استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی سطح سیال از مدل دوفازی^۱ VOF استفاده

¹ Monograph

² Goel and Verma

³ Mass flow inlet boundary condition

⁴ Pressure outlet boundary condition

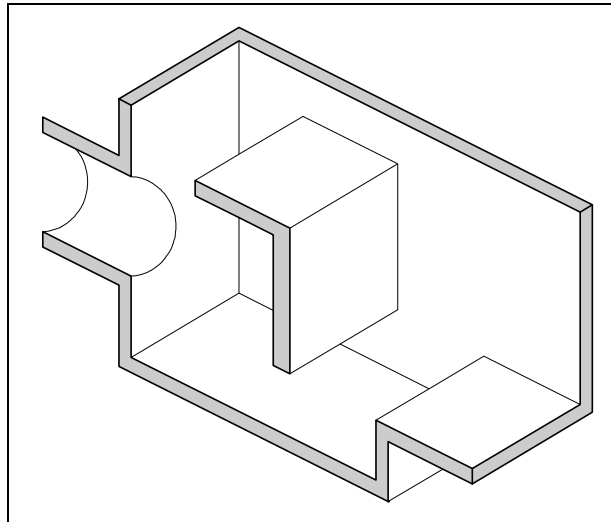
⁵ Symmetric boundary condition

⁶ Finite Volume

⁷ Cell based

شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی جریان مغشوش از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شد. به منظور اتصال معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای تعیین مقادیر فشار و سرعت در هر نقطه از روش Simple استفاده شد. شرط مرزی روی دیواره‌ها شرط عدم لغزش فرض شد. استفاده از شرایط ذکر شده توسط محققین زیادی برای سازه‌های مشابه استفاده شده است مانند چاتیلا و تابارا (۲۰۰۴) در سرریزهای اوجی و پلکانی [۴، ۵] و همچنین چن و همکاران (۲۰۰۲) برای شبیه‌سازی جریان مخلوط آب و هوا در کانال‌های باز از این شیوه بهره بردند [۶].

در سازه‌ی خروجی لوله برای تبدیل مقطع لوله بالادست از دایره‌ای به کانال با مقطع مستطیلی نیاز به تبدیل است. تبدیل انتخاب شده باید دارای شرایطی باشد که به استهلاك انرژی در جریان کمک کند. تبدیل مورد استفاده نباید در لوله‌ی بالادست ایجاد انسداد کند و باعث از بین رفتن سطح آزاد و تحت فشار قرار گرفتن جریان شود. سازه‌ی خروجی لوله استفاده شده به عنوان مدل اولیه جهت به‌سازی ابعاد و استهلاك انرژی در شکل (۳) به نمایش در آمده است. در شبیه‌سازی سازه‌ی خروجی فرض شده است که جریان در لوله‌ی ورودی جریان دارای سطح آزاد باشد. همچنین فرض شده است که حداکثر دبی طراحی زمانی رخ می‌دهد که عمق جریان در لوله‌ی ورودی برابر 0.8 قطر لوله و جریان در انتهای لوله بحرانی باشد.

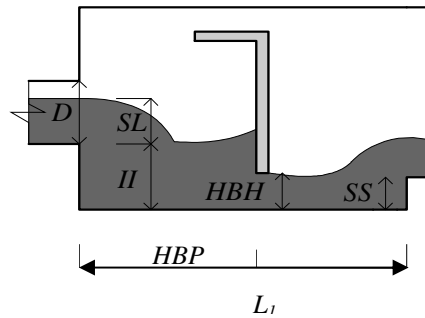


شکل ۳- نمایی از نیمه‌ی سازه‌ی خروجی لوله به عنوان مدل اولیه در سازه‌ی آدم‌رو

پارامترهای هندسی سازه‌ی خروجی لوله شامل قطر لوله ورودی (D)، عرض سازه (W)، طول سازه (L_I)، ارتفاع لوله‌ی ورودی از کف کانال (II)، ارتفاع پله‌ی انتهایی (SS)، فاصله‌ی دیواره‌ی آویزان از لوله‌ی ورودی (HBP) و ارتفاع آن (HBH) است. یکی از مهم‌ترین پارامترها عدد فرود (Fr) جریان است که مستقل از هندسه‌ی سازه است. یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی ارتفاع آب در لوله (SL) است. شکل (۴) پارامترهای توضیح داده شده را نشان می‌دهد. برای بررسی اثر هر یک از پارامترهای در نظر گرفته شده، تمامی جایگشت‌های حالت‌های مختلف نیز شبیه‌سازی شد. پس از بررسی‌های مقدماتی، بازه‌ی اثر هر کدام از پارامترها تعیین شد. در مجموع بیش از ۳۶۰۰ مدل از سازه‌ی خروجی لوله شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی قسمت خروجی لوله مدت ۶۰ ثانیه جریان درون آن شبیه‌سازی و از ماندگار شدن آن اطمینان حاصل شد.

