

## مطالعه آزمایشگاهی عوامل موثر بر شکل‌گیری جریان موجکی در سرریزهای لبه‌پهن

محمد رضا مددی<sup>۱\*</sup> - داود فرسادی زاده<sup>۲</sup> - علی حسین زاده دلیر<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۷/۲

### چکیده

جریان موجکی در سرریزهای لبه‌پهن، پدیده‌ای است که تحت شرایط هیدرولیکی خاصی رخ می‌دهد. در این حالت سطح جریان روی سرریز به شکل موجک‌های سینوسی در آمده و تعداد این موجک‌ها ممکن است از یک تا بیش از ۱۰ عدد متغیر باشد. وقوع این پدیده باعث می‌شود که اندازه-گیری جریان توسط این سازه‌ها با خطا صورت گیرد. در این تحقیق ضمن معرفی مهمترین عوامل موثر بر ایجاد جریان موجکی، تاثیر پارامترهای هندسی سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی بر روی شکل‌گیری و مشخصه‌های این جریان در حالتی که فقط یک موجک بر روی سرریز تشکیل شده باشد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با کاهش شیب وجه بالادست سرریز از حالت قائم به زاویه شیب ۴۰ درجه، ارتفاع نسبی موجک ۷۸ درصد کاهش یافته و طول نسبی موجک ۵۵ درصد افزایش داشته و موقعیت تشکیل موجک به سمت پایین دست منتقل شد. با تغییر انحنای پیشانی بالادست سرریز از حالت لبه‌تیز به شعاع انحنای نسبی ۰/۵، ارتفاع نسبی موجک به میزان ۸۰ درصد کاهش یافت. زبر کردن سطح تاج سرریز نیز بسته به موقعیت ایجاد زبری، سبب تضعیف یا از بین رفتن موجک شد.

واژه‌های کلیدی: اندازه‌گیری جریان، پارامترهای هندسی سرریز، مشخصه‌های جریان

### مقدمه

$$\frac{L_{Crest}}{(H_1 - \Delta Z)} > 1.5 - 3 \quad (1)$$

مشخصه‌های جریان روی سرریزهای لبه‌پهن مورد بررسی زیادی قرار گرفته است (۲، ۷، ۸، ۹، ۱۱، ۱۴ و ۱۵) اما در این میان مطالعاتی که پیرامون جریان موجکی روی سرریزهای لبه‌پهن صورت گرفته بسیار ناچیز می‌باشد.

### جریان موجکی روی سرریز لبه‌پهن

وقتی که عمق آب بالادست سرریز ( $d_1$ ) نسبت به ارتفاع سرریز ( $\Delta Z$ ) ناچیز باشد، محققان زیادی به مشاهده تشکیل موجک‌هایی بر روی تاج سرریز اشاره کردند (۲ و ۷ و ۸). به عبارت دیگر برای جریان‌های با دبی کم (رابطه ۲) هنگامی که عدد فرود در مقطعی که جریان کمترین عمق را روی تاج دارا است ( $d_{min}$ )، کوچکتر از ۱/۵ باشد جریان موجکی تشکیل می‌شود (۸) (شکل ۱-ب).

$$\frac{d_1 - \Delta Z}{\Delta Z} \square 1 \quad (2) \text{ جریان با دبی کم}$$

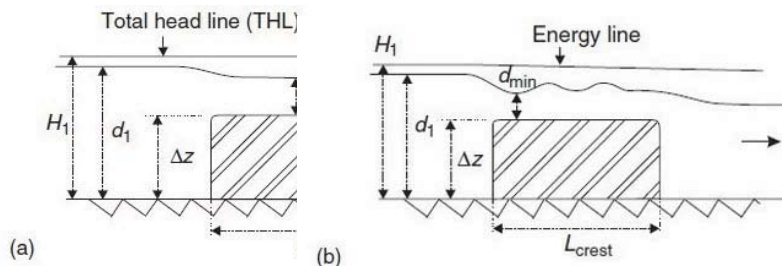
$$Fr_1 < 1.5 \rightarrow \frac{q}{\sqrt{gd_{min}^3}} < 1.5 \quad (3) \text{ جریان موجکی}$$

سرریزها سازه‌های هیدرولیکی ساده‌ای هستند که به منظور کنترل سطح آب و اندازه‌گیری شدت جریان در کانال‌های انتقال آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. سرریزها با توجه به مشخصات هیدرولیکی و فیزیکی سازه‌ای به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. در سرریزهای لبه‌پهن<sup>۴</sup>، لبه‌ی سرریز به اندازه کافی پهن بوده و در مقایسه با سایر ابعاد آن دارای اندازه قابل ملاحظه‌ای می‌باشد که این امر باعث توزیع هیدرواستاتیک فشار در طول تاج سرریز می‌شود و سرریز به گونه‌ای عمل خواهد کرد که در بالادست آن جریان زیر بحرانی و در روی آن جریان فوق بحرانی ایجاد شود و در نتیجه یک مقطع کنترل جریان بحرانی در مجاورت لبه بالادست سرریز به وجود خواهد آمد (شکل ۱-ا). طبق تعریف در سرریز لبه‌پهن نسبت طول تاج سرریز ( $L_{Crest}$ ) به بار کل آب روی سرریز ( $H_1 - \Delta Z$ ) در مقطع بالادست باید بزرگتر از ۱/۵ تا ۳ باشد (۶ و ۱۰).

۱- گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، جمهوری اسلامی ایران

۲ و ۳- دانشیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(\* نویسنده مسئول: Email: Mohamad\_Reza\_Madadi@yahoo.com)



شکل ۱- (a) جریان روی سرریز لبه‌پهن استاندارد (b) جریان موجکی (چانسون، ۲۰۰۴)

باشد (۱۴). هاگر و اسپوالت (۸) گسیختگی جریان در نوک ورودی سرریز را مورد بررسی قرار داده و برای آن تابعی ارائه نمودند. طبق نظر آن‌ها در شرایطی که نسبت بار آب روی سرریز به طول تاج سرریز کمتر از ۰/۱ باشد، شکل کلی جریان بر روی سرریز لبه‌پهن به صورت موج بوده و لزجت عامل اصلی ایجاد موجک در این شرایط می‌باشد. مهندسان باید از فراهم آوردن شرایطی که در آن جریان موجکی ایجاد شود اجتناب کنند زیرا در صورت وقوع این پدیده، سرریز قابلیت اندازه‌گیری جریان عبوری را نداشته و به علاوه اینکه ممکن است موجک‌های ایجاد شده به سمت پایین‌دست در کانال اصلی تکثیر یابند و جریان را مغشوش کنند که این خود موجب فرسایش بستر و کناره‌ها شده و در پایین‌دست مجاری بزرگ، کشتیرانی را با مشکل روبرو می‌کند. اگرچه مطالعات زیادی در مورد پرش هیدرولیکی نوسانی در کانال‌های روباز صورت گرفته (۱، ۳، ۴، ۶ و ۱۰) ولی تاکنون مطالعه کاملی بر روی جریان موجکی روی سرریزهای لبه‌پهن انجام نشده است و عوامل موثر بر روی مشخصه‌های این جریان (طول موجک، ارتفاع موجک، موقعیت تشکیل موجک روی سرریز) به خوبی شناخته نشده است. در این تحقیق تاثیر شیب وجه بالادست سرریز لبه‌پهن مستطیلی، شعاع انحنای پیشانی بالادست سرریز و زبری سطح تاج سرریز بر این مشخصه‌ها بررسی گردید.

