

شبه سازی عددی اثرات هیدرولیکی شیب شکن قائم در یک کانال مستطیلی

سید علی توین^۱، سید محمد هادی مشکاتی^۲

۱- گروه عمران، واحد گناوه، دانشگاه آزاد اسلامی، گناوه، ایران

۲- دکترای سازه‌های هیدرولیکی، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۱۰

چکیده

در این مطالعه، ساختمان شیب شکن با توجه به اهمیتی که در انتقال آب دارد مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مزیت اصلی احداث این سازه‌ها از بین بردن انرژی مخرب آب می‌باشد. زمانیکه بخواهند مقدار زیادی از انرژی مخرب آب را در کانال یا لوله بگیرند، اهمیت بکارگیری شیب شکن‌ها مشخص می‌شود. در این تحقیق، سعی بر این است که با استفاده از یک مدل عددی دارای قابلیت‌های مناسب (HEC-RAS)، یک کانال دارای شیب شکن (با دو شیب متفاوت و بدون مستهلک کننده انرژی) مورد بررسی قرار بگیرد، اما با توجه به تعدد پارامترهای مجهول، از کانال مستطیلی در بررسی استفاده می‌شود تا بتوان از روابط ساده شده آن در جهت نتیجه‌گیری مناسب‌تر استفاده نمود. جهت بررسی شرایط مختلف ناشی از شیب شکن، پارامترهای خاصی تغییر یافته و نتایج ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفت. این پارامترها شامل زبری کانال، دبی جریان، عمق شیب شکن، شیب بالادست و پایین‌دست شیب شکن و عرض کانال می‌شوند. نتیجه پژوهش، تعیین فاصله اثر شیب شکن در بالادست و پایین‌دست، نوع جریان ایجاد شده، فاصله محل پرش هیدرولیکی از شیب شکن، عدد فرود جریان، عمق آن و مقایسه سه پارامتر بدون بعد دیگر در شرایط فوق الذکر می‌باشد.

کلمات کلیدی: هیدرولیک، کانال مستطیلی، شیب شکن، پروفیل سطح آب

مقدمه

بین بردن انرژی مخرب آب می‌باشد. زمانیکه بخواهند مقدار زیادی از انرژی مخرب آب را در کانال یا لوله بگیرند، اهمیت بکارگیری شیب شکن‌ها مشخص می‌شود.

در صورتی که اختلاف ارتفاع بین دو سطح از ۲ متر کمتر باشد، شیب شکن قائم بکار گرفته می‌شود. علاوه بر استفاده شیب شکن قائم در مسیر کانال‌ها، یکی از کاربردهای مهم آن ساخت سرریز پله‌ای می‌باشد. یکی دیگر از کاربردهای سرریزهای پله‌ای، استفاده از آن برای تصفیه آب یا فاضلاب می‌باشد. در این حالت، شیب شکن به خاطر ساده بودن در طراحی، هزینه ناچیز در بهره‌برداری و سادگی در ساخت دارای مزایای مناسبی است. شیب شکن‌های قائم در ورودی آب به

معمولاً از سیستم‌هایی که برای انتقال آب از نقطه‌ای به نقطه دیگر استفاده می‌شوند می‌توان از: مجاری روباز (کانال‌های باز)، لوله‌های تحت فشار، فلوم، تندآب، شیب شکن‌ها، سیفون‌ها و ... را نام برد. هر کدام از این سازه‌ها با توجه به شرایط منطقه‌ای برای هدف خاصی بکار گرفته می‌شوند. با توجه به گستردگی دامنه علوم، برای مطالعه سیستم‌های انتقال آب نیاز است که ساختمان هر یک از این سازه‌ها بطور جداگانه بررسی شوند.

در این مطالعه، ساختمان شیب شکن با توجه به اهمیتی که در انتقال آب دارد مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. مزیت اصلی احداث این سازه‌ها از

شیب‌شکن باشد [۱]. او توزیع سرعت و فشار را در تمامی مقاطع به ترتیب یکنواخت و هیدرواستاتیک فرض کرد و رابطه انرژی در بالادست را به صورت زیر ارائه کرد:

$$E_0 = h + \frac{3}{2}d_c \quad (۱)$$

که در آن E_0 انرژی جریان در بالادست، d_c عمق بحرانی و h ارتفاع شیب‌شکن هستند.

وی با ترکیب فرضیات و روابط مختلف رابطه زیر را بدست آورد:

$$\left(\frac{d_c}{d_1}\right)^3 - \phi^2 \frac{d_c}{d_1} \left(2\frac{h}{d_c} + 3\right) + 2\phi^2 = 0 \quad (۲)$$

که در آن ϕ ضریب سرعت و d_1 عمق جریان در مقطع پایاب بلافاصله بعد از برخورد جت به کف کانال هستند.

مور بر روی دو شیب‌شکن قائم و با ارتفاع‌های متفاوت، مطالعات آزمایشگاهی انجام داده و نتیجه گرفت که افت انرژی تابعی از پارامتر h/d_c می‌باشد و با افزایش مقدار h/d_c از ۱ به ۱۲، مقدار افت انرژی نسبی ($\Delta E/h$) از صفر به ۰/۵۳ تغییر می‌کند [۲]. رابطه مور به شرح زیر است:

$$\frac{d_f}{d_c} = \sqrt{\left(\frac{d_1}{d_c}\right)^2 + 2\left(\frac{d_c}{d_1}\right) - 3} \quad (۳)$$

که در آن d_f عمق گرداب در پایاب است. پس از آن، وایت نتایج مور را ارزیابی کرده و یک مدل تحلیلی پیشنهاد داد [۳]. او فرض کرد که دبی برگشتی به عقب در مدل جت آزاد و مدل واقعی شیب‌شکن قائم برابر است و افت انرژی در شیب‌شکن قائم را ناشی از وجود گرداب دانست. بدین ترتیب انرژی نسبی در پایین‌دست شیب‌شکن قائم توسط وایت از رابطه زیر برآورد شده است:

$$\frac{E_1}{d_c} = \frac{\sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{\frac{h}{d_c} + 1.5}} + \frac{1}{4} \left(1.06 + \sqrt{\frac{h}{d_c} + 1.5} \right)^2 \quad (۴)$$

استخرهای پرورش ماهی نیز در جهت بالا بردن درصد اکسیژن محلول در آب استفاده می‌شود.

