



## تاثیر استفاده همزمان از المان شش پایه و سنگچین جهت کنترل آبشستگی و بررسی اقتصادی

محمد راشکی قلعه نو<sup>۱\*</sup>، مهدی اژدری مقدم<sup>۲</sup>، محمود شفاعی بجستان<sup>۳</sup>، حاضی محمد عظمت اله<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران

<sup>۴</sup> استاد، West Indies، Trinidad

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۱۹

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۳۰

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۳۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۳

### کلمات کلیدی:

آبشستگی

المان شش پایه بتنی

سرریز پرش اسکی

سنگ چین

مقایسه اقتصادی

**خلاصه:** کنترل آبشستگی پایین دست سرریزهای پرش اسکی یکی از مهمترین مسائلی است که مهندسين هیدرولیک با آن روبرو هستند. در این تحقیق با هدف بررسی کارایی مصالح جدید برای کنترل آبشستگی پایین دست سرریز پرش اسکی، به کمک مطالعات آزمایشگاهی به بررسی کاهش حجم گودال آبشستگی در حضور توام المان شش پایه بتنی با نام تجاری A-Jack به همراه سنگچین در پایین دست سرریز پرش اسکی در شرایط مختلف هیدرولیکی جریان پرداخته شد. آزمایش‌های انجام شده شامل یک اندازه المان بتنی و دو سایز سنگچین با پنج دبی و سه عمق پایاب متفاوت بوده که در نتیجه با توجه به تغییر عمق پایاب، سرریز در سه وضعیت آزاد، نیمه مستغرق و مستغرق قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که با افزایش عمق پایاب میزان آبشستگی دچار کاهش قابل ملاحظه‌ای شده و با حضور همزمان المان بتنی و سنگ چین میزان حداکثر حجم آبشستگی در بین شرایط مختلف هیدرولیکی تا ۱۰۰ درصد نسبت به آزمایش‌های شاهد کاهش یافت. همچنین مقایسه اقتصادی بین استفاده از هر یک از دو سازه پوششی سنگ چین و المان شش پایه بتنی در مساحت ۱۰۰ متر مربعی انجام گرفت. نتایج حاکی از برابری نسبی هزینه دو نوع پوشش دارد.

### ۱- مقدمه

آبشستگی بعنوان یک پدیده پیچیده هیدرولیکی، یکی از مهمترین مشکلاتی است که می‌تواند با پیشروی به سمت سازه‌های اصلی مخاطرات فراوانی از قبیل شکست سازه‌ی اصلی را به دنبال داشته باشد [۱]. یکی از قسمت‌های مهمی که کنترل آبشستگی در آن از اهمیت بالایی برخوردار است، پایین دست سرریزهای پرش اسکی است. سرریز پرش اسکی اواسط دهه ۱۹۳۰ در پروژه هیدرولیکی Dordogne در فرانسه به عنوان یک طرح هیدرولیکی موفق معرفی شد [۲]. مستهلک‌کننده‌های انرژی سیستم پرش اسکی یکی از سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی جریان به صورت متمرکز

است. در این سیستم، انرژی بالای جریان در پای سرریز یا انتهای مجاری تخلیه‌کننده سیلاب در سدها، در مراحل گوناگون مستهلک می‌شود. بدلیل اینکه ورود هوا به جریان باعث کاهش نرخ انرژی در واحد سطح مقطع جریان می‌شود، در نتیجه منجر به افت انرژی خواهد شد.

در سرریزهای پرش اسکی جریان آب به صورت یک جت آزاد پر انرژی در هوا پراکنده شده و در فاصله‌ای دورتر از سد به سطح بستر برخورد می‌کند و موجب آبشستگی بستر می‌شود. با وجود آنکه قسمتی از انرژی جریان فوق بحرانی در اثر پراکنده شدن در هوا مستهلک می‌گردد اما این جت کماکان توانایی تخریب بستر پایین دست را داراست. مرسوم ترین روش استهلاک انرژی جنبشی و کاهش

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mohammadrashki@yahoo.com



جدول ۱: برخی از روابط ارائه شده جهت پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی

Table 1. Some of the relationships presented to predict of the maximum scouring depth

رابطه	سال	رابطه	سال	رابطه
$D = 1.5 q^{0.6} H^{0.1}$	197 5	Martins-B	193 7	$D = 1.9 q^{0.54} H^{0.225} d_{50} < 5 \text{ mm}$
$D = 2.3 q^{0.6} H^{0.1}$	198 0	Sofrelec	193 7	$D = 0.202 q^{0.54} H^{0.225} d_{50}^{-0.42} d_{50} \geq 5 \text{ mm}$
$D = 1.413 q^{0.5} H^{0.25}$	198 1	Incyth		
$D = 0.521 q^{0.57} H^{0.2} / d_{90}^{0.32}$	198 3	Fahlbosc h	193 9	$D = 0.6 q^{0.5} H^{0.25} \left( \frac{Y_t}{d_{50}} \right)^{0.333}$
$D = 3.27 \frac{q^{0.6} H^{0.05} Y_t^{0.15}}{g^{0.3} d_{50}^{0.1}}$	198 5	Mason	197 4	$D = 1.663 q^{0.6} H^{0.2} / d_{50}^{0.1}$
			198 5	$D = (6.42 - (3.1 H^{0.1})) \frac{q^{(0.6 - \frac{H}{300})} H^{0.15 + \frac{H}{200}} Y_t^{0.15}}{g^{0.3} d_{50}^{0.1}}$
			200 5	$\frac{D}{Y_t} = 6.914 \left( \frac{q}{\sqrt{Y_t^3 g}} \right)^{0.694} \left( \frac{H}{Y_t} \right)^{0.0815} \left( \frac{R}{Y_t} \right)^{-0.233} \left( \frac{d_{50}}{Y_t} \right)^{0.196} (\varphi)^{0.196}$

منظور پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی، عظمت اله و همکاران (۲۰۰۵ و ۲۰۱۲) [۷ و ۸] و ایوبلو (۲۰۱۱) [۹] با استفاده از روش‌های هوش محاسباتی به پیش بینی این پارامتر پرداختند. نتایج این تحقیقات نشان از برتری این روش‌ها در مقایسه با روابط تجربی ارائه شده در پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی دارد.

در برخی موارد عمق پایاب کافی نیست و یا شدت انرژی جنبشی جت به حدی است که امکان آبشستگی بستر پایین دست وجود دارد. در نتیجه باعث وقوع خسارت‌هایی در پایین دست سد می‌گردد که جبران آن هزینه‌های زیادی را به دنبال دارد. از جمله می‌توان به خسارت‌های ناشی از آبشستگی در سدهای تاربلای پاکستان و الدر<sup>۶</sup> آمریکا اشاره نمود [۱].

به منظور بالا بردن ضریب اطمینان سد و سازه‌های وابسته و جلوگیری از هزینه‌های ناشی از آبشستگی لازم است تا از روش‌های کنترلی در پایین دست سرریزهای پرش اسکی استفاده گردد. روش‌های متفاوتی با مصالح مختلفی برای حفاظت بستر پائین

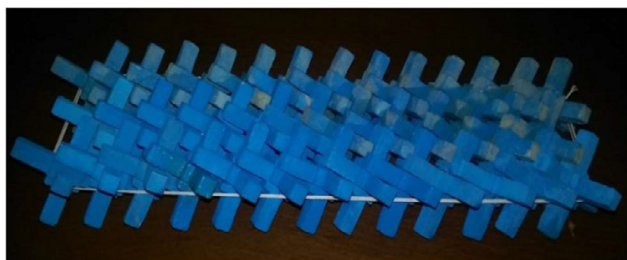
ابعاد حفره آبشستگی ایجاد استخر عمیق در محل برخورد جت با بستر رودخانه است. این امر نیازمند تخمین ابعاد حفره آبشستگی است [۳].

تاکنون مطالعات زیادی به منظور ارائه یک رابطه دقیق جهت تخمین حداکثر عمق آبشستگی پایین دست سرریزها انجام شده است. در تحقیقات وصالیان<sup>۱</sup> (۱۳۸۷)، ماسون<sup>۲</sup> (۱۹۸۵)، هنگ<sup>۳</sup> (۲۰۱۳) و درگاهی<sup>۴</sup> (۲۰۰۳) [۳-۶] تعدادی از این روابط تجربی جمع آوری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برخی از این روابط در جدول ۱ ارائه شده است.

