

توسعه معادلات تئوری صریح برای برآورد نسبت عمق ثانویه جهش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس

امیر کاسی^۱، مهدی اسمعیلی ورکی^{۲*} و جواد فرهودی^۳

چکیده

حوضچه‌های آرامش یکی از سازه‌های متداول برای استهلاک انرژی جریان‌های پرسرعت هستند. از میان انواع حوضچه‌های آرامش، حوضچه‌های با شیب کف معکوس به دلیل عملکرد هیدرولیکی مناسب‌تر از نظر پارامترهای جهش، جایگزین مناسبی برای حوضچه‌های کلاسیک هستند. از آنجا که در جهش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس وزن توده جهش به عنوان یک نیروی مؤثر در برآیند نیروهای وارد بر حجم کنترل آن وارد می‌شود، برای برآورد دقیق آن نیاز به در نظر گرفتن معادله ریاضی برای نیمرخ جهش و همچنین طول واقعی آن است. از این رو یافتن راه‌کاری که بتواند ضمن در نظر گرفتن نیمرخ واقعی برای جهش، طول جهش هیدرولیکی را به عنوان یک مجهول از معادله نهایی نسبت عمق ثانویه تئوری حذف کند، ارزشمند خواهد بود. در این پژوهش، با در نظر گرفتن نیمرخ‌های خطی، ربع بیضی و سهموی، رابطه‌های صریح برای برآورد نسبت عمق ثانویه جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس استخراج شد. مقایسه‌های انجام شده با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان داد که معادله تئوری با فرض نیمرخ سهموی و خطی دارای خطای کمتری نسبت به نیمرخ ربع بیضی در برآورد نسبت عمق ثانویه است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، جهش هیدرولیکی، شیب کف معکوس، نیمرخ جهش، نسبت عمق ثانویه.

ارجاع: کاسی ا.، اسمعیلی ورکی م. و فرهودی ج. ۱۳۹۳. توسعه معادلات تئوری صریح برای برآورد نسبت عمق ثانویه جهش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵): ۱۵۵-۱۶۶.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۳- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: esmaeili@guilan.ac.ir ، esmaeili.varaki@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۲۹

مقدمه

به طور معمول در انتهای سازه‌هایی مانند سرریز سدها، تنداب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، جریان سرعت زیادی داشته و برای جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین‌دست، احداث سازه‌ای برای استهلاک انرژی جریان و کاهش سرعت آن ضروری است. یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی که بدین منظور به کار گرفته می‌شوند، حوضچه‌های آرامش بوده که در آن‌ها با شکل‌گیری جهش هیدرولیکی و تبدیل رژیم جریان از فوق‌بحرانی به زیربحرانی، انرژی آن مستهلک می‌شود.

در مطالعه جهش هیدرولیکی پارامترهای نسبت عمق ثانویه، طول جهش و افت نسبی انرژی مهم هستند. از این‌رو، پژوهشگران سعی کرده‌اند که در پژوهش‌های خود ضمن مطالعه روند تغییرات این پارامترها تحت شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف، به رابطه‌های تئوری، تجربی و یا ترکیبی از هر دو برای برآورد این پارامترها برای طراحی حوضچه‌های آرامش دست یابند (پترکا، ۱۹۸۳).

نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران در مورد مشخصات جهش هیدرولیکی مستقیم در حوضچه مستطیلی با شیب کف معکوس نشان از آن است که می‌توان با به کارگیری قوانین بقاء جرم، اندازه حرکت و استفاده از فرضیه‌هایی که مهم‌ترین آن‌ها به کارگیری تابع مناسب برای نیمرخ طولی سطح آب در امتداد جهش (خطی، ربع بیضی و معادله درجه دو) است، رابطه‌ای تئوری-تجربی که تابعی از طول نسبی جهش است، برای برآورد نسبت عمق ثانویه ارائه کرد. همچنین نتایج پژوهش‌های انجام شده در این رابطه نشان داده است که با افزایش شیب کف معکوس، نسبت عمق ثانویه و طول نسبی جهش کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد (ابریشمی و صانعی، ۱۹۹۴؛ مک کورکودال و محمد، ۱۹۹۴؛ پروگینلی و پاگلیارا، ۲۰۰۰؛ بیرامی و چمنی، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۰ و کاسی و همکاران، ۱۳۹۰).

نتایج این پژوهش‌های باعث ارائه رابطه‌های پیچیده‌ای برای محاسبه نسبت عمق ثانویه شده که به دلیل وجود طول جهش در آن‌ها، هیچ یک دارای حل صریح نیستند (به دلیل وجود دو پارامتر مجهول در یک معادله). از آنجا که تغییر شکل نیمرخ طولی حوضچه با ایجاد شیب کف معکوس یکی از راه‌کارهای کاهش هزینه احداث و بهبود

پارامترهای هیدرولیکی مؤثر در حوضچه‌های آرامش است، توسعه مدل‌های ساده و در عین حال دقیق برای حل مسائل جهش هیدرولیکی در این‌گونه شرایط، می‌تواند کمک مؤثری برای طراحی این‌گونه از حوضچه‌های آرامش باشد. هدف از این پژوهش، استخراج مناسب‌ترین رابطه تئوری برای نسبت عمق ثانویه جهش هیدرولیکی بر شیب کف معکوس است.

مواد و روش‌ها

تئوری جهش هیدرولیکی روی شیب معکوس

برای تحلیل و استخراج رابطه‌های مربوط به جهش هیدرولیکی کلاسیک در مقطع‌های مختلف، از قوانین بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی و نیز فرضیه‌های ساده شونده مانند ناچیز در نظر گرفتن نیروهای وزن، اصطکاک و مقاومت ناشی از هوا، می‌توان استفاده کرد. آنچه که رابطه‌های تئوری مربوط به جهش هیدرولیکی با شیب کف معکوس را نسبت به جهش کلاسیک متفاوت و پیچیده‌تر می‌سازد، وجود نیروی ثقل ناشی از شیب حوضچه بوده که خود تابعی از نوع منحنی نیمرخ جهش و طول آن است.