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شد. تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشد:

**سیستم تامین آب:** شامل مخزنی زیرزمینی است که آب آن از طریق یک پمپ، به یک مخزن هوایی پمپاژ می‌شود (شکل‌های ۳ و ۲). مخزن هوایی تامین کننده ارتفاع ثابت آب برای فلوم می‌باشد. در نهایت آب پس از عبور از فلوم مجدداً به سمت مخزن اصلی هدایت می‌شود.

که در آن  $q$  دبی در واحد عرض سرریز و  $Fr_1$  عدد فرود در مقطعی که جریان کمترین عمق را روی سرریز دارد، می‌باشد. معیار کاربردی‌تر دیگری که توسط محققین ارائه شده است، شرایط تشکیل جریان موجکی را تابعی از طول تاج سرریز در جهت جریان و بار آب روی آن می‌داند (۵):

$$\frac{H_1 - \Delta Z}{L_{Crest}} \leq 0.1 \quad (4)$$

جریان موجکی دارای ماهیت دوبعدی می‌باشد و حداقل عمق جریان روی تاج سرریز همواره در بالادست اولین موجک تشکیل شده رخ می‌دهد و نوسانات سطح آب در طول تاج سرریز گسترش می‌یابد (۴). جریان موجکی از نظر هیدرولیکی شباهت زیادی به پرش هیدرولیکی نوسانی<sup>۱</sup> ( $2.5 < Fr < 4.5$ ) و امواج نوسانی<sup>۲</sup> در کانال‌های منشوری دارد. برای اعداد فرود نزدیک به یک، نتایج آزمایشگاهی با نتایجی که از حل معادله بوزینسک<sup>۳</sup> برای محاسبه مشخصه‌های جریان موجکی روی سرریز حاصل می‌شود تبعیت می‌کند ولی با افزایش عدد فرود از مقادیر حاصل از معادله بوزینسک فاصله گرفته بطوریکه برای اعداد فرود بزرگ، ارتفاع موجک با افزایش عدد فرود کاهش می‌یابد (۴). وقتی که  $Fr_1$  به مقدار  $1/46$  برسد موجک تشکیل شده روی سرریز از بین می‌رود و این در حالی است که در پرش هیدرولیکی نوسانی حذف موجک‌ها علاوه بر عدد فرود، تابع نسبت  $h/b$  و شرایط جریان ورودی نیز می‌باشد (۴). با توجه به این که جریان موجکی در سرریزها در حالتی که عمق جریان روی سرریز کم باشد اتفاق می‌افتد، تاثیر قابل ملاحظه لایه مرزی بر روی این پدیده و سایر مشخصه‌های جریان نباید نادیده گرفته شود (۱۱). هال و مش (۹) خصوصیات جریان را بر روی سرریز لبه‌پهن با در نظر گرفتن تئوری لایه مرزی به طور کامل و تحلیلی مطالعه نمودند. توسعه لایه مرزی تابعی از شکل لبه بالادست تاج سرریز می‌-

- 1- Undular Hydraulic Jump
- 2- Undular Waves
- 3- Boussinesq Equation

### روش انجام آزمایش‌ها

پس از نصب مدل در محل مورد نظر و انجام عملیات آب‌بندی، پمپ را روشن کرده و به آرامی شیر کنترل دبی را که بعد از پمپ قرار دارد باز نموده و بعد از ایجاد جریان یکنواخت در فلوم، عمق آب در بالادست سرریز در سطح مورد نظر ثابت نگه داشته شد و میزان دبی عبوری اندازه‌گیری شد. تراز سطح آب در طول سرریز و نقاطی واقع در بالادست سرریز قرائت شد. محدوده دبی در این آزمایش‌ها بین ۳ تا ۲۰ لیتر در ثانیه متغیر بود و در این فاصله آزمایش‌های متعددی صورت گرفت که اکثر آن‌ها در محدوده‌ای انجام شد که جریان موجکی روی سرریز تشکیل شود. سری اول آزمایش‌ها بر روی یک سرریز لبه‌پهن مستطیلی استاندارد صورت گرفت. آزمایش‌های ابتدایی برای تعیین شرایط تشکیل جریان موجکی انجام شد و شرایط هیدرولیکی که در آن یک موجک روی سرریز تشکیل می‌شود بدست آمد. پروفیل سطح جریان به ازای دبی‌های مختلف روی سرریز برداشت شد.

**فلوم آزمایشگاهی:** به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۲۵ متر و ارتفاع ۰/۵ متر از جنس فلز با دیواره‌های شیشه‌ای که شیب کف آن ثابت و برابر با ۰/۰۲۲ می‌باشد. این فلوم در بالادست مجهز به آرام‌کننده جریان ورودی می‌باشد.

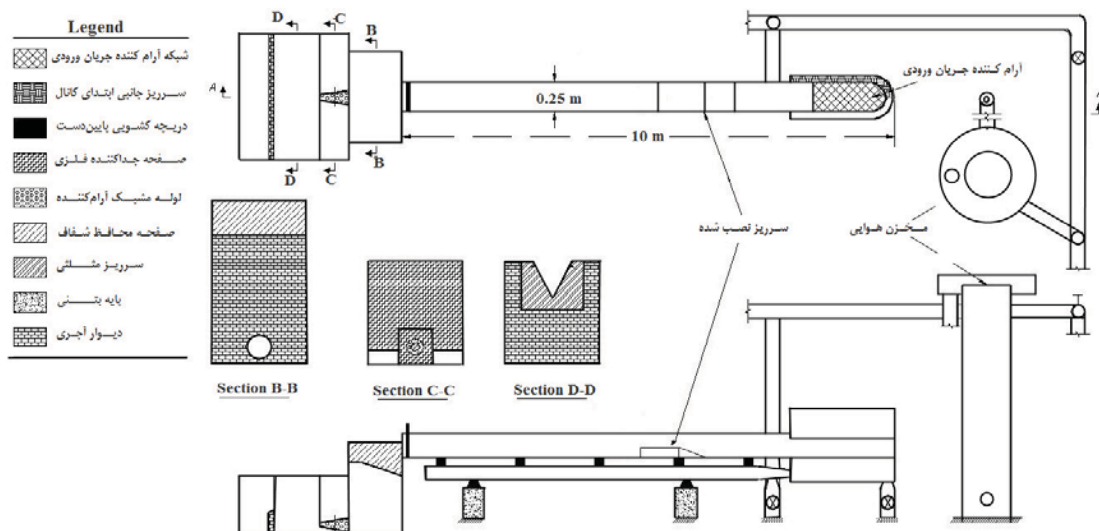
**سیستم اندازه‌گیری جریان:** جریان خروجی از فلوم از طریق یک سرریز لبه‌تیز مثلثی واسنجی شده با زاویه راس ۵۳ درجه اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۲). رابطه دبی در این سرریز به صورت  $H^{3/5}$   $Q=0/6918$  می‌باشد. در این رابطه ارتفاع آب روی تاج سرریز مثلثی (H) بر حسب متر و دبی (Q) بر حسب متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

**اندازه‌گیری سطح آب:** برای اندازه‌گیری پروفیل سطح آب از یک سطح سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر استفاده شد. سطح آب در محور مرکزی فلوم بر روی سرریز و نقاطی واقع در بالادست سرریز اندازه‌گیری شد.