امروزه استفاده از مدل‌های عددی به دلیل شرایط اقتصادی، نتایج نزدیک به واقعیت و نتیجه‌گیری در زمان کمتر به شدت افزایش یافته است. اما با وجود پارامترهای متعدد در تشکیل جریان، این موضوع به راحتی قابل انجام نمی‌باشد. ضمن اینکه امکان ایجاد حالت‌های مختلفی از جریان در طول شیب‌شکن وجود داشته و بررسی آن ابعاد گسترده‌ای از هیدرولیک کانال‌های باز را شامل می‌شود. علاوه بر این، داشتن فهم مناسب و کامل‌تر از نوع جریان‌های تشکیل شده، گام مهمی در برآورد فرسایش و رسوب در کانال‌های غیرصلب می‌باشد. در این تحقیق، سعی بر این است که با استفاده از یک مدل عددی دارای قابلیت‌های مناسب (HEC-RAS)، یک کانال دارای شیب‌شکن مورد بررسی قرار بگیرد. با بررسی پروفیل اندازه‌گیری شده سطح آب و اثر تغییر شرایط شیب‌شکن در تشکیل آن، می‌توان به نتایج مناسبی در تحلیل جریان‌های موجود رسید.

درباره خصوصیات هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم، محققان مختلفی از جمله بخمیتف (۱۹۳۲)، مور (۱۹۴۳)، وایت (۱۹۴۳)، رند (۱۹۵۵)، گیل (۱۹۷۹)، راجاراتنام و چمنی (۱۹۹۵) به تحقیق پرداخته‌اند. بر اساس تغییرات جریان، دو رژیم فوق بحرانی و زیر بحرانی در پایین‌دست شیب‌شکن در مدل‌های فیزیکی مشاهده شده است. این تغییرات رژیم جریان برای حالت‌های مختلف از دبی جریان متفاوت است. در این زمینه نیز مطالعاتی صورت گرفته است که می‌توان به تحقیقات راجاراتنام و وو (۱۹۹۷) اشاره کرد.

بخمیتف در تحقیقات خود نشان داد که معادله انرژی می‌تواند بیان‌کننده مطالعه جریان در پنجه

$$\frac{t_1}{d_c} = 1 - 0.161\lambda + 0.0047\lambda^2 \quad (۶)$$

$$\frac{t_2}{d_c} = 1.82 \exp(-0.176\lambda) - 0.82 \quad (۷)$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{g(d_c - t)}}{\left(\frac{q}{y_t}\right)} \quad (۸)$$

که در آن y_t عمق آب در کانال پایین دست و t اختلاف بین تراز آب در کانال پایین دست تا کف کانال بالادست می باشد.

اگر این دو رابطه ترسیم شوند، سه محدوده قابل تشخیص می باشد. در یک محدوده، رژیم جریان به صورت جت سقوط یافته است، در حالی که در محدوده دیگر، جریان سطحی اتفاق می افتد و در محدوده بینابین، بر اساس عمق جریان در کانال پائین دست قبل از تغییر، ممکن است هر دو نوع رژیم جریان مشاهده شود [۷].

مواد و روش ها

همان طور که در مقدمه عنوان شد، شبیه سازی عددی در این تحقیق با استفاده از مدل عددی HEC-RAS انجام گرفت. به همین دلیل آخرین نسخه از این نرم افزار (v4.0.1) تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل، بخش محاسبات جریان ماندگار توانایی مدل کردن سطح آب در رژیم های زیر بحرانی، فوق بحرانی و ترکیب این دو را دارا است. روال محاسبات پایه بر اساس حل معادله انرژی یک بعدی بنا شده است. اتلاف انرژی به وسیله اصطکاک (معادله مانینگ) و انقباض یا انبساط (ضریبی که باعث تغییر در هد سرعت می گردد) ارزیابی می گردد. هرگاه پروفیل سطح آب از نوع RVF باشد، معادله اندازه حرکت مورد استفاده قرار می گیرد. این حالتها شامل محاسبات رژیم جریان ترکیبی (یعنی پرش های هیدرولیکی) نیز می شود [۸].

هرگاه سطح آب از عمق بحرانی بگذرد، معادله انرژی قابل کاربرد نمی باشد. معادله انرژی تنها در

که در آن E_1 انرژی جریان در پایین دست شیب شکن است.

گیل در محاسبات خود عمق گرداب را وارد کرده و فرض کرد که کل افت انرژی در سطح برخورد جت آب به گرداب ایجاد می شود. بدین ترتیب انرژی نسبی را طبق رابطه زیر محاسبه نمود [۴]:

$$\frac{E_1}{d_c} = \frac{d_1}{d_c} + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{d_1}\right)^2 \quad (۵)$$

رند با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی خود، پارامتری تعریف کرد که بدون بعد بوده و آن را عدد شیب شکن نامید. هم چنین با برازش یک منحنی بر اطلاعات آزمایشگاهی، روابطی تجربی برای پارامترهای مورد نیاز به دست آورد [۵].