فرضیه‌های مورد استفاده برای استخراج رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه جهش هیدرولیکی بر روی شیب کف معکوس در این پژوهش عبارتند از (۱) سیال غیرقابل تراکم است، (۲) نیروی ثقل فقط نیروی حجمی وارد بر حجم کنترل است، (۳) نیروی فشاری تنها نیروی سطحی وارد بر سطوح حجم کنترل بوده و از اثر نیروهای ناشی از مقاومت هوا و اصطکاک ناشی از تنش برشی کف به جهت کم بودن صرف‌نظر می‌شود و (۴) منحنی نیمرخ سطح آب در جهش را می‌توان به صورت خطی، ربع بیضی و سهموی (شکل ۱) برای استخراج رابطه نسبت عمق ثانویه در نظر گرفت.

برای استخراج رابطه نسبت عمق ثانویه در جهش هیدرولیکی بر روی شیب کف معکوس، حجم کنترلی بر طبق شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود. با اعمال اصل بقاء اندازه حرکت برای نیروهای حجمی و سطحی وارد بر آن در راستای خط مرکزی جریان خواهیم داشت:

$$F_x = F_{p1x} - F_{p2x} - W_x = \int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

که در آن F_{p1x} نیروی هیدرواستاتیک در عمق اولیه جهش در راستای خط مرکزی جریان، F_{p2x} نیروی

$\vec{V} \cdot d\vec{A}$ شار جریان عبوری از سطوح حجم کنترل بوده که به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$F_{p1x} = \int_0^{y_1} p dA = \int_0^{y_1} \gamma \cos \phi y dy = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 b \cos \phi \quad \text{و} \quad F_{p2x} = \int_0^{y_2} p dA = \int_0^{y_2} \gamma \cos \phi y dy = \frac{1}{2} \gamma y_2^2 b \cos \phi \quad (2)$$

$$F_{p1x} - F_{p2x} = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 b \cos \phi (1 - D^2) \quad (3)$$

$$\int_{CS} u \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = \Delta M = M_2 - M_1 = \rho Q \left(\frac{Q}{A_2} - \frac{Q}{A_1} \right) = \rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) \quad (4)$$

$$\Delta M = \rho Q^2 \left(\frac{1}{by_2} - \frac{1}{by_1} \right) = \frac{\rho Q^2}{b} \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) = \frac{\rho Q^2}{b} \left(\frac{y_1 - y_2}{y_1 y_2} \right) = \frac{\rho Q^2}{by_1} \left(\frac{1 - D}{D} \right) \quad (5)$$

استخراج رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه با فرض سهموی بودن نیمرخ جهش

معادله بی بعد نیمرخ طول جهش با فرض سهموی بودن به صورت معادله ۶ است.

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = - \left(\frac{x}{L_j} \right)^2 + 2 \left(\frac{x}{L_j} \right) \quad (6)$$

$$y = \left[2 \left(\frac{x}{L_j} \right) - \left(\frac{x}{L_j} \right)^2 \right] (y_2 - y_1) + y_1 \quad (7)$$

که در آن L_j طول جهش و x میزان فاصله از ابتدای جهش است. با انتگرال گیری از حجم کنترل انتخابی در شکل ۲ و در نظر گرفتن نیمرخ سهموی بر طبق شکل ۱ معادله نیروی حجمی (ثقل) به صورت زیر استخراج می‌شود:

$$W_x = \left[\gamma b \int_0^{L_j} \int_0^y dy dx \right] \sin \phi = \gamma b \sin \phi \int_0^{L_j} \left[2 \left(\frac{x}{L_j} \right) - \left(\frac{x}{L_j} \right)^2 \right] (y_2 - y_1) + y_1 dx \quad (8)$$

$$W_x = \gamma L_j b \left(\frac{1}{3} y_1 + \frac{2}{3} y_2 \right) \sin \phi \quad (9)$$

$$D = y_2 / y_1 \quad (10)$$

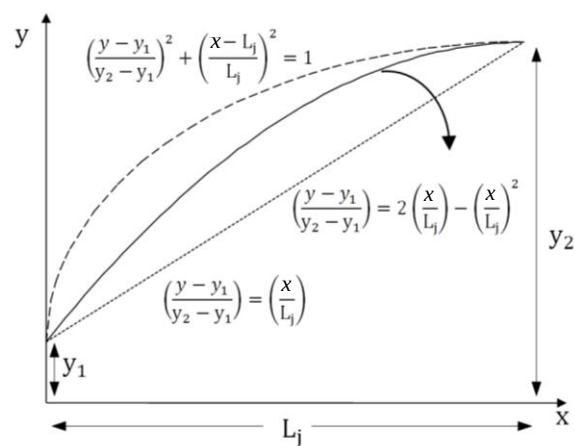
$$W_x = \frac{1}{3} \gamma L_j b y_1 (1 + 2D) \sin \phi \quad (11)$$

از آنجا که نیمرخ سطح آب به طور کامل منطبق بر منحنی تئوری نبوده و نسبت به آن دارای مقداری اختلاف است، برای تصحیح خطای ناشی از آن در نیروی وزن ضریب λ به شرح ذیل تعریف می‌شود.

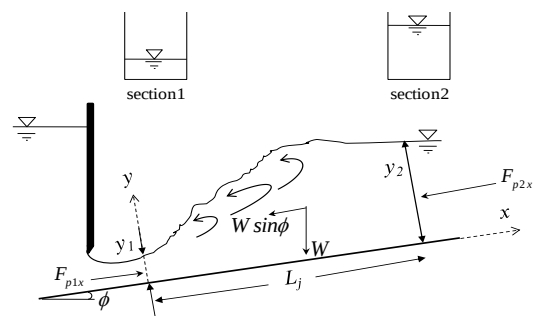
$$\lambda = W_{Exp} / W_{The} \quad (12)$$

هیدرواستاتیک در عمق ثانویه جهش و W نیروی ناشی از ثقل بوده، u در راستای محور x ها، ρ چگالی سیال و

در این معادلات Q ، دبی جریان، γ وزن مخصوص سیال، y_1 و y_2 به ترتیب اعماق اولیه و ثانویه جهش، b عرض حوضچه، ϕ زاویه شیب کف معکوس حوضچه، است.