شبیه‌سازی‌ها توسط یک ابر رایانه با ۸ پردازنده دو هسته‌ای و ۸ گیگابایت رم انجام شد. شبیه‌سازی‌ها در زمانی بالغ بر ۱۲۵۰ ساعت انجام شد. به منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی‌ها ابتدا یک مدل آزمایشگاهی از یک سرریز شبیه‌سازی شد. این سرریز توسط چانسون (۱۹۹۴) در آزمایشگاه مورد مشاهده و بررسی قرار گرفته بود [۷]. پروفیل سرعت و همچنین غلظت هوا مربوط به پله‌های ۶، ۷ و ۸ این سرریز با شبیه‌سازی مقایسه شد. نتایج تطابق خوبی را نشان داد. به منظور اطمینان از عدم تأثیر ابعاد مش‌ها به اندازه کافی برای شبیه‌سازی سازه کوچک شدند و مقایسه صورت گرفت.

¹ Volume of Fluid



شکل ۴- نمونه‌ی اولیه سازه خروجی لوله

به منظور آنالیز بهتر و همچنین کاهش تعداد پارامترهای مؤثر در جریان از پارامترهای بی‌بعد استفاده شد. بازه‌ی تغییرات هر یک از پارامترهای مؤثر در سازه خروجی لوله در جدول (۱) به نمایش درآمده است. پس از شبیه‌سازی سازه‌های خروجی لوله دو قید مورد نظر شامل عدم ایجاد انسداد در لوله بالادست و همچنین یکنواختی پروفیل جریان در عرض سازه بررسی شد. به منظور بررسی عدم انسداد انرژی در دو مقطع کمی به انتهای لوله و کمی پس از ابتدای سازه خروجی لوله اندازه‌گیری و مقایسه شد. در صورتی که انرژی در مقطع اول بیشتر از مقطع دوم باشد انسداد رخ نداده است. برای مقایسه مقدار انرژی از تئوری استراب و اندرسون (۱۸۹۰) استفاده شد [۸]. همچنین برای بررسی قید یکنواختی پروفیل جریان در عرض از نمایش منحنی میزان سرعت جریان در انتهای سازه استفاده شد. در میان نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی سازه‌های خروجی لوله، مدل از سازه دو قید مورد نظر را ارضا کردند.

جدول ۱- بازه‌ی تغییرات مقادیر پارامترهای بی‌بعد در سازه‌ی خروجی لوله.

تعداد حالت‌ها	بازه‌ی تغییرات	نام پارامتر
۴	۴، ۳/۵، ۳، ۲/۵	L_1/D
۳	۴، ۳، ۲	W/D
۴	۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵	II/D
۴	۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵	SS/D
۴	۰/۸، ۰/۷، ۰/۶، ۰/۵	HBH/D
۴	۳، ۲/۵، ۲، ۱/۵	HBP/D
۳	۰/۹، ۰/۸، ۰/۷	SL/D

