

## بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی ویژگی‌های پرش هیدرولیکی در بسترهای نفوذپذیر

نیما اکبری<sup>1</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>2\*</sup> و سعیدرضا خدائشاس<sup>3</sup>

- 1- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد
- 2- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد
- 3- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

\* email@um.ac.ir

(دریافت مقاله: 97/2/15؛ پذیرش مقاله: 97/10/2)

**چکیده-** در این تحقیق اثر نفوذپذیری بستر کانال بر مشخصات پرش هیدرولیکی از دیدگاه تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با تحلیل معادله اندازه حرکت رابطه‌ای جهت محاسبه مستقیم نسبت اعماق مزدوج برای بسترهای نفوذپذیر به دست آمد. سپس در آزمایشگاه با استفاده از کانالی به طول 6 متر و عرض 80 سانتی‌متر آزمایش‌هایی بر روی بسترهای نفوذپذیر متخلخل با دانه‌بندی‌های مختلف و طول و عرض‌های متفاوت انجام شد. بازه اعداد فرود مورد آزمایش جهت ایجاد پرش پایدار از 5/3 تا 7/4 بود. مشاهده شد که در شرایط نفوذپذیر بودن بستر پرش رابطه تحلیلی نسبت اعماق مزدوج را با دقت بهتری نسبت به رابطه بلانگر تخمین می‌زند و همچنین وابستگی تغییرات نسبت اعماق مزدوج به تغییرات عدد فرود جریان بیش از وابستگی آن به میزان نفوذپذیری بستر می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نفوذپذیری بستر در مجموع سبب کاهش نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی به میزان قابل ملاحظه‌ای نسبت به بستر صاف نفوذناپذیر شده و افت انرژی ناشی از پرش را نیز افزایش می‌دهد.

**کلید واژگان:** پرش هیدرولیکی، معادله اندازه حرکت، بستر نفوذپذیر

### 1- مقدمه

میزان قابل توجهی کاسته می‌گردد (حسینی و ابریشمی، 1378). پدیده پرش هیدرولیکی به دلیل فراوانی وقوع در طبیعت و کاربردهای آن به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای پرش هیدرولیکی کاهش انرژی آب در جریان از روی سدها، سرریزها و دیگر سازه‌های هیدرولیکی و نهایتاً محافظت قسمت‌های پایین‌دست می‌باشد. از حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی برای کنترل پرش و کاهش انرژی جنبشی جریان در یک مسیر کوتاه استفاده می‌شود. اندازه

پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع بوده و عبارت است از تغییر حالت جریان از فوق بحرانی به زیربحرانی که در بسیاری از کارهای عملی با آن روبرو هستیم. چنانچه آب در قسمتی از مسیر دارای حالت فوق بحرانی بوده و بنا به مشخصات و موقعیت خاص کانال بخواهد تغییر حالت دهد، عمق جریان در مسیر نسبتاً کوتاهی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و نتیجتاً ضمن ایجاد افت انرژی محسوس، از میزان سرعت به

حوضچه‌های آرامش تابعی از مشخصات پرش مانند طول و اعماق مزدوج است. به منظور کاهش ابعاد پرش و نهایتاً کاهش اندازه حوضچه‌ها به دلایل اقتصادی می‌توان از بلوک‌هایی در داخل حوضچه استفاده کرد که با توجه به سرعت جریان ورودی به حوضچه در معرض فرسایش و تخریب قرار دارند. یکی از روش‌های جایگزینی بلوک‌ها استفاده از بستر زبر می‌باشد. (Rajaratnam (1968) نخستین شخصی بود که به مطالعه پرش هیدرولیکی در بسترهای زبر پرداخت. او نشان داد که پرش‌های تشکیل شده در بسترهای زبر کوتاه‌تر از پرش تشکیل شده در بسترهای صاف است. (Rajaratnam (2002) و Ead پرش هیدرولیکی را بر روی بسترهای موج‌دار سینوسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که طول پرش تقریباً نصف طول پرش روی بستر صاف بوده و همچنین مقدار عمق ثانویه روی بسترهای موج‌دار حدوداً 25 درصد کاهش می‌یابد. (Shafai Bejestan و Izadjoo با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که تحت تأثیر زبری‌های موجی شکل با مقطع دوزنقه‌ای، طول پرش 50 درصد و عمق ثانویه پرش 20 درصد کاهش می‌یابد. (Carlo et al. (2007 در تحقیقی پرش هیدرولیکی روی بسترهای شنی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با وارد کردن پارامتر  $\beta$  به عنوان ضریب نیروی برشی در معادله مومنوم، رابطه (1) را برای نسبت اعماق مزدوج ارائه کردند.

هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با بستر سینوسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با به‌کارگیری بستر موج‌دار سینوسی در حوضچه آرامش، می‌توان شاهد کاهش نسبت اعماق ثانویه به اولیه تقریباً به میزان 20 درصد در بیشترین مقدار خود در حدود عدد فرود 12 و کاهش طول پرش هیدرولیکی به میزان 35 درصد نسبت به پرش کلاسیک در این نوع از حوضچه‌ها بود. تمرکز تحقیقات پیشین بیشتر بر روی شکل‌های مختلف زبری یا هندسه حوضچه آرامش بوده که وجه مشترک آن‌ها نفوذناپذیر بودن بستر حوضچه می‌باشد. این مسئله زمانی اهمیت خود را نشان می‌دهد که بستر زبر در مقیاس واقعی و خارج از آزمایشگاه طراحی و اجرا شود. در حال حاضر تأثیر نفوذپذیری بستر حوضچه آرامش بر مشخصات پرش هیدرولیکی از جمله نسبت اعماق مزدوج و طول پرش مشخص نیست و هدف پژوهش حاضر بررسی این موضوع می‌باشد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- تحلیل پرش بر روی بسترهای نفوذپذیر