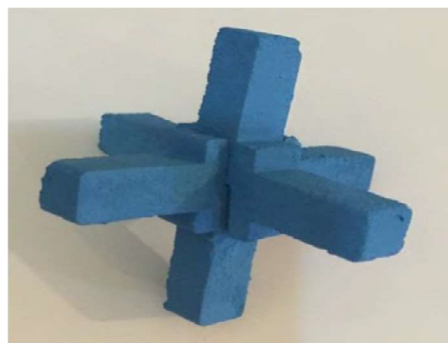
مطالعات ماسون [۴] نشان داد روابطی که در آنها از شدت جریان، ارتفاع ریزش و اندازه ذرات در پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی استفاده شده است از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین در مقاصد عملی، بدون آنکه زمان بعنوان پارامتر مهمی در نظر گرفته شود می‌توان آبشستگی را بررسی نمود. علاوه بر روابط ارائه شده به

1 Vesalian  
2 Mason  
3 Heng  
4 Dargahi

5 Tarbela  
6 Alder



ب



الف

شکل ۱: نمایی از المان‌های شش پایه، الف) المان منفرد ب) آرایش شبکه ای المان ها  
**Fig. 1. View of six-legged elements, A) single element B) grid arrangement of elements**

شود و تامین این دانه بندی در عمل دشوار است. علاوه بر آن لایه‌های مختلف فیلتر نیز در این روش نیاز خواهد بود. در صورت تامین تمامی شرایط و تمهیدات لازم برای استفاده از پوشش محافظتی سنگ چین، در عمل باز هم فرسایش لبه سنگچین باعث تخریب سنگ‌ها می‌شود. استفاده از سنگ چین دارای مشکلاتی از قبیل ناپایداری سنگ‌ها در برابر سرعت‌های زیاد (به دلیل عملکرد منفرد سنگ‌ها)، عدم دسترسی به مصالح مناسب با قطر زیاد و بدنبال آن مشکلات اقتصادی ناشی از حمل آن به محل پروژه‌هایی که با فاصله زیاد از منابع قرضه سنگ قرار دارند نیز می‌باشد. در صورت انتخاب نادرست قطر متوسط ذرات تشکیل دهنده سنگچین و یا انتخاب طول نادرست چینش، امکان بر هم خوردن پایداری و حتی شکست سنگچین در جریان‌های آشفته وجود داشته و عملاً سنگچین به تنهایی کارایی و نقش حفاظتی خود را از دست خواهد داد. با توجه به این مشکلات لازم است تا این سازه به کمک یک لایه محافظ دیگر بر روی آن پوشیده شود تا عملکرد آن بهبود یابد. محققین مصالح مختلفی را تاکنون مورد بررسی و مطالعه قرار داده‌اند که از جمله آنها می‌توان به استفاده از المان‌های چهارگانه بتنی (تترا هدرن<sup>۴</sup>) توسط وانگ و همکاران [۱۲] اشاره کرد. در این تحقیق از المان‌های بتنی جدید شش پایه با نام تجاری A-Jacks به منظور کنترل آبشستگی پایین دست جت‌های عمودی و بطور خاص پرش اسکی استفاده شده است تا کارایی آنها ارزیابی گردد.

المان‌های شش پایه قطعات بتنی هستند که باعث پایداری سنگچین و افزایش قابل ملاحظه شرایط آستانه حرکت آن می‌گردد

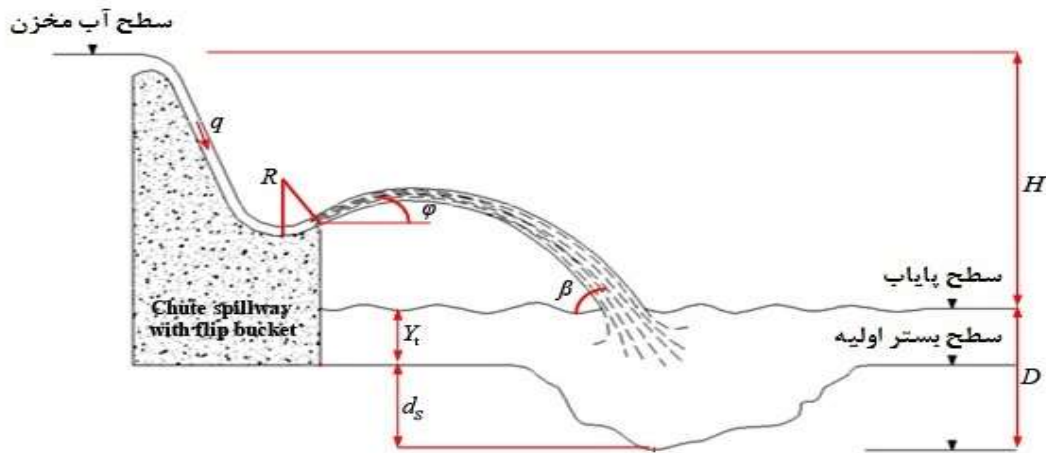
دست جت‌ها در گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است که بیشتر مطالعات مربوط به ریپ‌رپ یا لاشه سنگ بوده است. علاوه بر مطالعات گسترده انجام شده در زمینه تخمین حداکثر عمق آبشستگی، بسیاری از محققین پژوهش‌های خود را بر روی کنترل آبشستگی به کمک سنگ چین متمرکز کردند.

پترکا<sup>۱</sup> (۱۹۶۸) در مورد پایداری و شسته شدن سنگچین در پایین دست سرریزها آزمایشات متعددی انجام داد که در نهایت به یک گراف که قطر سنگچین در مقابل سرعت کف جریان بود دست یافت. همچنین وی پیشنهاد کرد که اندازه مینیمم سنگچین ۱/۵ برابر اندازه بزرگترین دانه شن موجود در کانال باشد [۱۰]. دی<sup>۲</sup> و سرکار<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) ضمن تحقیق در مورد طول سطح پوشش سنگچین، حداقل طول لازم جهت پوشش را ۱/۵ برابر حداکثر عمق آبشستگی پیشنهاد کردند [۱۱]. وصالیان و همکاران آبشستگی در پایین دست سرریزهای پرش اسکی را در بستر با مصالح غیر یکنواخت مورد بررسی قرار دادند. آنها با انتخاب سه سایز مختلف برای سنگ چین و انجام آزمایش‌ها در شرایط مختلف هیدرولیکی، روابطی را جهت تخمین حداکثر عمق آبشستگی ارائه نمودند. همچنین آنها معیاری را برای پایداری سنگ چین در زیر جت‌های پرتابی مستطیل شکل ارائه نمودند.

بدیهی است برای پائین دست جت‌های عمودی اندازه متوسط سنگ نسبتاً بزرگ خواهد بود و باید با دانه بندی مناسبی بکار برده

1 Peterka  
 2 Dey  
 3 Sarkar

4 Tetrahedron



شکل ۲: پارامترهای موثر بر آبشستگی پایین دست سرریز  
 Fig. 2. Affecting parameters in scouring downstream of spillway

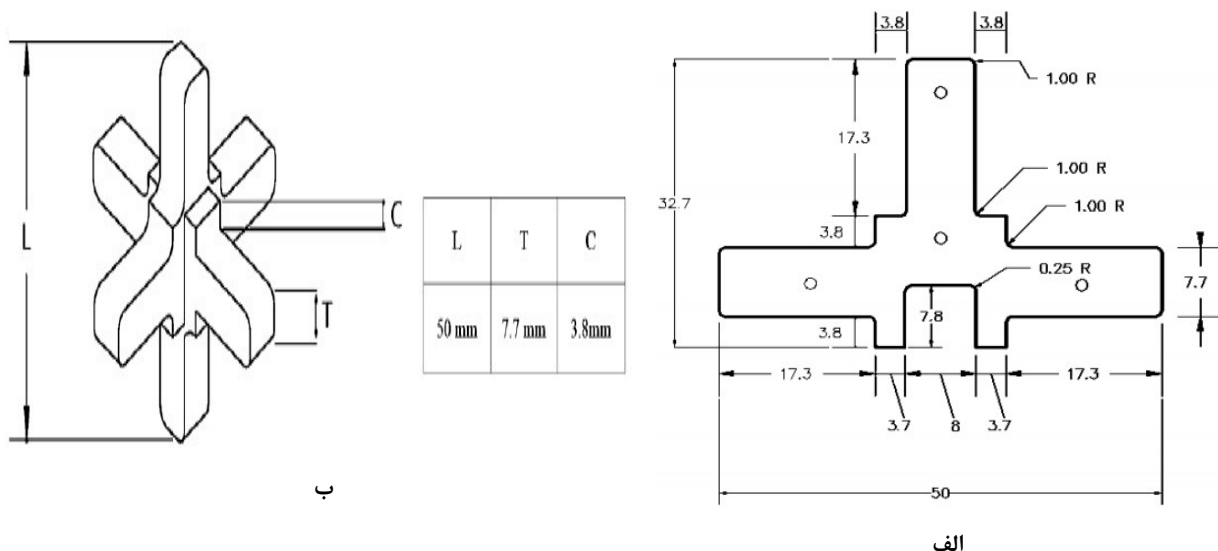
اطراف تکیه‌گاه پل توسط محمدپور و شفافی بجمستان (۱۳۹۴) مورد مطالعه قرار گرفت. آنها آزمایشات خود را براساس ۴ عدد فرود و چهار گستره ی کارگذاری در تکیه‌گاه پل انجام دادند. نتایج تحقیقات نشان داد برای اعداد فرود کم با دو ردیف کارگذاری المان میتوان عمق آبشستگی را تا ۱۰۰ درصد کنترل کرد اما با افزایش دبی و عدد فرود با استفاده از ۴ ردیف المان میتوان به ۸۹/۵۵ درصد آبشستگی را در پایه پل کنترل نمود [۱۴]. طرفی صالحی و شفافی بجمستان (۱۳۹۶) با استفاده از المان شش پایه بتنی در پایین دست حوضچه آرامش توانستند آبشستگی در پایین دست را تا حد مطلوبی کاهش دهند [۱۵]. حسین رضا و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیقی از ترکیب همزمان دو لایه حفاظتی سنگ چین و المان شش پایه به منظور کنترل آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل مستطیلی شکل استفاده کردند. آنها در تحقیق خود آرایش‌های مختلفی از قبیل المان نیمه مدفون در بستر به همراه سنگ چین در بین آنها، المان‌های مدفون در زیر بستر، آرایش باز المان‌ها و آرایش المان‌های قفل شده در هم با تراکم ۱۰۰ درصد را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آنها نشان داد که ترکیب المان نیمه مدفون در بستر و سنگ چین توانایی کاهش عمق آبشستگی راس تکیه‌گاه را تا ۹۷ درصد دارد [۱۶].