۴. نتایج

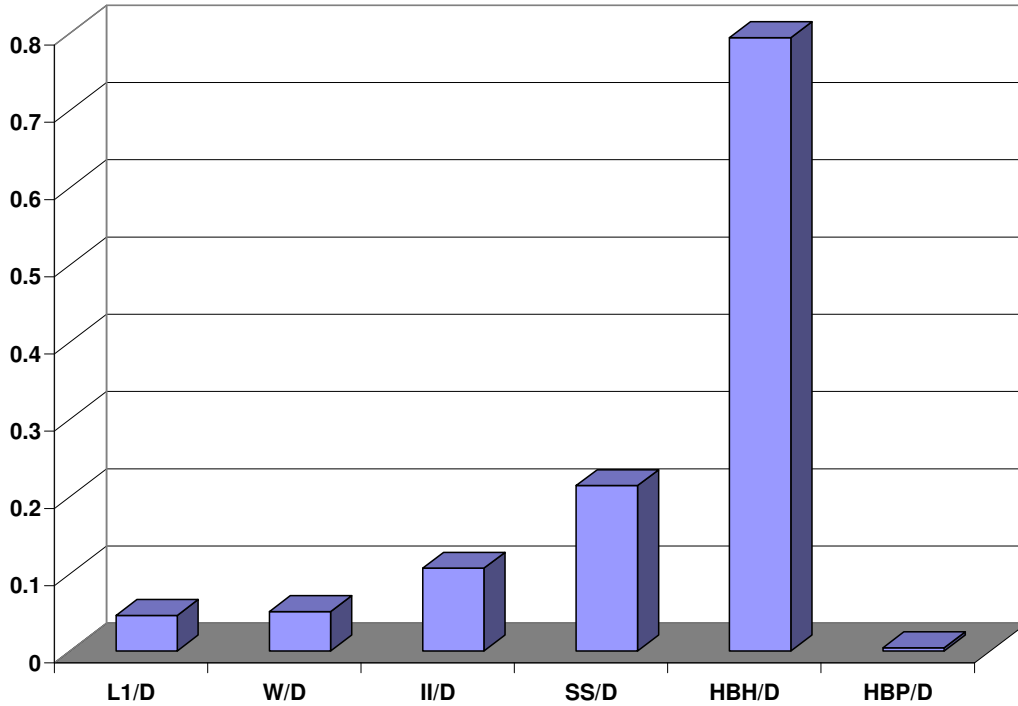
در قدم اول میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر در جریان سازه‌ی خروجی لوله توسط آنالیز حساسیت تعیین شد. با استفاده از روش آنالیز حساسیت حول میانگین نسبت تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر در راندمان استهلاك انرژی سازه‌هایی که در ورودی انسداد نداشتند و در انتهای آنها پروفیل سرعت یکسانی در عرض کانال وجود داشت، تعیین شدند. شکل (۵) میزان تأثیر هر یک از پارامترها را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل (۵) دیده می‌شود، پارامتر ارتفاع نسبی دیواره‌ی آویزان بیشترین تأثیر در استهلاك انرژی را دارد. دلیل تأثیر زیاد این پارامتر در استهلاك انرژی جریان می‌تواند به علت تأثیر آن در سرعت جریان عبوری از زیر آن و افزایش یا کاهش احتمال ایجاد پرش هیدرولیکی در برخورد با پله‌ی پس از آن باشد. دیگر پارامترهای مؤثر، ارتفاع نسبی پله‌ی انتهایی نسبت به قطر لوله‌ی ورودی است. این پله در ارتفاع و شرایط مناسب می‌تواند باعث ایجاد پرش هیدرولیکی و کاهش انرژی جریان شود. پارامتر بعدی نسبت ارتفاع لوله‌ی ورودی از کف سازه‌ی خروجی لوله به قطر لوله‌ی ورودی است. هر چه این فاصله بیشتر باشد، زاویه‌ی برخورد جت آب خارج شده از لوله‌ی ورودی به کف بیشتر و در نتیجه استهلاك انرژی جریان بیشتر می‌شود. پس از این پارامترها به ترتیب عرض نسبی سازه و طول نسبی سازه در استهلاك انرژی تأثیر دارد. پارامتر فاصله‌ی نسبی دیواره‌ی آویزان از ابتدای سازه تقریباً تأثیری بر استهلاك انرژی جریان ندارد.

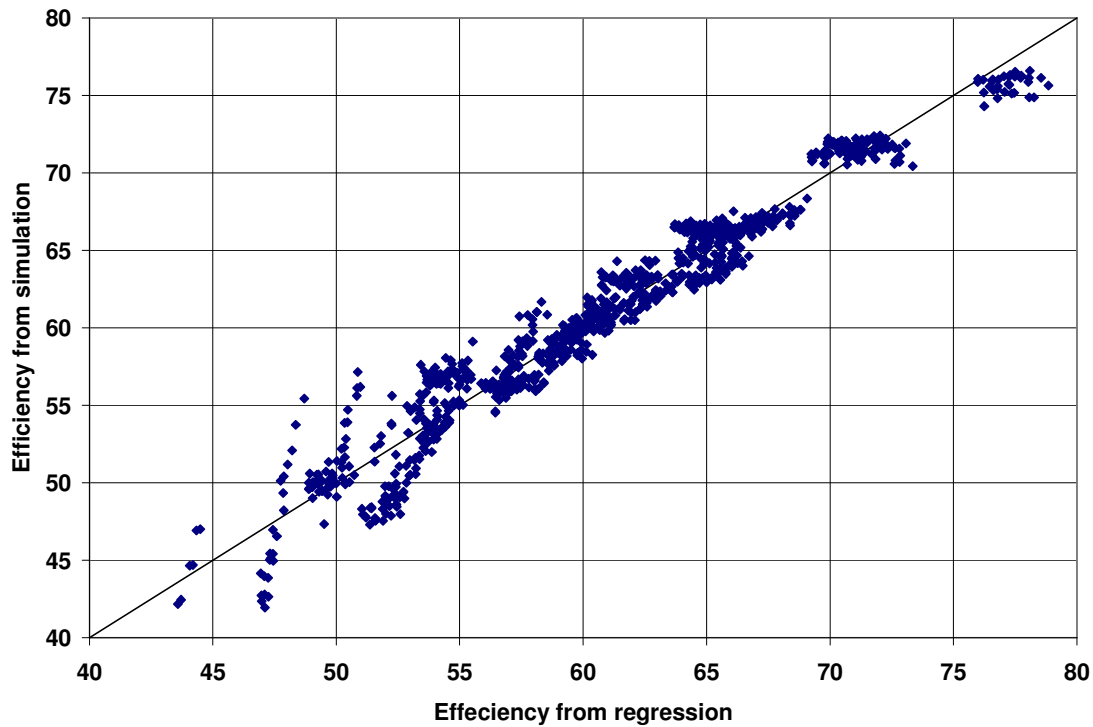
میزان استهلاک انرژی در سازه‌ی خروجی لوله بر اساس پارامترها توسط تابع نمایی به صورت زیر برآورد گردید:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 41.77 \left(\frac{HBP}{D} \right)^{-0.02} \left(\frac{HBH}{D} \right)^{0.323} \left(\frac{SS}{D} \right)^{0.251} \left(\frac{II}{D} \right)^{0.12} \left(\frac{W}{D} \right)^{0.057} \left(\frac{L_1}{D} \right)^{0.001} \quad (1)$$