برای استخراج معادله کلاسیک حاکم بر پرش هیدرولیکی در کف‌های صاف و غیر شیب‌دار و با استفاده از اصل اندازه حرکت، می‌توان معادله (3) را جهت دو مقطع ابتدا و انتهای پرش منظور نمود:

$$\frac{Q^2}{gA_1} + A_1 y_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + A_2 y_2 \quad (3)$$

که در مقاطع مستطیلی، معادله فوق به شکل رابطه (4) ساده می‌گردد:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] \quad (4)$$

معادله (4) که به معادله بلانگر معروف است با این فرض به دست آمده است که دبی در امتداد طولی کانال ثابت بوده و هیچ‌گونه دبی به کانال افزوده و یا از آن خارج نمی‌شود، درحالی‌که در این تحقیق تأثیر کاهش دبی جریان بر مشخصات پرش هیدرولیکی مدنظر بوده یا به عبارت دیگر  $dQ/dx \neq 0$  است.

برای نیل به این منظور با برقرار کردن معادله اندازه حرکت و دخیل کردن تغییرات دبی در معادله و با فرض

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + 8\beta Fr_1^2} \right) \quad (1)$$

که در آن  $\beta$  ضریب نیروی برشی است که از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$\beta = \frac{2}{\pi} \arctg \left( 0.8 \left( \frac{K_s}{y_1} \right)^{0.75} \right) \quad (2)$$

$K_s$  میانگین ارتفاع زبری می‌باشد.

(Salehian et al. (2011) تأثیر دو نوع زبری طبیعی بستر شامل رسوبات شکسته را روی مشخصات پرش هیدرولیکی بررسی کردند. نتایج نشان داد که زبری‌های طبیعی می‌توانند سبب کاهش اعماق مزدوج به مقدار 13/5 تا 19/5 درصد و طول پرش به مقدار 31/5 تا 39/8 درصد شوند. بدیع زادگان و همکاران (1390) در تحقیقی پرش

$$S_2 = \left[ p^2 Fr_1^2 - i \sqrt{\frac{(1+2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

ریشه واقعی معادله عبارت است از:

$$Z_1 = (S_1 + S_2) - \frac{a_2}{3} = S_1 + S_2 \quad (13)$$

ریشه سوم عبارت‌های  $S$  را می‌توان از عدد مختلط

$(Z = x + iy)$  به دست آورد و به‌صورت روابطه (14) تا

(16) نوشته می‌شود:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) = \tan^{-1} A^* \quad (14)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{\frac{(1+2Fr_1^2)^3}{27}} \quad (15)$$

$$A^* = \frac{\sqrt{\frac{(1+2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4}}{-p^2 Fr_1^2} \quad (16)$$

برای یک عدد مختلط  $Z^n = r^n e^{i n \theta}$  بنابراین

$$Z^{\frac{1}{3}} = r^{\frac{1}{3}} e^{\frac{i \theta}{3}} \quad (17)$$

$$S_1 = Z^{\frac{1}{3}} = r^{\frac{1}{3}} e^{\frac{i \theta}{3}} \quad (17)$$

$$S_2 = r^{\frac{1}{3}} e^{\frac{-i \theta}{3}} \quad (18)$$

بنابراین ریشه معادله عبارت است از:

$$Z_1 = S_1 + S_2 = r^{\frac{1}{3}} \left( e^{\frac{i \theta}{3}} + e^{\frac{-i \theta}{3}} \right)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \left( e^{\frac{i \theta}{3}} + e^{\frac{-i \theta}{3}} \right) \quad \text{اما}$$

بنابراین ریشه واقعی عبارت است از:

$$Z_1 = S_1 + S_2 = r^{\frac{1}{3}} \left( e^{\frac{i \theta}{3}} + e^{\frac{-i \theta}{3}} \right) \quad (19)$$

و

$$Z_1 = r^{\frac{1}{3}} \left[ 2 \cos \left( \frac{\theta}{3} \right) \right] \quad (20)$$

با جایگذاری متغیرهای اصلی، روابط (21) تا (23) بدست

می‌آیند:

$$\frac{y_2}{y_1} = 2e^A \cos \left[ \frac{\tan^{-1} B}{3} \right] \quad (21)$$

مسططیلی، صاف و بدون شیب بودن کانال، معادله جدیدی

برای نسبت اعماق مزدوج به صورت زیر به دست آمد:

$$\frac{\gamma (y_1^2 - y_2^2)}{2} - F_f = \frac{\gamma}{g} \left( \frac{\beta_2 q_2^2}{y_2} - \frac{\beta_1 q_1^2}{y_1} \right) \quad (5)$$

با فرض  $F_f$  کوچک و  $\beta_2 = \beta_1 = 1$

$$\frac{y_1^2}{2} + \frac{q_1^2}{g y_1} = \frac{y_2^2}{2} + \frac{q_2^2}{g y_2} \quad (6)$$

از آنجایی که عدد فرود بالادست  $Fr_1^2 = q_1^2 / g y_1^3$  و این

حقیقت که دبی جریان پایین‌دست را می‌توان به عنوان

نسبتی از دبی جریان بالادست ( $q_2 = p q_1$ ) در نظر

گرفت، لذا می‌توان رابطه (7) را نوشت:

$$y_1^2 + 2y_1^2 Fr_1^2 = y_2^2 + 2 \frac{(p q_1)^2}{g y_2} \quad (7)$$

یا:

$$1 + 2Fr_1^2 = \left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{2p^2 Fr_1^2}{\left( \frac{y_2}{y_1} \right)} \quad (8)$$

