

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر قرارگیری سری پره‌های مستغرق در بالادست پایه استوانه‌ای در کاهش آب‌شستگی

سمیرا رضاپوریان قهفرخی<sup>۱\*</sup>، بهزاد قربانی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

\* شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵

behg1955@yahoo.com

**چکیده-** آب‌شستگی یکی از عوامل تخریب سازه‌های هیدرولیکی مانند پایه پلها در هنگام وقوع سیلاب به‌شمار می‌رود. برای دستیابی به مؤثرترین روش حفاظت از سازه‌های آبی در برابر آب‌شستگی، تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. یکی از روشها استفاده از تعدادی پره‌های مستغرق است که البته تحقیق در این زمینه کامل انجام نشده است. در این پژوهش کاربرد گروه پره‌های مستغرق در بالادست پایه و به صورت متقارن نسبت به خط جریان در موقعیت‌های مختلف و زوایای متفاوت برخورد، برای کنترل آب‌شستگی موضعی پایه استوانه‌ای در شرایط آب‌زالال مطالعه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که قرارگیری پره‌ها در بالادست پایه و در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به پایه، بیشترین کاهش عمق آب‌شستگی را در پی داشته و در بهترین موقعیت، ۸۰/۹ درصد کاهش در آب‌شستگی را سبب می‌شود.

**کلید واژگان:** آب‌شستگی، پایه استوانه‌ای، گروه پره‌های مستغرق، زاویه برخورد.

## ۱- مقدمه

آب‌شستگی یکی از مهمترین مشکلات پیش روی مهندسان و طراحان سازه‌های هیدرولیکی رودخانه‌ها بوده و هست؛ زیرا سازه‌هایی مانند پایه و تکیه‌گاه پلها، آب‌شکن‌ها، حوضچه‌های آرامش پایین‌دست، پرتاب‌کننده‌ها و آبشارها همواره در معرض تهدید این پدیده قرار دارند. هر ساله پل‌های متعددی در سراسر جهان از جمله آمریکا، به دلیل در نظر نگرفتن نقش

عوامل هیدرولیکی در طراحی، بر اثر سیلاب تخریب می‌شوند (قربانی و کلز، ۲۰۰۸ و زراتی، ۱۳۷۹). آب‌شستگی پدیده‌ای است ناشی از فرسایش بستر و کناره رودخانه‌های آبرفتی که توسط جریان آب در اطراف سازه هیدرولیکی ایجاد می‌شود (رودکیوی و اتما، ۱۹۸۳). تغییر شکل بستر بر اثر آب‌شستگی سبب تهدید پایداری سازه‌های هیدرولیکی می‌شود (ناصری، ۱۳۷۳). لذا پیش‌بینی عمق و وضعیت نهایی حفره آب‌شستگی یکی از

مهمترین موارد در طراحی هیدرولیکی سازه‌ها می‌باشد (بهشتی و عطایی‌آشتیانی، ۱۳۸۷).

توسعه زمانی حفره آب‌شستگی و ارتباط بین عمق آب‌شستگی و سرعت جریان در نزدیکی پایه، به نوع آب‌شستگی (آب زلال<sup>۱</sup> یا بستر زنده<sup>۲</sup>) بستگی دارد (بروسر و رودکیوی، ۱۹۹۱). در بررسی عوامل ایجاد کننده آب‌شستگی مشخص شده است که شکل اصلی جریان نزدیک پایه، جریان گردابی است که در اطراف پایه توسعه یافته و سازوکار اصلی آب‌شستگی را تشکیل می‌دهد. اجزای اصلی این سیستم جریان رو به پایین، گرداب نعل اسبی و گرداب‌های دنباله‌دار است (رودکیوی، ۱۹۹۸).

مطالعات و تحقیقات زیادی در زمینه بررسی تأثیر روشهای مختلف حفاظت از پایه پل‌ها برای جلوگیری از آب‌شستگی انجام شده است، اما هیچ یک به‌طور کامل در زمینه حفاظت از پایه‌های پل در برابر آب‌شستگی به موفقیت کامل نرسیده است. چپو (۱۹۹۲) دو روش اساسی را برای محافظت از پایه‌ها ارائه کرد: ۱- روش مستقیم: در این روش با تقویت مصالح اطراف پایه، مقاومت بستر در برابر تنش‌های وارد شده افزایش داده می‌شود. ۲- روش غیرمستقیم: در این روش با قرار دادن طوق یا شکاف بر روی پایه و یا صفحه‌ای گسترده در اطراف پایه و پره‌های برگردان، با تغییر الگوی جریان در اطراف پایه، از تأثیر نیروهای مخرب کاسته می‌شود. علاوه بر این روش برای محافظت از پایه پل‌ها در برابر آب‌شستگی، ترکیبی از دو روش فوق نیز به‌کار می‌رود.

یکی دیگر از روشهای کنترل و کاهش آب‌شستگی در کنار پایه پل‌ها استفاده از پره‌های مستغرق<sup>۳</sup> است که صفحات کوچکی هستند و اغلب برای حفاظت از بستر و