**مدل فیزیکی سرریز:** سرریزها از جنس پلی‌اتیلن بوده و عرض همه آن‌ها مطابق با عرض فلوم ۰/۲۵ متر و طول تاج و ارتفاعشان نیز به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شد.



شکل ۲- نمونه‌های تجهیزات آزمایشگاهی در تحقیق حاضر به ترتیب از راست به چپ: مخزن هوایی، فلوم، سرریز مثلثی



شکل ۳- نمای شماتیک سیستم تامین آب

تساوی (۸) (؟؟؟) از عبارت اول داخل پرانتز به علت ناچیز بودن تغییرات آن می‌توان چشم‌پوشی کرد. از طرفی در این تحقیق مقادیر  $R_d, B, \Delta Z$  و  $\beta$  در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد و  $R_u$  برابر با صفر بود. همچنین حداقل عمق جریان روی سرریز  $0.4$  متر در نظر گرفته شد تا تاثیر کشش سطحی بر روی جریان ناچیز باشد (۱۲ و ۱۳). در نهایت رابطه ۸ را به صورت زیر می‌توان ساده نمود:

$$q = \sqrt{gH^2} f_1\left(\frac{R_u}{H}, \theta\right) \quad (9)$$

همان طور که از رابطه ۹ مشخص است از عوامل موثر بر جریان روی این سرریزها زاویه شیب وجه بالادست و شعاع انحنای پیشانی بالادست سرریز می‌باشد. از این رو در این تحقیق تاثیر این پارامترها بر روی مشخصه‌های جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

### نتایج و بحث

در اثر وجود یک مانع مثل سرریز در مسیر جریان زیربحرانی، انرژی مخصوص جریان کاهش یافته و سطح آب هنگام عبور از روی سرریز کاهش می‌یابد. کاهش عمق آب بر روی تاج سرریز همچنان ادامه پیدا کرده و تا رسیدن به عمق بحرانی، پروفیل  $M_2$  بر روی سرریز شکل می‌گیرد. در این تحقیق مختصات پروفیل سطح جریان عبوری از روی سرریز را که برداشت شده بود وارد محیط نرم‌افزار اتوکد<sup>۱</sup> کرده و به کمک امکاناتی که در این نرم افزار وجود دارد، شکل سرریز و پروفیل جریان عبوری از روی آن رسم گردید. پارامترهایی که در این بخش ذکر خواهند شد در شکل ۴ معرفی شده‌اند.

### پروفیل سطح آب روی سرریز لبه‌پهن استاندارد به ازای دبی‌های مختلف

شکل ۵ پروفیل سطح آب روی سرریز لبه‌پهن استاندارد را به ازای دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. در ابتدای آزمایش ( $q=0.079 \text{ m}^2/\text{s}$ ) پروفیل جریان روند طبیعی خود را داشت که هنگام مواجهه جریان زیربحرانی با یک مانع رخ می‌دهد (کاهش عمق). با کاهش بیشتر دبی در یک محدوده مشخص، ناگهان پروفیل جریان تغییر شکل داده و یک موجک روی سرریز تشکیل شد. با ادامه‌ی فرایند کاهش دبی موجک تشکیل شده تضعیف شد و به چند موجک با طول موج و ارتفاع موج کمتر تبدیل شد که در طول تاج سرریز انتشار یافت (شکل ۵). آزمایش‌ها نشان داد زمانی که عدد فرود جریان در مقطعی که جریان آب کمترین عمق ( $d_{\min}$ ) را روی سرریز دارد در محدوده

در سری دوم آزمایش‌ها سطح تاج سرریز بطور مصنوعی زبر شد. بدین منظور از ذرات شن با اندازه متوسط ۳ میلی‌متر استفاده شد. زبری در دو حالت بررسی شد. در حالت اول سطح تاج سرریز واقع در پایین دست قله‌ی موجک زبر شد و قسمت بالادست آن بدون تغییر باقی ماند. در حالت دوم تاج سرریز از ابتدای لبه بالادست تا محل قله موجک زبر گشت در حالی که قسمت پایین دست بدون زبری بود. پروفیل موجک روی سرریز در هر دو حالت اندازه‌گیری شد. در ادامه برای بررسی تاثیر شیب وجه بالادست بر روی پدیده جریان موجکی از ۴ شیب ۰.۲۱، ۰.۴۰، ۰.۵۴ و ۰.۷۴ درجه برای وجه بالادست استفاده شد و نتایج آنها با حالتی که وجه بالادست قائم بود مورد مقایسه قرار گرفت. در نهایت برای بررسی تاثیر انحنای پیشانی بالادست بر روی مشخصه‌های جریان موجکی، به پیشانی بالادست سرریز انحنای داده شد. چهار شعاع انحنای با نسبت شعاع انحنای به ارتفاع سرریز ( $R/DZ$ ) ۰.۲۱، ۰.۳۳، ۰.۴۱ و ۰.۵ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج هر یک با حالتی که پیشانی بالادست سرریز لبه‌تیز بود مقایسه شد. همان طور که گفته شد هدف از این تحقیق بررسی تغییر خصوصیات هندسی سرریز لبه‌پهن استاندارد روی جریان موجکی می‌باشد.

### تحلیل ابعادی

به طور کلی عوامل موثر بر جریان در سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی با انحنای پیشانی بالادست و پایین دست شیب‌دار، شامل:  $H$  بار کل،  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\sigma$  کشش سطحی،  $g$  شتاب ثقل،  $L_{crest}$  طول سرریز در جهت جریان،  $B$  عرض سرریز،  $\Delta Z$  ارتفاع سرریز،  $R_u$  و  $R_d$  به ترتیب شعاع انحنای پیشانی بالادست و پایین دست،  $\theta$  و  $\beta$  به ترتیب زاویه شیب وجه بالادست و پایین دست سرریز می‌باشند (شکل ۴):

$$F(q, H, \rho, \mu, \sigma, g, L_{crest}, B, \Delta Z, R_u, R_d, \theta, \beta) = 0 \quad (5)$$

با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام، پارامترهای بی‌بعد به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$f\left(\frac{q}{\sqrt{gH^2}}, \frac{v}{\sqrt{gH^2}}, \frac{\sigma}{\rho g H^2}, \frac{L_{crest}}{H}, \frac{B}{H}, \frac{\Delta Z}{H}, \frac{R_u}{H}, \frac{R_d}{H}, \theta, \beta\right) = 0 \quad (6)$$