در تحقیق حاضر برای نخستین بار از روش حفاظت بستر به صورت ترکیبی از سنگ چین و المان‌های شش پایه بصورت همزمان استفاده گردید. دلیل این کار آن است که اولاً سنگ از جمله مصالحی است که بخصوص در ابعاد کوچکتر در دسترس است ثانیاً المان‌های

(شکل ۱ الف). این المان‌ها به صورت گروهی کاربرد دارند و از مهمترین مزایای آنها آن است که با قفل شدن بازوهای آنها در یکدیگر به پایداری بالایی می‌رسند (شکل ۱ ب).

در زمینه استفاده از المان‌های شش پایه بتنی در سازه‌های هیدرولیکی در سال‌های اخیر مطالعاتی صورت پذیرفته است که اکثر آنها به کاربرد آنها در کنترل آبشستگی در پایه‌های پل و حوضچه‌های آرامش اشاره دارد.

ذوالقدر و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تاثیر تراکم این المان‌های شش پایه بر کنترل آبشستگی موضعی در تکیه‌گاه پل با دیواره بالای شکل پرداختند. در این تحقیق المان‌ها در سه تراکم باز، متوسط و متراکم و در سه عمق کارگذاری ریز بستر، روی بستر و حالت مابین که نصف المان در زیر بستر بود، پیرامون تکیه‌گاه کارگذاری شدند. کارگذاری المان‌ها در عمق‌های زیر بستر موجب افزایش پایداری آنها می‌گردد. همچنین کارگذاری المان‌ها با تراکم کمتر تعداد آنها را در واحد سطح کاهش می‌دهد. لذا نتایج این تحقیق گزینه‌های مختلفی جهت طراحی پی تکیه‌گاه با روش حفاظت المان‌های شش پایه در اختیار مهندس طراح قرار می‌دهد. بر این اساس بهترین آرایش از دیدگاه مهار آبشستگی، زمانی حاصل می‌گردد که المان‌ها بر روی بستر و با تراکم بیشینه کارگذاری گردند. در این حالت، کارگذاری این المان‌ها می‌تواند آبشستگی راس تکیه‌گاه با دیواره بالای شکل را تا ۱۰۰٪ مهار نماید [۱۳]. تاثیر گستره‌های دو ردیف، سه ردیف و چهار ردیف از کارگذاری المان‌های شش پایه به منظور کاهش آبشستگی در



شکل ۳: الف) قالب آزمایشگاهی مورد استفاده جهت ساخت المان‌ها ب) ابعاد المان آزمایشگاهی ارتفاع موثر این المان‌ها زمانی که بر روی سه پایه قرار می‌گیرند برابر ۴ سانتی متر است.

Fig. 3.A) Laboratory mold used to make the elements B) Dimensions of the laboratory element

آبشستگی در پایین دست سرریز پرش اسکی است می‌توان نوشت:

$$d_s = f\left(q, Y_t, B, \mu, t, S, \beta, \rho_s, \rho_w, g, H, d_{50}, \rho_w\right) \quad (1)$$

بدلیل آنکه هدف این تحقیق بررسی آبشستگی در حالت تعادل باشد، عامل زمان از رابطه فوق حذف می‌گردد. از پارامترهای  $R, S, B$  و  $\theta$  بدلیل ثابت بودن در آزمایش‌ها صرف نظر می‌گردد. با توجه به آشفته بودن جریان در آزمایش‌ها و بالا بودن عدد رینولدز، از  $\mu$  نیز میتوان صرف نظر نمود. در نتیجه خواهیم داشت [۶-۱۷]:

$$f\left(\frac{q, Y_t, \rho_s, g, H}{d_s, d_{50}, \rho_w}\right) = 0 \quad (2)$$

با انتخاب سه متغیر تکراری  $q, \rho_w$  و  $H$  و بکار بردن تئوری باکینگهام رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$f\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{d_s}{H}, \frac{Y_t}{H}, \frac{d_{50}}{H}\right) = 0 \quad (3)$$

که پارامتر  $\frac{q}{\sqrt{gH^3}}$  همان عدد فرود سقوط (Fr) می باشد. از پارامتر نیز بدون بعد  $\frac{\rho_s}{\rho_w}$  به دلیل ثابت بودن در آزمایش‌ها

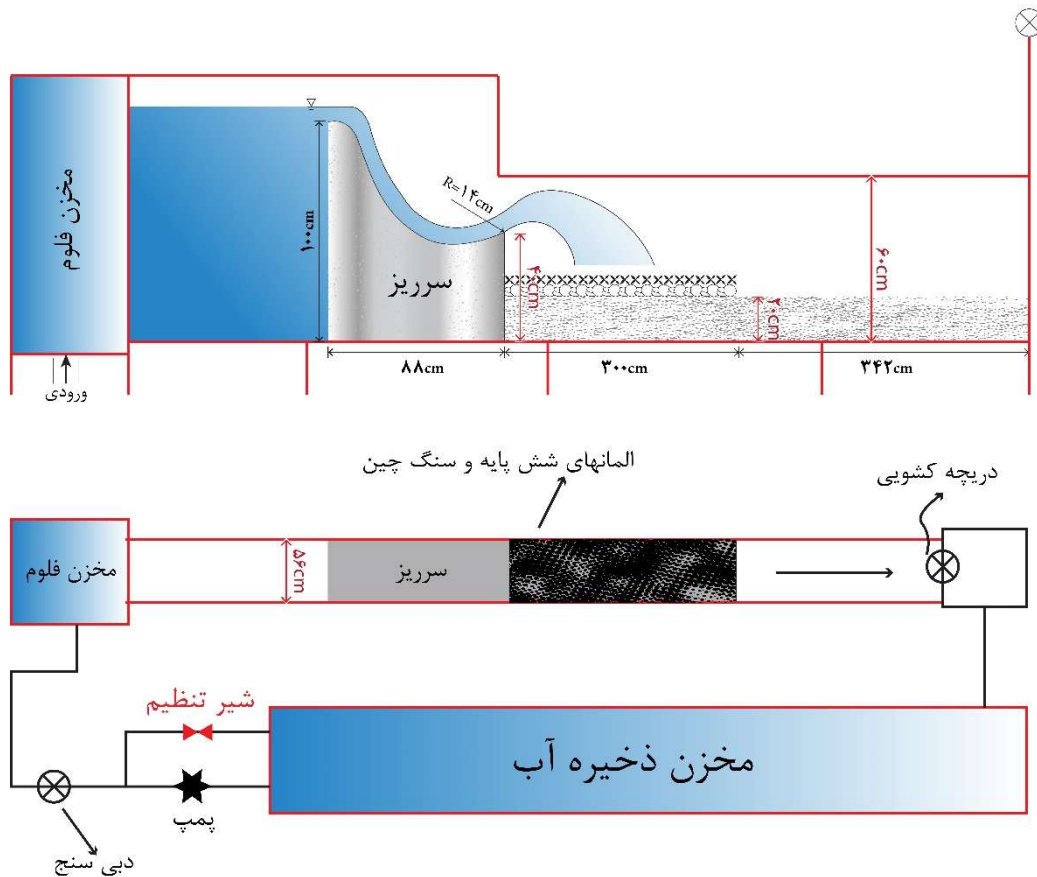
شش پایه به عنوان سازه ای پایدارتر و با ضریب زبری بالا توانایی از بین بردن نقاط ضعف سنگ را دارد. ثالثاً استفاده همزمان المان شش پایه و سنگ می‌تواند باعث کوچکتر شدن سایز مصالح سنگی شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- استخراج معادله عمومی آبشستگی به کمک آنالیز ابعادی

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا پارامترهای مهم این تحقیق که بر چاله آبشستگی و فاصله آن از سازه مؤثر می‌باشند، استخراج شد. پارامترهای مهم در این تحقیق شامل دبی در واحد عرض سرریز  $q$ ، عمق پایاب  $Y_t$ ، اختلاف سطح آب بالادست و پایین‌دست  $H$ ، شتاب ثقل  $g$ ، ویسکوزیته دینامیکی سیال  $\mu$ ، جرم حجمی آب  $\rho_w$ ، عرض کانال  $B$ ، زمان  $t$ ، زاویه پرتاب جت  $\varphi$ ، زاویه برخورد جت با سطح پایاب  $\beta$ ، شیب کف کانال  $S$ ، شعاع انحنا جام  $R$ ، اندازه متوسط ذرات رسوبی  $d_{50}$ ، جرم مخصوص ذرات رسوبی  $\rho_s$ ، عمق حداکثر چاله فرسایشی  $d_s$  و حداکثر عمق چاله فرسایش تا سطح آب پایاب  $D$  می‌باشد، که در شکل ۲ نشان داده شده است.

از آنجایی که در تحقیق حاضر هدف بررسی حداکثر عمق



شکل ۴: الف) مقطع طولی ب) پلان فلوم آزمایشگاهی  
 Fig. 4.A) Longitudinal section B) Laboratory flume plan

یک شبکه یکپارچه عمل می‌کنند که از مزیت‌های اصلی این سازه به حساب می‌آید.

در آزمایشگاه این المان‌ها با استفاده از قالب طراحی شده توسط نرم افزار اتوکد، با مقیاس ۱:۱۲ از جنس بتن ساخته شدند که ابعاد المان آزمایشگاهی و قالب استفاده شده در شکل ۳ ارائه شده است.

### ۳-۲- شرح آزمایشات

آزمایش‌های این تحقیق در فلومی به طول ۷/۳ متر، عرض ۰/۵۶ متر و عمق ۰/۶ متر با شیب طولی ۰/۰۰۲۸ واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه چمران اهواز انجام شدند. جنس دیواره‌ها و کف فلوم از پلکسی گلاس شفاف بود. در ابتدای فلوم، سرریزی از نوع پرش اسکی با ارتفاع ابتدایی و انتهایی ۱۰۰ و ۲۰ سانتیمتر و هم عرض با فلوم نصب گردید. شعاع انتهایی (۱۴ سانتیمتر) از جنس ورق گالوانیزه ساخته و نصب گردید (شکل ۴).

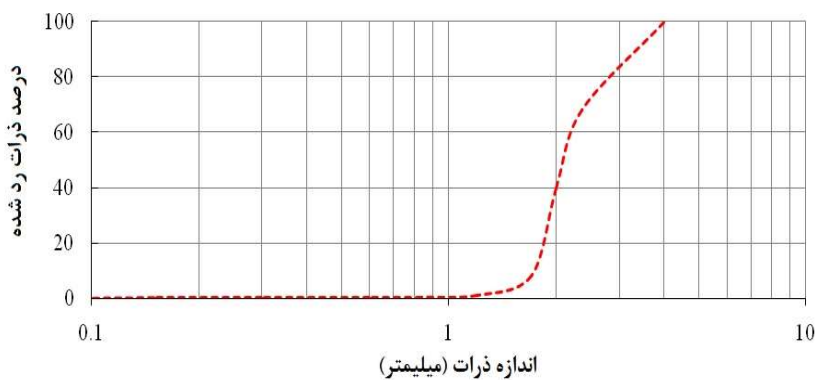
صرف نظر می‌گردد در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\frac{d_s}{H} = f \left( Fr, \frac{Y_t}{H}, \frac{d_{50}}{H} \right) \quad (4)$$

### ۲-۲- المان‌های به کار رفته در این تحقیق

المان‌های شش پایه بتنی علاوه بر آنکه با اندازه‌های مختلف بعنوان موج شکن در بنادر و سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، طی سال‌های اخیر کاربرد هایی جهت کنترل فرسایش پنجه رودخانه‌ها پیدا کرده اند [۱۸].

این المان‌ها با قرارگیری بر روی بستر رودخانه علاوه بر استهلاک انرژی جریان و افزایش مقاومت بستر در برابر نیروهای فرسایشی، باعث افزایش ضریب زبری تا حدود ۰/۱ نیز می‌شوند. المان‌ها از ترکیب دو قطعه بتنی T شکل که در وسط بهم متصل می‌گردند تشکیل شده است که در نتیجه دارای شش پایه می‌باشد. در نتیجه امکان قفل شدن از ۶ جهت را با المان‌های کناری خود دارند و بعنوان



ب

الف

شکل ۵: الف) مصالح مورد استفاده در بستر، ب) منحنی دانه بندی مصالح بستر  
**Fig. 5.A) Materials used in the bed, B) Granulation curve of bed materials**

فوق و با سعی و خطا انجام شده است. در نتیجه قسمتی از فلوم به طول ۳ متر در پایین دست سرریز با استفاده از ماسه گردگوشه با وزن مخصوص ۲/۶۳ گرم بر سانتیمتر مکعب و با اندازه متوسط ۲/۴ میلی متر، انحراف معیار هندسی ۱/۱۹، در ضخامتی ۲۰ سانتیمتری گسترانده شد. لیتل و مایر<sup>(۱۹۷۶)</sup> [۲۱] نشان دادند که در صورت انحراف معیار ذرات از ۱/۳ کمتر باشد ذرات بستر را می توان به صورت یکنواخت در نظر گرفت که در نتیجه در این آزمایش بستر یکنواخت خواهد بود. در شکل ۵ الف) مصالح ماسه‌ای مورد استفاده و ب) نمودار دانه بندی مصالح ارائه شده است.

دبی مورد نیاز برای آزمایش‌ها با استفاده از یک پمپ سانتریفیوژ از مخزن تأمین آب وارد مخزن آرام کننده در ابتدای فلوم می گردید. به منظور حذف تلاطم ورودی، از یک صفحه مشبک آرام کننده، در فاصله ۱ متری از دهانه ورودی فلوم، استفاده شد. دبی جریان با استفاده از دبی سنج دیجیتالی که بر روی لوله ورودی نصب شده بود اندازه گیری می شد. خطای این دبی سنج برای اندازه گیری دبی های تا ۱۵۷ لیتر در ثانیه کمتر از یک درصد می باشد. با توجه به زیر بحرانی بودن جریان، کنترل عمق جریان با استفاده از یک دریچه کشویی که در انتهای فلوم قرار داشت، صورت گرفت.

آزمایش های این تحقیق در دبی های مختلف بین ۵ تا ۲۵ لیتر بر ثانیه و در عمق های مختلف پایین دست ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر در دو وضعیت بستر بدون پوشش و بستر محافظت شده انجام شد. قابل ذکر است که در پ دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر

مشخصات این سرریز براساس سرریز طراحی شده و در حال اجرا در پائین دست ترین نقطه بهمنشیر با مقیاس ۱:۱۲ می باشد. هر چند شعاع سرریز برای دبی های سیلابی بیشتری نسبت به این مطالعه طراحی شده است ولی شعاع اسکی برای دبی های مورد استفاده در این تحقیق بیشتر از حداقل هایی است که پترکا [۱۰] و ماسون [۱۹] توصیه کرده اند.