ساحل رودخانه در برابر فرسایش و برای کنترل رسوب در محل آبنگورها به‌کار می‌روند. اما هنگامی که پره در کنار پایه‌ها اضافه شود با انحراف خطوط جریان، موجب کاهش قدرت جریان‌های گردابی نعل اسبی در کنار پایه‌های پل و لذا موجب کاهش آب‌شستگی می‌شود (قربانی و کلز، ۲۰۰۸). بر طبق گزارش صمیمی بهبهان و بارانی (۱۳۸۵) صفحات مستغرق، بسته به موقعیت قرارگیری، با ایجاد جریان ثانویه در اطراف خود باعث تغییر مقدار و جهت تنش برشی، الگوی توزیع سرعت در نتیجه تغییر روند انتقال رسوب می‌شوند. به علت اختلاف فشار در دو سوی پره، جریان از سمت پر فشار به سمت بالای پره و از سمت کم فشار به سمت پایین آن حرکت می‌کند و در نتیجه گرداب و نوعی گردش القایی در اطراف پره به‌وجود می‌آید. این گرداب پس از طی مسیر نسبتاً کوتاهی توسط نیروی لزجت آب از بین می‌رود. ادگار و کندی (۱۹۸۳) از تعدادی پره برای کاهش یا حذف فرسایش در قوس رودخانه‌ها استفاده کردند. پس از آن برای اولین بار در سال ۱۹۸۷ ادگار و وانگ استفاده از پره برای کنترل آب‌شستگی در کنار پایه‌های استوانه‌ای را با انجام تعدادی آزمایش مقدماتی مورد توجه قرار دادند. لاجلان (۱۹۹۹)، تعدادی صفحات مستغرق با طول‌ها و ارتفاعهای مختلف استفاده کردند که حاصل آن کاهش ۱۰ تا ۲۸ درصدی آب‌شستگی بوده است. جانسون و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که پره‌های مستغرق در تغییر مکان آب‌شستگی از مرکز کانال مؤثرند. قربانی و کلز (۲۰۰۸) با انجام آزمایش‌هایی بر روی پره‌های منفرد و دوگانه در زوایای مختلف برخورد، ارتفاعات متفاوت پره و شرایط مختلف جریان، کاهش ۱۷ درصدی را برای پره منفرد و ۸۳ درصدی را برای پره دوگانه با زاویه برخورد ۱۸/۵ درجه گزارش کرده‌اند.

1. Clear Water Scour
2. Live Bed Scour
3. Submerged Vanes

برای سنجش عمق آب در کانال از عمق‌سنج مجهز به کولیس - که قابلیت جابه‌جایی در طول و عرض کانال را دارد - استفاده شد. خطای اندازه‌گیری با این عمق‌سنج در حدود  $\pm 0.1\%$  است. برای بررسی توسعه یافتگی جریان، بررسی پروفیل سرعت در بالادست پایه و کنترل بیشتر دبی جریان در طول آزمایش از سرعت سنج ADV - که نوعی ردیاب صوتی دو حالته است استفاده شد (راهنمای سرعت‌سنج VECTRINO، ۲۰۰۴) (شکل ۲).

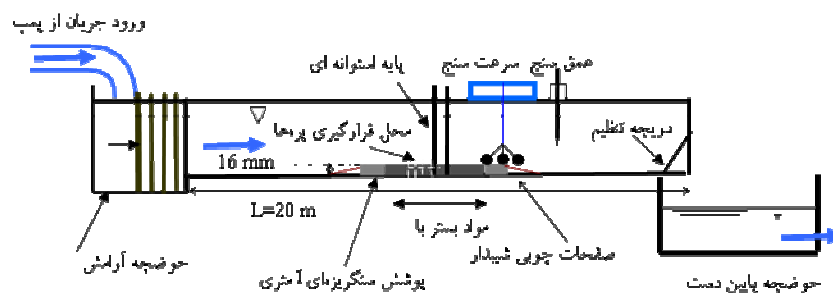
در آزمایش‌هایی که برای تعیین حداکثر عمق آب‌شستگی موضعی انجام می‌شود، انتخاب مناسب پارامترهای موثر بر آب‌شستگی مانند عمق جریان، اندازه و دانه‌بندی ذرات رسوب و سرعت جریان، برای رسیدن به حداکثر عمق آب‌شستگی در شرایط آب زلال مهم است (ملویل و ساترلند، ۱۹۸۸). یکی از محدودیت‌ها برای دستیابی به حداکثر عمق آب‌شستگی، انتخاب قطر رسوبهای غیرچسبنده است. بر طبق معیار ارائه شده توسط رودکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای جلوگیری از تشکیل رپیل توسط رسوبهای غیرچسبنده که باعث کاهش بیشینه عمق آب‌شستگی می‌شود، متوسط قطر ذرات باید از  $0.7$  میلی‌متر بزرگتر باشد.

با وجود این مطالعات، هنوز ضرورت انجام تحقیقات در باره تأثیر پره بر آب‌شستگی در کنار پایه‌های پل وجود دارد. هدف از این تحقیق بررسی کارایی و تأثیر گروه پره‌های مستغرق در کاهش آب‌شستگی موضعی در کنار پایه استوانه‌ای و تعیین بهترین موقعیت قرارگیری سری پره‌های مستغرق در بالا دست پایه است.

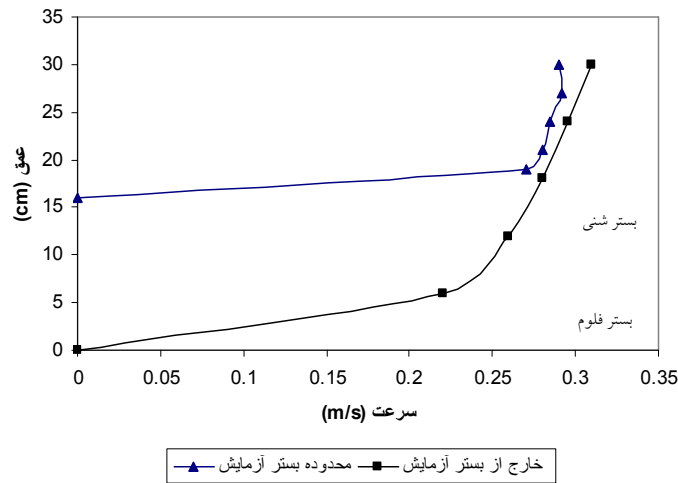
## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی به طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. فلوم دارای کف فلزی و دیوارهای شفاف فایبرگلاس بوده و تغییر شیب آن توسط دو دستگاه جک ابتدایی و انتهایی امکان‌پذیر است. گردش آب از مخزن به فلوم و به عکس به وسیله پمپ سانتریفوژ با قابلیت تنظیم دبی تا ۷۰ لیتر بر ثانیه انجام می‌شود. برای آرام ساختن جریان ورودی فلوم از حوضچه آرامش مجهز به صفحات آرام‌کننده استفاده می‌شود. در انتهای فلوم نیز دریچه‌ای لولایی برای تغییر و تنظیم عمق آب در کانال نصب شده است. برش طولی فلوم آزمایشگاهی در شکل ۱ دیده می‌شود.