رابطه بالا را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{q}{\sqrt{gH^2}} = f_1\left(\frac{v}{\sqrt{gH^2}}, \frac{\sigma}{\rho g H^2}, \frac{L_{crest}}{H}, \frac{B}{H}, \frac{\Delta Z}{H}, \frac{R_u}{H}, \frac{R_d}{H}, \theta, \beta\right) \quad (7)$$

یا:

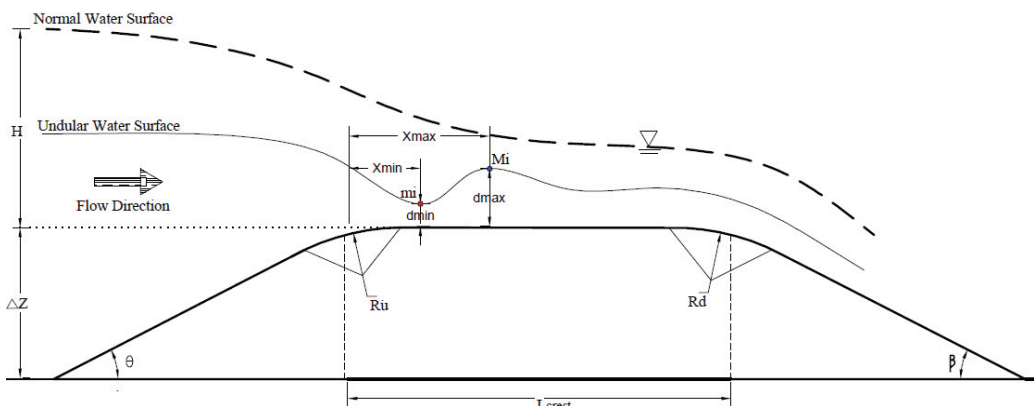
$$q = \sqrt{gH^2} f_1\left(\frac{v}{\sqrt{gH^2}}, \frac{\sigma}{\rho g H^2}, \frac{L_{crest}}{H}, \frac{B}{H}, \frac{\Delta Z}{H}, \frac{R_u}{H}, \frac{R_d}{H}, \theta, \beta\right) \quad (8)$$

در سمت راست

## تاثیر شیب وجه بالادست سرریز لبه‌پهن بر روی جریان موجکی

یکی از عوامل موثر بر تشکیل جریان موجکی و میزان قدرت موجک‌ها جدایی جریان در نوک بالادست سرریز می‌باشد. برای بررسی تاثیر این عامل از شیب‌های مختلفی برای وجه بالادست سرریز استفاده شد. شیب وجه بالادست ( $\theta$ ) تاثیر زیادی بر روی خطوط جریان گذاشته و میزان جداسازی جریان را بر روی سرریز تحت تاثیر قرار داد. در این آزمایش‌ها از ۴ شیب ۲۱، ۴۰، ۵۴ و ۷۴ درجه برای وجه بالادست سرریز استفاده شد و نتایج آن با وجه بالادست قائم مقایسه شد. کاهش شیب وجه بالادست سرریز از ۹۰ درجه به ۴۰ درجه موجب شد که طول نسبی موجک ( $L_w/L_{crest}$ ) ۵۵ درصد افزایش و ارتفاع نسبی موجک ( $h_w/DZ$ ) ۷۸ درصد کاهش یابد و موقعیت تشکیل آن به سمت پایین دست منتقل شود به طوری که در سرریز با وجه بالادست قائم نقطه شروع موجک ( $m_1$ ) در نزدیکترین فاصله نسبت به ابتدای نوک بالادست سرریز بود.  $(X_{max}-X_{min})=LW$  و  $d_{max}-d_{min}=hw$  ارتفاع موجک می‌باشد.

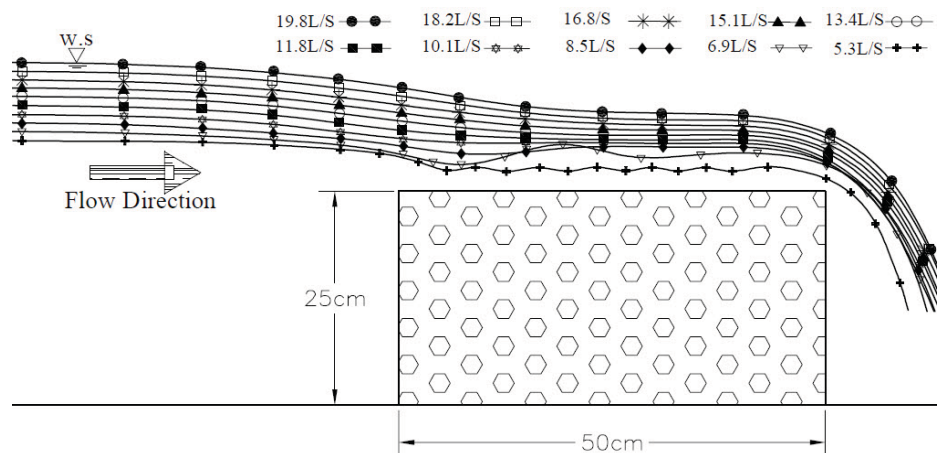
۰/۸۹ تا ۱/۲۵ باشد جریان موجکی روی سرریز تشکیل می‌شود (جدول ۱). در این حالت  $q$  در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۳۴ متر مربع در ثانیه متغیر بود. در حالتی که  $q$  در حد  $0.28 \text{ m}^2/\text{s}$  ثابت نگه داشته شد، یک موجک نسبتاً ثابت، قوی و پایدار روی سرریز شکل گرفت. همان طور که گفته شد این تحقیق حالتی را که در آن یک موجک روی سرریز تشکیل شد مورد بررسی قرار می‌دهد. به همین منظور در تمام آزمایشاتی که برای بررسی تاثیر شعاع انحنا و شیب وجه بالادست و زبری تاج سرریز روی جریان موجکی صورت گرفت،  $q$  در مقدار  $0.28 \text{ m}^2/\text{s}$  ثابت نگه داشته شد. لازم به ذکر است که در حالت  $Fr_1=1/25$  ( $q=0.34 \text{ m}^2/\text{s}$ ) موقعیت قله موجک ثابت نبود و در طول زمان به سمت پایین دست و بالادست جابجا می‌شد. در این حالت بیشترین ارتفاع موجک در محور مرکزی فلوام بوده و جریانات چرخشی در سطح موجک در مجاورت دیواره‌های جانبی فلوام به وقوع پیوست (شکل ۶). از آنجایی که سنجش مشخصه‌های موجک در این حالت با دقت بالایی همراه نبود، لذا در حالتی که یک موجک پایدار و ثابت روی سرریز تشکیل شد مقایسه‌ها انجام شد.