مجذور ضریب همبستگی در این تخمین برابر ۰/۹۵۲ است. این ضریب همبستگی دقت قابل قبول تخمین این تابع را نشان می‌دهد. در صورتی که سه پارامتر برتر در آنالیز حساسیت را در نظر گرفته شود، میزان استهلاک انرژی با مجذور ضریب همبستگی به ۰/۴۶۳ محدود می‌شود که مناسب نیست. شکل (۶) رابطه میان مقادیر راندمان به دست آمده از شبیه‌سازی و همچنین تخمین آنها توسط رابطه (۱) را به نمایش گذاشته است. این شکل نشان می‌دهد دقت تابع در نظر گرفته شده برای راندمان‌های بیشتر از ۵۳ درصد تقریباً خوب و برای کمتر از آن خطا بیشتر می‌شود.



شکل ۵- میزان تأثیر نسبی هر کدام از پارامترهای مؤثر در استهلاک انرژی سازه‌ی خروجی.



شکل ۶- مقایسه‌ی راندمان استهلاك انرژی از شبیه‌سازی و رابطه‌ی (۱)

۵. نتیجه‌گیری

در نهایت با استفاده از شکل ابتدایی سازه خروجی لوله بهینه‌سازی شده توسط گوئل و ورما و ایجاد تغییرات در آن با توجه به شرایط کانال‌های غیرفرسایشی و جلوگیری از انسداد لوله برای جریان‌های با فرود کمتر از یک، نوع جدیدی سازه خروجی لوله ارایه شد. کلیه‌ی ابعاد این سازه بی‌بعد شد و در حالت‌های متفاوت شبیه‌سازی شد. پس از مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اعمال قیود، راندمان انرژی سازه‌ی خروجی لوله محاسبه گردید. طول سازه‌ی خروجی لوله بسیار کمتر از تحقیقات قبلی و ۴ برابر قطر لوله ورودی جریان است. همان‌طور که جدول (۱) نشان می‌دهد، حداکثر طول سازه خروجی لوله ۴ برابر قطر فرض شده و دو شرط مورد نظر شامل عدم ایجاد انسداد و یکنواختی پروفیل در عرض را دارد.

۶. مراجع

1. Peterka, A.J., (1978), "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipaters", USBR, Engineering Monograph No. 25.
2. Goel, A., Verma, D.V.S., (2001), "Model studies on stilling basins for pipe outlets", *Irrigation and Drainage Systems*, **15** (1), pp 81-91.
3. Goel, A., Verma, D.V.S., "Alternate design of stilling basins for pipe outlets", *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 20, pp. 139-150, 2006.
4. Chatila, J., Tabbara, M., "Computational modeling of flow over an ogee spillway", *Computers and Structures*, Vol. 82, pp. 1805-1812, 2004.
5. Chatila, J., Tabbara, M., Awwad, R., "Computational simulation of flow over stepped spillways", *Computers and Structures*, Vol. 83, pp. 2215-2224, 2004.
6. Chen, Q., Dai, G., and Lio, H., "Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 7, pp. 683-689, 2002.



7. Chanson, H., "Hydraulics of skimming flow over stepped channel and spillways", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 3, 1994.
8. Straub, L.G., Anderson, A.G., "Experiments on self-aerated flow in open channels", *Proc., ASCE*, Vol. 87, No. 7, pp. 1-35, 1890.