شکل ۱ طرحواره‌ای از برش طولی فلوم آزمایشگاهی



شکل ۲ پروفیل سرعت در محدوده آزمایش بر روی بستر ماسه‌ای و خارج از محدوده آزمایش روی بستر فلوم

دوبار شستشو انجام شد. جدول ۱ خصوصیات مواد بستر را نشان می‌دهد.

در این مطالعه محدوده بستر آزمایش به فاصله ده متری از ورودی فلوم انتخاب شد تا در محدوده جریان توسعه یافته قرار گیرد. برای اطمینان از محدوده توسعه یافتگی جریان، سرعت جریان در مقطع فوق و یک مقطع در بالادست اندازه‌گیری شد تا از یکنواختی پروفیل سرعت و در نتیجه از توسعه یافتگی جریان اطمینان حاصل شود.

ضخامت بستر در این مطالعه با توجه به تحقیقات قربانی و کلز (۲۰۰۸)، برابر ۱۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای این منظور در وسط فلوم محدوده‌ای در حدود ۳ متر با رسوبهای غیر چسبنده فوق با ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر پر شد. برای تراز بستر آزمایش قسمتی از بالادست و پایین‌دست محدوده فوق تا فاصله یک متری از هر طرف و تا عمق ۱۶۰ میلی‌متر با سنگ‌ریزه پوشانده شد.

همچنین برای حذف تأثیر اندازه رسوبها بر عمق آب‌شستگی، متوسط قطر این ذرات باید در شرط  $\frac{D}{D_{50}} > 20-25$  (D قطر پایه و  $D_{50}$  متوسط قطر ذرات، است) صدق کند. علاوه بر این با توجه به اینکه نایکنواختی رسوبها باعث کاهش آب‌شستگی موضعی می‌شود، لذا برای حذف این عامل در صورتی که انحراف معیار هندسی ذرات  $\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84.1}}{D_{15.9}}} < 1.3$  باشد، شرط یکنواختی ذرات برقرار می‌شود. در رابطه فوق،  $D_{84.1}$  و  $D_{15.9}$  قطر رسوبهای بستر است که به ترتیب ۸۴/۱ و ۱۵/۹ درصد از ذرات از آنها کوچکترند (شفاعی بجزستان، ۱۳۷۳). با توجه به شرایط ذکر شده در بالا، برای این تحقیق از ماسه‌ای برای بستر استفاده شد که از الک‌های شماره ۱۸ و ۲۵ در محدوده اندازه ذرات ۰/۷۱ تا ۱ میلی‌متر عبور داده شده و برای حذف چسبندگی آنها

جدول ۱ ویژگیهای رسوبهای بستر

انحراف معیار	ضریب یکنواختی	زاویه ایستایی	تخلخل	جرم مخصوص	قطر متوسط
$\sigma_g$	$C_u$	$\phi$	$\eta(\%)$	$G_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$D_{50}$ (mm)
۱/۱	۱/۲	۳۰/۵	۵۱/۸۵	۲/۷	۰/۷۸

آزمایش‌ها مورد توجه قرار گیرد، رعایت حداکثر تنش برشی بحرانی<sup>۱</sup> در شرایط آب زلال است. برای تحقق این شرط و با استفاده از میانگین قطر و چگالی مواد بستر، گرانشی سینماتیک (در دمای ۲۰°)، شعاع هیدرولیکی، شیب خط انرژی و چگالی آب، تنش برشی بحرانی (۰/۳۹۷ N/m<sup>2</sup>) از منحنی شیلدر به دست آمد و نسبت تنش در کانال (۰/۳۱۸ N/m<sup>2</sup>) به تنش بحرانی ۰/۸ (۰/۳۱۸ ÷ ۰/۳۹۷ = ۰/۸۰) در نظر گرفته شد (قربانی و کلز، ۲۰۰۸). روابط مورد استفاده به شرح زیر است:

$$S = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} = \frac{Fr^2 g \gamma n^2}{R^{4/3}} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{Q}{A \sqrt{g d}} = \frac{Q}{A \sqrt{g y}} \quad (2)$$

$$\tau_0 = \rho g R S \quad (3)$$

که در آن، Q شدت جریان (m<sup>3</sup>/s)، A سطح مقطع جریان (m<sup>2</sup>)، R شعاع هیدرولیکی (m)، y عمق جریان (m)، g شتاب ثقل جریان (m/s<sup>2</sup>)، n ضریب زبری مانینگ، d عمق معادل (m)، S شیب خط انرژی و ρ چگالی (kg/m<sup>3</sup>) است. علاوه بر این در آزمایشگاه بر روی بستر فلوم با دبی ثابت ۴۹ لیتر بر ثانیه، عمق‌های مختلفی از ۲۱ تا ۳۵ سانتی‌متر ایجاد شد تا حرکت یا عدم حرکت مواد بر روی بستر مطالعه شود. نتیجه این آزمایش‌ها که در جدول ۲ آورده شده نشان می‌دهد که این نتیجه با محاسبات انجام شده تطابق دارد. لذا عمق ۳۰ سانتی‌متر که مرز بین سکون و حرکت مواد بستر است برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. در این عمق، عدد فرود تقریباً برابر ۰/۱۶ و عدد رینولدز در دمای ۲۰ درجه برابر ۴۰۷۸۶ است. لذا تمامی آزمایش‌ها در رژیم جریان زیر بحرانی انجام شده است.

برای محاسبه ضریب زبری مانینگ، از زبری معادل بین دو جدار فایبرگلاس و مقدار آن بر روی بستر کانال استفاده

برای حفاظت بیشتر رسوبها در برابر جریان در بالادست و پایین‌دست نیز از دو سطح شیب‌دار چوبی استفاده شد. قبل از شروع آزمایش، عمق جریان با شدت جریان کم تا ۳۰ سانتی‌متر تنظیم شد.