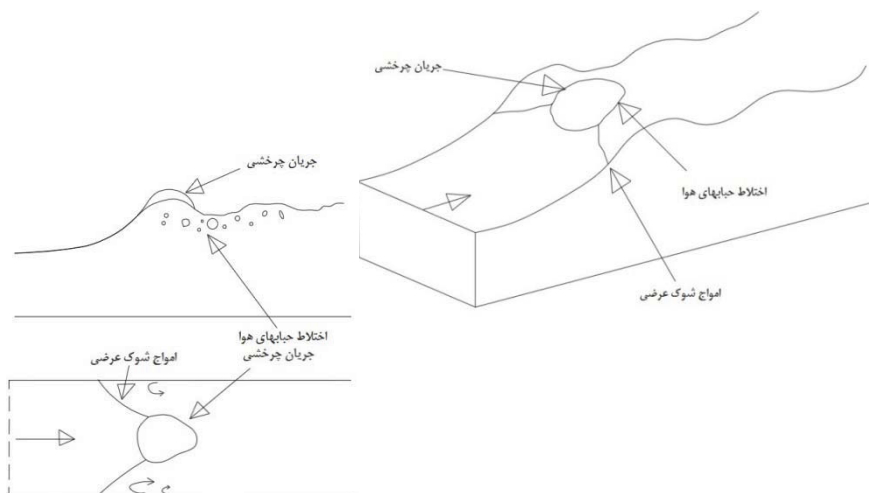
شکل ۴- جریان روی سرریز لبه‌پهن

جدول ۱- مقایسه شرایط ایجاد جریان موجکی در این تحقیق با سایر محققین

توضیحات	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	عدد فرود در مقطع یک $Fr_1$	عمق بحرانی نسبی $dc/w$	محقق-سال تحقیق
عرض سرریز ( $W$ ) = ۳۰۵ میلی‌متر	۷/۶ - ۴/۸	۱/۰۹ - ۰/۸۶	۰/۱۳۱ - ۰/۰۹۶	وودبرن (۱۹۳۲)
عرض سرریز = ۵۰۰ میلی‌متر	۴۵/۹ - ۳۹/۶	۱/۳۰ - ۰/۹۱	۰/۱۹۰ - ۰/۱۷۲	تایسون (۱۹۵۰)، سره (۱۹۵۳)
عرض سرریز = ۴۹۹ میلی‌متر، طول تاج = ۵۰۰ میلی‌متر، ارتفاع سرریز = ۴۰۱ میلی‌متر	۸/۲۵ - ۳/۱۵	۱/۴۵ - ۱/۱۹	۰/۰۶۱ - ۰/۰۳۲	هاگر و اسچوالد (۱۹۹۴)
عرض سرریز = ۲۵۰ میلی‌متر، طول تاج = ۵۰۰ میلی‌متر، ارتفاع = ۲۵۰ میلی‌متر	۸/۵ - ۳	۱/۲۵ - ۰/۸۹	۰/۱۴۰ - ۰/۰۹۳	تحقیق حاضر



شکل ۵- پروفیل سطح جریان روی سرریز لبه پهن استاندارد



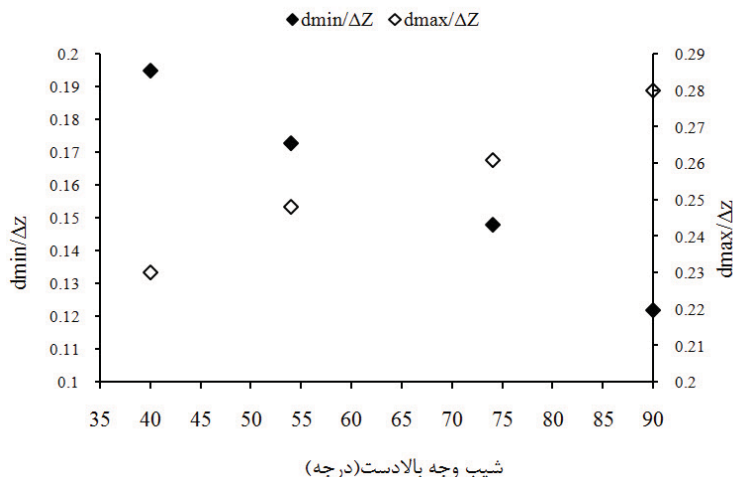
شکل ۶- جریان چرخشی در سطح موجک و دیواره‌های جانبی قلوم

جریان موجکی از ۴ شعاع انحنا با مقادیر ۵/۲۲، ۸/۲۵، ۱۰/۳ و ۱۲/۶ سانتی‌متر استفاده شد و نتایج آن با سرریز لبه پهن تیز گوشه مورد مقایسه قرار گرفت. ایجاد انحنا در پیشانی بالادست سرریز لبه پهن سبب عبور آسان‌تر جریان و افزایش ضریب دبی عبوری از روی آن شد. با ایجاد انحنا میزان جداشدگی جریان تا حد چشمگیری کاهش یافت. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشخص است شعاع‌های انحنای کوچک تاثیر چندانی بر روی قدرت و موقعیت موجک ندارند. با افزایش شعاع انحنا به مقدار ۱۰/۳ سانتی‌متر موجک تشکیل شده روی سرریز تحت تاثیر قرار گرفته و قدرت آن به طور چشمگیری نسبت به سرریز تیز گوشه کمتر شد و موقعیت آن نیز به سمت پایین-دست منتقل گردید.

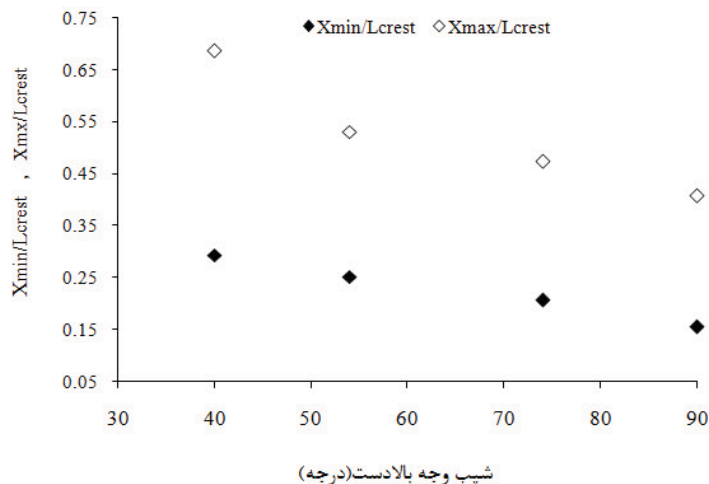
در سرریز با شیب بالادست ۲۱ درجه موجک تشکیل شده بسیار ضعیف بوده و به سختی قابل تشخیص است. نمودارهای شکل ۷ و ۸ مشخصه‌های ارتفاعی و طولی موجک را به ازای شیب‌های مختلف وجه بالادست نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است با ملایم شدن شیب وجه بالادست از ارتفاع موجک کاسته شده و به طول آن افزوده می‌شود. به عبارت دیگر قدرت موجک تا حدود زیادی کاهش می‌یابد به طوری که در شیب ۲۱ درجه عملاً موجکی بر روی سرریز تشکیل نشد (شکل ۹).