راجاراتنام و چمنی، سرعت را در مقاطع مختلف کانال بالادست و جت آزاد آب اندازه گیری کرده و نتایج و فرضیات گیل و وایت را ارزیابی کردند [۶]. در این تحقیق نتیجه گرفته شد که دبی برگشتی در مدل جت آزاد بیشتر بوده و تقریباً ثابت می ماند، ولی در مدل شیب شکن قائم با اضافه شدن پارامتر d_c/h ، دبی برگشتی کاهش می یابد. آن ها با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی، به مجموعه ای از روابط تجربی دست یافته و با استفاده از رابطه تجربی حاصل از اندازه گیری عمق گرداب، به روشی تحلیلی- تجربی برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی جریان زیر بحرانی نائل شدند. راجاراتنام و وو رژیم جریان زیر بحرانی را در بالادست یک شیب شکن بررسی کردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که سطح آب در کانال پایین دست شیب شکن متغیر می باشد، به طوری که این سطح به لبه شیب شکن رسیده و حتی از این لبه نیز فراتر می رفته است [۷]. آن ها در تحقیقات به عمل آمده نتیجه گرفتند که رژیم جریان در این مدل می تواند به صورت جت با سقوط آزاد و یا به صورت جریان سطحی باشد. ضمناً با انجام کارهای آزمایشگاهی و برازش بر نقاط تجربی دو معادله زیر ارائه شده است:

به یک توده آب که توسط دو مقطع در مکان‌های ۱ و ۲ محصور شده است، عبارت زیر برای تغییر در اندازه حرکت در واحد زمان می‌تواند نوشته شود، شکل ۱:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (9)$$

که در آن P نیروی فشار هیدرولیکی در مکان‌های ۱ و ۲، W_x نیروی ناشی از وزن آب در جهت x ، F_f نیروی ناشی از اتلاف اصطکاک خارجی از مکان‌های ۱ و ۲، Q دبی، ρ دانسیته آب و ΔV_x تغییر سرعت از مقطع ۲ به ۱ در جهت x هستند.

در نهایت و با استفاده از معادلات نیروی فشار هیدرواستاتیک، نیروی وزن آب، نیروی اصطکاک خارجی و تعیین شتاب زمانی جرم و پس از ساده‌سازی، شکل اصلی معادله اندازه حرکتی که در HEC-RAS مورد استفاده قرار می‌گیرد به شرح زیر خواهد بود. همه کاربردهای معادله اندازه حرکت درون این مدل از معادله مذکور مشتق شده‌اند.

$$\frac{Q_2^2\beta_2}{gA_2} + A_2\bar{Y}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right)LS_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right)L\bar{S}_f = \frac{Q_1\beta_1}{gA_1} + A_1\bar{Y}_1 \quad (10)$$

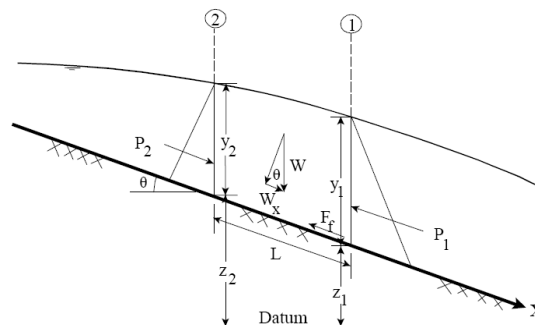
شیب‌شکن در نظر گرفته شده است، اگرچه شرایط مرزی متفاوت در محل ورود جریان به کانال (ابتدای همین بخش) جهت حساسیت‌سنجی لحاظ شده است. طول این بخش در اجراهایی که انجام شد در محدوده ۱۰۰ الی ۳۰۰۰ متر در نظر گرفته شد.

جایی کاربرد دارد که جریان به صورت متغیر تدریجی باشد و انتقال از جریان زیر بحرانی به فوق بحرانی یا فوق بحرانی به زیر بحرانی جزو حالت‌های جریان متغیر سریع می‌باشد. حالت‌های مختلفی از انتقال جریان زیر بحرانی به فوق بحرانی و فوق بحرانی به زیر بحرانی می‌تواند به وقوع بپیوندد. این حالت‌ها شامل تغییرات قابل ملاحظه در شیب کانال، انقباض در محدوده پل، سازه‌های ریزشی و سرریزها و محل اتصال جریان‌ها می‌باشد. در برخی حالت‌ها، معادلات تجربی قابل استفاده است (از قبیل سازه‌های ریزشی و سرریزها)، در حالی که در باقی حالت‌ها لازم است از معادله اندازه حرکت برای تعیین جواب استفاده شود.

در HEC-RAS، معادله اندازه حرکت می‌تواند برای مسائل خاص زیر استفاده شود: وقوع پرش هیدرولیکی، هیدرولیک جریان‌های کم عمق در پل‌ها و اتصال جریان‌ها. با اعمال قانون دوم نیوتن در حرکت

در این پژوهش، جهت شبیه‌سازی اثر شیب‌شکن بر روی جریان از یک کانال با مقطع مستطیلی شکل استفاده شده است که در پلان در راستای یک خط مستقیم ادامه یافته و دارای ۵ بخش است. دلایل انتخاب و محدوده طول‌های در نظر گرفته شده برای این تقسیم‌بندی در ادامه ارائه شده است:

- بخش اول کانال: این بخش از کانال، جهت اطمینان از شرایط ثابت جریان در هنگام ورود به



شکل ۱. کاربرد اصل اندازه حرکت

با توجه به اینکه عرض کانال یکی از پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر نتایج شبیه‌سازی می‌باشد، از دو مقدار متفاوت ۳ و ۵ متر استفاده گردید. به عبارت دیگر تمامی حالت‌های موجود، برای کانال مستطیلی با دو عرض متفاوت ۳ و ۵ متر تکرار گردید تا اثرات تغییر عرض در نظر گرفته شود.