برطبق معیار رودکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای از بین رفتن تأثیر دیوارهای کانال بر آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه، نسبت عرض کانال (b) به قطر پایه (D) باید بیش از ۶/۲۵ باشد ( $\frac{b}{D} \geq 6.25$ ). در این تحقیق عامل محدودکننده، عرض کانال است، لذا با توجه به اینکه عرض کانال برابر ۰/۶ متر است، قطر پایه برابر ۹۰ میلی‌متر و از جنس PVC انتخاب شد. در ضمن ارتفاع پره‌ها برابر با ارتفاع بستر ماسه‌ای در فلوم در نظر گرفته شد، زیرا با توجه به نتایج تحقیقات قربانی و کلز (۲۰۰۸)، بیشترین کاهش در آب‌شستگی موضعی در ارتفاع صفر پره نسبت به سطح بستر مشاهده شده است که باید در این مطالعه بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. پره‌های مورد استفاده دارای طولی برابر با قطر پایه، ضخامت ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۶۰ میلی‌متر است و از تعداد شش پره برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد.

## ۲-۲- تعیین عمق جریان

بر طبق نظر اتما (۱۹۸۰)، در جریان‌های کم‌عمق، گرداب‌های موج‌کمانی ایجاد شده در سطح آب، به علت گردش در خلاف جهت جریان با جریان تداخل یافته و موجب کاهش در جریان رو به پایین و کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. بنابراین باید عمق جریان به نحوی انتخاب شود که تأثیر این پدیده بر عمق آب‌شستگی از بین برود. پس حداقل عمق انتخاب شده برای از بین بردن این اثر باید بیش از سه برابر قطر پایه (۲۷ سانتی‌متر = ۳×۹) باشد. نکته دیگری که باید در تعیین عمق جریان در

کوتاه‌تر و با گذشت زمان در فواصل زمانی بزرگتری اندازه‌گیری و مقایسه شد.

#### ۲-۴- روش آزمایش

مجموعه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق برای تعیین عملکرد گروه پره‌ها بر میزان آب‌شستگی در کنار پایه را می‌توان به سه بخش مهم تقسیم کرد:

۱- آزمایش‌های بدون پره (آزمایش شاهد): در این بخش تعدادی آزمایش بدون استفاده از پره انجام شد. هدف از این آزمایش‌ها بررسی روند تغییرات آب‌شستگی در کنار پایه نسبت به زمان و استفاده از نتایج حاصل به‌عنوان شاهد برای آزمایش‌های بعدی است.

۲- قرارگیری گروهی پره‌های جدا از پایه در بالادست: در این آزمایش‌ها شش پره به‌طور متقارن نسبت به خط جریان در بالادست پایه چیده شد. چینش گروهی پره‌ها و انجام آزمایش‌ها، از فاصله چهار برابر قطر پایه شروع شد و تا فاصله یک برابر قطر پایه ادامه یافت (شکل ۳).

شد. برای این منظور نخست ضریب زبری بستر کانال با استفاده از قطر متوسط ذرات بستر  $(D_{50})$  و رابطه استریکلر (معادله ۴) محاسبه شد. آنگاه ضریب زبری جدار کانال برای فایبرگلاس از منابع و با توجه به عمق جریان و سطح مؤثر جدار و بستر زبری معادل به روش متوسط وزنی استخراج و محاسبه شد.

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (4)$$

#### ۲-۳- زمان آزمایش‌ها

لوچلن (۱۹۹۹) و لارسن (به نقل از جانسون و همکاران، ۲۰۰۱) آزمایش‌های آب‌شستگی را برای مدت چهار ساعت دنبال کردند. قربانی و کلز (۲۰۰۸) در طی آزمایش‌های خود بر روی تأثیر پره در میزان آب‌شستگی، آزمایش‌های بلند مدتی را انجام دادند (۲۴ ساعته) و در نهایت مشاهده کردند که بیش از ۷۵٪ آب‌شستگی موضعی در کنار پایه در هفت ساعت اول آزمایش رخ می‌دهد، لذا در این تحقیق زمان انجام تمامی آزمایش‌ها در دوره ای هفت ساعته انتخاب شده و عمق‌های آب‌شستگی در این هفت ساعت (در ابتدای آزمایش در بازه‌های زمانی

جدول ۲ محاسبه پارامترهای جریان در حرکت بستر

عمق جریان (cm)	سطح مقطع جریان (m <sup>2</sup> )	محیط خیس شده (m)	شعاع هیدرولیکی (m)	دبی جریان (m <sup>3</sup> /s)	ضریب زبری (n)	سرعت جریان (m/s)	شیب سطح آب (S * 10 <sup>4</sup> )	تنش برشی $\tau_0$ (N/m <sup>2</sup> )	حرکت یا ثبات؟ (محاسبات)
۲۱	۰/۱۲۶	۱/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۴۹	۰/۰۱۳۹۷	۰/۳۹۰	۵/۰	۰/۵۸۰	حرکت
۲۴	۰/۱۴۴	۱/۰۸	۰/۱۳	۰/۰۴۹	۰/۰۱۳۹۴	۰/۳۴۲	۳/۴۰	۰/۴۳۲	حرکت
۲۷	۰/۱۶۲	۱/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۴۹	۰/۰۱۳۹۲	۰/۳۰۴	۲/۳۹	۰/۳۳۳	حرکت
۳۰	۰/۱۸۰	۱/۲	۰/۱۵	۰/۰۴۹	۰/۰۱۳۹۰	۰/۲۷۳	۱/۸۰	۰/۲۶۴	ثبات
۳۵	۰/۲۱۰	۱/۳	۰/۱۶	۰/۰۴۹	۰/۰۱۳۸۷	۰/۲۳۴	۱/۲	۰/۱۲۶	ثبات

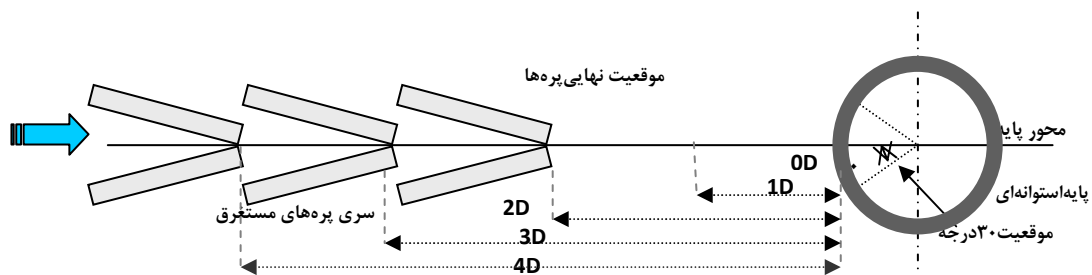
بالادست جدا از پایه (شکل ۳) و چسبیده به پایه (شکل ۴) نشان می‌دهند.