شکل ۱- نیمرخ‌های تئوری بیضوی، سهموی و خطی نیمرخ جهش



شکل ۲- نیروهای وارد بر حجم کنترل در جهش هیدرولیکی بر روی شیب کف معکوس

$$W_x = \frac{1}{3} \gamma \lambda L_j b y_1 (1 + 2D) \sin \phi \quad (13)$$

با جایگذاری رابطه‌های ۳، ۵ و ۱۳ در رابطه ۱، می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} \gamma y_1^2 b (1 - D^2) \cos \phi - \frac{1}{3} \gamma \lambda L_j b y_1 (1 + 2D) \sin \phi = \frac{\rho Q^2}{b y_1} \left(\frac{1 - D}{D} \right) \quad (14)$$

$$3(1 - D^2) \cos \phi - 2\lambda \frac{L_j}{y_1} (1 + 2D) \sin \phi = \frac{Q^2}{g b^2 y_1^3} \left(\frac{1 - D}{D} \right) = 6Fr_1^2 \left(\frac{1 - D}{D} \right) \quad (15)$$

$$3(1 - D^2) \cos \phi - 2\lambda \frac{L_j}{y_1} (1 + 2D) \sin \phi - 6Fr_1^2 \left(\frac{1 - D}{D} \right) = 0 \quad (16)$$

$$L_j = \alpha(y_2 - y_1) \quad (17)$$

با فرض رابطه خطی بین اختلاف عمق‌های اولیه و ثانویه در مقابل طول جهش، داریم:

$$3(1 - D^2) \cos \phi - 2\lambda \frac{\alpha(y_2 - y_1)}{y_1} (1 + 2D) \sin \phi - 6Fr_1^2 \left(\frac{1 - D}{D} \right) = 0 \quad (18)$$

$$3(1 - D^2) \cos \phi + 2\varepsilon(1 + 2D)(1 - D) \sin \phi - 6Fr_1^2 \left(\frac{1 - D}{D} \right) = 0, \quad \varepsilon = \alpha\lambda \quad (19)$$

$$3(1 + D) \cos \phi + 2\varepsilon(1 + 2D) \sin \phi - 6Fr_1^2 (1/D) = 0 \quad (20)$$

با ساده‌سازی رابطه بالا می‌توان نوشت:

$$D^2(3 \cos \phi + 4\varepsilon \sin \phi) + D(3 \cos \phi + 2\varepsilon \sin \phi) - 6Fr_1^2 = 0 \quad (21)$$

$$\left(\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \right)^2 + \left(\frac{x - L_j}{L_j} \right)^2 = 1 \quad (22)$$

$$y = y_1 + (y_2 - y_1) \sqrt{1 - ((x - L_j) / L_j)^2} \quad (23)$$

با انتگرال‌گیری از حجم کنترل انتخابی شکل ۲ می‌توان نوشت:

$$W_x = \gamma \lambda L_j b \left(\left(1 - \frac{\pi}{4} \right) y_1 + \frac{\pi}{4} y_2 \right) \sin \phi \quad (24)$$

$$W_x = \gamma \lambda L_j b y_1 \left(\left(1 - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{\pi}{4} D \right) \sin \phi \quad (25)$$

با جایگذاری رابطه‌های ۳، ۵ و ۲۹ در رابطه ۱ معادله ۳۰ حاصل می‌شود:

با تعریف $K = 3 \cos \phi + 2\varepsilon \sin \phi$ و $M = 3 \cos \phi + 4\varepsilon \sin \phi$ جایگذاری در معادله ۲۱ معادله زیر به دست می‌آید:

$$D^2(M) + D(K) - 6Fr_1^2 = 0 \quad (26)$$

$$\Delta = K^2 + 24MFr_1^2 \quad (27)$$

$$D = \frac{y_2}{y_1} = \frac{-K \pm \sqrt{\Delta}}{2M} = \frac{-K \pm \sqrt{K^2 + 24Fr_1^2}}{2M} \quad (28)$$

$$D = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{K}{M} \right) \left(\sqrt{1 + 8P^2} - 1 \right) \quad (29)$$

که در آن $P^2 = \frac{3Fr_1^2 M}{K^2}$ ، عدد فرود عمق اولیه پرش است.

استخراج رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه با فرض بیضوی بودن نیمرخ جهش

معادله بی‌بعد نیمرخ ربع بیضی برای جهش بر طبق معادله ۲۶ است.

$$\frac{1}{2} \gamma y_1^2 b (1 - D^2) \cos \phi - \gamma \lambda L_j b y_1 \left(\left(1 - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{\pi}{4} D \right) \sin \phi = \frac{\rho Q^2}{b y_1} \left(\frac{1 - D}{D} \right) \quad (30)$$

با استفاده از فرض معادله ۱۷ و ساده‌سازی رابطه‌های حاصله می‌توان نوشت:

$$(1 - D^2) \cos \phi - \frac{2\alpha\lambda(y_2 - y_1)}{y_1} \left(\left(1 - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{\pi}{4} D \right) \sin \phi - 2Fr_1^2 \left(\frac{1 - D}{D} \right) = 0 \quad (31)$$

$$(1 - D^2) \cos \phi + 2\varepsilon(1 - D) \left(\left(1 - \frac{\pi}{4} \right) + \frac{\pi}{4} D \right) \sin \phi - 2Fr_1^2 \left(\frac{1 - D}{D} \right) = 0, \quad \varepsilon = \alpha\lambda \quad (32)$$

$$D^2 \left(\cos \phi + \frac{\pi}{2} \varepsilon \sin \phi \right) + D \left(\cos \phi + (2 - \frac{\pi}{2}) \varepsilon \sin \phi \right) - 2Fr_1^2 = 0 \quad (33)$$

با استفاده از معادله ۱۷ و ساده‌سازی رابطه‌های زیر حاصل خواهد شد:

$$D^2 + D - \frac{Fr_1^2}{\cos \phi + \varepsilon \sin \phi} = 0 \quad (41)$$

$$P^2 = \frac{Fr_1^2}{\cos \phi + \varepsilon \sin \phi} \quad (42)$$

$$D = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8P^2} - 1 \right) \quad (43)$$

تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه انجام آزمایش‌ها

برای مطالعه آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس، یک مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. این مدل شامل یک مخزن آرام کننده به همراه سرریز مثلثی لبه تیز برای اندازه‌گیری دبی و مخزن تأمین ارتفاع آب در بالادست، دریچه کشویی لبه تیز، یک کانال مستطیلی با کف و دیواره‌هایی از جنس شیشه به عرض و ارتفاع ۱ متر و طول ۶ متر و یک مخزن با سرریز مثلثی واسنجی شده در پایین دست است. طرح کلی مدل آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. مدل حوضچه آرامش دارای طولی به اندازه ۱/۴ متر و عرض ۰/۲۵ متر بوده که بلافاصله بعد از دریچه کشویی مستقر شد. این مدل به گونه‌ای طراحی شد که امکان ایجاد شیب‌های متفاوت وجود داشته باشد. مخزن تأمین ارتفاع آب بالادست امکان ایجاد جریان فوق بحرانی تا عدد فرود ۹ را در داخل حوضچه فراهم می‌کرد. جهت اندازه‌گیری عمق آب در طول جهش، پیزومترهایی به فاصله‌های ۵ سانتی‌متر در طول خط مرکزی جریان و بر کف حوضچه نصب شدند. برای ایجاد عمق پایاب لازم جهت تشکیل جهش در داخل حوضچه و تثبیت آن، دریچه پروانه‌ای در انتهای قسمت افقی حوضچه نصب شد.