قاعدتاً ارتفاع شیب‌شکن نقش مهمی در نتایج خواهد داشت. با در نظر گرفتن ابعاد کانال و با توجه به تعریف شیب‌شکن، تمامی حالت‌های موجود برای دو ارتفاع متفاوت ۰/۵ و ۱/۰ متر تکرار گردید تا اثرات این پارامتر نیز لحاظ شود.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در تعیین نوع جریان، شیب کانال می‌باشد. جهت بررسی این موضوع دو شیب متفاوت ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ در بالادست و پایین‌دست شیب‌شکن (در بخش‌های اول، دوم، سوم و پنجم کانال) در نظر گرفته شده و اثر تغییر شیب در حالت‌های مختلف جریان مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به اینکه شرایط مرزی خود عاملی در ایجاد حالت‌های مختلف جریان می‌باشد، تصمیم بر این گرفته شد که جهت ایجاد حالت‌های پایدار و طبقه‌بندی مناسب نتایج تحقیق، در انتهای بالادست و پایین‌دست کانال دو بخش با طول کافی (بخش اول و پنجم کانال) در نظر گرفته شده و جهت معرفی شرایط مرزی از عمق نرمال استفاده شود. در صورتی که طول در نظر گرفته شده برای این دو بخش مناسب بوده و در مرزها شیب خط انرژی برابر شیب کانال در نظر گرفته شود، این موضوع قابل حصول می‌باشد. نتایج اجرا نیز نشان از عدم تغییر عمق و ایجاد شرایط جریان نرمال در ابتدا و انتهای کانال دارد. بدین ترتیب می‌توان بر اساس شیب‌های انرژی متفاوت از جریان طبقه‌بندی مناسب‌تری از نتایج پژوهش ارائه داد.

اهمیت دبی جریان در تعیین نوع جریان ایجاد شده در محدوده شیب‌شکن بر کسی پوشیده نیست. بنابراین با حساسیت‌سنجی و لزوم ایجاد جریان‌های زیربحرانی

• بخش دوم کانال: این بخش از کانال، جهت کوچک‌تر کردن فاصله بین مقاطع در محدوده بالادست شیب‌شکن، مطالعه دقیق‌تر اثرات ناشی از آن و رفع خطاهای اجرا در نظر گرفته شده است. طول این بخش در اجراهایی که انجام شد در محدوده ۲ الی ۸ متر در نظر گرفته شد.

• بخش سوم کانال: این بخش از کانال، جهت تعریف هندسه شیب‌شکن در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه سازه شیب‌شکن در این بخش قرار دارد، قاعدتاً طول این محدوده خیلی کوچک بوده و بسته به شیب در نظر گرفته شده طول آن متفاوت می‌باشد. در شبیه‌سازی شیب‌شکن‌های قائم طول این بخش در محدوده ۰/۵ الی ۰/۱ متر در نظر گرفته شد. درست است که در شیب‌شکن‌های قائم طول افقی وجود ندارد، اما جهت شبیه‌سازی آن‌ها لازم است طول خیلی کوچکی برای آن‌ها در نظر گرفت. طول در نظر گرفته شده (۵ الی ۱۰ سانتی‌متر) در مقایسه با ابعاد کانال قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.

• بخش چهارم کانال: این بخش از کانال نیز مشابه بخش دوم، جهت کوچک‌تر کردن فاصله بین مقاطع در محدوده پایین‌دست شیب‌شکن، مطالعه دقیق‌تر اثرات ناشی از آن و رفع خطاهای اجرا در نظر گرفته شده است. طول این بخش در اجراهایی که انجام شد در محدوده ۴ الی ۸ متر در نظر گرفته شد.

• بخش پنجم کانال: این بخش از کانال نیز مشابه بخش اول، جهت اطمینان از شرایط ثابت جریان در پایین‌دست شیب‌شکن در نظر گرفته شده است، اگرچه شرایط مرزی متفاوت در محل خروج جریان از کانال (انتهای همین بخش) جهت حساسیت‌سنجی لحاظ شده است. طول این بخش در اجراهایی که انجام شد در محدوده ۱۰۰ الی ۴۰۰ متر در نظر گرفته شد.

با توجه به اینکه در برنامه HEC-RAS و کلیه شبیه‌سازی‌های عددی، فاصله بین مقاطع پارامتری تعیین کننده می‌باشد، به این موضوع باید دقت بیشتری شود. چرا که انتخاب نامناسب این پارامتر حتی باعث اشتباه در نتایج خواهد شد. آگاهی از شرایط جریان و آشنایی فنی با حالت‌های مختلف جریان در تعیین این پارامتر تأثیرگذار خواهد بود. یکی از گزینه‌های برنامه HEC-RAS این است که کاربر می‌تواند در فاصله بین دو مقطع، به تعداد یا فاصله مورد نیاز مقاطع درون‌یابی شده ایجاد نماید، به عبارت دیگر برنامه به کاربر اجازه می‌دهد تا با تعریف فاصله مقاطع، به صورت اتوماتیک مقطعی تولید نماید که از لحاظ ابعادی به صورت خطی از مقطع اولیه ایجاد شده‌اند. جدول ۱ نشان‌دهنده فواصل انتخابی جهت درون‌یابی مقاطع (فاصله مقاطع) در بخش‌های مختلف کانال می‌باشد.

و فوق بحرانی سه مقدار برای دبی جریان در نظر گرفته شد. مقادیر فرض شده ۱، ۵ و ۱۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

یکی از پارامترهای تعیین کننده در شبیه‌سازی هیدرولیکی عدد مانینگ می‌باشد. این پارامتر بر اساس شرایط مختلف کانال می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد و معمولاً در شرایط پیش‌بینی، یکی از پارامترهای اصلی کالیبراسیون می‌باشد. با توجه به گستردگی مقادیر عدد مانینگ و در نظر گرفتن این موضوع که هدف از تحقیق بررسی اثرات شیب‌شکن می‌باشد، سه مقدار ۰/۰۱، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲ برای این پارامتر در نظر گرفته شده و نتایج این تغییرات مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. بدیهی است با توجه به جنس شیب‌شکن‌ها احتمال خارج بودن مقدار عدد مانینگ از محدوده حداقل و حداکثر این اعداد، خیلی کم می‌باشد.