که این به معادله درجه سه (9) ختم می‌شود:

$$\left( \frac{y_2}{y_1} \right)^3 - (1 + 2Fr_1^2) \left( \frac{y_2}{y_1} \right) + 2p^2 Fr_1^2 = 0 \quad (9)$$

برای حل این معادله درجه سه، آن با فرم کلی معادله

درجه سه مقایسه می‌شود:

$$z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0 = 0 \quad (10)$$

که  $a_1 = -(1 + 2Fr_1^2)$ ،  $a_2 = 0$ ،  $z = \left( \frac{y_2}{y_1} \right)$  و

$$a_0 = 2p^2 Fr_1^2 \quad \text{سپس} \quad a_0 = 2p^2 Fr_1^2$$

$$r = \frac{a_1 a_2 - 3a_0}{6} - \frac{a_2^3}{27} = -p^2 Fr_1^2$$

حال با نوشتن روابط زیر، روابط (11) و (12) بدست

می‌آیند:

$$S_1 = \left[ r + (q^3 + r^2)^{1/2} \right]^{1/3} \quad \text{و}$$

$$S_2 = \left[ r - (q^3 + r^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$S_1 = \left[ p^2 Fr_1^2 + i \sqrt{\frac{(1+2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = f_3 \left( Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy}}, \frac{t}{y_1}, \frac{l}{y_1}, \frac{d_{50}}{y_1} \right) \quad (26)$$

### 2-3- روش انجام آزمایش‌ها

به منظور انجام این تحقیق از یک کانال مستطیلی به طول 6 متر و عرض 80 سانتی‌متر که دارای ارتفاع جداره 80 سانتی‌متر بود، استفاده شد. انرژی لازم برای ایجاد جریان فوق بحرانی توسط مخزنی به ارتفاع 3 متر و هم‌عرض با کانال که در ابتدای کانال نصب شده بود، تأمین گردید. در محل اتصال مخزن به کانال از یک دریچه کشویی آب‌بندی شده با قابلیت تنظیم میزان بازشدگی بر اساس ارتفاع بستر نفوذپذیر استفاده شد و همچنین جهت تنظیم عمق پایاب و تثبیت موقعیت پرش، یک دریچه کشویی قابل کنترل در پایین دست نصب گردید. دبی مورد نیاز آزمایش‌ها از طریق سیستم آبرسانی آزمایشگاه هیدرولیک که مجهز به پمپ سانتریفیوژ با توان آبدی 100 لیتر بر ثانیه و اینورتر برای تنظیم دور پمپ بود، تأمین می‌شد. در شکل 1 طرحی از کانال مورد استفاده در این تحقیق و در شکل 2 نمایی از پرش تشکیل شده بر روی بستر نفوذپذیر کانال نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری عمق جریان از اشل‌های شفاف مدرج با دقت میلی‌متر که در سراسر جداره شیشه‌ای کانال چسبانده شده بودند استفاده شد.

$$A = \frac{\ln \sqrt{\frac{(1 + Fr_1^2)^3}{27}}}{3} \quad (22)$$

$$B = \frac{\sqrt{\frac{(1 + 2Fr_1^2)^3}{27} - p^4 Fr_1^4}}{-p^2 Fr_1^2} \quad (23)$$

### 2-2- آنالیز ابعادی

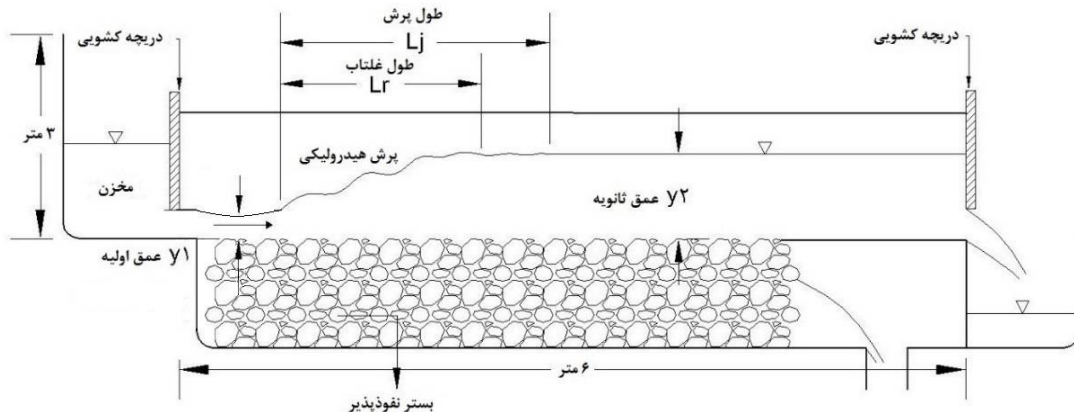
با مطالعه و مروری بر تحقیقات گذشته و با توجه به مبانی هیدرولیک جریان روی بسترهای نفوذپذیر و متخلخل و پدیده پرش هیدرولیکی عمق ثانویه پرش هیدرولیکی روی بستر نفوذپذیر به عوامل زیر وابسته می‌باشد.

$$y_2 = f_1(y_1, V_1, g, \rho, \mu, t, l, d_{50}) \quad (24)$$

در عبارت فوق،  $y_1$  عمق اولیه پرش هیدرولیکی،  $V_1$  سرعت اولیه،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  چگالی آب،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $t$  ضخامت بستر شنی،  $l$  طول بستر شنی و  $d_{50}$  میانگین قطر شن‌ها می‌باشد. با استفاده از تئوری باکینگهام عوامل بدون بعد به صورت رابطه (25) قابل استخراج است.