با تعریف $K = \cos \phi + \left(2 - \frac{\pi}{2} \right) \varepsilon \sin \phi$ و

$M = \cos \phi + \frac{\pi}{2} \varepsilon \sin \phi$ و جایگذاری در معادله ۳۳

معادله زیر به دست خواهد آمد:

$$D^2(M) + D(K) - 2Fr_1^2 = 0 \quad (34)$$

$$\Delta = K^2 + 8MFr_1^2 \quad (35)$$

$$D = \frac{y_2}{y_1} = \frac{-K \pm \sqrt{\Delta}}{2M} = \frac{-K \pm \sqrt{K^2 + 8MFr_1^2}}{2M} \quad (36)$$

$$D = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{K}{M} \right) \left(\sqrt{1 + 8P^2} - 1 \right) \quad (37)$$

که در آن $P^2 = \frac{3Fr_1^2 M}{K^2}$ است.

استخراج رابطه تئوری نسبت عمق ثانویه با فرض بیضوی

بودن نیمرخ جهش

با به کارگیری فرضیه‌های ذکر شده برای استخراج رابطه‌های تئوری جهش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس با فرض خطی بودن نیمرخ جهش معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x}{L_j} \Rightarrow y = y_1 + (y_2 - y_1) \frac{x}{L_j} \quad (38)$$

با به کارگیری رابطه بالا معادله نیروی وزن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_x = \gamma \lambda L_j b y_1 \left(\frac{1 + D}{2} \right) \sin \phi \quad (39)$$

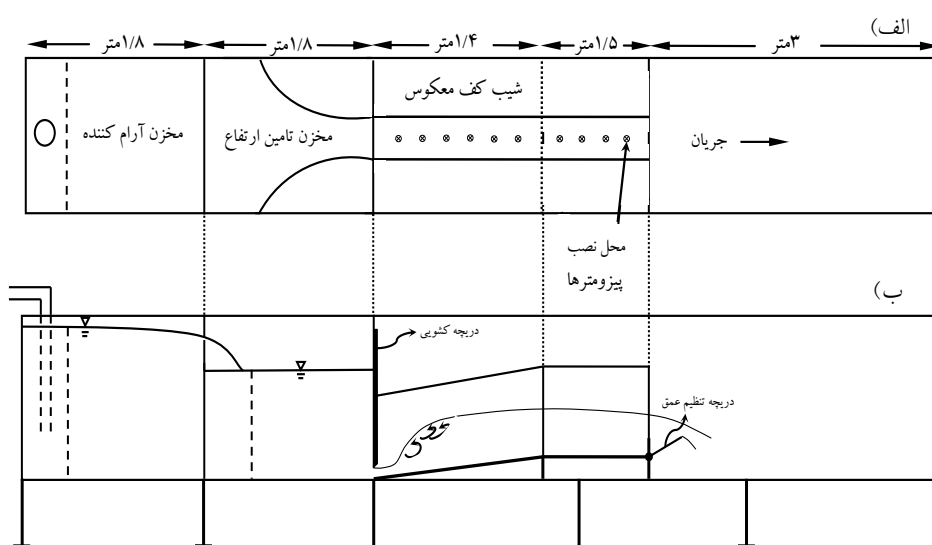
با جایگذاری رابطه ۳۹ به همراه رابطه‌های ۳ و ۵ در رابطه ۱ می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} \gamma y_1^2 b (1 - D^2) \cos \phi - \gamma \lambda L_j b y_1 \left(\frac{1 + D}{2} \right) \sin \phi = \frac{\rho Q^2}{b y_1} \left(\frac{1 - D}{D} \right) \quad (40)$$

جهش از شروع، تا جایی که غلطابها و نوسانهای سطح آب در آن حداقل بوده و تغییرات عمق کم می‌شد، در نظر گرفته شد.

برای ارزیابی رابطه‌های تئوری ارائه شده در این پژوهش در مجموع، ۳۰ آزمایش در دامنه اعداد فرود اولیه ۹-۲/۵ و برای ۵ شیب کف معکوس (S)، صفر، ۲/۳، ۴/۱، ۵/۶ و ۸ درصد انجام شد. در جدول ۱ دامنه پارامترهای آزمایشگاهی آورده شده است.

برای انجام آزمایش‌ها، بعد از تنظیم شیب کف ابتدا دبی ورودی برای عدد فرود مورد نظر برقرار و سپس با مانور دریچه پروانه‌ای انتهای حوضچه، موقعیت جهش کمی بعد از دریچه (تقریباً ۱۰ سانتی‌متر) تثبیت می‌شد. پس از پایدار شدن جهش، عمق جریان (به صورت تصویربرداری از پیزومترها) در طول نیمرخ جهش و همچنین طول جهش اندازه‌گیری شد. با توجه به این که معیارهای متفاوتی برای تعریف طول جهش وجود دارد، در این پژوهش طول



شکل ۳- طرح کلی کانال آزمایشگاهی، (الف) نمای پلان و (ب) نمای نیمرخ

داده‌های آزمایشگاهی پژوهشگران دیگر

در این پژوهش ضمن استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مؤلف، داده‌های آزمایشگاهی سایر پژوهشگران نیز استفاده شد. داده‌های مورد استفاده شامل نتایج اوکادا و اکی (۱۹۵۹)، مک کورکودال و محمد (۱۹۹۴)، پروگینلی و پاگلایارا (۲۰۰۰) و بیرامی و چمنی (۲۰۰۶) بود که از مقالات مختلف گردآوری و در تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شد. در جدول ۲ مشخصات کلی فلوم آزمایشگاهی، دامنه شیب معکوس و اعداد فرود اولیه این پژوهشگران به تفکیک آورده شده است.