جدول ۱. فواصل مقاطع در بخش‌های مختلف کانال

بخش‌های کانال	حداقل فاصله مقاطع (m)	حداکثر فاصله مقاطع (m)
اول	۱	۲/۵
دوم	۰/۱	۱
سوم	۰/۰۰۱	۰/۰۱
چهارم	۰/۱	۱
پنجم	۱	۲/۵

بحث و نتیجه‌گیری

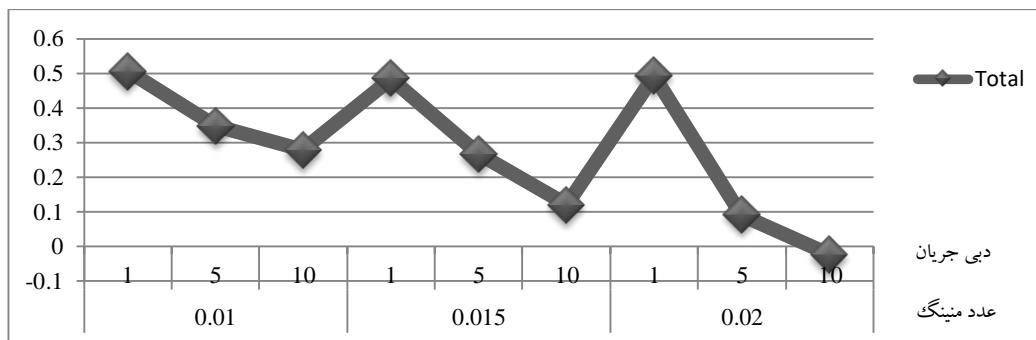
برای نتیجه‌گیری از اجراهای انجام شده، نتایج مدل‌سازی در کنار یکدیگر قرار گرفته و تغییرات پارامترهای مختلف به صورت درختی مورد بررسی قرار گرفت.

فاصله اثر شیب‌شکن در بالادست (L_u): این پارامتر نشان‌دهنده فاصله‌ای است که بر اثر ایجاد شیب‌شکن، شرایط هیدرولیکی جریان در بالادست آن تغییر می‌کند. بدیهی است که در شرایط جریان فوق بحرانی بالادست شیب‌شکن، مقدار این پارامتر برابر صفر

همان‌طور که در جدول فوق‌الذکر ملاحظه می‌شود در بخش اول و پنجم کانال به دلیل فاصله زیاد از شیب‌شکن، حساسیت کمتر بوده و فاصله مقاطع بزرگتر می‌باشد. در بخش‌های دوم و چهارم کانال، به دلیل چسبیده بودن این مقاطع به شیب‌شکن و تغییرات قابل ملاحظه در جریان، فواصل بین مقاطع کاهش یافته است؛ اما بخش سوم کانال که محدوده معرفی شیب‌شکن می‌باشد، قاعدتاً به دلیل پیچیدگی شرایط تغییر جریان، نیازمند فواصل بسیار کمتری مابین مقاطع می‌باشد.

باعث افزایش L_{II} خواهد شد، اما نکته جالب این است که با دو برابر شدن ارتفاع شیب‌شکن، پارامتر L_{II} تغییر متناسبی نداشته است. اما افزایش عرض مقطع، به صورت واضح باعث کاهش اثر شیب‌شکن در بالادست خواهد شد. مقدار این کاهش در مقادیر دبی بزرگتر و کانال‌های زیرتر مشهودتر است، اگرچه افزایش زبری در مقادیر بالاتر این پارامتر اثر کمتری بر این موضوع داشته است.

می‌باشد ($L_{II}=0$). نتایج حاکی از آن است که در شرایط جریان زیربحرانی بالادست شیب‌شکن، با افزایش عدد مینینگ L_{II} افزایش می‌یابد، اگرچه شیب تغییرات این متغیر روند رو به کاهشی را در پی دارد؛ به گونه‌ای که در برخی حالت‌ها، افزایش عدد مینینگ تغییری در این پارامتر ایجاد نمی‌کند. اما افزایش دبی جریان، بر اساس یک معادله درجه دو باعث افزایش مقدار L_{II} می‌شود. همچنین افزایش ارتفاع شیب‌شکن، به صورت متوسط



شکل ۲. تغییرات L_{II} در مقابل زبری و دبی جریان

روند فوق نشان دهنده مقعر بودن منحنی تغییرات L_{II} نسبت به دبی جریان می‌باشد. مقایسه این پارامتر با L_{II} نشان دهنده این است که افزایش دبی، باعث افزایش این دو پارامتر خواهد شد، اگرچه این اثرگذاری با افزایش دبی کاهش می‌یابد. حتی در برخی موارد مقدار L_{II} به دلیل شرایط هیدرولیکی جریان، صفر می‌شود.

همچنین افزایش ارتفاع شیب‌شکن، به صورت متوسط باعث افزایش L_{II} خواهد شد، بطوری که با دو برابر شدن ارتفاع شیب‌شکن، پارامتر L_{II} تغییر متناسبی نداشته است.