### ۳- تحلیل نتایج آزمایش شاهد

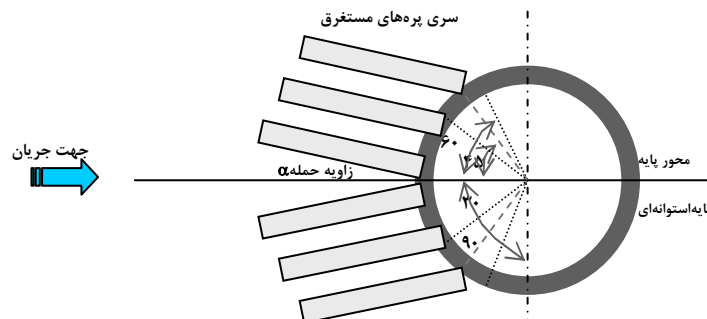
به منظور بررسی روند تغییرات زمانی و تعیین حداکثر عمق آب‌شستگی تعدادی آزمایش در شرایط آب زلال بدون حضور پره‌های مستغرق در جلوی پایه انجام شد. در بازه زمانی آزمایش، عمق آب‌شستگی در جلوی پایه با گذشت زمان یادداشت و در پایان آزمایش نیز حداکثر عمق آب‌شستگی ثبت شد. شکل ۵ تکرار آزمایش شاهد را در شرایط یکسان برای زمانهای مختلف نشان می‌دهد.

در هر آزمایش شش پره در سه موقعیت قرار گرفت. مثلاً وقتی اولین زوج پره در موقعیت 1D قرارگرفت، زوج دوم بر روی راس پایه و زوج سوم بر روی زاویه ۳۰ درجه پایه قرار داده شد.

۳- قرار گیری گروهی پره‌ها بر روی پایه: در این آزمایش‌ها شش پره به‌طور متقارن نسبت به خط جریان روی پایه و با ارتفاع صفر از سطح بستر، در سه موقعیت (۰، ۳۰، ۴۵)، (۳۰، ۴۵، ۶۰) و (۴۵، ۶۰، ۹۰) درجه‌ای پایه و در چهار زاویه برخورد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۹۰ درجه‌ای نسبت به خط جریان چیده شد. در هر سه بخش آزمایش‌ها، عمق آب‌شستگی در جلوی پایه در بازه زمانی هفت ساعته برداشت شد. شکل‌های ۳ و ۴ طرحواره پایه را همراه با موقعیت‌های قرارگیری گروه پره‌های مستغرق در



شکل ۳ طرحواره قرارگیری گروه پره‌های مستغرق در بالادست پایه (D فاصله‌ای معادل قطر پایه است)



شکل ۴ طرحواره قرارگیری گروه پره‌های مستغرق بر روی پایه (پره‌ها بر روی زوایای متقارن نسبت به محور پایه قرار گرفته‌اند)

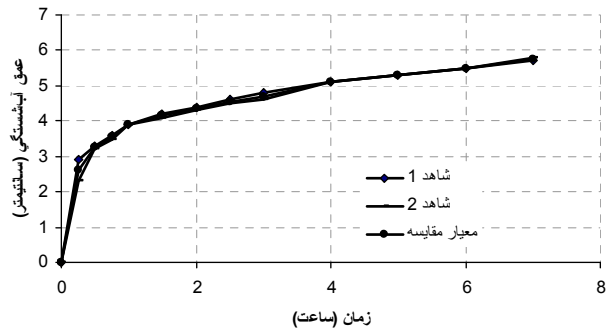
لازم است یادآوری شود که در تمامی آزمایشها، بیشینه عمق آب‌شستگی در کنار پایه در مدت هفت ساعت (نه زمان تعادل) مورد نظر است. محل وقوع بیشینه عمق آب‌شستگی در کنار پایه، با تغییر موقعیت قرارگیری پره‌ها ممکن است تغییر کند که البته این با توجه به اثر حضور پره‌ها در نقاط مختلف، اثر هیدرولیکی آنها و ایجاد نواحی پرفشار و کم‌فشار در اطراف آنها قابل توجیه است. این تحقیق نشان داد که آب‌شستگی در کنار پره‌ها به‌علت همتراز بودن آنها با سطح بستر، بسیار ناچیز است.

### ۳-۱- تحلیل قرارگیری گروه پره‌های جدا از پایه در بالادست

در این مجموعه تعداد ۱۶ آزمایش در چهار موقعیت قرارگیری پره‌ها و چهار زاویه برخورد انجام شد. جدول ۳ مشخصات و موقعیت قرارگیری پره‌ها و زاویه برخورد هر آزمایش را نشان می‌دهد. در هر موقعیت سه جفت پره مستغرق به‌صورت ۷ شکل در بالادست پایه و تحت چهار زاویه برخورد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۹۰ درجه چیده شده است (شکل ۷). نمودار بی‌بعد آب‌شستگی در این موقعیت‌ها برای چهار زاویه برخورد در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷ نمایی از آب‌شستگی موضعی در حضور گروه پره‌ها در بالادست پایه



شکل ۵ نمودار زمانی آب‌شستگی آزمایش‌های شاهد

همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، حد اکثر عمق آب‌شستگی در این سه تکرار مشابه است. نبود اختلاف قابل توجه بین سه تکرار حاکی از تثبیت عوامل مؤثر بر آب‌شستگی و سلامت آزمایش است. علاوه بر این همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، اولاً با افزایش زمان، عمق آب‌شستگی نیز افزایش می‌یابد، ثانیاً بخش عمده آب‌شستگی رخ داده در این آزمایش هفت ساعته در چهار ساعت اول آزمایش رخ داده است. با انجام آزمایش‌های شاهد مشاهده شد که آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه، بیشترین عمق را در جلوی پایه داشته و در دو سمت به‌صورت متقارن رو به پایین دست پایه از عمق آن کاسته می‌شود و در پشت پایه تجمع مواد جدا شده از جلوی پایه دیده می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶ ایجاد حفره در جلو و تجمع مواد در پشت پایه