جدول ۱- دامنه پارامترهای آزمایشگاهی

پارامترهای قرائت شده	واحد	حداقل	حداکثر
y_1	Cm	۱/۸	۲/۲
y_2	Cm	۴/۴	۲۱
Fr_1	---	۲/۵	۹
L_j	Cm	۱۱	۱۲۱
Q	Lit/s	۵/۲۱	۲۱/۰۵
ϕ	---	صفر	۰/۰۸

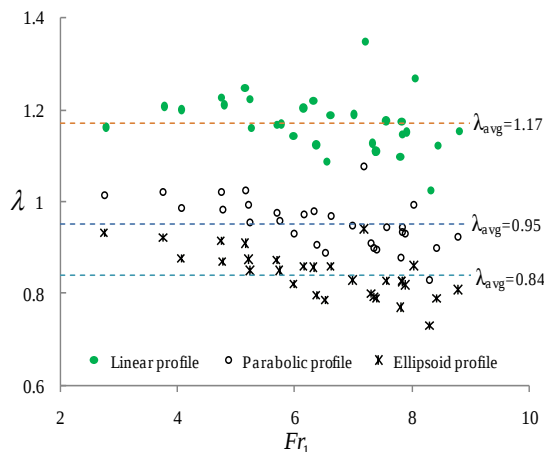
جدول ۲- مشخصات کلی شرایط آزمایشگاهی پژوهشگران پیشین

نام محقق	ابعاد حوضچه معکوس	دامنه شیب معکوس	دامنه عدد فرود اولیه
اوکادا و اکی (۱۹۵۹)	۰/۹×۰/۴×۰/۵ متر	۱۶/۷-۲۵ درصد	۹-۱۳
مک کورکودال و محمد (۱۹۹۴)	۰/۶×۰/۴۶×۰/۶۵ متر	۰-۲۰ درصد	۲/۵-۹
بیرامی و چمنی (۲۰۰۶)	۱/۶×۰/۴۰۴×۰/۵ متر	۲/۵-۱۰ درصد	۴/۵-۱۲
پروگینلی و پاگلایارا (۲۰۰۰)	۶×۰/۴×۱/۲ متر	۰-۲۰ درصد	۲-۱۱

نتایج و بحث

محاسبه ضریب تصحیح نیروی وزن (۸)

برای محاسبه ضریب تصحیح نیروی وزن توده جهش ابتدا با استفاده از نیمرخ‌های برداشت شده جهش هیدرولیکی مقادیر ضریب تصحیح وزن برای ۳ نیمرخ ربع بیضی، سهموی و خطی با استفاده از معادله ۱۰ برآورد شد. در شکل ۴ مقایسه نیمرخ‌های تئوری و آزمایشگاهی جهش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نیمرخ سهموی نسبت به نیمرخ‌های ربع بیضی و خطی دارای بیشترین هماهنگی با داده‌های آزمایشگاهی است. برای ارزیابی معادلات تئوری ارائه شده برای نیمرخ جهش از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات ($RMSE = \sqrt{\sum (E_i - M_i)^2 / n}$) و راندمان مدل ($EF = 1 - \frac{\sum (E_i - M_i)^2}{\sum (M_i - \bar{M})^2}$) استفاده شد که نتایج عملکردی آن در جدول ۳ ارائه شده است. در این معادلات E_i و M_i به ترتیب مقادیر تئوری برآورد شده و مقادیر برداشت شده نیمرخ جهش و $\bar{M}$ میانگین داده‌های آزمایشگاهی است.

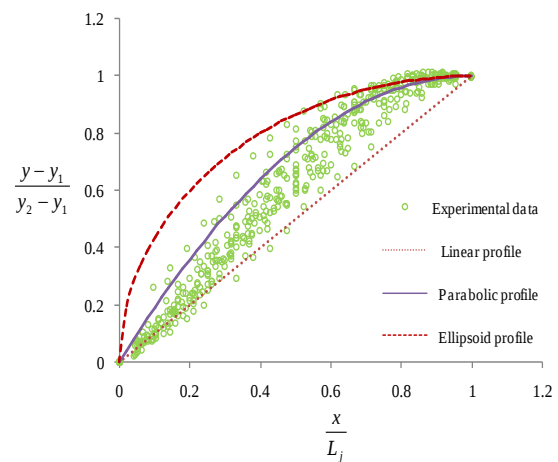


شکل ۵- مقادیر محاسبه شده ضریب تصحیح نیروی وزن برای سه نیمرخ نظری خطی، ربع بیضی و سهموی

محاسبه ضریب تغییرات طول جهش در مقابل اختلاف اعماق اولیه و ثانویه (α)

با توجه به معادله ۱۸ نیاز به محاسبه ضریب α با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی است. در این مطالعه محاسبه این ضریب با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی نویسنده و همچنین داده‌های آزمایشگاهی مک کورکودال و محمد (۱۹۹۴) انجام شده است. نتایج حاصل در شکل ۶ آورده شده است.

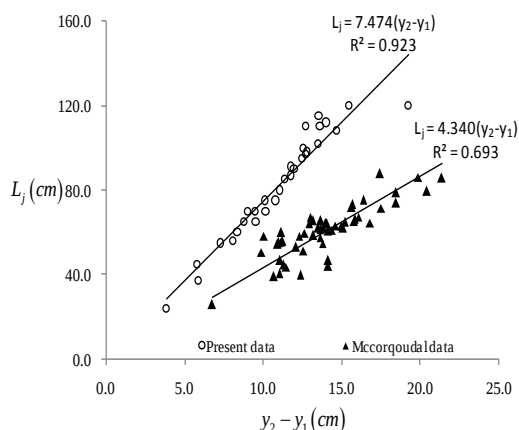
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود ضریب α برای داده‌های آزمایشگاهی مؤلف برابر ۷/۴۷۴ و مک کورکودال و محمد (۱۹۹۴)، ۴/۳۴ به دست آمده است که دلیل آن ناشی از اختلاف در معیار اندازه‌گیری طول جهش است.