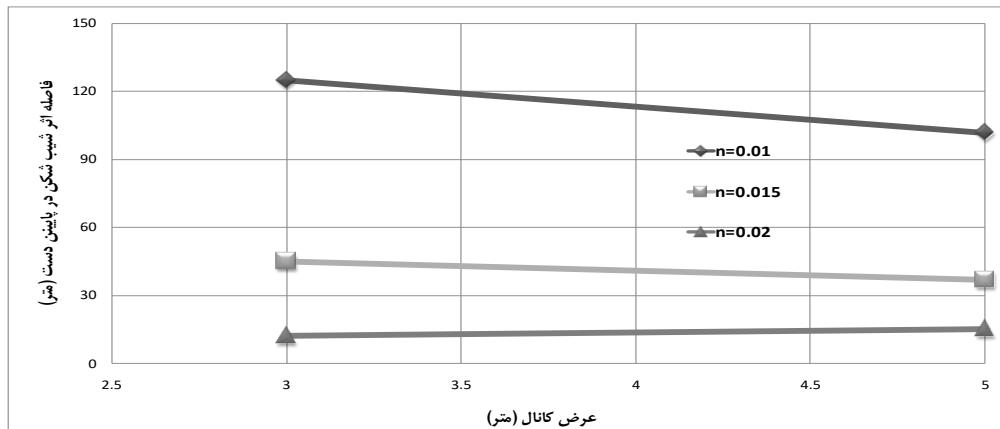
اما افزایش عرض مقطع، به صورت واضح باعث کاهش اثر شیب‌شکن در بالادست خواهد شد. بر خلاف پارامتر L_{II} با افزایش عرض، میزان افت این پارامتر وابستگی مشخصی را به دبی جریان نشان نمی‌دهد و در دبی ۵ متر مکعب بر ثانیه شیب افت

فاصله اثر شیب‌شکن در پایین دست (L_{II}): این پارامتر نشان دهنده فاصله‌ای است که بر اثر ایجاد شیب‌شکن، شرایط هیدرولیکی جریان در پایین دست آن تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد مینینگ مقدار L_{II} کاهش می‌یابد، اگرچه شیب تغییرات این متغیر روند رو به کاهشی را در پی دارد؛ به گونه‌ای که در برخی حالت‌ها، افزایش عدد مینینگ تغییری در این پارامتر ایجاد نمی‌کند. مقایسه این پارامتر با L_{II} نشان دهنده این است که ازدیاد زبری کانال، باعث کاهش این پارامتر و افزایش L_{II} خواهد شد، اگرچه این اثرگذاری با افزایش زبری کاهش می‌یابد. حتی در برخی موارد مقدار L_{II} به دلیل شرایط هیدرولیکی جریان، صفر می‌شود.

اما افزایش دبی جریان، بر اساس یک معادله درجه دو باعث افزایش مقدار L_{II} می‌شود. بدیهی است که نمی‌توان L_{II} را تنها وابسته به دبی جریان دانست، اما

متفاوتی را به دنبال داشته است (شکل ۳). همچنین در مقادیر زبری بالاتر، اثر زبری بر پارامتر L_d مشخص تر بوده و با پرش ناگهانی نسبت به مقادیر زبری کمتر همراه بوده است.

بالاتری وجود دارد. به همین ترتیب این موضوع در مقادیر مختلف زبری کانال مشاهده می شود. در کانال با زبری ۰/۰۱ نه تنها افزایش عرض باعث کاهش L_d نشده است، بلکه باعث افزایش آن شده است، در حالیکه در زبری های بزرگتر این موضوع نتیجه



شکل ۳. متوسط تغییرات L_d نسبت به عرض کانال در زبری های مختلف

برخورد با شیب کم پایین دست و جریان زیربحرانی موجود، با پذیرش پرش هیدرولیکی شرایط تطبیق خود را با جریان ایجاد می نماید.

نتایج نشان دهنده این واقعیت است که افزایش ارتفاع شیب شکن در تشکیل این جریان ها تأثیر بسزایی دارد. هر چه ارتفاع شیب شکن بیشتر باشد، شرایط جریان به این گروه بیشتر متمایل می شود. دلیل این امر را می توان ناشی از کسب انرژی بیشتر در هنگام عبور از شیب شکن دانست. همچنین با کاهش عدد مانینگ، نتایج به سمت این گروه میل می کند. قاعدتاً کاهش زبری، افزایش سرعت و در نتیجه انرژی بیشتر را به همراه داشته و نتیجه عنوان شده را به دنبال خواهد داشت.

گروه سوم، جریان های زیربحرانی هستند که حتی با وجود شیب شکن، شرایط جریان زیربحرانی را در تمام طول کانال ادامه می دهند. این گروه، متعلق به شیب شکن هایی هستند که در کانال های با شیب کم و زبری بالا وجود دارند. بدیهی است این دو پارامتر باعث

نوع جریان (فوق بحرانی یا زیربحرانی) ایجاد شده به دلیل حضور شیب شکن: نتایج نشان دهنده چندگونه بودن رفتار جریان در مقابل این سازه می باشد.

گروه اول، جریان های فوق بحرانی هستند که به واسطه حضور شیب شکن، با افزایش انرژی همراه بوده و الگوی جریان در پایین دست آن ها فوق بحرانی خواهد بود. بدیهی است که در گذر از شیب شکن، انرژی جریان افزایش داشته و عمق جریان کاهش می یابد، اما در برخورد با شیب پایین دست شیب شکن، این انرژی کاهش یافته و رفته رفته عمق جریان افزایش می یابد تا به شرایط اولیه خود برسد.

گروه دوم، جریان های زیربحرانی هستند که به واسطه حضور شیب شکن به شرایط جریان فوق بحرانی رسیده و در پایین دست به دلیل برخورد با شرایط زیربحرانی، با پرش هیدرولیکی مسیر را برای تبدیل به جریان زیربحرانی طی می کنند. جریان زیربحرانی در هنگام رسیدن به شیب شکن به شرایط فوق بحرانی رسیده و پس از کسب انرژی در ارتفاع شیب شکن، در

قبل از شیب‌شکن زیربحرانی بوده و پرش هیدرولیکی در محدوده این سازه اتفاق می‌افتد، به عبارت دیگر انرژی آزاد شده به دلیل حضور شیب‌شکن در برخورد با جریان زیربحرانی پایین‌دست، مجبور به پذیرش آنی شرایط پرش هیدرولیکی خواهد شد. با عنایت به گروه‌بندی بالا، می‌توان نوع جریان‌های ایجاد شده به دلیل حضور شیب‌شکن را مطابق جدول (۲) تعریف نمود.