به منظور انتخاب اندازه مصالح بستر و ایجاد بستر رسوبی، قبل از شروع آزمایش های اصلی، تعدادی آزمایش با ترکیب المان های شش پایه و سنگ چین با مصالح بستر مختلف انجام شد. ساینز انتخابی مصالح بستر باید به اندازه ای ریز باشد که بتواند از میان منافذ موجود در لایه محافظ بستر فرار کند و آنقدر بزرگ باشد که بتواند در مقابل تغییر شکل بستر در برابر جریان متلاطم مقاومت کند. لذا آزمایش هایی با مصالح ماسه ای با قطر متوسط بین ۰/۹ تا ۳ میلی متر انجام شد [۲۰]. اندازه ذرات بستر که زیر لایه رویی قرار می گیرند بر اساس تجربیات پیشین و با در نظر گرفتن اینکه با توجه به شرایط حاکم بر جریان در این تحقیق نه آبشستگی شدیدی بوجود بیاید که به بستر فلوم برسد و نه اینکه هیچگونه حرکتی نکند و یا عمق آبشستگی آنقدر کوچک باشند که خطای اندازه گیری تاثیر زیادی داشته باشد. از همه مهمتر شرایط بستر زنده در پائین دست چاله آبشستگی برقرار نباشد و یا بعبارتی شرایط آب زلال حاکم باشد و اینکه فرم بستر که می تواند ابعاد این فرمها در دبی ها و عمق پایاب مختلف تغییر کند و روی نتایج آزمایشگاهی تاثیر داشته باشد بوجود نیاید، انتخاب شده است. انتخاب اندازه مناسب برای این تحقیق با در نظر گرفتن موارد



شکل ۶: آبشستگی در بستر محافظت نشده  
Fig. 6. Scouring in unprotected bed

جدول ۲: تعداد آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق

Table 2. Number of experiments performed in this study

تعداد آزمایش	نوع آزمایش
15	آزمایش شاهد (بستر محافظت نشده)
15	آزمایش بستر مسلح با المان شش پایه و سنگ چین 9 میلیمتر
15	آزمایش بستر محافظت شده با المان شش پایه و سنگ چین 20 میلیمتر

وصالیان و همکاران [۳]) بدست آمد. این زمان در آزمایش پاگلیارا و پالمو<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) ۴۰ دقیقه [۲۲]، در آزمایش اسکارلاک<sup>۲</sup> (۲۰۱۲) ۱۲ ساعت [۲۳]، در آزمایش بویان<sup>۳</sup> (۲۰۰۷) ۲ تا ۴ روز [۲۴] و در تحقیق لیم<sup>۴</sup> (۲۰۰۴) ۴۶ تا ۵۴۶ ساعت [۲۵] در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایشات، ابتدا کف فلوم به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر از مصالح ماسه‌ای ریخته شد، سطح آن به کمک ماله چوبی و تراز بنایی صاف گردید. در شروع هر آزمایش دریاچه کشویی کاملاً بسته و آب از انتهای فلوم به آرامی وارد می‌شد، جریان ورودی نیز با سرعت بسیار کم وارد فلوم می‌گردید تا سطح ناحیه رسوبی تا ارتفاع چند سانتی‌متری از آب پوشیده شود، سپس دریاچه کشویی به تدریج باز شده تا این‌که دبی و ارتفاع آب درون فلوم در مقدار مورد نظر تنظیم‌گردد. بعد از برقراری جریان به مدت ۴ ساعت، دریاچه انتهایی بسته و پمپ خاموش می‌شد تا آب موجود در کانال به آرامی زهکشی شود. پس از گذشت چند ساعت و تخلیه کامل آب از درون کانال، به وسیله عمق سنج لیزری، حداکثر عمق آبشستگی که در کناره‌های فلوم وجود داشت، برداشت گردید. علت آن است که بدلیل گردابه‌های که در اطراف تشکیل می‌شوند در برخورد با دیواره باعث انتقال بخشی از رسوبات به سمت مرکز می‌شوند. ولی ترسیم پروفیل بستر هم نشان می‌دهد که در وسط اختلاف کمی با کناره‌ها وجود دارد.

به منظور ارزیابی تاثیر توام سنگچین و المان‌های شش پایه در پدیده آبشستگی پایین دست سرریز پرش اسکی، آزمایش‌ها به صورت جدول ۲ انجام شد.

با توجه به انرژی جریان، عمق حفره آبشستگی به کف فلوم رسیده و مصالح بستر شسته می‌شود. بنابراین این مورد از آزمایشات در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته نشده‌اند.

در آزمایش‌های این تحقیق فاصله تراز بستر رسوبی از لبه‌ی پرتابه ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شد. به این ترتیب عمق پایاب در حالتی که ۱۰ سانتی‌متر است لبه جام را مستغرق نمی‌کند، در حالت دوم (۲۰ سانتی متر) عمق پایاب در تراز لبه‌ی پرتابه و در حالت سوم (۳۰ سانتی‌متر) جام مستغرق می‌باشد.

#### ۲-۴- تعیین مدت زمان آزمایش

پدیده آبشستگی یک فرآیند تابع زمان است و در طول زمان گسترش می‌یابد تا به شرایط تعادل برسد. شناخت این فرآیند و توانایی تخمین عمق آبشستگی در طول زمان، بویژه هنگامی که حفره آبشستگی به تعادل می‌رسد، برای طراحان و مهندسين هیدرولیک بسیار مهم است. در زمان تعادل حفره آبشستگی نسبت به گام زمانی تغییر محسوسی نخواهد داشت. در بررسی پدیده آبشستگی در ساعات اولیه بیشترین میزان آبشستگی رخ می‌دهد.

آزمایش‌های تعیین زمان تعادل برای بحرانی ترین شرایط هیدرولیکی (حالتی که در آن انتظار ایجاد بیشترین عمق آبشستگی را داریم) انجام می‌پذیرد. در این تحقیق حداکثر دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و کمترین عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر بعنوان بحرانی ترین حالت در نظر گرفته شد. در نتیجه یک آزمایش ۱۷ ساعته برای شرایط مذکور انجام گرفت و زمان تعادل ۴ ساعت به عنوان زمان لازم برای رسیدن عمق حفره آبشستگی به ۸۵ درصد عمق تعادل نهایی آن (با توجه به آزمایش سایر محققین از جمله اکبری و همکاران [۱۷]،

1 Pagliara and Palermo  
2 Scurlock  
3 Bhuiyan  
4 Lim





شکل ۷: بستر محافظت شده با A-Jacks و سنگ  
 Fig. 7. Protected bed by A-Jacks and Riprap

جدول ۳: درصد کنترل آبشستگی در حضور المان شش پایه و سنگ چین  
 Table 3. Percentage of scour control in the presence of Six-legged elements and Riprap

Q (lit/s)	$Y_t$ (m)	Fr سقوط	درصد کنترل آبشستگی در حضور المان و سنگ چین 9 میلیمتر	درصد کنترل آبشستگی در حضور المان و سنگ چین 20 میلیمتر
5	0/1	0/004	100	100
5	0/2	0/005	100	100
5	0/3	0/007	100	100
10	0/1	0/008	100	100
10	0/2	0/010	100	100
10	0/3	0/013	100	100
15	0/1	0/012	80/33	100
15	0/2	0/015	100	100
15	0/3	0/020	100	100
20	0/1	0/016	80/11	97/5
20	0/2	0/020	71/72	96/2
20	0/3	0/026	100	100
25	0/1	0/020	---	---
25	0/2	0/025	56/66	92
25	0/3	0/032	84/68	100

شرایط ارائه شده در تحقیقات پترکا ( که قطر سنگچین حداقل ۱/۵ برابر اندازه بزرگترین دانه موجود در بستر باشد ) [۱۰]، و منافذ موجود در المان ها این سایز برای سنگچین انتخاب گردید. البته تا حدودی نیز سعی شد معیار فیلتر یعنی  $d_{50R}/d_{50S} < 25$  نیز رعایت شود که  $d_{50R}$  قطر متوسط سنگچین و  $d_{50S}$  قطر متوسط ذرات

در انتخاب اندازه سنگچین ۲ نکته دارای اهمیت است ، اول آنکه اندازه آنها به حدی باشد که با عبور جریان حرکت نکنند ، دوم آنکه سرعت جریان عبوری از میان قطعات سنگچین به حدی برسد که باعث فرسایش در لایه تحتانی یا خاک بستر نشود. لذا با توجه به شرایط آزمایشگاهی و با در نظر گرفتن اندازه مصالح بستر و ارضاء



شکل ۸: حجم آبشستگی در دبی‌های متفاوت در سه شرایط بستر ( $\text{cm}^3$ )

Fig. 8. Scour volume at different discharges under three bed conditions ( $\text{Cm}^3$ )

به اندازه حداکثر طول آبشستگی بدست آمده از آزمایشات شاهد روی بستر ریخته شد و سپس المان‌های شش پایه با تراکم ۱۰۰ درصدی در هم قفل شده و بعد از قرارگیری بر روی یک توری سیمی روی آنها قرارگرفت (شکل ۷). به دلیل اینکه در محل اتصال شبکه المان‌ها و کناره فلووم فضای خالی وجود داشت (به دلیل وجود پایه‌های کناری

بستر است.

برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا آزمایش‌های شاهد در حالت بستر بدون محافظ انجام شد (شکل ۶). سپس برای آزمایش‌های اصلی، کارگذاری سنگ چین و المان شش پایه در پایین دست سرریز به اینصورت انجام شد که ابتدا یک لایه لحاف گونه سنگ چین در طولی

مختلف ارائه گردیده است:

که در آن  $Y_t$  عمق پایاب بر حسب سانتیمتر و  $V$  حداکثر حجم حفره آبشستگی بر حسب سانتیمتر مکعب است. در شکل ۷ در سه عمق پایاب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر تغییرات پارامتر بی بعد  $(\frac{d_s}{H})$  در مقابل فرود سقوط  $Fr = \frac{q}{\sqrt{gH^3}}$  ترسیم شده است که در این رابطه  $q$  دبی واحد عرض،  $g$  شتاب ثقل و  $H$  اختلاف ارتفاع سطح آب مخزن و سطح آب پایاب است. مطابق شکل ۹ با افزایش عدد فرود سقوط و یا کاهش عمق پایاب، بالشتک آبی توانایی کمی در مقابل نیروی دینامیکی جت داشته و مقدار فرسایش بیشتر است همچنین در هر عمق پایاب با مسلح کردن بستر عمق آبشستگی کاهش می یابد و این کاهش با افزایش قطر سنگ بستر بیشتر می باشد و آبشستگی با افزایش عمق پایاب کاهش می یابد.

به منظور پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی، با توجه به پارامترهای بی بعد ارائه شده در آنالیز ابعادی، رابطه رگرسیونی ۵ برای ۴۴ داده آزمایشگاهی این تحقیق (با حذف آزمایش دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر، بدلیل مشخص نبودن عمق آبشستگی) با  $R^2 = 0.95$  ارائه می گردد.

$$\frac{d_s}{H} = 0.001(Fr)^{0.905} \left(\frac{Y_t}{H}\right)^{-0.705} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{-1.44} \quad (5)$$

که در آن  $d_{50}$  در ۱۴ آزمایش شاهد معادل قطر ذرات بستر و در ۳۰ آزمایش اصلی معادل قطر متوسط ذرات سنگچین است. براساس رابطه ۵ مقدار عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب و قطر متوسط ذرات بستر کاهش می یابد و عدد فرود سقوط رابطه مستقیم با آن دارد. در شکل ۱۰ مقادیر محاسباتی و آزمایشگاهی در مقایسه با یکدیگر نشان داده شده است.

### ۳-۱- مقایسه اقتصادی

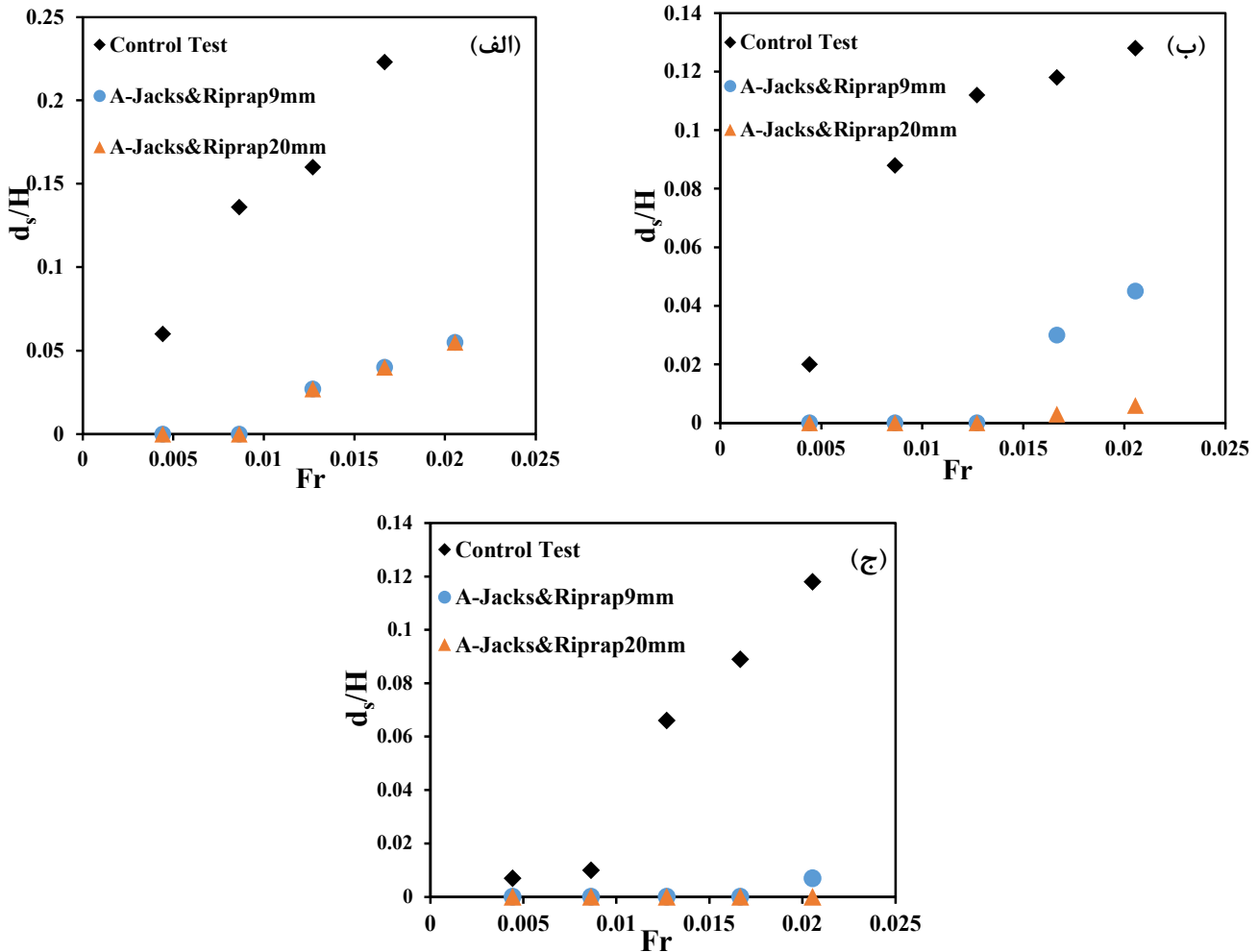
همانگونه که قبلا تاکید شد استفاده از مصالح جدید برای پروژه هایی که دسترسی به مصالح سنگی با ابعاد درشت امکان پذیر نیست و یا لازم است از فاصله طولانی تهیه شوند توصیه می شود. لذا در این بخش مقایسه اقتصادی تهیه مصالح برای پروژه ای در حال ساخت در پایین دست رودخانه بهمیشیر (استان خوزستان) انجام شده است. هر

المان که امکان قفل شدن با جداره را ندارد) و امکان قرار دادن المانها در این فضا امکان پذیر نبود، این فضا توسط بتونه پر شد. آزمایشهای اولیه نشان داد که دبی بالای جریان در آزمایشها جت بسیار قوی به پایاب از کوچکترین فضای ممکن امکان نفوذ داشته و با شستن پوشش زیر المانها باعث برهم خوردن آرایش شبکه ای المانها و در نتیجه حرکت دادن آنها می شود که این در این زمان آزمایش متوقف می شود. از این رو این فضا، در سطح و کناره ها، برای جلوگیری از تشکیل جت قائم توسط بتونه پر شد در عمل نیز در صورت بکارگیری این المانها به منظور کنترل آبشستگی لازم است تا این فضا توسط بتن پر شود. همچنین به دلیل سهولت برداشتن شبکه المانها در پایان آزمایشها و عدم برهم خوردن پروفیل آبشستگی و انجام اندازه گیری المانهای شبکه شده که به صورت چند دسته بودند در لایه محل اتصالشان توسط بتونه بهم متصل گشتند که این روش در نتیجه نهایی آزمایشها کاملا بی تاثیر بود.

### ۳- تحلیل و بررسی نتایج

آبشستگی در آزمایشات صورت گرفته بدین شکل است که ابتدا در اثر ضربه ی پرش اسکی به سطح رسوبات مقدار قابل توجهی آبشستگی رخ می دهد و بعد از برخورد جریانهای غلظتی ایجاد شده حاصل از پدیده ی برخورد جت آب به کف، به عقب و جلو می غلتند و رسوبات را با خود حمل می کند به طوری که در عمقهای بیشتر پایاب که اثر ضربه پرش اسکی کم می شود مقدار قابل توجهی از آبشستگی را موجهای غلظتی ایجاد می کنند و با به کار بردن المانهای شش پایه و سنگچین به طور قابل توجهی اثر ضربه ایجاد شده توسط پرش اسکی کاهش می یابد و با کاهش اثر ضربه، آبشستگی کاهش می یابد. درصد کنترل آبشستگی در پایین دست سرریز در هر یک از حالت های بستر محافظت شده با سنگ چین به قطر ۹ میلی متر و یک لایه المان بتنی شش پایه بر روی آن و بستر محافظت شده با سنگ چین به قطر ۲۰ میلی متر و یک لایه المان بتنی شش پایه به صورت جدول ۳ ارائه گردیده است.

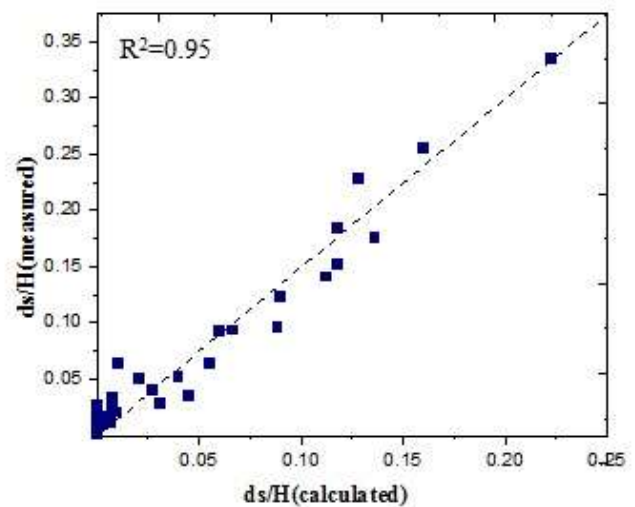
به منظور محاسبه حداکثر حجم حفره آبشستگی، پروفیل طولی آبشستگی که از کناره فلووم مشاهده است با عکس برداری و استفاده از نرم افزار دیجیتایز شده و سطح آن محاسبه شده است و سپس در عرض فلووم ضرب شده است که نتایج آن در شکل ۸ برای دبی های



شکل ۹: تغییرات حداکثر عمق چاله‌ی فرسایشی در اعماق پایاب، ۱۰ سانتی‌متر (الف)، ۲۰ سانتی‌متر (ب) و ۳۰ سانتی‌متر (ج)، در مقابل عدد فرود پایاب  
 Fig. 9. Changes in the maximum depth of the erosion pit at the depths of the downstream, (A) 10 cm , (B) 20 cm and (C) 30 cm , versus the  $Fr$

چند مطالعات این تحقیق صرفاً جهت معرفی یک نوع مصالح جدید بوده که با شرایط جریان مختلف (دبی و عمق پایاب) و نیز مصالح سنگچین مختلف انجام شده است و نتایج به صورت پارامترهای بدون بعد استخراج شده است لیکن می‌تواند الگوی مناسبی برای مقایسه اقتصادی مصالح مختلف باشد.

به منظور برآورد هزینه لازم جهت پوشش بستر با دو روش سنگچین و استفاده از المان شش پایه، ابتدا با توجه به ابعاد المان آزمایشگاهی مساحت و حجم المان توسط نرم افزار اتوکد محاسبه گردید. سپس برای محاسبه حجم المان در مقیاس واقعی حجم محاسبه شده ۱۲ برابر گردید و با توجه به وزن مخصوص بتن (۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب) وزن المان واقعی محاسبه گردید. این وزن برابر وزن یک قطعه سنگ معادل می‌باشد. با توجه به وزن مخصوص



شکل ۱۰: مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و محاسباتی از رابطه ۵  
 Fig. 10. Comparison of measured and computational data from Equation 5

جدول ۴: محاسبات وزنی و حجمی المان شش پایه و سنگ منفرد

Table 4. Weight and volume calculations of six-legged element and single stone

محاسبات حجمی و وزنی	آیتم
3833/69 میلیمتر مربع	مساحت المان آزمایشگاهی (توسط اتوکد)
8798 میلیمتر مکعب	حجم المان آزمایشگاهی (توسط اتوکد)
0/0152203 متر مکعب	حجم المان در پروتوتایپ با در نظر گرفتن مقیاس 1:12
36/48 کیلوگرم	وزن المان در پروتوتایپ با فرض وزن مخصوص بتن برابر با 2400 کیلوگرم بر متر مکعب
0/30 متر	محاسبه قطر لاشه سنگ هم وزن المان با فرض وزن مخصوص سنگ برابر با 2650 کیلوگرم بر متر مکعب

جدول ۵: آنالیز بهای پوشش سنگ چین در ۱۰۰ متر مربع (براساس فهرست بهای سدسازی ۱۳۹۷)

Table 5. Price analysis of Riprap coating in 100 m<sup>2</sup> (based on the price list of dam construction 1397)

بها (ریال)	ردیف فهرست بها	آیتم
9050800	011903	تهیه مصالح از سنگ کوهی و اجرای پوشش خشکه چین (RIP-RAP)
689282	011302	حمل مصالح سنگی، برای مصالح مازاد بر 500 متر تا 10 کیلومتر
25744290	011307	حمل مصالح سنگی، برای مصالح مازاد بر 10 کیلومتر
35484372		جمع

جدول ۶: آنالیز بهای پوشش المان شش پایه بتنی در ۱۰۰ متر مربع (براساس فهرست بهای سدسازی ۱۳۹۷)

Table 6. Price analysis of Six-legged concrete element coating in 100 m<sup>2</sup> (based on the price list of dam construction 1397)

بها (ریال)	ردیف فهرست بها	آیتم
12667322	060102	قالب بندی F2
13861000	070301	بتن رده III
5901780	073603	تهیه سیمان نوع 5
402198	100101	حمل سیمان از 30 تا 75 کیلومتر
150556	100102	حمل سیمان از 75 تا 150 کیلومتر
400115	011302	حمل مصالح سنگی مازاد بر 500 متر تا 10 کیلومتر
3448634	011307	حمل مصالح سنگی مازاد بر 10 کیلومتر به ازای هر 10 کیلومتر اضافه
36831605		جمع کل

بستر با المان های شش پایه و پوشش سنگچین با شرایط مذکور تقریباً یکسان خواهد بود. در صورتیکه بجای استفاده از یک لایه سنگ، از چند لایه سنگ چین استفاده نماییم در این صورت استفاده از المان های شش پایه در مقابل سنگ چین از توجیه اقتصادی بهتری برخوردار خواهد بود.

#### ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تاثیر المان شش پایه بتنی به همراه سنگچین، در پنج دبی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه و سه عمق پایاب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر بر کاهش آبستگي پايين دست سرریز پرش اسکی به کمک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی مقدار آبستگي پايين دست سرریز بیشتر و افزایش عمق پایاب عاملی کاهنده بر این مقدار تلقی می شود. همچنین با افزایش عدد فرود سقوط حداکثر عمق چاله فرسایشی افزایش می یابد. ایجاد پوشش حفاظتی از دو روش پوشش با المان شش پایه و سنگ چین بر روی بستر توانایی کنترل کامل یا تا حد زیادی از میزان حجم آبستگي را دارد که این موضوع در دبی های بالا با عمق پایاب کم از اهمیت بالاتری برخوردار است. به طوریکه مثلاً در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۱۰ سانتی متر، حداکثر حجم آبستگي ۸۹ درصد برای پوشش با سنگ چین ۹ میلی متر و المان شش پایه و ۹۹ درصد برای پوشش با سنگچین به قطر ۲۰ میلی متر و المان شش پایه کاهش یافت.

در مقایسه اقتصادی میان استفاده از سنگ چین و المان های شش پایه بتنی، با توجه به وجود محدودیت های کارگاهی برای ساخت المان های شش پایه و ساخت مرحله ای آنها، با فرض قالب بندی ۱۰ درصد المان ها به صورت روزانه، هزینه پوشش بستر با یک لایه سنگ چین با هزینه پوشش با المان های شش پایه برابر خواهد بود. با این وجود بدلیل مزایای فنی المان شش پایه بتنی و ویژگی اصلی آنها یعنی قفل شونده و عملکرد شبکه ای آنها، می تواند در انتخاب گزینه مورد نظر مهندسین هیدرولیک مورد توجه قرار گیرد. همچنین در صورت افزایش ضخامت لایه پوششی سنگ چین، استفاده از المان های شش پایه به صورت شبکه یک لایه مقرون به صرفه تر خواهد بود.

بدیهی است که قبل از اجرایی شدن این پیشنهاد نیاز است تا تحقیقات بیشتری بخصوص در رابطه با وزن و ابعاد و اندازه المان ها

سنگ ( ۲۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) قطر سنگ معادل محاسبه گردید. جهت اطمینان قطر سنگ ۲۰ درصد افزایش یافت و وزن سنگ مجدداً محاسبه گردید. با توجه به محاسبات انجام شده و ابعاد بدست آمده تعداد المان شش پایه مورد نیاز برای پوشش مساحت ۱۰۰ متر مربع (۱۰ متر در ۱۰ متر) و تعداد سنگ لازم برای پوشش این مساحت محاسبه گردید. از آنجایی که متوسط فاصله حمل سنگ در پروژه ها حدود ۴۰۰ کیلومتر و فاصله نزدیکترین محل جهت تهیه مصالح ساخت بتن حدود ۱۰۰ کیلومتر است، در نتیجه محاسبات در هر یک از سازه های محافظت بستر بر این اساس انجام می گیرد. همچنین تمامی محاسبات برای مساحت ۱۰۰ متر مربع (۱۰ متر \* ۱۰ متر) انجام می گردد. جهت انجام برآورد اقتصادی هر یک از لایه های پوششی از فهرست بهای سد سازی ۱۳۹۷ استفاده گردید. نتایج محاسبات انجام شده در جدول ۴ ارائه گردیده است.

با اعمال ۲۰ درصد ضریب اطمینان به قطر لاشه سنگ، وزن سنگ به قطر ۰/۳۶ متر برابر ۶۸ کیلوگرم بدست می آید. با توجه به ابعاد المان شش پایه واقعی، در صورتیکه المان ها به صورت کامل و شبکه در هم قفل شوند حدود ۷۲۹ المان جهت پوشش محدوده ۱۰۰ متر مربعی لازم است. در نتیجه وزن المان ها در مساحت مذکور معادل ۲۶/۶ تن خواهد بود (با در نظر گرفتن وزن مخصوص لاشه سنگ برابر ۲۶۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب، حجم سنگ لازم معادل ۱۸/۷ متر مکعب خواهد بود). همچنین با کنار هم قرار دادن سنگ ۳۶/۶ سانتی متری، به ۷۲۹ قطعه سنگ جهت پوشش مساحت مذکور نیاز خواهد بود که وزن کلی آن معادل ۴۹/۵۷ تن بدست می آید. مساحت قالب مورد نیاز جهت ساخت یک المان شش پایه واقعی برابر ۰/۳۸۷ متر مربع می باشد. در پروژه های اجرایی معمولاً المان ها را به صورت مرحله به مرحله ساخته و با یکدیگر مونتاژ می نمایند. در نتیجه ساخت کلیه المان ها در زمان مشخصی انجام می شود. برآورد هزینه ساخت المان ها با فرض اینکه ۱۰ درصد تعداد کل المان ها قالب آماده در اختیار بوده انجام می شود. در نتیجه مساحت قالب بندی معادل ۲۸/۲۱۲ متر مربع در نظر میگیریم.

با توجه به تعداد المان های بتنی و لاشه سنگ بدست آمده هزینه پوشش بستر با دو سازه المان شش پایه بتنی و سنگ مطابق جدول ۵ و ۶ ارائه می شود:

با توجه به نتایج جدول ۵ و ۶ می توان دید که هزینه پوشش

- Evolving Scour Hole Downstream of an Apron, Journal of Engineering Mechanics 936-927 (2008) (11)134.
- [12] J. M. Wang, X. G. Yang, H. W. Zhou, X. Lin, R. Jiang, E. Q. Lv, Bed Morphology around various solid and flexible grade control structures in an unstable gravel-bed river, Water. 822 (2018) 10.
- [13] M. Zolghadr, M. Shafaei Bajestan, M. Rezaeianzadeh, Investigating the Effect of Six-Legged Element Placement Density on Local Scour at Wing-Wall Bridge Abutments, World Environmental and Water Resources Congress, (36-28 (2016).
- [14] S. Mohammadpour, M. Shafai Bajestan, Investigation of The Area of Around Bridge Abutment by A-Jacks to Protect Against Scour, Irrigation Sciences and Engineering, (1)40 35-25 (2017). (in Persian)
- [15] L. Torfi Salehi, M. Shafai Bajestan, Hydraulic Jump Stilling Basins Downstream Scour Covered with Six Legs Elements under Reduction of Basin Length, Irrigation Sciences and Engineering, 124-109 (2018) (4)40. (in Persian)
- [16] A.A. Hossein Reza, M. Shafai Bajestan, M. Ghomshi, M. Fathi Moghadam, Investigation the Joined Effect of Riprap and Six legged Elements (SLC) Installation on Scour Depth Mitigation at Vertical Wall Bridge Abutments, Irrigation Sciences and Engineering Journal, (2019). (in Persian)
- [17] G.H. Akbari, M. Kavianpour, E.S. Samani, Experimental investigation of scouring downstream of ski jump spillway, Journal of Water Resources Engineering, (64-51 (2014).
- [18] C.I. Thornton, S.R. Abt, C.C. Watson, Field Assessment of A-Jacks Installation, A Case Study of: Brush Creek, Kansas City, Missouri Powell Creek, Waukegan, Illinois. Proceedings of the Wetlands Engineering & River Restoration Conference, Reno, Nevada (2001).
- [19] P.J. Mason, Practical guidelines for the design of flip buckets and plunge pools, Water and Dam Construction, 10(9)45 (1993) 45-40.
- [20] B.W. Melville, Pier and abutment scour: integrated approach, Journal of Hydraulic Engineering, 2(1)23 (1997) 136-125.
- [21] W.C. Little, P.G. Mayer, Stability of Channel Beds by Armoring, Journal of Hydraulic Division, (1976).
- نیز انجام شود.
- ۵- مراجع
- [1] N.A. Amanian, N., Scour Below a Flip Bucket Spillway, Ph.D. Dissertation Submitted to Utah State University at Logan, UT, (1993).
- [2] M. Mehri, Simulation of hydraulic behavior of water flow on Balarood Dam spillway by using a small scale physical model, Thesis, University of Shahid Chamran, Ahvaz, (2007). (In Persian)
- [3] M.R. Vesalian, M.H. Jahromi, M. Shafai Bajestan, Scouring caused by rectangular jets in downstream of Ski jump spillways with non-uniform materials, Journal of Agricultural Science and Natural Resources, (2009).
- [4] P.J. Mason, K. Arumugam, Free jet scour below dams and flip buckets, Journal of Hydraulic Engineering, (2)111 235-220 (1985).
- [5] S. Heng, T. Tingsanchali, T. Suetsugi, Prediction formulas of maximum scour depth and impact location of a local scour hole below a chute spillway with a flip bucket, WIT Transactions on Ecology and the Environment, (2013) 172 262-251.
- [6] B. Dargahi, Scour development downstream of a spillway, Journal of hydraulic research (426-417 (2003) 4(41).
- [7] H.M.D. Azmathulla, M.C. Deo, P.B. Deolalikar, Estimation of scour below spillways using neural networks, Journal of Hydraulic Research, 1(44) (2006) 69-61.
- [8] H.M.D. Azmathulla, A.Ab. Ghani, and N.A. Zakaria, Prediction of Scour below Flip Bucket using Soft Computing Techniques, The 2nd International Symposium and The 12th International EPMESC Conference, (2010) 1593-1588.
- [9] M.K. Ayoubloo, H.M.D. Azmathulla, Z. Ahmad, A.Ab. Ghani, J. Mahjoobi, A. Rasekh, Prediction of Scour Depth in Downstream of Ski-Jump Spillways Using Soft Computing Techniques, International Journal of Computers and Applications. 1(33) (2011) 97-92.
- [10] A.J. Peterka, Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, Engineering Monograph, (7)25 125-91 (1983).
- [11] S. Dey, A. Sarkar, Characteristics of Submerged Jets in

- [24] F. Bhuiyan, R.D. Hey, P.R. Wormleaton, Hydraulic evaluation of W-weir for restoration, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 605-596 (2007) (6)133.
- [25] S.Y. Lim, J. Nugroho, Observations on Flow Field around an Abutment in a Two-stage Channel. *Proceedings of the 2nd International Conference on Scour and Erosion, Singapore 1, (2004) 164-156.*
- [22] S. Pagliara, M. Palermo, Scour control and surface sediment distribution downstream of block ramps, *Journal of Hydraulic Research*. 343-334 (2008) (3)46.
- [23] S.M. Scurlock, C.I. Thornton, S.R. Abt, Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade-control structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, (2)138 176-167 (2012).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh.N.M. Rashki, M.M. Azhdary, M. Shafai Bajestan, M.H. Azamathulla, *Effect of Concurrent Use of the Six-Legged Element and Rip-Rap for Scour Control with Economic Considerations, Amirkabir J. Civil Eng., 52(8) (2020) 1995-2010.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.15793.6032](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15793.6032)