### تاثیر شعاع انحنای پیشانی بالادست سرریز بر روی جریان موجکی

برای بررسی تاثیر شعاع انحنای پیشانی بالادست سرریز بر روی



شکل ۷- تغییر مشخصه‌های ارتفاعی موجک در برابر شیب وجه بالادست سرریز



شکل ۸- تغییر مشخصه‌های طولی موجک در برابر شیب وجه بالادست سرریز

### تأثیر زبری تاج سرریز بر روی جریان موجکی

از دیگر خصوصیات هندسی سرریز لبه‌پهن که تأثیر آن بر روی جریان موجکی بررسی شد زبری تاج سرریز بود. همانطور که گفته شد سرریزها از جنس پلی‌اتیلن بوده و زبری سطح تاج آنها بسیار ناچیز بود. برای بررسی عامل زبری تاج، سطح تاج سرریز به دو قسمت تقسیم شد. قسمت اول از ابتدای ورودی سرریز آغاز شده و تا نقطه‌ی متناظر با قله موجک روی تاج ادامه می‌یافت و قسمت دوم از انتهای بخش اول آغاز شده و تا انتهای تاج سرریز را شامل می‌شد. ابتدا قسمت دوم تاج به کمک ذرات شن با  $D_{50}=3\text{mm}$  بطور مصنوعی زبر شد. همانطور که از شکل ۱۳ مشخص است، در این حالت موجک تشکیل شده روی سرریز تبدیل به دو موجک با قدرت کمتر شد. به عبارت دیگر زبر کردن قسمت پایین دست تاج سرریز که محل شروع آن دقیقاً از نقطه نظیر قله موجک روی تاج شروع می‌شود سبب

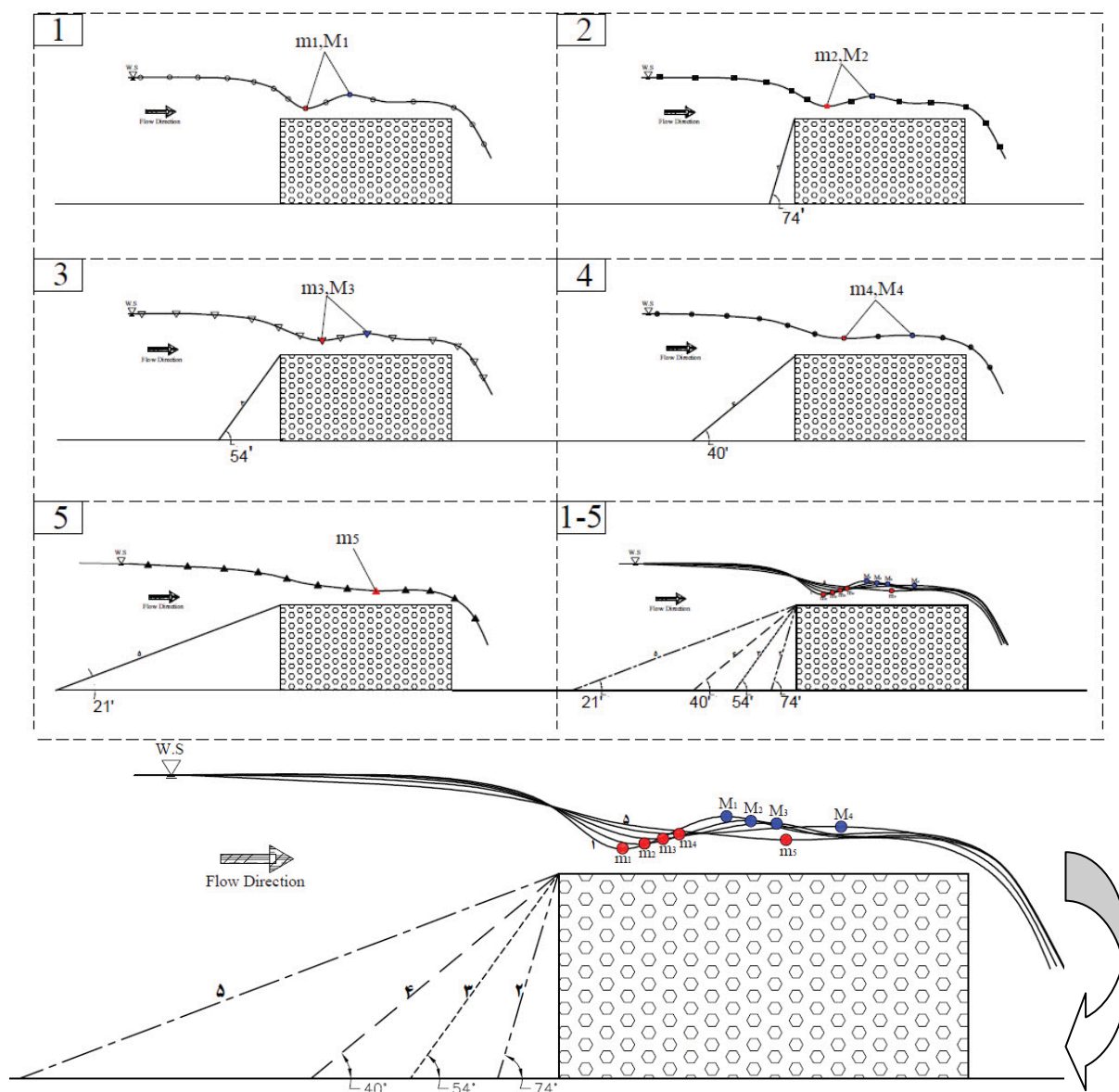
در نهایت در سرریز با شعاع انحنای  $۱۲/۶$  سانتی‌متر تشکیل موجک فقط به صورت افزایش تدریجی عمق بر روی سرریز ظاهر شد که در واقع حاکی از یک موجک با ارتفاع ناچیز و طول زیاد می‌باشد که در تمام طول تاج سرریز توسعه یافته است. در این حالت پس از محل تشکیل عمق بحرانی - که اندکی بالاتر از لبه بالادست تاج بود - جریان پروفیل  $M_3$  را تا انتهای تاج سرریز به خود گرفت و در انتهای تاج نیز در اثر ریزش جریان پروفیل  $M_2$  به وقوع پیوست. نحوه تغییر مشخصه‌های موجک در این حالت در نمودار شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که انحنای پیشانی بالادست سرریز از نظر هیدرولیکی مشابه با شیب‌دار کردن وجه بالادست سرریز عمل می‌کند و باعث استهلاک قدرت موجک می‌شود.

انحنای پیشانی بالادست و زبری سطح تاج سرریز لبه‌پهن مستطیلی بر روی مشخصه‌های جریان موجکی مورد بررسی قرار گرفت. کم شدن شیب وجه بالادست از حالت قائم به زاویه شیب ۲۱ درجه سبب شد که ارتفاع نسبی موجک ( $hw/\Delta Z$ ) به میزان ۷۸ درصد کاهش یافته و طول نسبی آن ( $L_w/L_{crest}$ )، ۵۵ درصد افزایش یابد. همچنین در اثر این تغییر شیب، موقعیت نسبی نقاط کمینه و بیشینه موجک ( $x_{max}/L_{crest}$  و  $x_{min}/L_{crest}$ ) به ترتیب ۹۰ و ۶۸ درصد به سمت پایین دست تاج منتقل شد.