شکل ۴- منحنی‌های تئوری و داده‌های آزمایشگاهی نیمرخ جهش

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل آماری حاصل از مقایسه نیمرخ‌های نظری با داده‌های آزمایشگاهی

نوع نیمرخ طولی جهش	EF	RMSE
سهموی	۰/۹۳	۰/۰۸
خطی	۰/۸۴	۰/۱۳
ربع بیضی	۰/۶۱	۰/۲۱



شکل ۶- طول جهش در مقابل تغییرات اعماق اولیه و ثانویه جهش

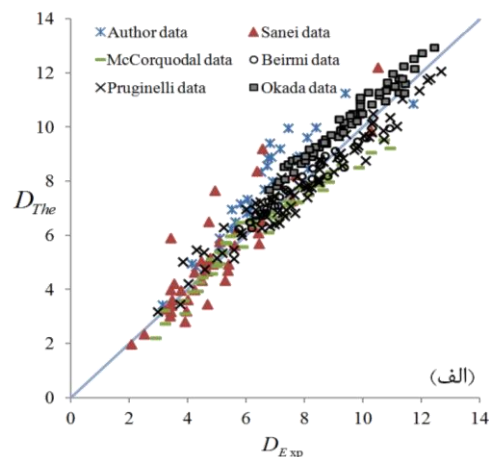
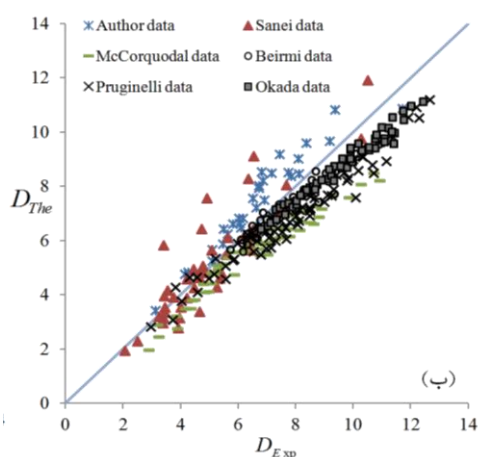
مقایسه معادلات تئوری و داده‌های آزمایشگاهی نسبت

عمق ثانویه

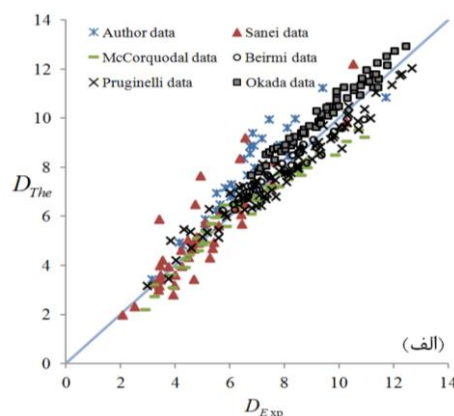
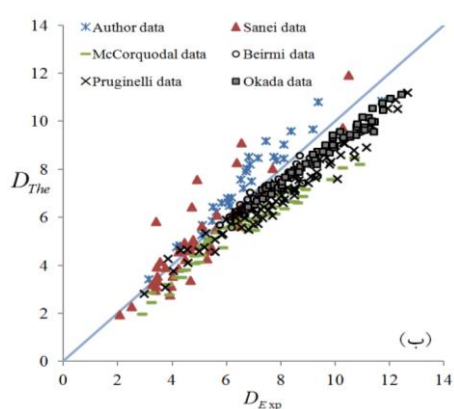
برای بررسی معادلات تئوری استخراج شده برای هر یک از نیمرخ‌های پیشنهادی جهش، داده‌های آزمایشگاهی و نتایج تئوری برای دو حالت مختلف از ضریب α (۷/۴۷) و α (۴/۳۴) مقایسه شد، که نتایج آن در شکل‌های ۷ تا ۹ و نیز جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نیمرخ سهموی با ضریب α = ۴/۳۴ دارای بهترین عملکرد است.

جدول ۴- نتایج تحلیل آماری حاصل از مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نظری نسبت عمق ثانویه

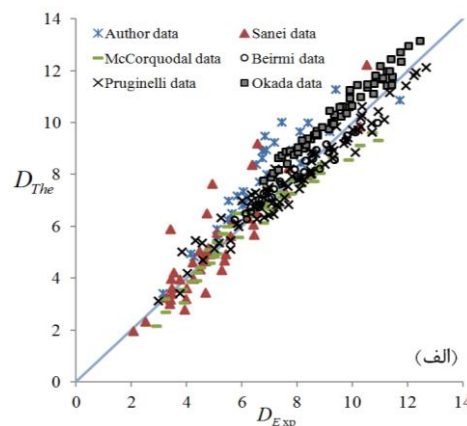
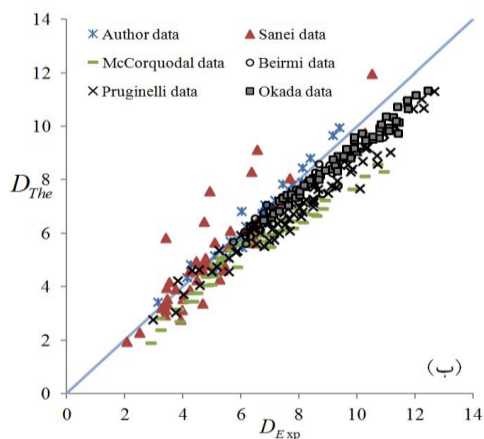
$\alpha = 7.47$			$\alpha = 4.34$			نوع نیمرخ	نام محقق
R^2	EF	RMSE	R^2	EF	RMSE		
۰/۹۱	۰/۶۹	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۳	۱/۴	سهموی	مولفین
۰/۹۱	۰/۷	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۳۲	۱/۳۹	ربع بیضی	
۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۳۹	۰/۸۳	۰/۲۸	۱/۴۲	خطی	
۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۶۴	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۳۸	سهموی	بیرامی و چمنی
۰/۹۲	۰/۷۷	۰/۶۴	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۳۸	ربع بیضی	
۰/۹۲	۰/۸	۰/۶۱	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۳۸	خطی	
۰/۹۴	۰/۶۲	۱/۲۲	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۵۶	سهموی	مک کورکودال و محمد
۰/۹۴	۰/۶۱	۱/۲۳	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۵۷	ربع بیضی	
۰/۹۵	۰/۶۳	۱/۲	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۵۵	خطی	
۰/۹۶	۰/۶۶	۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۶۹	۰/۸	سهموی	اوکادا و اکی
۰/۹۷	۰/۶۲	۰/۹	۰/۹۵	۰/۷۲	۰/۷۷	ربع بیضی	
۰/۹۶	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۹۶	۰/۶۱	۰/۹۱	خطی	
۰/۹۶	۰/۷۳	۱/۱۳	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۵۶	سهموی	پروگینلی و پاگلیرا
۰/۹۵	۰/۷۲	۱/۱۵	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۵۷	ربع بیضی	
۰/۹۶	۰/۷۵	۱/۰۹	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۵۶	خطی	
۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۷۲	۰/۹۵	سهموی	ابریشمی و صانعی
۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۹۲	۰/۸۱	۰/۷۲	۰/۹۵	ربع بیضی	
۰/۸۱	۰/۷۴	۰/۹۳	۰/۸	۰/۷۲	۰/۹۵	خطی	