این موضوع خواهد شد که اولاً جریان با سرعت کمتری وارد محدوده شیب‌شکن شده و ثانیاً در هنگام عبور از این محدوده، اتلاف انرژی بیشتری را دارا باشد. البته بررسی پروفیل جریان در این گروه نشان دهنده این موضوع است که اثر جریان زیربحرانی پایین‌دست تا ابتدای شیب‌شکن پیشرفت داشته و شرایطی بدین گونه را ایجاد می‌نماید.

گروه چهارم، مربوط به جریان‌هایی است که حد میانه گروه دوم و سوم هستند. در این جریان‌ها، شرایط

جدول ۲. گروه بندی جریان‌های ایجاد شده به دلیل حضور شیب‌شکن

گروه	شرایط جریان در بالادست شیب‌شکن	شرایط جریان در محدوده شیب‌شکن	شرایط جریان در پایین‌دست شیب‌شکن
اول	فوق بحرانی	فوق بحرانی	فوق بحرانی
دوم	زیربحرانی	فوق بحرانی	فوق بحرانی و پس از آن پرش هیدرولیکی و تشکیل زیربحرانی
سوم	زیربحرانی	زیربحرانی	زیربحرانی
چهارم	زیربحرانی	فوق بحرانی و پس از آن پرش هیدرولیکی و تشکیل زیربحرانی	زیربحرانی

انرژی جریان شده و این پدیده نهایتاً مقدار L_c را بالا خواهد برد. این موضوع در نتایج مدل‌سازی کاملاً قابل مشاهده است.

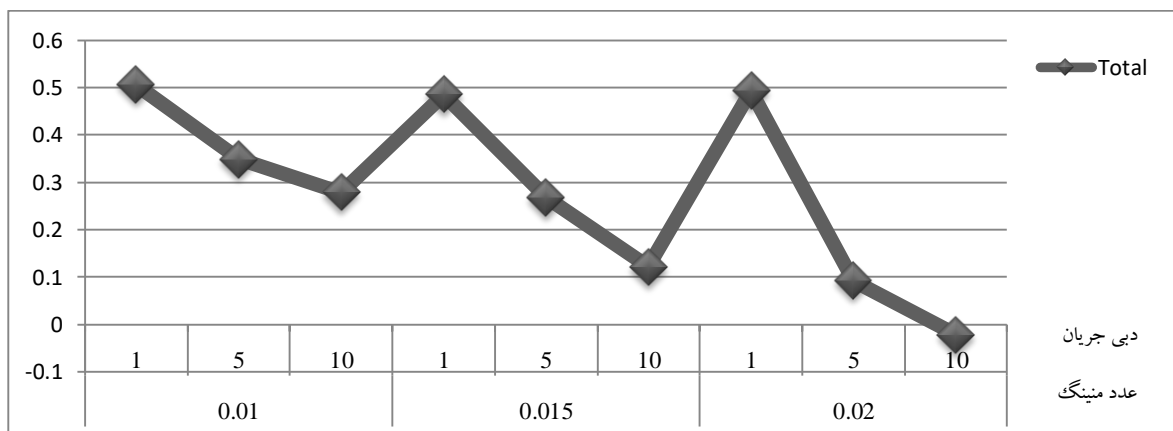
درصد تغییر عمق $(\frac{\Delta d}{d_0})$: همان‌طور که می‌دانید عمق جریان به پارامترهای مختلفی وابسته است و به عنوان مثال برای یک جریان نرمال، هر چه زبری جریان بیشتر شود، عمق جریان بیشتر خواهد بود، در حالیکه افزایش شیب جریان، باعث کاهش عمق خواهد شد. بنابراین بدون حضور شیب‌شکن، عمق جریان بر اساس شرایط مختلف متفاوت می‌باشد و لازم است عدد بی‌بعدی در نظر گرفته شود تا بتوان اثر حضور شیب‌شکن را به صورت کمی مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، نسبت تفاضل عمق جریان در ابتدا و انتهای شیب‌شکن به عمق اولیه جریان را درصد تغییر عمق نامیدیم. بدین ترتیب شرایط عمق اولیه

فاصله محل پرش هیدرولیکی از شیب‌شکن (L_c): همان‌طور که در بالا عنوان شد، تنها در دو گروه از کانال‌ها پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. در گروه چهارم، محل پرش هیدرولیکی مشخص بوده و سازوکار برخورد با آن قابل برنامه‌ریزی می‌باشد، اما لازم است محل این پدیده در گروه دوم کانال‌ها نیز ارزیابی شود. افزایش زبری کانال در این پارامتر به شدت اثرگذار بوده و با افزایش زبری، اثر آن نیز کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر، در محدوده اعداد مانینگ کوچکتر، مقدار L_c تفاوت فاحشی را نسبت به مقادیر بزرگتر آن نشان می‌دهد و هر چه عدد مانینگ افزایش می‌یابد، L_c با وجود کاهش به مقادیر قبلی خود نزدیکتر می‌شود. در مورد دبی جریان، شرایط ایجاد شده برعکس می‌باشد. در مقابل افزایش دبی جریان، L_c نیز افزایش می‌یابد، اما روند افزایشی آن رو به کاهش است. افزایش ارتفاع شیب‌شکن باعث افزایش

می‌یابد. اما روند کاهش این پارامتر در مقادیر دبی بزرگتر، کمتر است، شکل ۴. همچنین افزایش ارتفاع شیب‌شکن، باعث افزایش مقدار این پارامتر خواهد شد. زیرا انرژی افزوده شده به جریان، صرف ایجاد سرعت بیشتر و عمق کمتر خواهد شد. نکته جالب در اینجا است که افزایش شیب یا عرض کانال، باعث بزرگ شدن این پارامتر می‌شود، اگرچه اثر افزایش شیب در عرض‌های کوچکتر، خیلی بیشتر خواهد بود.