تضعیف موجک اولیه و تبدیل آن به دو موجک ضعیف‌تر شد. در مرحله بعد قسمت بالادست نقطه متناظر با قله تاج سرریز به مانند مرحله اول زبر شد و قسمت پایین دست صاف باقی ماند. زبر کردن قسمت بالادست تاج سبب محو کامل جریان موجکی شده و موجب شد پروفیل جریان شکل طبیعی خود را هنگام عبور از روی سرریز داشته باشد ( $M_2$ ).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر سه پارامتر هندسی شیب وجه بالادست،

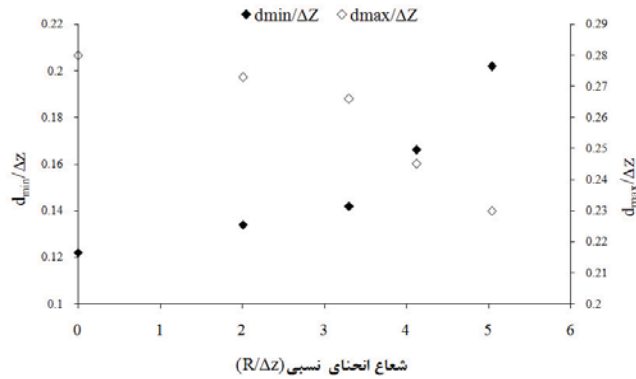


شکل ۹- تغییرات پروفیل سطح جریان موجکی به ازای تغییر شیب

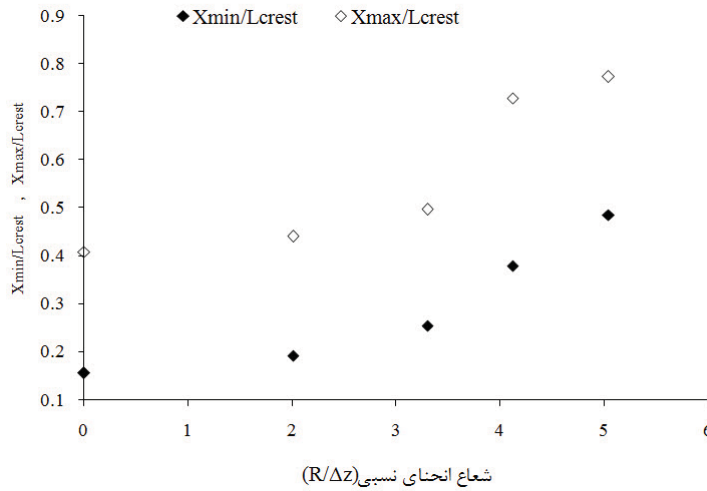


برای محدوده‌های وسیع‌تر نیاز به انجام تحقیقات بیشتر می‌باشد. برای جلوگیری از تشکیل و گسترش جریان موجکی روی سرریزهای لبه-پهن که منجر به تلاطم جریان پایین‌دست و ایجاد خطای اندازه‌گیری توسط این سازه‌ها می‌شود، می‌توان از یکی از سه راهکار شیب‌دار کردن وجه بالادست سرریز، ایجاد انحنا در پیشانی بالادست سرریز و زبر کردن سطح تاج سرریز بهره جست.

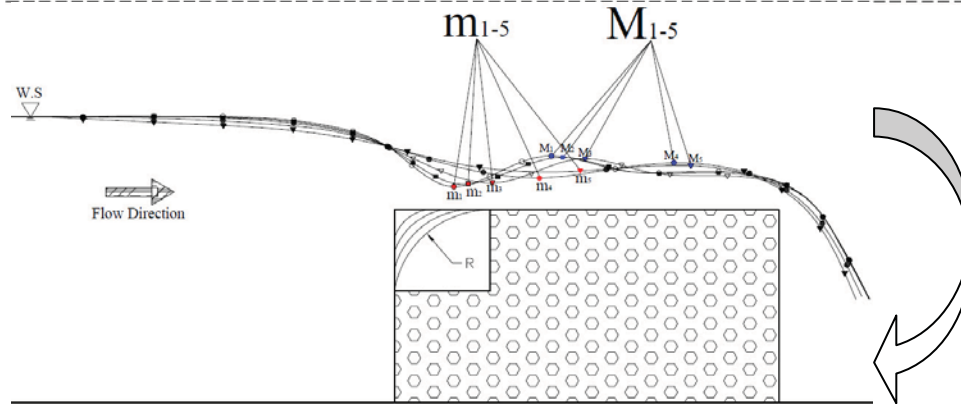
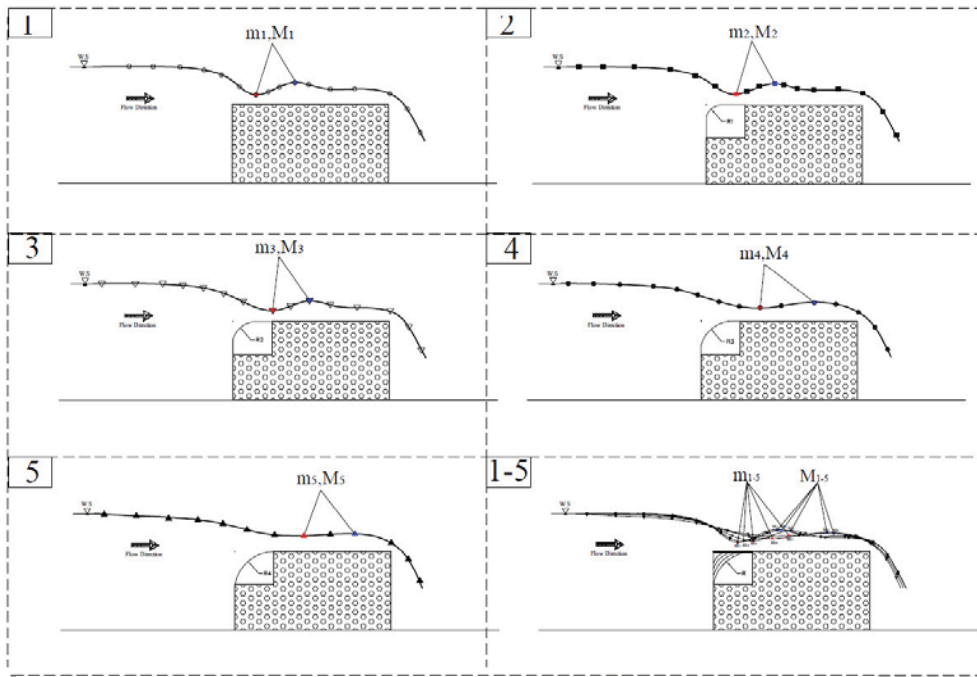
تغییر انحنای پیشانی بالادست سرریز از حالت لبه‌تیز به شعاع انحنای نسبی  $R/\Delta Z = 0/5$  باعث افزایش طول نسبی موجک به میزان ۱۳ درصد، کاهش ارتفاع نسبی موجک به میزان ۸۰ درصد و جابجایی موجک به سمت پایین‌دست شد. زبر کردن سطح تاج سرریز بسته به موقعیت ایجاد زبری سبب تضعیف یا محو کامل موجک شد. نتایج این مطالعه برای محدوده آزمایش‌های تحقیق حاضر معتبر می‌باشد و