شکل ۷- مقادیر تئوری و آزمایشگاهی نسبت عمق ثانویه با فرض نیمرخ سهموی جهش؛ (الف) $\alpha = 4/34$ و (ب) $\alpha = 7/47$



شکل ۸- مقادیر تئوری و آزمایشگاهی نسبت عمق ثانویه با فرض نیمرخ ربع بیضی جهش؛ (الف) $\alpha = 4/34$ و (ب) $\alpha = 7/47$



شکل ۹- مقادیر تئوری و آزمایشگاهی نسبت عمق ثانویه با فرض نیمرخ خطی جهش؛ (الف) $\alpha = 4/34$ - (ب) $\alpha = 7/47$

که در آن S شاخص حساسیت، O پارامتر خروجی و I پارامتر ورودی به مدل است. شاخص حساسیت را به دو صورت مطلق و نسبی به ترتیب بر طبق رابطه‌های ۴۵ و ۴۶ می‌توان به کار برد که مزیت حساسیت مطلق، ارائه درک فیزیکی بهتر و مزیت حساسیت نسبی بی‌بعد بودن آن است (رینالت، ۱۹۹۹).

تحلیل حساسیت معادلات نظری نسبت عمق ثانویه نسبت به پارامتر ε

طبق تعریف نسبت تغییرات خروجی به تغییرات ورودی یک معادله حساسیت آن را نشان می‌دهد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S = \frac{\partial O}{\partial I} \quad (44)$$

پارامتر ε برای شیب‌ها و نیمرخ‌های مختلف متفاوت است ولی به طور کلی می‌توان بیان کرد که با افزایش شیب معکوس از ۵ تا ۲۰ درصد حساسیت متوسط معادله تئوری با فرض نیمرخ سهموی از ۰/۱۴ به ۰/۳، با فرض نیمرخ ربع بیضی از ۰/۱۵ به ۰/۳۵ و با فرض نیمرخ خطی این مقدار از ۰/۱۳ به ۰/۳ افزایش می‌یابد. بدین معنی که چنانچه در یک عدد فرود مشخص و در شیب ۵ درصد با افزایش یک واحد در میزان ε ، نسبت عمق ثانویه تئوری به میزان ۰/۱۱ تغییر می‌کند. در شرایط مشابه و در شیب ۲۰ درصد این تغییرات در برآورد عمق ثانویه نظری به میزان ۰/۳ است. در توجیه این تغییرات می‌توان بیان داشت با توجه به این که در تمامی معادلات نظری استخراج شده پارامتر ε در نیروی وزن توده جهش در جهت جریان بوده و توجه به این نکته که نیروی وزن در جهت جریان در تابعی از زاویه شیب کف ضرب شد، بنابراین از نظر تئوری با افزایش شیب کف معکوس اثر پارامتر ε در برآورد نسبت عمق ثانویه بیشتر شده و در نتیجه حساسیت مدل نسبت به تغییرات این پارامتر افزایش می‌یابد.

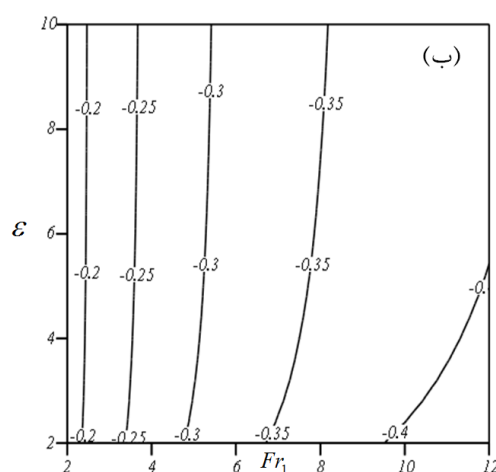
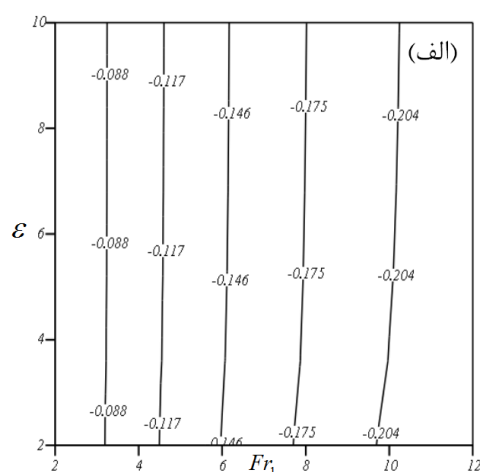
$$S = \left(\frac{\partial O}{\partial I} \right) / \partial I \quad (45)$$

$$S = \left(\frac{\partial O}{\partial I} \right) / \left(\frac{\partial I}{I} \right) \quad (46)$$