(بدون حضور شیب‌شکن) تأثیر کمتری بر نتایج خواهد داشت.

بررسی نتایج نشان دهنده این موضوع است که با افزایش زبری کانال، به طور متوسط درصد تغییر عمق از لحاظ عددی کاهش می‌یابد و این تأثیر تقریباً به صورت خطی می‌باشد. یعنی اثر زبری در تقابل با اثر شیب‌شکن عمل می‌کند. این موضوع در مورد دبی جریان نیز صادق است. هر چه مقدار دبی جریان افزایش می‌یابد، به طور متوسط مقدار $\frac{\Delta d}{d_0}$ کاهش



شکل ۴. تغییرات $\frac{\Delta d}{d_0}$ در مقابل زبری و دبی جریان

را افزایش می‌دهد که این موضوع کاملاً طبیعی است. پارامتر متغیر دیگر، شیب اولیه کانال می‌باشد. بدیهی است که نتایج نشان دهنده این موضوع است که در کانال‌های با شیب بزرگتر، $\frac{\Delta S}{S_0}$ کمتر می‌باشد، چرا که شیب بزرگتر کانال، شرایط نزدیک‌تری به شیب‌شکن خواهد داشت. همچنین در نتایج مشاهده گردید که افزایش عرض کانال، به طور متوسط باعث افزایش پارامتر $\frac{\Delta S}{S_0}$ می‌شود. این موضوع شاید ناشی از اثر بیشتر کانال در بستر خود باشد.

درصد تغییر سرعت $(\frac{\Delta V}{V_0})$: پارامتر بی‌بعد بعدی که در این تحقیق از آن استفاده شد، درصد تغییر سرعت می‌باشد. این پارامتر برابر است با نسبت تفاضل سرعت در ابتدای و انتهای شیب‌شکن به سرعت اولیه کانال.

درصد تغییر شیب خط انرژی $(\frac{\Delta S}{S_0})$: مشابه پارامتر بی‌بعد بالا، جهت مقایسه اثرات وجود شیب‌شکن‌های متفاوت از پارامتری به نام درصد تغییر شیب خط انرژی استفاده گردید که بر اساس نسبت تفاضل خط انرژی در ابتدا و انتهای شیب‌شکن به شیب خط انرژی اولیه محاسبه می‌شود.

نتایج بیانگر این موضوع است که افزایش زبری کانال باعث افزایش این پارامتر شده و تغییرات آن تقریباً خطی می‌باشد. در حالیکه افزایش دبی جریان، کاهش دهنده $\frac{\Delta S}{S_0}$ بوده و شیب تغییرات آن با افزایش دبی، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش دبی باعث کاهش اثر شیب‌شکن خواهد شد، این در حالی است که افزایش ارتفاع شیب‌شکن، مقدار این پارامتر

شیب‌شکن، باعث ایجاد جریان‌های مختلفی شده و انتظار شرایط متفاوتی از شیب‌شکن‌ها وجود دارد، اما بر اساس شرایط هیدرولیکی و شکل شیب‌شکن، جریان‌های ایجاد شده قابل شبیه‌سازی بوده و روند تغییرات آن قابل پیش‌بینی است.

قدردانی

این مقاله، از طرح پژوهشی با موضوع همین مقاله استخراج شده که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناوه (محل خدمت نویسنده اصلی) انجام شده است و بدینوسیله کمال تشکر و قدردانی از این واحد بعمل می‌آید.

بررسی نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که این پارامتر در عدد میننگ $0/015$ که تقریباً در میانه محدوده مطالعاتی زبری قرار گرفته است، دارای بیشترین مقدار و با فاصله گرفتن از آن، مقادیر کمتری را خواهد داشت، اما افزایش دبی جریان باعث کاهش این پارامتر شده و شیب تغییرات آن با افزایش دبی، کاهش می‌یابد. مشابه پارامتر قبلی و به همان دلیل، افزایش ارتفاع شیب‌شکن باعث افزایش $\frac{\Delta V}{V_0}$ می‌شود، همان‌طور که افزایش شیب کانال، با کاهش این پارامتر همراه است. علاوه بر این، افزایش عرض کانال، افزایش این پارامتر را به همراه دارد. همان‌طور که در نتایج بالا مشاهده گردید، پارامترهای متغیر در شرایط هیدرولیکی جریان

مراجع

- 1- Bakhmeteff, B. A. (1932), "Hydraulics of Open Channels", Mc Graw-Hill, pp 295.
- 2- Moore, W. L. (1943), "Energy Loss at the Base of Free Overfall", Trans., ASCE, 108, pp 1343- 1360.
- 3- White, M. P. (1943), "Discussion of Moore (1943)", Trans., ASCE, 108, pp 1361-1364.
- 4- Gill, M. A. (1979), "Hydraulics of Rectangular Vertical Drop Structures", Journal of Hydraulic Research, 17(4), pp 289-302.
- 5- Rand, W. (1955), "Flow Geometry at Straight Drop Spillways", Proc. ASCE, 81(No. 791), pp 1-13.
- 6- Rajaratnam, N. and Chamani, M. R. (1995), "Energy Loss at Drops", Journal of Hydraulic Research, 33(3), pp 373-384.
- 7- Wu, S. and Rajaratnam, N. (1997), "Impinging Jet and Surface Flow Regimes at Drops", Journal of Hydraulic Engineering, 36(1), pp 69-74.
- 8- Brunner, Gary W. (2010), "HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual", U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.