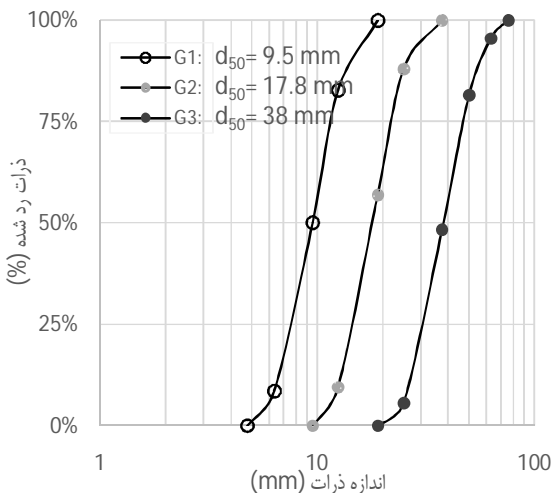
$$\frac{y_2}{y_1} = f_2 \left( Re = \frac{\rho V y_1}{\mu}, Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy}}, \frac{t}{y_1}, \frac{l}{y_1}, \frac{d_{50}}{y_1} \right) \quad (25)$$

و به دلیل آشفتگی جریان می‌توان از اثر لزجت صرف نظر کرد. بنابراین می‌توان رابطه (26) را نوشت:



شکل 1 طرحی از کانال مورد استفاده در تحقیق

نفوذپذیر مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.



شکل 3 منحنی دانه‌بندی بستر نفوذپذیر



شکل 2 پرش هیدرولیکی تشکیل شده بر روی بستر نفوذپذیر کانال

همچنین در برخی از آزمایش‌ها به منظور اطمینان بیشتر از دقت اندازه‌گیری، با استفاده از دوربین با کیفیت بالا از پرش هیدرولیکی ایجاد شده در کانال عکس برداری شده و سپس با انتقال عکس‌ها به محیط نرم‌افزار گرافر و رقومی کردن تصاویر از صحت برداشت‌ها اطمینان حاصل می‌شد. بازشدگی دریچه ورودی جریان از مخزن به کانال نیز به میزان 2 سانتی‌متر به‌طور ثابت تنظیم گردید. بازه اعداد فرود مورد استفاده در این تحقیق جهت ایجاد پرش پایدار بر روی بستر نفوذپذیر از 5/3 تا 7/4 تعیین گردید. نحوه انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که جریان فوق بحرانی با عبور از زیر دریچه کشویی ابتدای کانال برقرار شده و پرش هیدرولیکی بر روی بستر نفوذپذیر متخلخل تشکیل می‌گردید و سپس با تنظیم دریچه کشویی انتهای کانال، پرش در مکان موردنظر تثبیت شده و اقدام به اندازه‌گیری پارامترهای مختلف از جمله اعماق مزدوج و طول پرش می‌گردید. در این تحقیق از سه نوع شن با میانگین قطر ( $d_{50}$ ) 9/5، 17/8 و 38 میلی‌متر که به ترتیب با علامت‌های G1، G2 و G3 در نمودارها نشان داده شده‌اند، استفاده شد. مقادیر ضریب یکنواختی برای سه دانه‌بندی فوق به ترتیب 1/61، 1/55 و 1/59 و مقادیر ضریب تخلخل 0/428، 0/442 و 0/455 بود. منحنی دانه‌بندی شن‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. همچنین با در نظر گرفتن سه طول متفاوت 0/5، 0/75 و 1 متر و سه ضخامت 0/1، 0/15 و 0/2 متر برای بستر شنی، تأثیر طول و ضخامت بستر نفوذپذیر در دانه‌بندی‌های مختلف بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. جدول 1 مشخصات بسترهای

جدول 1 مشخصات بسترهای نفوذپذیر مورد استفاده در

آزمایش‌ها			
میانگین قطر دانه بندی بستر ( $d_{50}$ )	نام بستر	طول بستر (متر)	ضخامت بستر (متر)
G1: $d_{50}= 9/5$ mm	B1	0/5	0/1
	B2	0/5	0/15
	B3	0/5	0/2
	B4	0/75	0/1
G2: $d_{50}= 17/8$ mm	B5	0/75	0/15
	B6	0/75	0/2
	B7	1	0/1
G3: $d_{50}= 38$ mm	B8	1	0/15
	B9	1	0/2

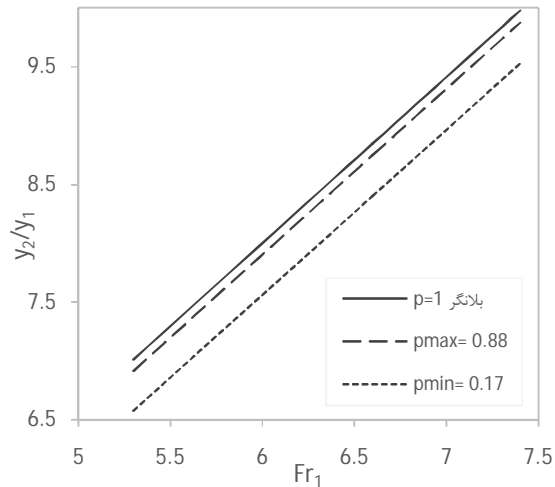
### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- نسبت اعماق مزدوج

در شکل 4 نمودار تغییرات نسبت اعماق مزدوج حاصل از فرمول تحلیلی در مقابل عدد فرود جریان نشان داده شده است. در حالتی که تمام جریان ورودی به کانال از انتهای کانال خارج شده و نفوذی به داخل بستر صورت نگیرد ( $p=1$ ) رابطه (6) به معادله بلانگر تبدیل می‌شود. در این تحقیق نسبت جریان باقیمانده در پایین‌دست به جریان اولیه ورودی به کانال ( $p = q_2/q_1$ ) بین 0/17 تا

0/88 قرار داشت.

در شکل 4 مشاهده می‌شود که نسبت اعماق مزدوج با افزایش عدد فرود افزایش یافته و تغییرات آن با عدد فرود شدیدتر از تغییرات آن با پارامتر  $p$  می‌باشد که این مطلب بیان کننده حساسیت بیشتر نسبت اعماق مزدوج به عدد فرود جریان نسبت به نفوذ جریان به داخل بستر می‌باشد. این مسئله در شکل 5 نیز قابل مشاهده است.

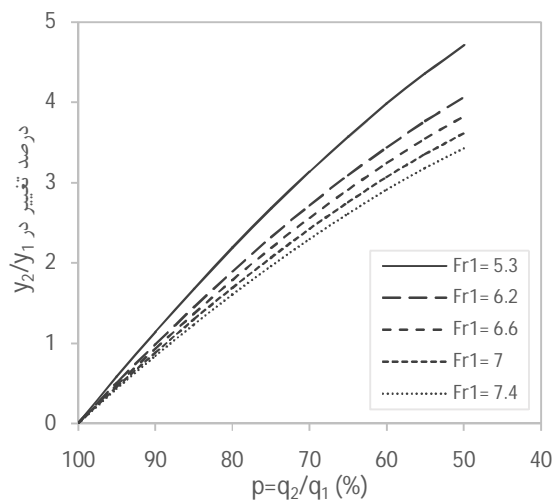


شکل 4 تغییرات نسبت اعماق مزدوج به ازای عدد فرود در فرمول تحلیلی

شکل 5 درصد تغییر در نسبت اعماق مزدوج در مقابل نسبت جریان باقیمانده در پایین دست به جریان ورودی ( $p$ ) را برای بازه اعداد فرود بکار رفته در آزمایش‌های این تحقیق نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است درصد تغییر در نسبت اعماق مزدوج به دست آمده از فرمول تحلیلی با کاهش عدد فرود با شیب بیشتری نسبت به کاهش درصد  $p$  افزایش می‌یابد.

با توجه به رابطه (9) می‌توان نسبت اعماق مزدوج را تابعی از عدد فرود اولیه جریان، ضخامت و طول بستر نفوذپذیر متخلخل و میانگین قطر شن‌ها دانست. در شکل 6 تغییرات نسبت اعماق مزدوج در مقابل عدد فرود اولیه جریان در آزمایش‌ها نشان داده شده و با نسبت اعماق مزدوج پرش روی بستر صاف نفوذناپذیر و مقدار به دست آمده از معادله تحلیلی مقایسه شده است. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که به صورت کلی، با افزایش عدد فرود جریان نسبت اعماق مزدوج افزایش می‌یابد. خطوط آبی، خاکستری و مشکی در نمودار مقادیر نسبت اعماق مزدوج محاسبه شده از رابطه تحلیلی (21) با در نظر گرفتن نسبت  $p$  اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد و خط قرمز نشان‌دهنده نسبت اعماق مزدوج محاسبه شده از رابطه بلانگر برای اعداد فرود متناظر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر محاسبه شده از رابطه تحلیلی در زیر خط قرمز مربوط به معادله بلانگر قرار گرفته‌اند. علت این امر در نظر گرفتن نفوذ جریان در رابطه 21 تحت عنوان پارامتر  $p$  می‌باشد که سبب کاهش نسبت اعماق مزدوج شده است. نتایج نشان دادند رابطه تحلیلی نسبت اعماق مزدوج را حداکثر 6/2 درصد و به‌طور میانگین 3/4 درصد کمتر در مقایسه با معادله بلانگر، برای بازه اعداد فرود مورد آزمایش به دست می‌دهند.

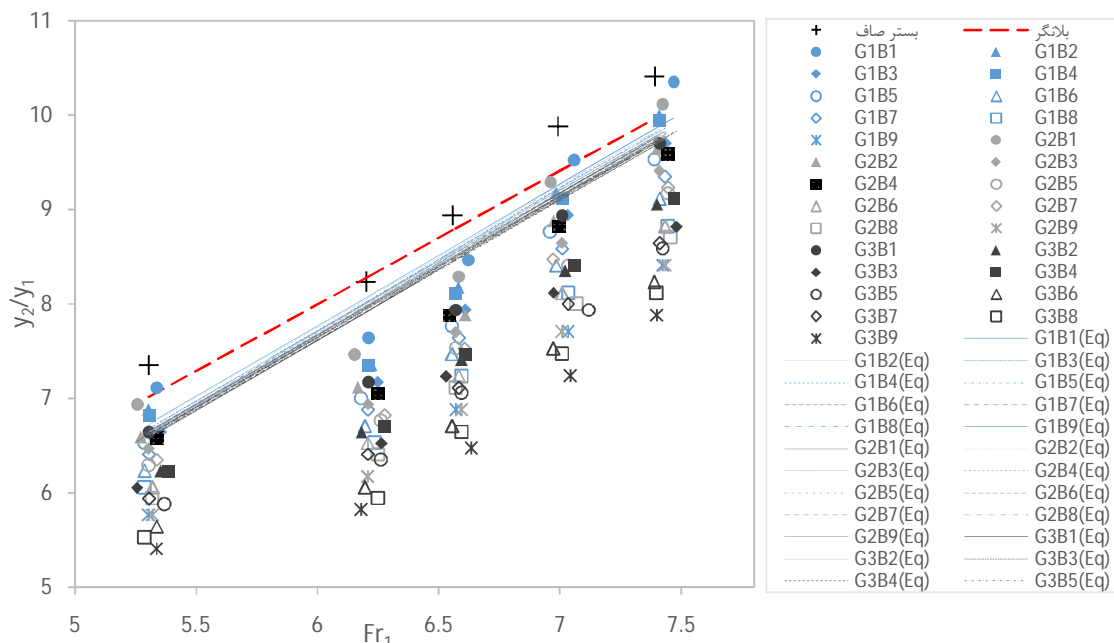
با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که مقادیر اندازه‌گیری شده برای نسبت اعماق مزدوج بر روی بستر صاف و بسترهای نفوذپذیر نیز صحت این امر را تأیید می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که در هر عدد فرود بزرگ‌تر شدن میانگین قطر دانه‌بندی بستر، سبب کاهش بیشتر نسبت اعماق مزدوج می‌شود که این امر به علت افزایش مقدار نفوذ و در نتیجه کاهش عمق ثانویه پرش می‌باشد.



شکل 5 تغییرات اعماق مزدوج در مقابل  $p$  برای اعداد فرود مختلف

آمده از نتایج آزمایشگاهی با نتایج به دست آمده از رابطه 6 مقایسه شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود هرچه میانگین قطر شن های بستر کوچک تر بوده و به تبع آن نفوذ جریان به داخل بستر کمتر باشد مقادیر به دست آمده از آزمایش ها برای نسبت اعماق مزدوج با نتایج به دست آمده از معادله تحلیلی تطابق بهتری نشان می دهد.

در این تحقیق مشاهده شد که نسبت اعماق مزدوج اندازه گیری شده در بسترهای نفوذ پذیر در مقایسه با بستر صاف حداکثر 29/3 درصد کاهش می یابد. به طور میانگین نیز نسبت اعماق مزدوج مقدار 15/8 درصد در مقایسه با بستر صاف برای سه دانه بندی مختلف در این تحقیق کاهش نشان داد. در شکل 7 مقادیر  $y_2/y_1$  به دست

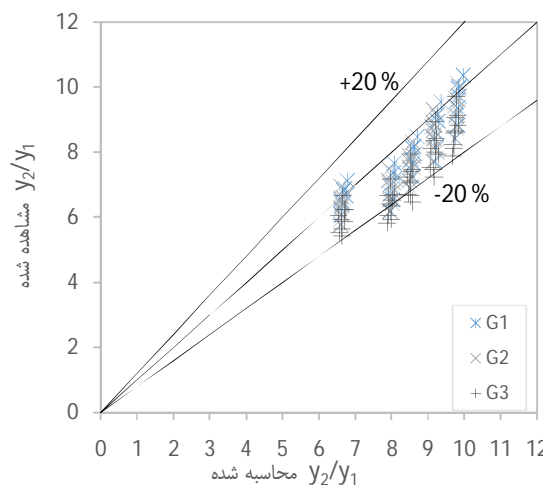


شکل 6 تغییرات نسبت اعماق مزدوج در بسترهای نفوذ پذیر به ازای عدد فرود اولیه

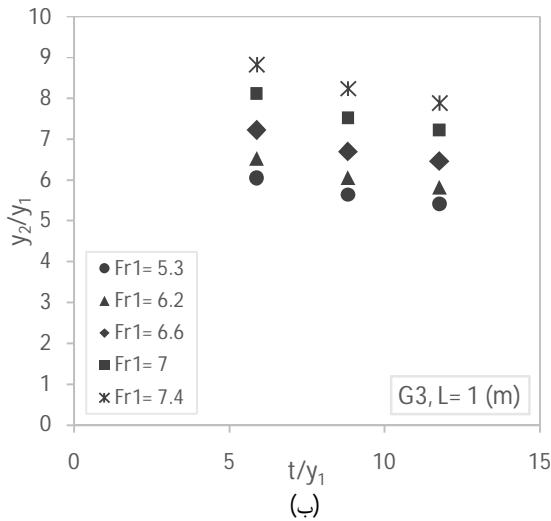
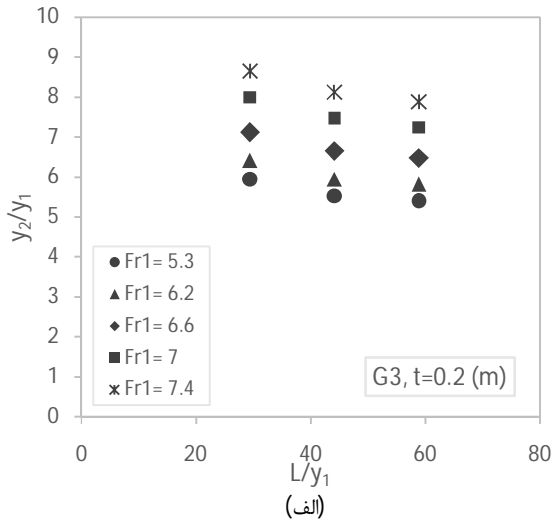
(2002) Ead و Rajaratnam پارامتر ضریب کاهش عمق ثانویه را به صورت رابطه (27) معرفی نمودند:

$$D' = \frac{y_2^* - y_2}{y_2^*} \quad (27)$$

در این رابطه  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش روی بستر صاف می باشد. در شکل 8 مقدار کاهش عمق نسبی پرش هیدرولیکی در بسترهای نفوذ پذیر متخلخل نشان داده شده است. اختلاف بین نقاط در هر عدد فرود در هر کدام از دانه بندی ها به دلیل طول و ضخامت های متفاوت بسترها می باشد. اندازه ضریب کاهش عمق ثانویه بین 0/01 و 0/29 است که بیشترین مقدار آن در عدد فرود 6/2 اتفاق می افتد. بسترهای نفوذ پذیر متخلخل به طور متوسط 16 درصد عمق ثانویه را نسبت به بستر صاف نفوذناپذیر



شکل 7 مقایسه نتایج نسبت اعماق مزدوج محاسبه شده به کمک رابطه تحلیلی با نتایج مشاهده شده در آزمایش ها



شکل 9 تغییرات نسبت اعماق مزدوج در برابر الف- افزایش طول و ب- افزایش ضخامت بستر نفوذپذیر متخلخل

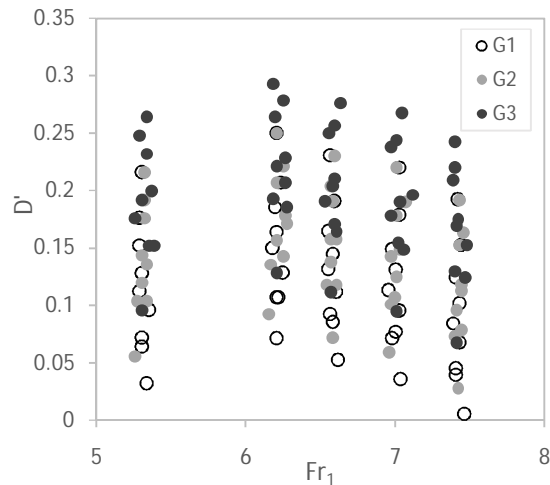
### 3-2- طول پرش هیدرولیکی

اگرچه طول پرش هیدرولیکی یکی از پارامترهای حساس در طراحی است، اما در حالت کلی قابل محاسبه از طریق تحلیل‌های ریاضی نبوده و لازم است تا در هر مورد از نتایج تجربی و آزمایشگاهی استفاده گردد. در شکل 10 تغییرات طول بی‌بعد شده پرش  $L_j / y_2^*$  نسبت به افزایش عدد فرود نشان داده شده است که در آن  $y_2^*$  عمق ثانویه پرش در بستر صاف و  $L_j$  طول پرش است. ملاحظه می‌شود که میانگین نسبت  $L_j / y_2^*$  در بستر صاف برابر 5/9 است ولی مقادیر آن برای بسترهای نفوذپذیر کمتر از

کاهش می‌دهند.

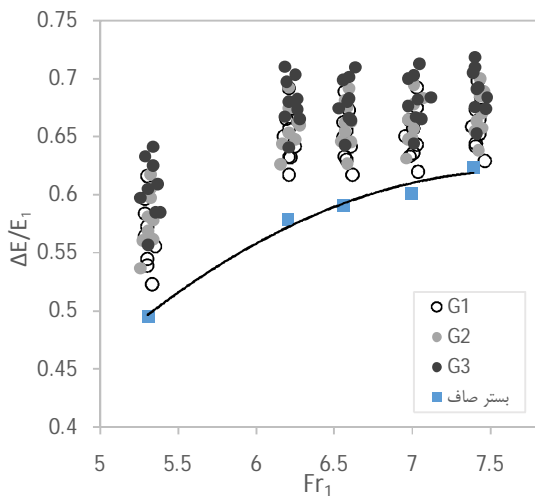
در شکل 9 میزان تأثیر طول و ضخامت بستر نفوذپذیر متخلخل بر نسبت اعماق مزدوج به ترتیب در بیشترین ضخامت ( $t=0.2m$ ) و بیشترین طول بستر ( $L=1m$ ) و برای بزرگ‌ترین میانگین قطر دانه‌بندی بستر ( $G3$ ) به ازای اعداد فرود مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش طول و ضخامت بستر نفوذپذیر متخلخل در اعداد فرود یکسان، نسبت اعماق مزدوج کاهش می‌یابد. بدیهی است که افزایش طول بستر نفوذپذیر سبب افزایش سطح نفوذ جریان به داخل بستر خواهد شد و در نتیجه  $p$  کاهش می‌یابد.

از طرف دیگر افزایش ضخامت بستر نفوذپذیر نیز سبب افزایش سطح مقطع بستر نفوذپذیر می‌شود و در نتیجه میزان دبی عبوری در واحد عرض بستر نفوذپذیر افزایش یافته و مقدار  $p$  کاهش می‌یابد و در هر دو حالت کاهش  $p$  سبب کاهش عمق ثانویه جریان و در نتیجه کاهش نسبت اعماق مزدوج خواهد شد. حداکثر درصد کاهش اعماق مزدوج نسبت به بستر صاف به ترتیب 24/2 درصد برای ضخامت ثابت ( $t=0.2m$ ) و طول متغیر و همچنین 23/4 درصد برای طول ثابت ( $L=1m$ ) و ضخامت متغیر می‌باشد که نشان از تأثیر نسبتاً یکسان طول و ضخامت بستر نفوذپذیر متخلخل بر کاهش نسبت اعماق مزدوج در این تحقیق می‌باشد.



شکل 8 تغییرات ضریب کاهش عمق ثانویه پرش در بسترهای نفوذپذیر به ازای عدد فرود اولیه





شکل 11 تغییرات افت انرژی نسبی پرش روی بستر نفوذپذیر به ازای عدد فرود اولیه

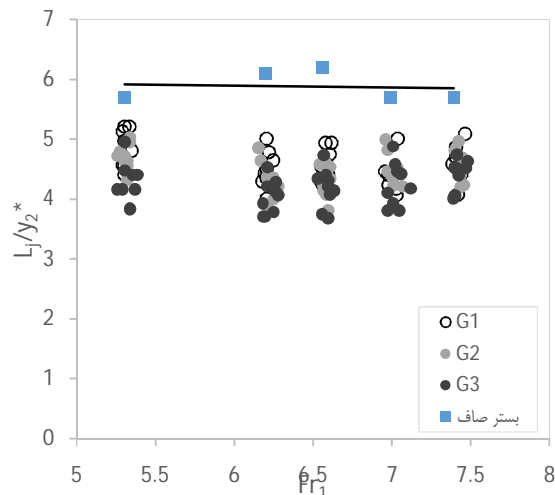
همچنین نفوذپذیری بستر سبب کاهش ابعاد پرش هیدرولیکی شده بطوریکه اندازه این تغییرات به میانگین قطر ذرات بستر و همچنین طول و ضخامت بستر نفوذپذیر بستگی دارد.

مشاهده شد که در اعداد فرود یکسان با درشت‌تر شدن اندازه دانه‌های بستر متخلخل، نفوذ جریان به درون بستر افزایش یافته و نسبت اعماق مزدوج کاهش می‌یابد که مقدار این کاهش به‌طور میانگین 15/8 درصد بوده و در بیشترین مقدار خود به 29/3 درصد می‌رسد. طول پرش نیز در مقایسه با بستر صاف حداکثر 39 درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش نفوذ جریان به درون بستر به علت افزایش قطر دانه‌بندی یا افزایش طول و ضخامت بستر میزان افت انرژی افزایش یافته و به‌طور میانگین در حدود 14 درصد بیش از بستر صاف می‌باشد.

### 5- فهرست علائم

$A$	سطح
$d_{50}$	میانگین قطر
$g$	شتاب
$F_f$	نیروی اصطکاک
$Fr_1$	عدد فرود جریان در مقطع بالادست پرش

5/9 می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر نفوذ جریان و دانه بندی بستر در کوتاه‌تر شدن طول پرش است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که طول پرش در بسترهای نفوذپذیر حداکثر 39 درصد نسبت به بستر صاف کاهش می‌یابد.



شکل 10 طول پرش در بستر نفوذپذیر به ازای عدد فرود اولیه

### 3-3- افت انرژی نسبی

اتلاف انرژی پرش هیدرولیکی  $\Delta E$  برابر با اختلاف انرژی قبل و بعد از پرش هیدرولیکی  $E_1 - E_2$  می‌باشد. شکل 11 نمودار تغییرات اتلاف انرژی نسبی  $\Delta E/E_1$  را به ازای اعداد فرود اولیه روی بسترهای نفوذپذیر متخلخل در مقایسه با بستر صاف نفوذناپذیر نمایش می‌دهد. شکل 11 نشان می‌دهد که می‌توان با دقت خوبی یک منحنی چندجمله‌ای درجه دو را بر روی نتایج اتلاف انرژی حاصل از پرش هیدرولیکی برازش داد. مطابق این نمودار مشاهده می‌شود که حداکثر نرخ اتلاف انرژی در بسترهای نفوذپذیر حدود 31/5 درصد بوده و میانگین اتلاف انرژی نیز در اعداد فرود یکسان، حدود 14 درصد بیش از بستر صاف می‌باشد.

### 4- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که تأثیر عدد فرود جریان بر شدت تغییرات نسبت اعماق مزدوج پرش بیش از تأثیر نفوذپذیری بستر می‌باشد.

## 6- منابع

بدیع زادگان، ر.، اسماعیلی، ک.، فغفور مغربی، م. و صانعی، م. (1390). مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش کانال‌های آبیاری با بستر موج‌دار. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). (3)25: 676 تا 687.

حسینی، م. و ابریشمی، ج. (1378). هیدرولیک کانال‌های باز (چاپ هفتم). موسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ایران.

Carollo, F. G., Fero, V. and Pampalone, V. (2007). "Hydraulic Jumps on Rough Beds". Journal of Hydraulic Engineering, 133(9): 989-999.

Ead, S. A., and Rajaratnam, N. (2002). "Hydraulic jumps on corrugated beds". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(7): 656-663.

Izadjoo, F., and Shafai-Bajestan, M. (2007). "Corrugated bed hydraulic jump stilling basin". Journal of Applied Sciences, 7(8): 1164-1169.

Rajaratnam, N. (1968). "Hydraulic jumps on rough beds". Transportation Engineers Institute, Canada, 11(A-2): 1-8.

Salehian, S., Shafai-Bajestan, M., Mousavi-Jahromi, H., Kashkooli, H. and Kashefipour, S. M. (2011). "Hydraulic jump characteristics due to natural beds". World Applies Science Journal, 13(5): 1005-1011.

$K_s$	میانگین ارتفاع زبری
$l$	طول بستر نفوذپذیر
$L_j$	طول پرش
$q$	دبی در واحد عرض
$Q$	دبی جریان
$P$	نسبت جریان باقیمانده در پایین‌دست به جریان ورودی
$Re$	عدد رینولدز
$t$	ضخامت بستر نفوذپذیر
$V$	سرعت جریان
$y_1$	عمق اولیه پرش
$y_2$	عمق ثانویه پرش
$\pi$	ثابت پی
$\beta$	ضریب نیروی برشی
$\beta$	ضریب تصحیح مومنوم
$\gamma$	وزن مخصوص
$\rho$	چگالی
$\mu$	لزجت دینامیکی