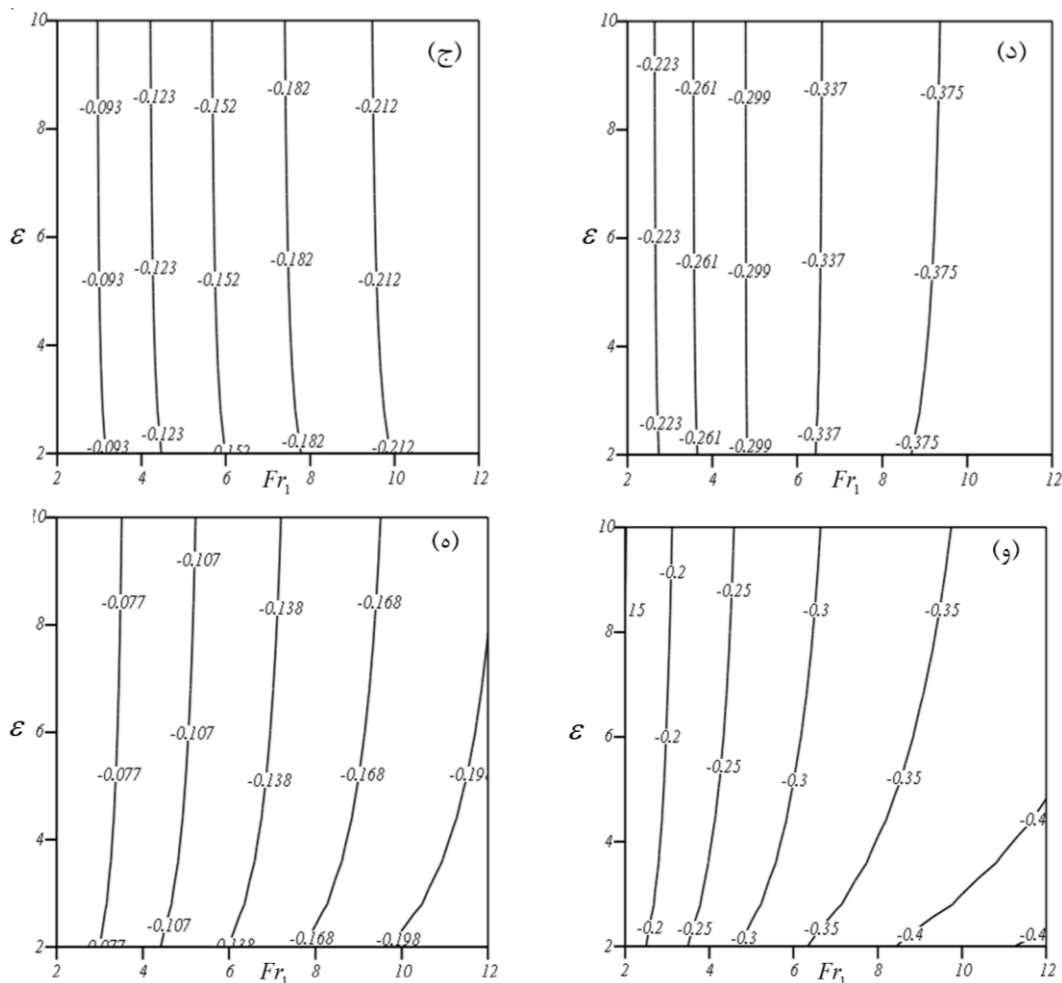
از آنجا که در پژوهش‌های مختلف روی جهش هیدرولیکی معیار اندازه‌گیری طول جهش متفاوت است پس تعیین میزان حساسیت معادلات نظری در برآورد نسبت عمق ثانویه مهم است. در این مطالعه تحلیل حساسیت معادلات نظری نسبت به پارامتر ورودی ε ($\varepsilon = \alpha \lambda$) با به کارگیری نرم‌افزار Mathcad انجام شد. تعیین حساسیت برای ۴ شیب معکوس، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد و در دامنه اعداد فرود ۱۲-۲ و برای دامنه عدد ε ، ۱۰-۲ انجام شده است. در شکل ۱۰ تحلیل حساسیت برای شیب‌های معکوس ۵ و ۲۰ درصد و نیمرخ‌های مفروض سهموی، بیضوی و خطی آورده شده است.

$$S = \left(\frac{\partial D}{\partial \varepsilon} \right) / \left(\frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon} \right) \quad (47)$$

معادله بالا بدین معنی است که به میزان تغییرات یک واحدی در پارامتر ε به اندازه S واحد در میزان برآورد نسبت عمق ثانویه تغییر ایجاد می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، حساسیت مدل‌ها در برآورد نسبت عمق ثانویه نسبت به تغییرات



شکل ۱۰- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل‌ها نسبت به پارامتر ε ، (الف) - نیمرخ سهموی شیب ۵ درصد، (ب) - نیمرخ سهموی شیب ۲۰ درصد



ادامه شکل ۱۰- (ج)- نیمرخ ربع بیضی شیب ۵ درصد، (د)- نیمرخ ربع بیضی شیب ۲۰ درصد، (ه)- نیمرخ خطی شیب ۵ درصد و (و)- نیمرخ خطی شیب ۲۰ درصد

منابع

- کاسی کوزانی ا. اسمعیلی ورکی م. و فرهودی ج. ۱۳۹۰. مطالعه آزمایشگاهی مشخصات جهش هیدرولیکی واگرا با شیب کف معکوس. مجموعه مقالات ششمین کنگره ملی مهندسی عمران. جلد اول. دانشگاه سمنان. سمنان. ایران. ۶-۷ اردیبهشت. ص ۴۹۱.
- Abrishami J. and Saneie M. 1994. Hydraulic Jump in adverse basin slopes. International J. Iranian Water Resource Engineering. 2(1):51-63.
- Beirami M. K. and Chamani M. R. 2006. Hydarulic jumps in sloping channels: sequent depth ratio. Journal Hydraulic Engineering. 132(10):1061-1068
- Beirami M. K. and Chamani M. R. 2010. Hydarulic jumps in sloping channels: roller length and energy loss. Candian of Journal of Civil Engineering. 37(9):535-543.

نتیجه گیری

در این پژوهش با فرض سه نیمرخ متفاوت برای جهش هیدرولیکی بر روی شیب معکوس، معادلات تئوری برای برآورد نسبت عمق ثانویه استخراج شد. سپس با داده‌های آزمایشگاهی مؤلف و پژوهشگران دیگر به تحلیل آماری معادلات استخراج شده در برآورد نسبت عمق ثانویه پرداخته شد. نتایج آماری نشان داد که معادله با نیمرخ سهموی در مقایسه با معادلات با نیمرخ خطی و ربع بیضی، خطای کمتری در برآورد نسبت عمق ثانویه ایجاد می‌کند. همچنین نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر E نشان داد که با افزایش شیب معکوس از ۵ تا ۲۰ درصد حساسیت مدل‌ها در برآورد نسبت عمق ثانویه تئوری به طور متوسط در تمامی نیمرخ‌های مفروض به میزان ۰/۲ نسبت به شرایط مشابه در پایین‌ترین شیب افزایش می‌یابد.

5. McCorquodale J. A. and Mohamed M. S. 1994. Hydraulic jump on adverse slopes. *Journal of Hydraulic Research*. 31(1):119-130.
6. Okada A. and Aki S. 1959. Hadraulic Studies of Hydraulic Jump On Reversed Slope Channel. *Journal Electrical Technology Institute* (in Japanese). 5(6):161-174.
7. Peruginelli A. and Pagliara S. 2000. Limiting and sill-controlled adverse-slope hydraulic jump. *ASCE. Journal of Hydraulic Engineering*. 126(11):847-851.
8. Peterka A.J. 1983. Hydraulic design of stilling basin and energy dissipaters. *Engineering monograph*. No. 25, U. S. Bureau of reclamation. 240 p.
9. Renault D. 1999. Offtake sensitivity, operation effectiveness, and performance of irrigation system *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 125(3):137-147.