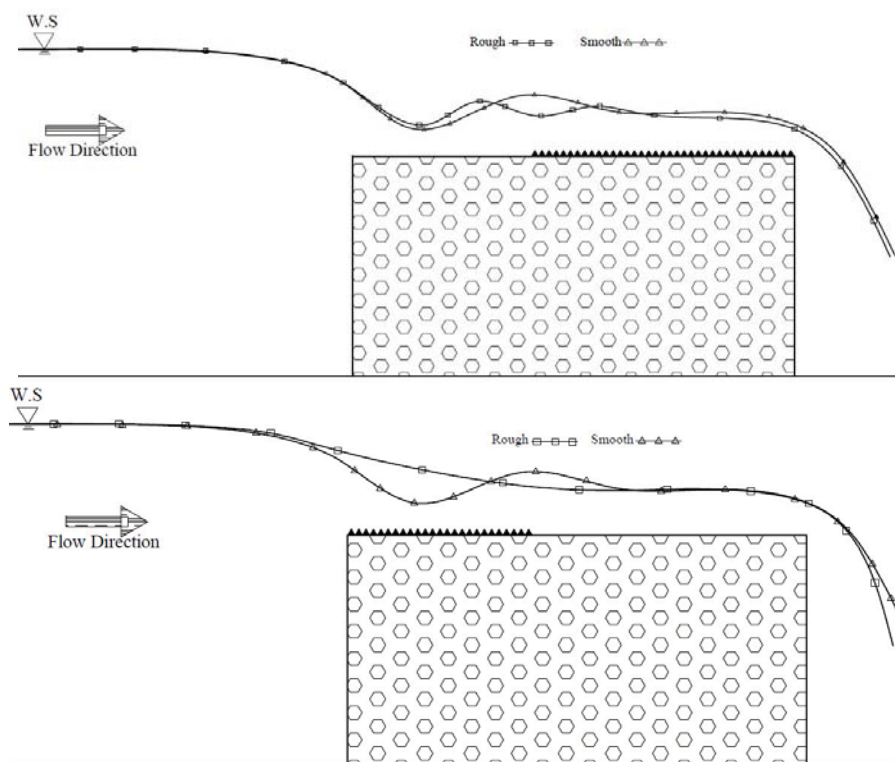
شکل ۱۰- نمودار تغییر مشخصه‌های ارتفاعی موجک در برابر شعاع انحنای پیشانی بالادست سرریز



شکل ۱۱- نمودار تغییر مشخصه‌های طولی موجک در برابر شعاع انحنای پیشانی



شکل ۱۲- تغییرات پروفیل سطح جریان موجی به ازای تغییر شعاع انحنای پیشانی



شکل ۱۳- تاثیر زبری سطح تاج سرریز بر روی پروفیل جریان موجکی

## منابع

- 1- Benmeftah M., Mossa M., and Pollio A. 2010. Considerations on shock wave/boundary layer interaction in undular hydraulic jumps in horizontal channels with a very high aspect ratio. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 29. 415-429.
- 2- Bos M.G. 1976. Discharge measurement structures. Publication No. 161. Delft Hydraulic Laboratory. Delft. Netherlands. 464 pages.
- 3- Chanson H., and Montes J.S. 1995. Characteristics of undular hydraulic jumps. experimental apparatus and flow patterns. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 121 (2) 129-144.
- 4- Chanson H. 1996. Free-surface flows with near-critical flow conditions. *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 23. No. 6. 1272-1284.
- 5- Chanson H. 2004. The hydraulics of open channel flow: An introduction. 2d edition. Department of Civil Engineering, University of Queensland, Australia. 512 pages.
- 6- Chow V.T. 1959. Open channel hydraulics. McGraw-Hill International. New York. USA. 680 pages.
- 7- Govinda Rao N.S., and Muralidhar D. 1963. Discharge characteristics of weirs of finite-crest width. *Journal La Houille Blanche*. Aug/Sept. (5). 537-545.
- 8- Hager W.H., and Schwalt M. 1994. Broad-Crested Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*. 120 (1) 13-26. Discussion: 121 (2) 222-226.
- 9- Hall G.W., and Mech E. 1962. Analytical determination of the discharge characteristics of broad-crested weirs using boundary layer theory. *International civil Engineering*. vol. 22. 177-190.
- 10- Henderson F.M. 1966. Open channel flow. MacMillan Company. New York. USA. 522 pages.
- 11- Isaacs L.T. 1981. Effects of laminar boundary layer on a model broad-crested weir. Research report no. CE28. Department of Civil Engineering, University of Queensland, Australia, 21 pages.
- 12- Novak P., and Cabelka J. 1981. Models in Hydraulic Engineering. Boston. London. Melbourne. Pitman Advanced Publishing Program. 480 pages.
- 13- Peakall J., and Warburton J. 1996. Surface tension in small hydraulic river models- the significance of the Weber number. *Journal of Hydrology*. 35(2): 199-212.
- 14- Ramamurthy S.A., Tim U.S., and Rao M.V. 1998. Characteristics of square-edged and round-nosed broad-crested weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 114(1). 61-73.
- 15- Sarker M.A., and Rhodes D.G. 2004. Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation*. 15. 215-219.

## Effective Parameters on Formation of Undular Flow on the Broad-Crested Weirs

M.R. Madadi<sup>1\*</sup> - D. Farsadizadeh<sup>2</sup> - A. Hosseinzadeh Dalir<sup>3</sup>

Received:21-2-2012

Accepted:23-9-2012

### Abstract

Undular flow on broad-crested weirs is a phenomenon occurs under certain hydraulic conditions. In this case the flow surface on the weir transforms to a sinusoidal wave and the number of waves may vary from one to over 10. Forming of this phenomenon leads to error in measurement of flow discharge by weirs. In this study in addition to introduction of the most effective parameters on undular flow formation, effect of geometric properties of rectangular broad-crested weirs was also investigated when only one wave formed. The results show that reducing the upstream slope from standard angle to 21 degree, decreases the relative wave height by 78 percent and increases the relative wave length by 55 percent. The position of undular wave also displaced toward the downstream. With changing in upstream edge shape from sharp edge to a relative radius of curvature equal to 0.5, the relative height of wave decreased up to 80 percent. Roughening the surface of the weir crest led to attenuation and elimination of undular wave, depending on the position of roughness surface.

**Keywords:** Flow measurement, Geometric parameters of weir, Flow characteristics

---

1-Department of Agriculture, Payame Noor University, I.R. of IRAN

(\*-Corresponding Author Email: Mohamad\_Reza\_Madadi@yahoo.com)

2,3- Associate Professors, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz