

# مطالعه توزیع فشار دینامیکی بر روی بستر پرتاب‌کننده جامی مرکب

امید امین‌الرعا یی مینی<sup>۱</sup>، محمدرضا کاویانپور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب- هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه مهندسی آب- هیدرولیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

\* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۶۷۱۵۴۳۳

kavianpour@kntu.ac.ir

**چکیده-** پرتاب‌کننده‌های جامی اغلب در انتهای سرریزهای شوت به منظور استهلاک انرژی و هدایت جریان به حوضچه‌های استغراق، به‌ویژه در سدهای بلند، استفاده می‌شوند. جام مرکب طرح خاصی از پرتاب‌کننده‌ها است که بر خلاف جام ساده با شیب عرضی کف صفر درجه، دارای شیب عرضی در بستر جام بوده و در نتیجه انحنا طولی با انحنایی در پلان جام یا انحنا عرضی ترکیب می‌شود. این پرتاب‌کننده‌ها در شرایط هندسی و محدودیت‌های پایین‌دست سدها مورد توجه ویژه قرار می‌گیرند. با وجود این که مطالعاتی در زمینه جام‌های ساده در دسترس است، اما اطلاعات در زمینه جام‌های مرکب بسیار ناچیز است. در مقاله حاضر پارامترهای هیدرولیکی مانند فشار، سرعت و عمق در سه موقعیت عرضی (چپ، مرکز، راست) با سه شیب عرضی مختلف) و در مقاطع مختلف طولی (ورودی جام، قعر جام، لبه جام) بر روی دو سرریز مدل هیدرولیکی سد گتوند علیا با شیب متفاوت ثبت شد. مقادیر فشار پیزومتری با مقادیر مختلف دبی در محدوده اعداد فرود  $3/5$  تا  $7/5$  توسط پیزومترهای نصب شده در بستر جام‌ها برداشت و به کمک آنها روند تغییر فشارهای دینامیکی در راستای طولی جام به صورت روابط و نمودارهای بی‌بعد برای سه محور با شیب عرضی متفاوت نزدیک دو دیوار و محور میانی بستر جام‌های مرکب فوق تعیین شد. در این راستا محل بیشینه فشار دینامیکی بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب نیز ارائه شده است. نتایج این تحقیق اطلاعات مفید و جدیدی را به منظور طراحی پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب در اختیار طراحان قرار می‌دهد.

**کلیدواژگان:** پرتاب‌کننده‌های جامی، جام‌های مرکب، توزیع فشار، فشار دینامیکی، مدل هیدرولیکی.

## ۱- مقدمه

کننده و حتی طرح‌های ویژه‌ای مانند جام‌های مرکب ساخته شده، اما هنوز دایره اطلاعات و دانش موجود به‌ویژه در مورد جام‌های مرکب برای طراحی این سازه‌های کوچک و ضرورت پرداختن به آن احساس می‌شود. بدین منظور این مطالعه بر روی دو مدل هیدرولیکی از پرتاب‌کننده جامی مرکب متمرکز شده

پرتاب‌کننده‌های جامی اغلب در انتهای سرریزهای شوت و مجرای تنداب سدهای بزرگ به منظور استهلاک انرژی جریان‌های با سرعت بالا طراحی و ساخته می‌شوند. تاکنون مدل‌های مختلفی از پرتاب‌کننده‌های جامی مانند جام‌های ساده، جام‌های شیاردار، جام‌های دارای منحرف

است. پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب دارای شیب عرضی در بستر جام هستند که با انحنایی در پلان جام ترکیب می‌شوند. این شیب و انحنای جام تحت شرایط هندسی سازه سرریز و توپوگرافی منطقه تعیین می‌شود. این پرتاب‌کننده‌ها در مواردی که سرریز در دو طرف سد قرار داشته و نیاز به انحراف جت پرتابی از سمت دیوارهای پایاب برای کاهش خطر تخریب آنها مطرح باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد که این انحراف جت جریان با استفاده از انحنایی در پلان جام تأمین می‌شود.

پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب علاوه بر انحراف جت پرتابی به سمت دلخواه در پایاب با ایجاد چرخش در هسته جت توسط شیب عرضی بستر جام باعث افزایش استهلاک انرژی جت و پاشش بیشتر جت پرتابی در هوا می‌شوند.

تاکنون تحقیقات مختلفی با موضوع بررسی فشار بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی به منظور طراحی سازه جام و دیوارهای کناری آن انجام شده است. در سال ۱۹۵۰ طراحی جام و دیوارهای جانبی پرتاب‌کننده‌ها بدون در نظر گرفتن اثر گریز از مرکز<sup>۱</sup> حاصل از چرخش جریان در جام انجام شد. به طور کلی فشار کل بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی برابر مجموع فشارهای هیدرواستاتیک و اثر ناشی از گریز از مرکز است (Khatsuria, 2005).

تاکنون تحقیقات مختلفی با موضوع بررسی فشار بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی به منظور طراحی سازه جام و دیوارهای کناری آن انجام شده است. در سال ۱۹۵۰ طراحی جام و دیوارهای جانبی پرتاب‌کننده‌ها بدون در نظر گرفتن اثر گریز از مرکز<sup>۱</sup> حاصل از چرخش جریان در جام انجام شد. به طور کلی فشار کل بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی برابر مجموع فشارهای هیدرواستاتیک و اثر ناشی از گریز از مرکز است (Khatsuria, 2005).

جریان غیرقابل تراکم و غیرچرخشی، مجموعه‌ای از معادلات انتگرالی را به دست آورده و با حل عددی این معادلات توانستند سرعت و توزیع فشار در جام را تعیین کنند. آنان نشان دادند که اثر لزجت در جریان بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی ناچیز است. البته اثر گرانش در جریان بر روی جام‌ها مهم است و پارامتر  $Q/(\sqrt{2gH}R)$  شامل دبی جریان و  $H$  هد انرژی وارد می‌شود. از آنجا که در جریان بر روی جام‌ها هد استاتیک در مقایسه با هد دینامیک  $V^2/2g$  کوچک است، می‌توان جمله دیگری را با عنوان  $h_0/R$  بیان کرد. همچنین جمله بی‌بعد فشار  $(P/\rho gH)$  را که در آن چگالی سیال است می‌توان به صورت  $P/(\rho V^2/2)$  نوشت. اگر هد فشار وابسته به عمق جریان ورودی به جام معادل  $h_0$  باشد، می‌توان نوشت:

Chen and Yu (1969) نظریه Lenau and Cassidy (1969) را اصلاح و تکمیل کردند. آنان با در نظر گرفتن جریان غیرقابل تراکم و غیرچرخشی، مجموعه‌ای از معادلات انتگرالی را به دست آورده و با حل عددی این معادلات توانستند سرعت و توزیع فشار در جام را تعیین کنند. آنان نشان دادند که اثر لزجت در جریان بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی ناچیز است. البته اثر گرانش در جریان بر روی جام‌ها مهم است و پارامتر  $Q/(\sqrt{2gH}R)$  شامل دبی جریان و  $H$  هد انرژی وارد می‌شود. از آنجا که در جریان بر روی جام‌ها هد استاتیک در مقایسه با هد دینامیک  $V^2/2g$  کوچک است، می‌توان جمله دیگری را با عنوان  $h_0/R$  بیان کرد. همچنین جمله بی‌بعد فشار  $(P/\rho gH)$  را که در آن چگالی سیال است می‌توان به صورت  $P/(\rho V^2/2)$  نوشت. اگر هد فشار وابسته به عمق جریان ورودی به جام معادل  $h_0$  باشد، می‌توان نوشت:

ارائه کرد:

در رابطه (۳) عدد فرود جریان ورودی به جام است که از رابطه  $V/\sqrt{gh_0}$  به دست می‌آید. بنابراین فشار بیشینه در جام وابسته به انحنای جام، عمق بی‌بعد جریان ورودی به جام  $(h_0/R)$  و عدد فرود جریان ورودی است (Lenau et al., 1969).

## 1. Centrifugal Pressures

- بر روی بستر جام:

$$\frac{(h_p - h_0)}{(h_{PM} - h_0)} = |X_{PM}^\varepsilon|$$

For  $-1 \leq X_{PM} \leq 0$

- قبل از ورود به جام

$$\frac{h_p}{h_{PM}} = \text{Exp}(2\varepsilon(1 + X_p))$$

For  $X_{PM} < -1$  (۷)

که در این روابط  $\varepsilon$  پارامتر برآزش بوده و با توجه به شرایط هندسی و هیدرولیکی جریان در جام‌های مثلثی برابر یک یا دو است. به عبارت دیگر در جام‌های مثلثی  $\varepsilon = 1$  برای عدد فرود  $F_0$  و ارتفاع جام  $w$  بزرگ و  $\varepsilon = 2$  برای عدد فرود  $F_0$  و ارتفاع جام  $w$  کوچک انتخاب می‌شود. نتایج حاصل از مطالعات آنان برای جام‌های با انحنای دایره‌ای نیز قابل ارزیابی است (Steiner et al., 2008).

نوسانهای فشار در سازه‌های هیدرولیکی یکی از مباحث ویژه و مهم به‌شمار می‌رود که توجه محققان مختلف را در چند دهه اخیر به خود جلب کرده است. بر اساس مطالعات انجام شده، در سازه‌های هیدرولیکی که جریان با سرعت زیاد در حرکت بوده و با آشفتگی شدید جریان همراه است، نوسانهای فشار و سرعت در مقایسه با مقادیر متوسط جریان اهمیت می‌یابد. جریان بر روی سرریزها، جریان در جهش هیدرولیکی یا جریان عبور کننده سریع از روی موانع، نمونه‌هایی از موارد مرتبط با این شرایط هستند. بر اساس میدان فشار هیدرودینامیک ایجاد شده، شرایط جریان برای افت فشار موضعی به زیر فشار بخار سیال و در نتیجه وقوع خلأزایی آماده خواهد شد. تاکنون نمونه‌های تخریب مختلفی گزارش شده است که محققان نوسانهای فشار را عامل خرابی آنها برشمرده‌اند. بنابراین مطالعه این پدیده کمک شایانی به ارزیابی وقوع خلأزایی و عملکرد ایمن سازه‌های هیدرولیکی خواهد کرد. این ارزیابی به دلیل ماهیت آماری آن، طراح را قادر می‌سازد تا ایمنی سازه را با ارزیابی ریسک همراه سازد. Narayanan (1980) با محاسباتی ساده رابطه‌ای را بین نوسانهای فشار و پدیده خلأزایی در حوضچه آرامش اثبات کرد. همچنین

(2000) Joun and Hager با مطالعه آزمایشگاهی پرتاب‌کننده‌های جامی ساده با انحنای دایره‌ای که در ابتدای کانال منشوری قرار داشت، توزیع فشار بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی ساده را به‌دست آوردند. به‌منظور تعیین توزیع فشار دینامیکی، پارامتر بی‌بعد  $H_p$  با رابطه (۴) ارائه شد.

$$H_p = (h_p - h_0)/(h_{PM} - h_0) \quad (۴)$$

که در آن  $h_p$  فشار کل،  $h_0$  هد فشار استاتیک و  $h_{PM}$  فشار بیشینه برداشت شده در راستای طولی پرتاب‌کننده جامی است. ایشان با ترسیم تغییر  $H_p$  در سیستم مختصات بی‌بعد  $X_p$  که با استفاده از زاویه انحنای جام و شعاع جام توسط  $X_p = x/R \sin \beta$  تعریف شده، روند توزیع فشارهای دینامیکی بر روی بستر جام‌های ساده را مشخص کردند (Joun and Hager, 2000):

$$H_p = [-2X_p \exp(1 + 2X_p)]^{2/3} \quad (۵)$$

Heller et al. (2005) در راستای تکمیل آزمایشهای Joun و Hager (2000)، روابط مشابه و دقیق‌تری را برای توزیع فشار دینامیک بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی ساده با قوس دایره‌ای ارائه کردند. بر این اساس توزیع فشار دینامیک بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی حاصل از تحلیل نتایج آزمایشگاهی بر روی مدل‌های مختلف هیدرولیکی، بر پایه پارامترهای تعریف شده رابطه (۵) به‌صورت رابطه زیر ارائه شد:

$$H_p = [-X_p \exp(1 + X_p)]^{1.5} \quad (۶)$$

ایشان به‌منظور تعیین تفاوت پارامترهای هیدرولیکی جام‌های مثلثی<sup>۱</sup> و دایره‌ای، آزمایشهایی را بر روی جام‌های مثلثی با هندسه‌های مختلف انجام دادند. آنان با تعریف پارامتر بی‌بعد فشار  $P = (h_p + h_0)/(h_{PM} + h_0)$  توزیع نسبی فشار دینامیک بر مبنای مختصات نرمال شده  $X_{PM} = X_{PM}/X$  برای قبل از ورود به جام و پس از ورود به جام تا لبه جام را به صورت روابط زیر ارائه کردند:

#### 1. Triangular Deflector

شیب عرضی بستر ترکیب می‌شود (پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب) - در دست است. به همین دلیل، مقاله حاضر تلاش دارد با مطالعه آزمایشگاهی این مدل‌ها و تحلیل نتایج، روابط بی‌بعد و قابل استنادی را برای توصیف توزیع فشار دینامیکی بر روی بستر پرتاب‌کننده جامی مرکب ارائه کند. این نگرش در باره پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. نتایج این مطالعه ارائه توزیع فشار در موقعیت‌های مختلف عرضی جام، تعیین محل بیشینه فشار دینامیک را نیز مد نظر قرار داده که می‌تواند در طراحی هیدرولیکی و سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو مدل مختلف پرتاب‌کننده جامی مرکب که در انتهای سرریز سد گتوند قرار دارند، انجام شد. مدل هیدرولیکی سرریز سد گتوند در مؤسسه تحقیقات آب ایران طراحی و ساخته شده است. کانال‌های ورودی منتهی به این پرتاب‌کننده‌ها مقاطع مستطیلی دارند و تراز بستر مجرای سمت راست نسبت به تراز مجرای سمت چپ پایین‌تر است. شیب کانال‌های ورودی به این پرتاب‌کننده‌ها حدود  $3/5\%$  و طول افقی این کانال حدود ۲ متر است. شیب عرضی بستر جام این پرتاب‌کننده‌ها متفاوت است. هر دو جام دارای انحنايي محوری در پلان است که محور پرتاب‌کننده‌ها را تحت زاویه  $24^\circ$  درجه به سمت راست تغییر می‌دهد. تنداب‌های منتهی به پرتاب‌کننده‌ها دارای دو مجرا به عرض خالص  $34/5$  سانتی‌متر است که در انتهای یک تنداب بالادست با شیب زیاد قرار دارند. تنداب‌ها، کانال ورودی، پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب و دیوارها از جنس ورق شفاف<sup>۱</sup> ساخته و در مدل نصب شد. ارتفاع دیوار جانبی پرتاب‌کننده‌ها و کانال ورودی برابر ۱۲ سانتی‌متر

وی در سال ۱۹۸۴ با انجام آزمایشهایی بر روی دریچه نشان داد که نوسانهای شدید فشار، احتمال وقوع خلأزایی را افزایش می‌دهد و بیشترین احتمال وقوع را در لایه برشی جدا شده از لبه بالایی دریچه اعلام کرد (Narayanan, 1984). نتایج حاصل از آزمایشهای کاویانپور در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۰ بر روی سرریز و در پایین‌دست سراسیب‌ها و مجاری بسته نشان داد که با هوادمی به جریان، شدت نوسانها کاهش یافته و همچنین میانگین فشار جریان افزایش می‌یابد، که در نتیجه خطر وقوع خلأزایی به مقدار زیادی کاهش می‌یابد (Kavianpour, 1997, 2000). همچنین نوسانهای فشار بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی به دلیل وجود شرایط آشفته و سرعت جریان مورد توجه محققان قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی Kavianpour and Pourhasan (2005) در مورد نوسانهای فشار بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی نشان داد که ضریب بیشینه مثبت نوسانهای فشار با ورود به مقطع جام روندی کاهشی می‌یابد، اما در نزدیکی مقطع خروجی جام این مقادیر ثابت نگاه داشته می‌شود. ضریب بیشینه منفی نوسانهای فشار نیز با ورود به مقطع جام افزایش می‌یابد، اما با کاهش نسبتاً کوچکی در قعر جام همراه است. مطالعات وطن دوست (۱۳۸۵) بر روی ضرایب نوسانهای فشار در پرتاب‌کننده‌های جامی شکل نشان داد که بیشینه ضریب میانگین نوسانهای فشار در محدوده تغییر شکل جام رخ می‌دهد. در این مطالعات با افزایش عدد فرود جریان ورودی، ضرایب نوسانهای فشار کاهش می‌یابد، اما در محدوده انحنای و تغییر شکل جام‌ها این روند کاهشی دیده نمی‌شود (وطن دوست، ۱۳۸۵).

با توجه به نتایج تحقیقات ملاحظه می‌شود که با وجود مطالعات نسبتاً مفصل انجام شده بر روی پرتاب‌کننده‌های جامی ساده، متأسفانه اطلاعات کم و غیرقابل استنادی در مورد پرتاب‌کننده‌های جامی - که انحنايي محوری آنها با

1. Plexiglass

محدوده عدد فرود در دبی‌های سیلابی سرریز از ۲۰ تا ۱۷۰ ( $lit/s$ )، برابر ۳/۵ تا ۷/۵ است و به‌ازای این مقادیر عدد فرود، فشار و سایر پارامترهای هیدرولیکی بر روی بستر پرتاب‌کننده‌ها ثبت شده است.

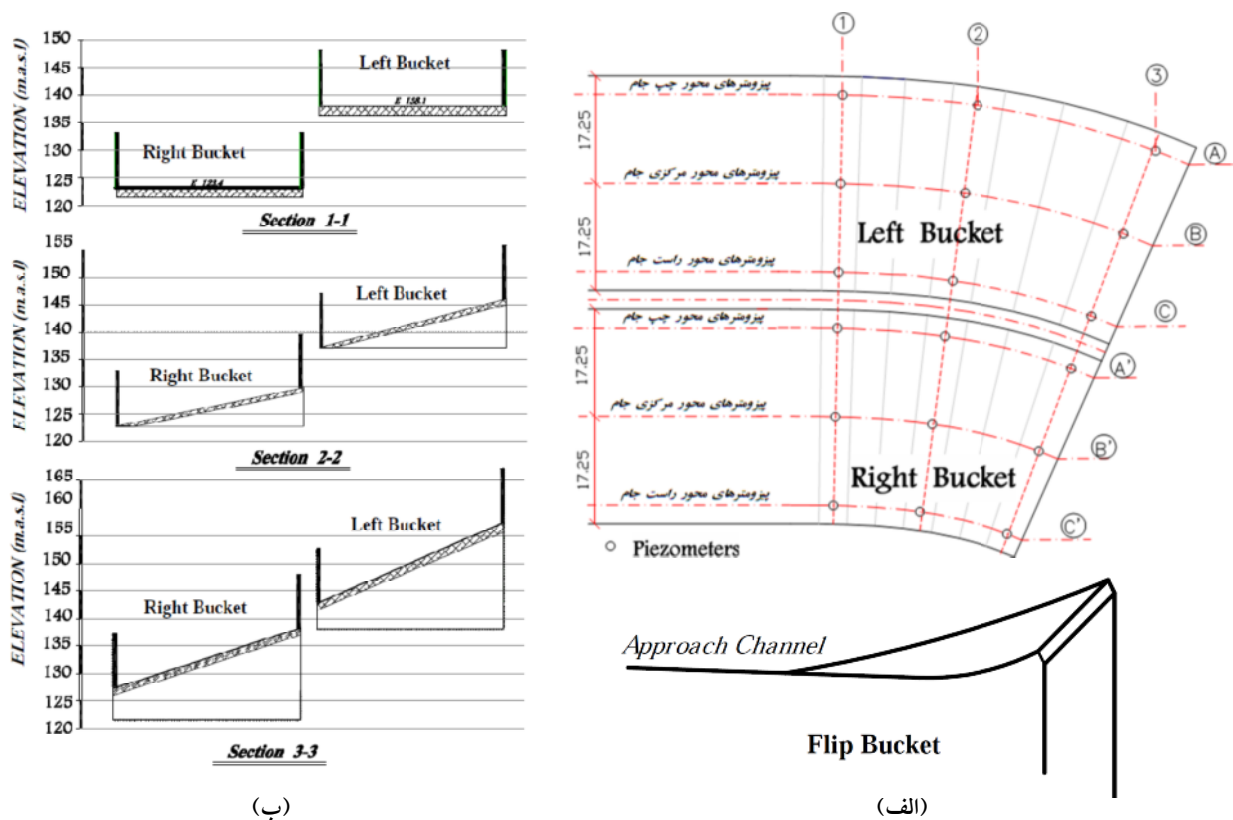
جریان بر روی تنداب‌ها و کانال‌های مسطح تحت اثر نیروی ثقل بوده و در این حالت فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک وارد بر کف کانال منطقی است. اما در کانال‌هایی که در بستر آنها هر گونه انحنای مقعر یا محدب داشته باشد -به طوری که خطوط جریان در راستای حرکت خود تحت اثر تغییر شکل بستر منحرف شوند- به علت تأثیر نیروی گریز از مرکز، توزیع فشار هیدرواستاتیک نخواهد بود. در جریان‌هایی که انحنای خطوط جریان مقعر است، به علت تأثیر هم‌جهت نیروی گریز از مرکز و ثقل، فشار در هر نقطه، از فشار هیدرواستاتیک بیشتر است (محمودیان شوستری، ۱۳۸۷). در این شرایط چنان‌چه شیب عرضی نیز به انحنای محوری به شکل نوعی قوس محوری به هندسه جام اضافه شود، الگوی توزیع فشار بر بستر و دیواره‌ها پیچیده می‌شود و با حالت قوس ساده در پرتاب‌کننده‌های جامی ساده متفاوت است. وجود چنین وضعیت پیچیده‌ای در جام‌های مرکب در تحقیق حاضر، آن را از سایر مطالعات در این زمینه متمایز می‌سازد.

در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۱ در سمت چپ، نمایی از مدل هیدرولیکی سرریز سد گتوند را نشان می‌دهد و در سمت راست ساختار مدل هیدرولیکی پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب نشان داده شده است (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۷).

هم چنان که در شکل دیده می‌شود، شیب عرضی بستر جام‌ها با توجه به شکل قوسی مقطع عرضی و همچنین هندسه جام‌های چپ و راست با یکدیگر متفاوت است. در شکل ۲- الف پلان جام‌های مرکب و موقعیت پیزومترها بر روی بستر جام‌های چپ و راست در مدل هیدرولیکی همراه با طرح‌واره‌ای از پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب نشان داده شده است. پیزومترها در بستر هر دو پرتاب‌کننده در دو موقعیت عرضی نزدیک به دیوارهای جانبی و در وسط جام از بالادست جام تا لبه انتهایی آن قرار گرفته‌اند. در شکل ۲- ب مقطع پرتاب‌کننده‌های جامی در سه بخش قبل از ورود به جام، در قعر جام و لبه پرتاب‌کننده -به‌منظور نمایش شیب عرضی بستر جام‌ها- نشان داده شده است. ثبت پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز در دبی‌های مختلف انجام شده و بنابراین سرعت میانگین و عمق جریان ( $h_0$ ) اندازه‌گیری شده، محدوده‌ای از عدد فرود را معرفی می‌کند. با توجه به جهت جریان و پلان جام‌های مرکب در این تحقیق، هر یک از جام‌ها با نام جام چپ و جام راست نامگذاری شده است.



شکل ۱ مدل هیدرولیکی سرریز سد گتوند و مدل هیدرولیکی پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب (مؤسسه تحقیقات آب، ۱۳۸۷)



شکل ۲. پلان و مقطع، موقعیت پیزومترهای بستر جام‌ها و سایر مشخصات هندسی پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب

و دینامیک را نشان می‌دهد. به منظور تعیین آن، نخست ثبت آزمایشگاهی توزیع فشار استاتیک و دینامیک از قبل از ورود به جام تا لبه جام انجام شد که نتایج در شکل ۴ دیده می‌شود. در این شکل به‌ازای مقادیر مختلف دبی، عمق و سرعت جریان در مقطع قبل از ورود به جام مشخص و عدد فرود جریان ورودی به جام برآورد شد که مقادیر آن شامل  $3/6$ ،  $4/2$ ،  $5/1$ ،  $6/3$  و  $7/5$  است. دبی ورودی به هر دو مجرا برابر  $Q$  است که برای هر یک از تنداب‌ها با توجه به شرایط همسان کانال ورودی از تاج سرریز می‌توان دبی را برای هر جام برابر  $Q/2$  در نظر گرفت.

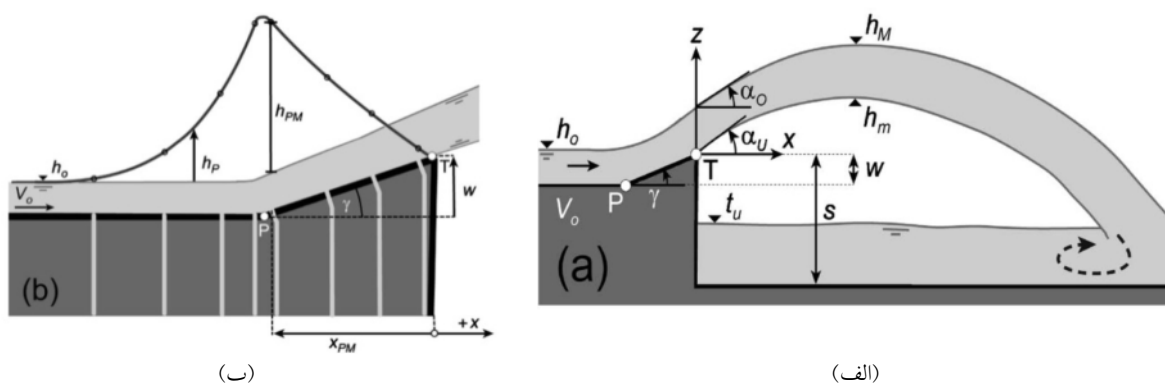
### ۳- تحلیل نتایج

شکل ۴- الف توزیع فشار پیزومتری را از پیش از ورود به جام تا لبه جام برای پیزومترهای محور میانی جام مرکب سمت چپ نشان می‌دهد.

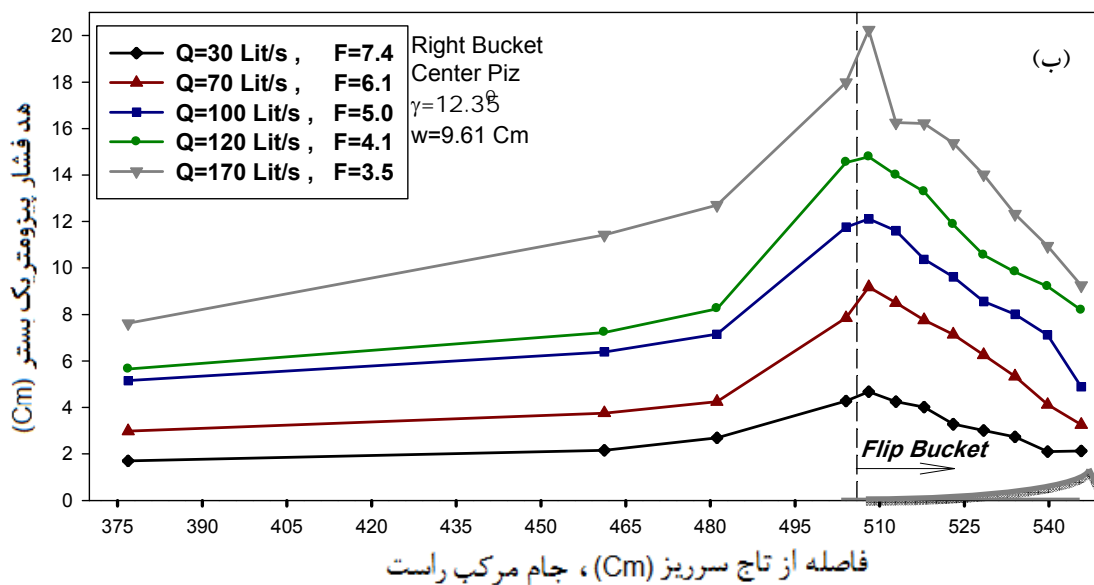
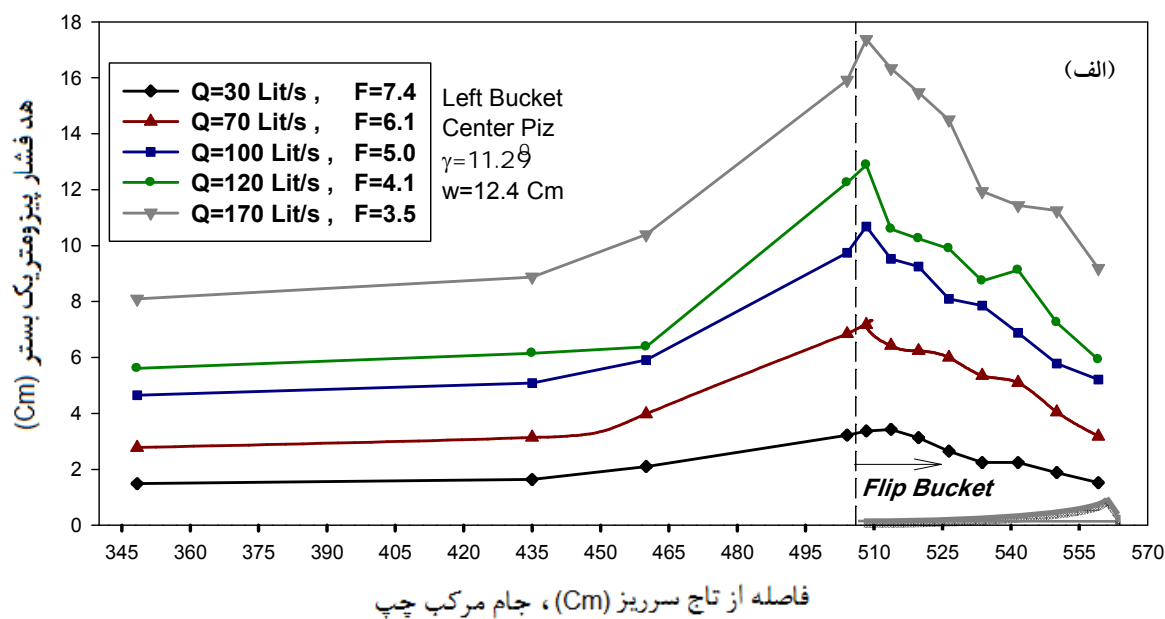
در شکل ۳ مشخصات کلی و طرح‌واره جام‌ها در مقطع طولی مشخص نشان داده شده است. در این شکل زاویه انحراف جام با  $\gamma$  و ارتفاع جام نسبت به کف کانال ورودی با  $w$  نشان داده شده است. عمق و سرعت جریان در کانال ورودی به جام با علامت  $h_0$  و  $V_0$  نمایش داده شده است. در این شکل نقطه  $P$  محل شروع جام و نقطه  $T$  لبه جام است. توزیع طرح‌واره‌ای از فشار پیزومتری بر طبق نتایج آزمایشگاهی در شکل ۳- ب نشان داده شده که در آن  $h_p$  هد فشار کل یا فشار پیزومتری بر روی بستر جام و  $h_{PM}$  بیشینه فشار کلی برداشت شده بر روی بستر جام است که اغلب در محدوده ورودی جام (نقطه  $P$ ) رخ می‌دهد. سایر مشخصات هندسه جام و هندسه جت پرتابی در شکل ۳ نشان داده شده است.

توزیع فشار پیزومتری در بستر جام‌های مرکب  $h_p$  پارامتر مهمی در طراحی است که مجموع هد فشار استاتیک ( $h_0$ )

1. Deflector Angle



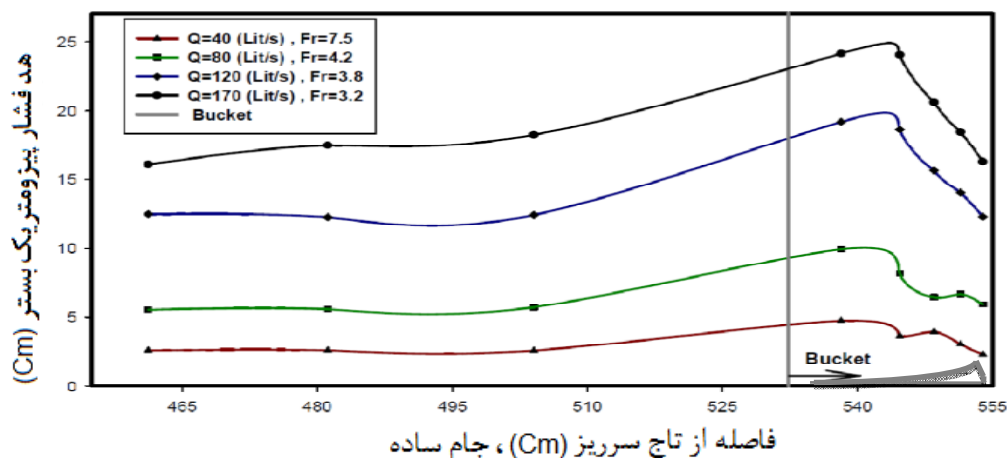
شکل ۳ الف) پارامترها و مشخصات هندسی، ب) طرح‌واره‌ای از توزیع فشار پیزومتر بر روی بستر جام‌های مرکب در محور مرکزی



شکل ۴ توزیع هد فشار پیزومتر بر روی بستر جام مرکب در محور مرکزی برای مقادیر مختلف دبی الف- جام چپ، ب- جام راست

در شکل ۴- ب توزیع فشار پیزومتری جام سمت راست نشان داده شده که در آن، بیشینه فشار پیزومتری در ناحیه ابتدای ورود جریان به روی جام رخ می‌دهد. محور قائم همراه با نشانگر، معرف شروع جام در انتهای تنداب است که با مقادیر بیشینه فشار در پایین دست همراه شده است. در شکل ۵ توزیع فشار پیزومتری بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی ساده توسط محققان حاضر استخراج شده است (Aminoroaya et al., 2011). این شکل برای جام ساده با قوس دایره‌ای با زاویه انحنای ۲۸ درجه و شعاع تقریبی ۵۰ متر برای مقادیر مختلف دبی به‌ازای عدد فرود ۳/۲، ۳/۸، ۴/۲ و ۷/۵ ترسیم شده است. مقایسه توزیع فشار پیزومتری جام ساده و مرکب نشان می‌دهد که فشار دینامیک بر روی جام‌های مرکب نسبت به جام‌های ساده با شدت بیشتر و در محدوده کوچکتري افزایش می‌یابد. تغییرات فشار پیزومتری بر روی جام‌های مرکب در محدوده آغازین جام به مقدار بیشینه خود می‌رسد، اما در جام‌های ساده بیشینه فشار در قعر رخ می‌دهد. مقادیر بیشینه فشار رابطه عکس با عدد فرود دارد و با افزایش عدد فرود فشار بیشینه کاهش یافته است. همچنین مقادیر بیشینه فشار برای عدد فرود ۷/۵ و ۴/۲ برای جام مرکب چپ به ترتیب برابر ۳ و ۱۳ متر و برای

جام مرکب راست برابر ۴ و ۱۵/۵ متر است. مقدار بیشینه فشار برای عدد فرود ۷/۵ و ۴/۲ برای جام ساده به ترتیب برابر ۴/۵ و ۱۰ متر است و در مجموع مقادیر کوچکتري را برای عدد فرود بزرگ، در مقایسه با جام‌های مرکب نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در مدل نمی‌توان پیزومترهای برداشت فشار را دقیقاً در محل اتصال جام به کانال قرار داد، بنابراین در مدل هیدرولیکی، پیزومترها در فاصله بسیار نزدیکی به محل ورود جریان به داخل جام نصب شده‌اند و اولین پیزومتر کمی پایین‌تر از محل شروع جام قرار دارد. این اختلاف اندک نشان می‌دهد که بیشینه فشار پیزومتری کمی پایین‌تر از نقطه محل ورود جریان به داخل جام رخ می‌دهد. اما اگر بتوان مدل هیدرولیکی جام‌ها و کانال ورودی را به صورت یکپارچه ساخت و اولین ردیف پیزومترها را دقیقاً در محل ورود جریان به داخل جام نصب کرد، این اختلاف اندک از بین خواهد رفت. با توجه به نتایج ارائه شده در این بخش، در طراحی پرتاب‌کننده‌های جامی که در آنها محدودیت‌های خاص هندسی و توپوگرافی منطقه در ساخت سازه سرریز سدها وجود ندارد، طراحی و استفاده از جام‌های ساده مناسب‌تر است.



شکل ۵ توزیع هد فشار پیزومتری بر روی بستر جام ساده برای مقادیر مختلف دبی



اما این پرتاب‌کننده‌ها در شرایط هندسی و محدودیت‌های خاص پایین‌دست سدها مورد توجه ویژه قرار می‌گیرند. این پرتاب‌کننده‌ها در مواردی که سرریز در دو طرف سد قرار داشته و به انحراف جت پرتابی از سمت دیوارهای پایاب نیاز باشد، به‌منظور کاهش خطر تخریب سازه سد و سرریز، استفاده از این پرتاب‌کننده‌ها مطرح می‌شود. این انحراف در جت توسط انحنایی در پلان جام و شیب عرضی بستر تأمین می‌شود (پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب سرریز سد گتوند، سد منجیل و مانند آن). به‌عنوان مثال موقعیت رودخانه کارون و وجود دیواره سنگی در سمت چپ این سد، طراحی جام‌های مرکب را برای این سد اجتناب‌ناپذیر می‌کند. پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب علاوه بر انحراف جت پرتابی به سمت دلخواه در پایاب با ایجاد چرخش در هسته جت توسط شیب عرضی بستر جام باعث افزایش استهلاک انرژی جت و پاشش بیشتر جت پرتابی به هوا می‌شوند. بنابراین اگر چه بیشینه فشار در جام‌های ساده کمتر است و چه بسا طراحی آنها آسان‌تر نیز باشد، اما در موقعیت‌های مختلفی طراحان و مهندسان هیدرولیک مجبور به طراحی جام‌های مرکب می‌شوند.

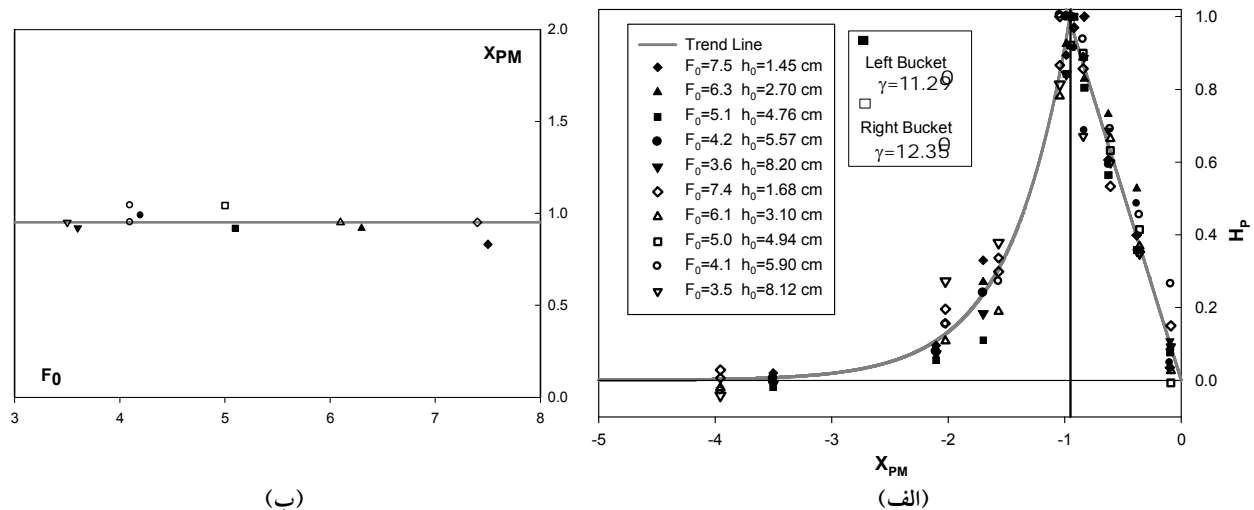
به‌منظور تعیین توزیع فشار دینامیکی بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب و اثرهای این فشار بر کانال بالادست می‌توان پارامترنرمال شده فشار ( $H_p$ ) را به‌صورت رابطه (۸) تعریف کرد:

$$H_p = (h_p - h_0) / (h_{PM} - h_0) \quad (8)$$

در این رابطه  $h_p$  هد فشارکل یا هد پیزومتری ثبت شده در بستر پرتاب‌کننده یا کف تنداب،  $h_0$  هد فشار استاتیک یا عمق جریان ورودی در کانال قبل از پرتاب‌کننده و  $h_{PM}$  بیشینه هد فشار پیزومتری ثبت شده در راستای طولی جریان از بالادست ورودی پرتاب‌کننده تا لبه انتهایی جام است (شکل ۳). در ادامه لازم است تغییرات مقادیر  $H_p$  در نوعی سیستم مختصاتی بدون بعد در راستای جریان ترسیم شود. مختصات بی‌بعد هر نقطه نسبت به لبه جام از رابطه  $x_p = w / \tan(\gamma)$  محاسبه می‌شود که در آن  $\gamma$  زاویه

انحراف جام و  $w$  ارتفاع جام مطابق شکل ۳ است. در این سیستم لبه جام ( $x=0$ ) لبه جام و  $x_p$  طول پرتاب‌کننده است که راستای طولی جام توسط آن بی‌بعد می‌شود. بر این اساس پارامتر بی‌بعد  $X_{PM} = (x/x_p)$  به‌صورت  $X_{PM}$  تعریف می‌شود. شکل ۶ توزیع هد فشار دینامیک بر روی بستر تنداب تا لبه جام را برای پیزومترهای محور مرکزی بر مبنای پارامترهای بدون بعد ( $X_{PM}, H_{PM}$ ) نشان می‌دهد. در این شکل نقاط توپر نتایج آزمایش جام چپ و نقاط توخالی مربوط به جام راست است. مشخصات مربوط به زاویه لبه جام و مقادیر اعداد فرود فشار ثبت شده در شکل ۴ آورده شده است. در شکل ۶- الف با استفاده از داده‌های ترسیم شده، روند توزیع نسبی فشار دینامیک بر روی بستر جام ترسیم شده است. در شکل ۶- ب محل وقوع بیشینه فشار پیزومتری بر روی بستر دو پرتاب‌کننده جامی مرکب نسبت به شروع جام (نقطه  $P$ ) برای مقادیر مختلف عدد فرود ترسیم شده که بیانگر وقوع بیشینه فشار دینامیک در محدوده شروع جام ( $X_{PM} \sim 1$ ) است. هم‌چنان‌که در شکل ۶- الف دیده می‌شود، توزیع فشار دینامیک بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب، مستقل از عدد فرود ( $F_0$ ) جریان ورودی است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار آماری Sigma Plot 2011 برازش داده‌ها انجام شد. این برازش با توجه به پراکندگی داده‌های توزیع فشار دینامیک در بخش قبل از ورود جریان به داخل جام و از محل ورود جریان به داخل جام تا لبه جام در دو بخش مجزا انجام و برای هر بخش رابطه جداگانه‌ای ارائه شد. در نرم‌افزار Sigma Plot 2011 می‌توان معادله پارامتری داده‌ها را بر حسب ضرایبی ثابت به نرم‌افزار معرفی کرد و سپس با استفاده از برازش منحنی پویا<sup>۱</sup> بهترین ثابت‌های معادله معرفی شده را تعیین کرد. در این نرم‌افزار ضریب تعیین<sup>۲</sup> ( $R^2$ ) و سایر مشخصات آماری مربوط به برازش داده نیز قابل استخراج است.

1. Dynamic Curve Fitting  
2. Coefficient of Determination



شکل ۶ الف- توزیع نرمال هد فشار دینامیک ( $H_p$ ) بر روی بستر پرتاب‌کننده مرکب در محور مرکزی جام‌ها ( $R^2=0.95$ )

ب- تعیین محل بیشینه فشار دینامیکی  $X_p = w/\tan(\gamma)$  در ازای تغییر عدد فرود

چپ جام که نسبت به محور میانی دارای شیب بزرگتری هستند، نمودار نرمال شده توزیع فشار دینامیکی مطابق شکل ۷ برآورد و ترسیم شده است. در این محور زاویه انحراف جام ( $\gamma$ ) و در پی آن ارتفاع جام ( $w$ ) افزایش یافته که این تغییرات هندسی در تحلیل نتایج آزمایشگاهی و ترسیم نمودارها در نظر گرفته شد.

روابط توزیع فشار برای پیژومترهای محور سمت چپ جام‌های مرکب با توجه به شکل ۸ به صورت زیر ارائه می‌شود:

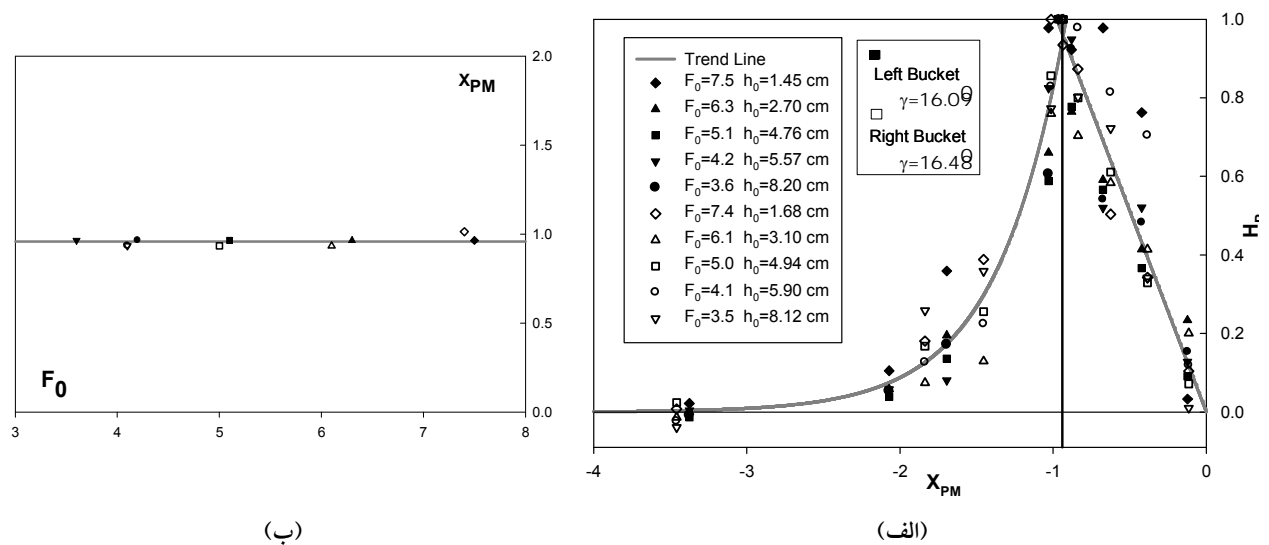
$$\begin{aligned}
 & \text{قبل از ورود به جام} \\
 & H_p = \text{Exp}(2(1 + 1.1X_p)) \quad \text{For } X_{PM} < -1 \\
 & \text{بر روی بستر جام} \\
 & H_p = |X_{PM}| \quad \text{For } -1 \leq X_{PM} \leq 0
 \end{aligned}
 \quad (10)$$

زاویه انحراف جام برای محور سمت چپ نسبت به محور مرکزی جام مرکب از حدود ۱۲ درجه به حدود ۱۶ درجه تغییر یافت که این تغییر هندسی جام باعث تغییر در روند توزیع فشار دینامیک قبل از ورود به پرتاب‌کننده‌ها شد، اما توزیع فشار دینامیک بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب مطابق پیژومترهای محور میانی جام نتیجه شد.

بر این اساس رابطه (۹) ارائه می‌شود که برحسب محل مورد نظر بر روی بستر در راستای طولی جام یا کانال ورودی قبل از پرتاب‌کننده قابل بیان است:

$$\begin{aligned}
 & \text{قبل از ورود به جام} \\
 & H_p = \text{Exp}(1.8(1 + X_p)) \quad \text{For } X_{PM} < -1 \\
 & \text{بر روی بستر جام} \\
 & H_p = |X_{PM}| \quad \text{For } -1 \leq X_{PM} \leq 0
 \end{aligned}
 \quad (9)$$

در این رابطه  $H_p$  هد فشار دینامیکی بی‌بعد بر روی بستر پرتاب‌کننده جامی و تنداب است که بر اساس مختصات نرمال شده محل مورد نظر  $X_{PM}$  به دست می‌آید. با توجه به شکل ۶- الف اثر جام بر بالادست مشاهده می‌شود که این اثر تا فاصله  $X_{PM} = -3$  ادامه دارد. این اثر در طراحی محل‌های اتصال جام به تنداب بسیار اهمیت دارد و باید مورد توجه قرار گیرد، اما در نواحی  $X_{PM} > -3$  می‌توان از آن صرف‌نظر نمود. هم‌چنان که ذکر شد رابطه (۹) و شکل ۶ برای محور مرکزی جام ارائه شده و به همین ترتیب روند تغییرات فشار بر روی بستر جام مرکب در نزدیکی دیواره قابل بررسی است. با توجه به تغییر عرضی شیب در بستر پرتاب‌کننده‌های جامی برای پیژومترهای محور



شکل ۷ الف- توزیع نرمال هد فشار دینامیک (HP) بر روی بستر پرتاب‌کننده مرکب در محور چپ جام‌ها ( $R^2=0.88$ )  
 ب- تعیین محل بیشینه فشار دینامیکی  $x_p = w/\tan(\gamma)$  در ازای تغییر عدد فرود

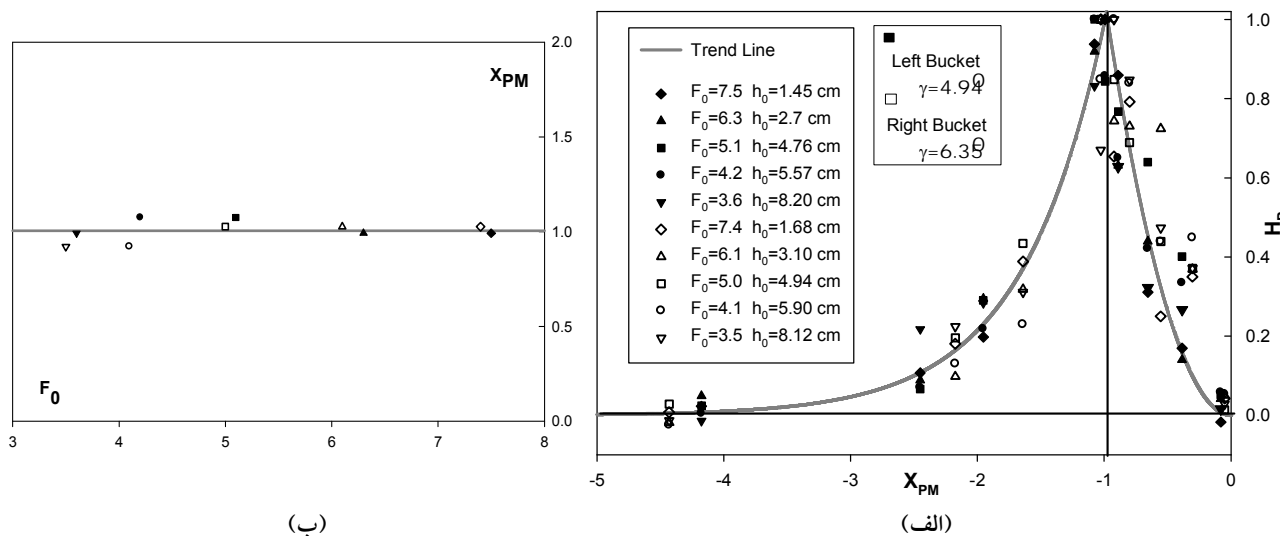
عدد فرود جریان ورودی به جام نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها دیده می‌شود که با کاهش زاویه انحراف جام، بیشینه فشار دینامیکی  $h_{PM}$  کاهش یافته است. روابط توزیع هد فشار دینامیک برای محور سمت راست پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب با رابطه (۱۱) توصیف می‌شود. در این روابط، توزیع فشار بر روی کانال ورودی قبل از پرتاب‌کننده‌ها (تنداب) و بر روی بستر جام به صورت زیر تفکیک می‌شود:

$$\begin{aligned}
 & \text{قبل از ورود به جام} \\
 & H_p = \text{Exp}(1.5(1 + X_p)) \quad \text{For } X_{PM} < -1 \\
 & \text{بر روی بستر جام} \\
 & H_p = |X_{PM}^2| \quad \text{For } -1 \leq X_{PM} \leq 0
 \end{aligned} \quad (11)$$

از آنجا که ارتفاع لبه جام و زاویه انحراف جام ( $\gamma$ ) در محور سمت راست پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب بسیار کم و در حدود ۵ درجه است و از سوی دیگر انحنای محوری جام‌های مرکب نیز، جریان را بر روی جام به سمت راست هدایت می‌کند، ترکیب این شرایط باعث شکل نگرفتن کامل جریان پرتابی به طرف پایاب در محور سمت جام‌ها می‌شود.

اثر جام بر فشار دینامیکی در محور سمت چپ جام‌ها نیز تا محل  $X_{PM} = -3$  قابل مشاهده است، اما برای فواصل دورتر قابل صرف نظر است. محل بیشینه فشار دینامیکی مطابق شکل ۷-ب تغییر چندانی نداشته و می‌توان چنین نتیجه گرفت که محل بیشینه هد فشار دینامیکی بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب در محور چپ جام‌ها نیز در نزدیکی ابتدای جام است.

به منظور تعیین توزیع هد فشار دینامیک بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب برای پیزومترهای محور سمت راست جام، تحلیل‌های فوق نیز برای این محور انجام گرفت. محور سمت راست جام‌های مرکب در مقایسه با دو محور دیگر، زاویه انحراف جام ( $\gamma$ ) و ارتفاع جام ( $w$ ) کوچکتری می‌باشند، به طوری که زاویه انحراف این محور نسبت به محور مرکزی جام از ۱۲ درجه به ۶ درجه کاهش می‌یابد. روند توزیع فشار دینامیک بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی برای محور سمت راست در شکل ۸-الف ترسیم شده است. در شکل مشخصات هندسی و هیدرولیکی محور سمت راست ذکر شده است. شکل ۸-ب محل بیشینه هد فشار دینامیک را بر حسب



شکل ۸ الف- توزیع نرمال هد فشار دینامیک (HP) بر روی بستر پرتاب‌کننده مرکب در محور راست جام‌ها ( $R^2=0.76$ )

ب- محل بیشینه فشار دینامیکی  $x_p = w/\tan(\gamma)$  در ازای تغییر عدد فرود

ندارد. بنابراین ساده‌ترین و البته دقیق‌ترین رابطه با توجه به تحقیقات پیشین برای توزیع فشار دینامیکی ارائه شده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از ثبت پارامترهای هیدرولیکی بر روی مقاطع مختلف مدل مورد نظر، توزیع فشار پیزومتری بر روی جام مرکب استخراج شد. بر اساس نتایج مشخص شد که بیشینه فشار دینامیکی جامی مرکب در محدوده شیب طولی ۵ تا ۱۷ محل شروع جام ( $X_{PM} = -1$ ) رخ می‌دهد. اما این محل در جام‌های ساده با قوس دایره‌ای در قعر جام ( $X_{PM} = -0.5$ ) است. با توجه به روابط و نمودارهای ارائه شده در جام‌های ساده برخلاف جام‌های مرکب، روند توزیع فشار به صورت ملایم‌تری برای عدد فرود کمتر رخ می‌دهد و فشار بیشینه برای عدد فرود یکسان در جام‌های مرکب، در محدوده شیب طولی ۵ تا ۱۷ از جام‌های ساده بیشتر است. نحوه تغییر و روابط توزیع فشار دینامیکی در تنداب‌ها و بر روی بستر جام مرکب برای هر دو محور کناری و محور میانی جام مرکب

شکل نگرفتن کامل جت پرتابی در محور راست جام‌ها، باعث افزایش عمق جریان در قعر محور راست پرتاب‌کننده‌های جامی مرکب می‌شود. این افزایش عمق، روند تغییر فشار در این محور را از دو محور دیگر جام‌ها (محور چپ و محور مرکزی) متمایز می‌سازد، به طوری که توزیع هد فشارهای دینامیک بر روی بستر پرتاب‌کننده‌های جامی در محور سمت راست، توزیع تیز گوشه‌تری نسبت به دو محور دیگر جام‌های مرکب دارد. در این محور توزیع فشار دینامیکی با رابطه‌ای درجه دو نسبت به طول نرمال شده جام توصیف می‌شود، در حالی که برای محور سمت چپ و مرکزی جام، این رابطه خطی است (رابطه‌های ۹ و ۱۰). اثر جام در شکل فشار دینامیک بر روی کانال بالادست جام نیز برای محور سمت جام تا محدوده  $X_{PM} = -4$  ادامه دارد، در صورتی که برای دو محور دیگر، تا محدوده  $X_{PM} = -3$  ادامه دارد. با این حال بیشینه فشار دینامیک در نزدیکی ابتدای جام ( $X_{PM} \sim -1$ ) اتفاق افتاده است. لازم است ذکر شود که اگر چه برازش‌های دیگری مانند درجه سه را نیز برای چنین توزیعی می‌توان ارائه کرد، اما ضرایب در آنها تفاوت معناداری

$w$	ارتفاع لبه جام
$X_p$	راستای طولی بی بعد جام
$\beta$	زاویه انحنای جام
$\gamma$	زاویه انحراف جام
$\varepsilon$	پارامتر برازش
$\rho$	چگالی سیال

به صورت جداگانه ارائه شد و نتیجه شد که محل بیشینه فشار دینامیک در تمامی محورها در نزدیکی ابتدای ورود جریان به داخل جام رخ می دهد. از مقایسه نتایج این مطالعه با سایر مطالعات مشخص شد که ترکیب انحنای پلان و شیب عرضی در بستر جام های مرکب باعث ایجاد تغییر در روند توزیع فشار می شود و بنابراین استفاده از روابط توزیع فشار جام های ساده برای طراحی جام های مرکب منطقی به نظر نمی رسد. همچنین ارائه نمودارها و روابط جدید توزیع فشارهای دینامیکی و پیژومتری برای جام های مرکب، تحقیق حاضر را از سایر مطالعات در این زمینه متمایز می سازد.

### ۷- منابع

گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد گتوند علیا، (۱۳۸۷). مؤسسه تحقیقات آب، گروه سازه های هیدرولیکی، صص. ۱۱۱-۱۲۰.

محمودیان شوشتری م. (۱۳۸۷). اصول جریان در مجاری باز، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.

وطن دوست ح. (۱۳۸۵). "بررسی ضرایب نوسانات فشار در پرتاب کننده جامی شکل"، پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.

Aminoroaya O. and Kavianpour M.R. (2011). "Experimental study of static and dynamic pressures over simple flip bucket", 5<sup>th</sup> Symposium of Advances on Science and Technology, Mashhad, Iran.

Balloffet A. (1961). "Pressures on spillway flip buckets", J. Hydr. Div., ASCE, 87(5), pp. 87-98.

Chen T.-C. and Yu Y.-S. (1965). "Pressure distribution on spillway flip buckets", J. Hydr. Div., ASCE, 91(2), pp.51-63.

Heller V., Hager W. H. and Minor H.-E. (2005). "Ski jump hydraulics", J. Hydraul. Eng., 131(5), pp. 347-355.

Henderson F. M. and Tierney D. G. (1963). "Flow at the toe of a spillway", La Houille Blanche, Grenoble, France, 18(1), pp. 42-50.

[Http://WWW.SigmaPlot.Com/Products/SigmaPlot/Resources](http://WWW.SigmaPlot.Com/Products/SigmaPlot/Resources).

Joun R. and Hager W.H. (2000). "Flip bucket without and with deflectors", J. Hydraul. Eng., 126(11), pp.837-845.

Kavianpour M. R. (1997), "The reattaching flow downstream of deflector including the effect of air inject", A Thesis Submitted To University of

### ۵- تقدیر و تشکر

از گروه سازه های هیدرولیکی موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو به ویژه از آقایان مهندس علی خراسانی زاده و مهندس رضا روشن و شرکت سهامی مدیریت منابع آب (دفتر پژوهش های کاربردی) به دلیل همکاری های علمی و عملی، تشکر و قدردانی می شود.

### ۶- فهرست علائم

$F_0$	عدد فرود جریان ورودی
$g$	شتاب گرانش
$H$	هد انرژی
$h_0$	عمق جریان ورودی به داخل جام، هد فشار استاتیک
$h_p$	فشار کل
$H_p$	هد بی بعد فشار
$h_{PM}$	فشار بیشینه در راستای طولی جام
$P$	محل شروع جام
$P_{max}$	فشار بیشینه بر روی بستر جام
$Q$	دبی جریان
$R$	شعاع جام
$R^2$	ضریب تعیین
$T$	محل لبه جام
$V_0$	سرعت جریان ورودی به داخل جام

Lenau C. W. and Cassidy J. J. (1969). "Flow through spillway flip bucket", J. Hydr. Div., ASCE, 95(5), pp. 633-648.

Narayanan R. (1980). "Cavitation induced by turbulence in stilling basin", Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 106, NO. 4, PP. 616-619.

Narayanan R. (1984). "The role of pressure fluctuations in hydraulic modeling", Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Structures, Esslingen, Germany, PP. 1.12(1-6).

Steiner R., Heller V., Hager W. H. and Minor, H.-E. (2008). "Deflector ski jump hydraulics", J. Hydraul. Eng., 134(5), pp. 562-571.

Manchester Institute of Science and Technology for the Degree of Ph.D.

Kavianpour M. R. (2000). "Effect of air on the structure of flow downstream of ramp", Proceeding of International Symposium of Advances in Hydro-Since-Engineering.

Kavianpour M.R. and Pourhasan M. A. (2005). "Experimental investigation of pressure fluctuations on the bed of flip bucket spillways", Proc. of the XXXI IAHR Congress. Seoul, Korea, pp. 2627-2634.

Khatsuria R. M. (2005). *Hydraulics of spillway and energy dissipators*, Dekker, New York.