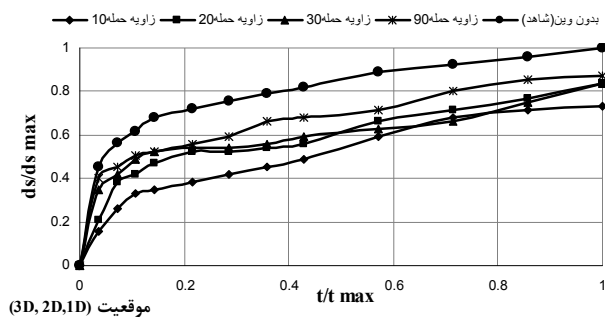
جدول ۳ مشخصات هیدرولیکی گروه پره‌های مستغرق در بالادست پایه استوانه‌ای در موقعیت‌ها و زوایای مختلف برخورد (تمامی آزمایش‌ها برای عمق جریان ۳۰ cm انجام شده است).

ردیف	موقعیت قرارگیری پره‌ها	زاویه حمله (درجه)	سرعت در بالادست پایه (cm/s)	عدد فرود Fr	حداکثر عمق آب‌شستگی (cm)	درصد کاهش آب‌شستگی
شاهد	-	-	۲۷/۳۸	۰/۱۶	۵/۷۵	-
۱	4D,3D,2D	۱۰	۲۷/۲۷	۰/۱۵۵	۴/۹	۱۴/۷۸
۲	3D,2D,1D	۱۰	۲۷/۳۸	۰/۱۶۱	۴/۸	۱۶/۵۲
۳	2D,1D,0D	۱۰	۲۷/۳۰	۰/۱۶	۳/۹	۳۲/۱۷
۴	1D,0D,0D(30)*	۱۰	۲۷/۳۳	۰/۱۵۹	۲	۶۵/۲۲
۵	4D,3D,2D	۲۰	۲۷/۲۷	۰/۱۵۵	۴/۲	۲۶/۹۶
۶	3D,2D,1D	۲۰	۲۷/۳۵	۰/۱۶۱	۴/۹	۱۴/۷۸
۷	2D,1D,0D	۲۰	۲۷/۳۰	۰/۱۶	۲/۹	۴۹/۵۷
۸	1D,0D,0D(30)*	۲۰	۲۷/۳۲	۰/۱۶	۲	۶۵/۲۲
۹	4D,3D,2D	۳۰	۲۷/۳	۰/۱۶	۴/۴	۲۳/۴۸
۱۰	3D,2D,1D	۳۰	۲۷/۳۸	۰/۱۶۱	۴/۸	۱۶/۵۲
۱۱	2D,1D,0D	۳۰	۲۷/۲۸	۰/۱۵۷	۴/۶	۲۰/۰۰
۱۲	1D,0D,0D(30)*	۳۰	۲۷/۳۵	۰/۱۶۱	۴/۱	۳۸/۷۰
۱۳	4D,3D,2D	۹۰	۲۷/۳۹	۰/۱۶۲	۵/۶	۲/۶۱
۱۴	3D,2D,1D	۹۰	۲۷/۲۹	۰/۱۶	۵	۱۳/۰۴
۱۵	2D,1D,0D	۹۰	۲۷/۲۵	۰/۱۵۷	۲	۶۵/۲۲
۱۶	1D,0D,0D(30)*	۹۰	۲۷/۳۱	۰/۱۶	۱/۶	۷۲/۱۷

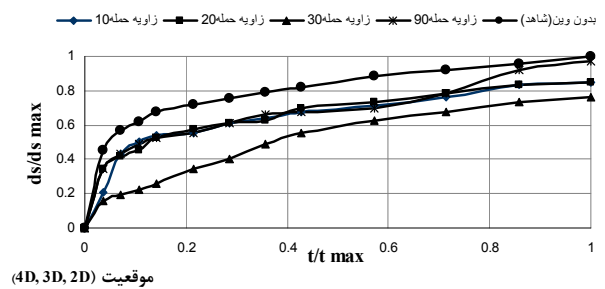
\* منظور از موقعیت ۳۰ قرارگیری یک زوج از پره‌ها بر روی زاویه ۳۰ درجه‌ای پایه است.

آن مربوط به موقعیت 1D,0D,0D(30) (شکل ۸-د) است. این تأثیر را می‌توان چنین توجیه کرد: در هنگام حرکت پره‌ها از بالادست به سمت پایه، نقطه جدایش لایه مرزی متناسب با موقعیت پره‌ها به سمت پایه حرکت می‌کند و در نتیجه ضخامت لایه مرزی کاهش می‌یابد. به همین دلیل هرچه پره‌ها به پایه نزدیک شود، تنش برشی برای انتقال مواد بستر از کنار پایه کاهش یافته و در نتیجه عمق آب‌شستگی نیز کاهش یافته و نقش حفاظتی پره‌ها بر روی پایه افزایش می‌یابد. اما تأثیر این روند بر کاهش آب‌شستگی برای زاویه برخورد ۳۰ درجه کمتر است.

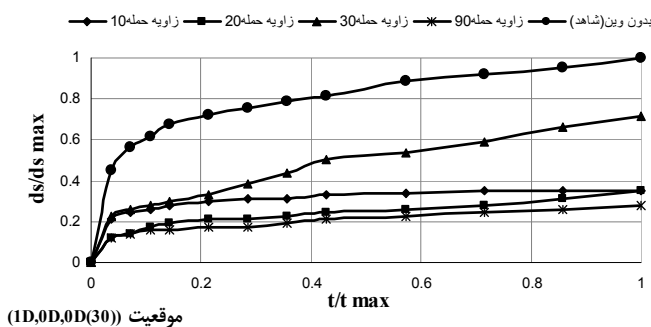
تمامی نمودارهای ترسیم شده نشان می‌دهد که حضور پره‌های مستغرق موجب کاهش آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه می‌شود، اما تأثیر موقعیت قرارگیری آنها در کاهش آب‌شستگی یکسان نیست. به علاوه با مقایسه نمودارها ملاحظه می‌شود که در سه زاویه برخورد ۱۰، ۲۰ و ۹۰ درجه، روند کاهش عمق آب‌شستگی موضعی با کاهش فاصله از پایه به طور یکنواخت صورت می‌گیرد، به نحوی که پس از آزمایش شاهد، بیشترین میزان آب‌شستگی مربوط به موقعیت قرارگیری سری پره‌های مستغرق در فواصل 4D,3D,2D (شکل ۸-الف) و کمترین



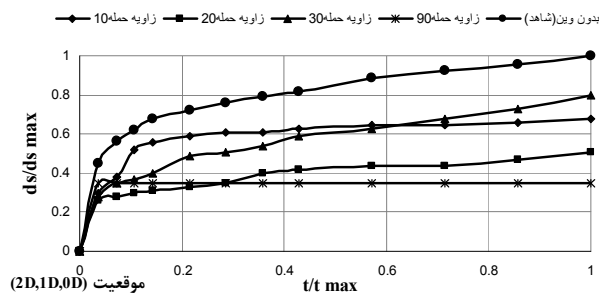
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۸ نمودار بی‌بعد تغییرات زمانی آب‌شستگی در موقعیت‌های الف: (4D, 3D, 2D)، ب: (3D, 2D, 1D)،

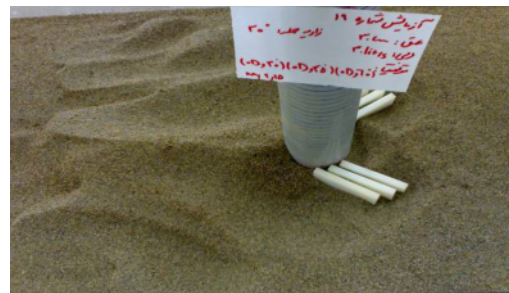
ج: (2D, 1D, 0D) و د: (1D, 0D, 0D(30))

### ۳-۲- قرارگیری گروه پره‌های مستغرق بر روی پایه (چسبیده به پایه)

در این دسته از آزمایش‌ها تعداد شش پره مستغرق بر روی پایه استوانه‌ای و چسبیده به آن قرار گرفت (شکل ۹). موقعیت قرارگیری گروه پره‌های مستغرق با توجه به زاویه مرکزی پایه توصیف می‌شود. زوایای قرارگیری سری پره‌ها بر روی پایه عبارتند از: ۰ (رأس پایه)، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه که در هر چینه سه موقعیت توسط شش پره به‌طور متقارن نسبت به خط جریان پوشش داده می‌شود. جدول ۴ موقعیت قرارگیری، زاویه‌برخورد و سایر مشخصات هر آزمایش را نشان می‌دهد.

علت چنین تغییراتی را می‌توان در برخورد جریان به پایه و ایجاد نیروی هیدرودینامیک در جلوی پایه و برخورد آن به پره‌ها و احتمالاً ایجاد گرداب ثانویه در جریان اطراف پره و تغییر در مقدار و جهت تنش برشی و الگوی توزیع سرعت و به تبع آن تغییر روند انتقال رسوب دانست. آنچه در تمامی نمودارها و جدول بالا به‌طور مشابه قابل ملاحظه است، وقوع کمترین آب‌شستگی در صورت قرارگیری گروه پره‌های مستغرق در موقعیت 1D,0D,0D(30) است. چنانچه گروه پره‌ها در این موقعیت با زاویه برخورد  $90^\circ$  عمود بر جهت جریان قرار گیرند، بیشترین کاهش برابر ۷۲/۱۷ درصد خواهد بود (شکل ۸-د و جدول ۳).

مقایسه کلی نتایج جدول فوق و نمودارهای شکل ۱۰ در چهار موقعیت نشان می‌دهد که زاویه برخورد ۲۰ درجه در موقعیت قرارگیری ۰، ۳۰، ۴۵ (شکل ۱۰-الف) بالاترین کاهش را در میزان آب‌شستگی برابر ۸۰/۸۷ درصد نتیجه می‌دهد. علاوه بر آن، نتایج حاصل از قرارگیری پره‌ها با زاویه برخورد ۲۰ درجه در سایر موقعیت‌ها نشان می‌دهد که در کلیه موارد به جز موقعیت (۳۰، ۴۵ و ۶۰) پره‌ها دارای عمل کرد نسبتاً بهتری می‌باشند.



شکل ۹ نمایش از آب‌شستگی موضعی در حضور گروه پره‌ها بر روی پایه

جدول ۴ مشخصات هیدرولیکی گروه پره‌های مستغرق چسبیده به پایه استوانه‌ای در موقعیت‌ها و زوایای مختلف برخورد

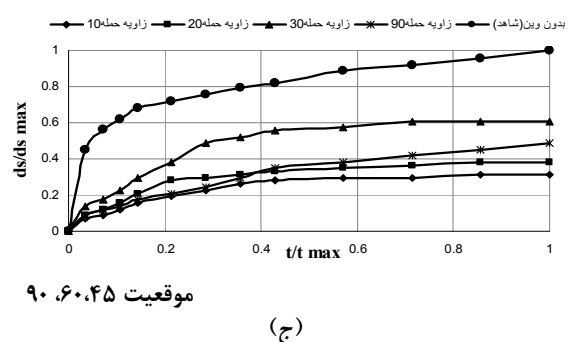
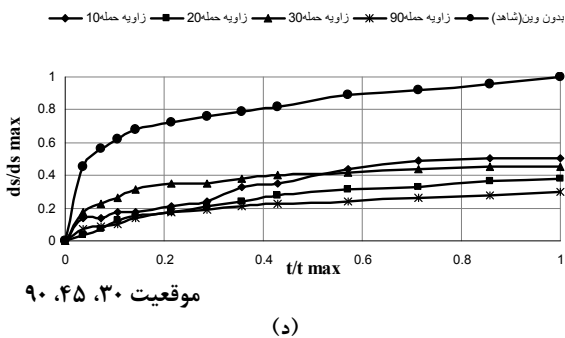
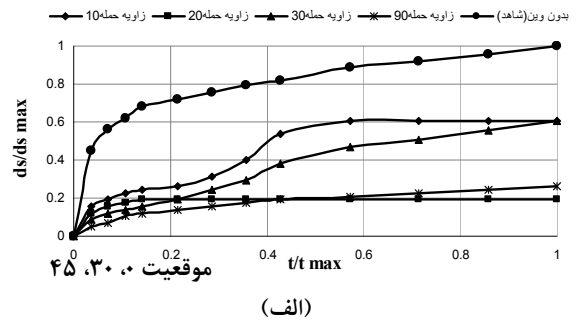
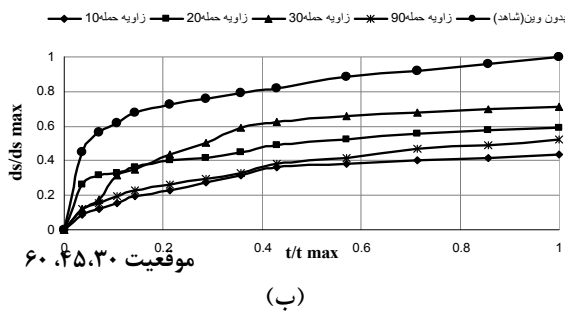
(تمامی آزمایش‌ها در دبی  $49 \text{ lit/s}$ ، عمق جریان  $30 \text{ cm}$  و عدد فرود  $0.16$  انجام شده است.)

ردیف	موقعیت قرارگیری پره‌ها	زاویه حمله (درجه)	سرعت در بالادست پایه ( $cm/s$ )	عدد فرود Fr	حداکثر عمق آب‌شستگی (cm)	درصد کاهش آب‌شستگی
شاهد	-	-	۲۷/۳۸	۰/۱۶۰	۵/۷۵	-
۱	۰، ۳۰، ۴۵	۱۰	۲۷/۲۹	۰/۱۶۰	۳/۵	۳۹/۱۳
۲	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰	۱۰	۲۷/۴۶	۰/۱۶۳	۲/۵	۵۶/۵۲
۳	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰	۱۰	۲۷/۵۳	۰/۱۶۵	۱/۸	۶۸/۷۰
۴	۰، ۳۰، ۴۵، ۹۰	۱۰	۲۷/۱۱	۰/۱۵۶	۲/۹	۴۶/۵۷
۵	۰، ۳۰، ۴۵	۲۰	۲۷/۴۷	۰/۱۶۳	۱/۱	۸۰/۸۷
۶	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰	۲۰	۲۷/۴۱	۰/۱۶۲	۳/۴	۴۰/۸۷
۷	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰	۲۰	۲۷/۴۰	۰/۱۶۲	۲/۲	۶۱/۷۴
۸	۰، ۳۰، ۴۵، ۹۰	۲۰	۲۷/۲۵	۰/۱۶	۲/۲	۶۱/۷۴
۹	۰، ۳۰، ۴۵	۳۰	۲۷/۴۱	۰/۱۶۲	۳/۵	۳۹/۱۳
۱۰	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰	۳۰	۲۷/۴۷	۰/۱۶۳	۴/۱	۲۸/۷۰
۱۱	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰	۳۰	۲۷/۴۵	۰/۱۶۲	۳/۵	۳۹/۱۳
۱۲	۰، ۳۰، ۴۵، ۹۰	۳۰	۲۷/۳۷	۰/۱۶۰	۲/۶	۵۴/۷۸
۱۳	۰، ۳۰، ۴۵	۹۰	۲۷/۴۷	۰/۱۶۳	۱/۵	۷۳/۹۱
۱۴	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰	۹۰	۲۷/۴۷	۰/۱۶۳	۳	۴۷/۸۳
۱۵	۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰	۹۰	۲۷/۴۷	۰/۱۶۳	۲/۸	۵۱/۳۰
۱۶	۰، ۳۰، ۴۵، ۹۰	۹۰	۲۷/۴۸	۰/۱۶۳	۱/۷	۷۰/۴۳

در بهترین حالت، قرارگیری پره‌ها در بالادست پایه موجب کاهش ۷۲/۲ درصدی در میزان آب‌شستگی می‌شود که البته این کاهش در حالی اتفاق افتاده که دو زوج از پره‌ها بر روی پایه در موقعیت‌های 0D و 0D(30) و زوج سوم در فاصله کمی بالاتر از پایه (1D) قرار گرفته است. در حالتی که تمامی پره‌ها بر روی پایه چیده شوند، در بهترین حالت، ۸۰/۹ درصد کاهش آب‌شستگی در موقعیت ۰، ۳۰ و ۴۵ درجه از پایه و زاویه برخورد ۲۰ درجه دیده می‌شود.

لوچلن (۱۹۹۹) مشابه همین تحقیقات را برای گروه پره‌های مستغرق با طول‌ها و ارتفاعهای مختلف - که ارتفاع آنها از سطح بستر بالاتر بوده - برای آب زلال انجام داد. وی بیشینه کاهش آب‌شستگی را برای زاویه برخورد ۳۰ درجه ۳۴/۴٪ گزارش داد.

اگرچه زاویه برخورد ۹۰ درجه نیز در موقعیت (۰، ۳۰ و ۴۵) (شکل ۱۰-د) عملکردی برابر ۷۳/۹ درصد در کاهش آب‌شستگی دارد، اما می‌توان گفت که زاویه برخورد ۲۰ درجه حساسیت کمتری را نسبت به جابه‌جایی پره‌ها بر روی پایه داشته و حداکثر کاهش را نیز نشان داده است. در مجموع موقعیت ۰، ۳۰، ۴۵ پره‌ها با زوایای برخورد ۲۰ و ۹۰ درجه، بیشترین تأثیر را در کاهش آب‌شستگی داشته است. شکل ۱۰ دیده می‌شود که بیشترین تأثیر، به ترتیب مربوط به زوایای برخورد (۱۰ و ۹۰) درجه در موقعیت (ب) و (۱۰ و ۲۰) درجه در موقعیت (ج) و کمترین تأثیر در زاویه برخورد ۳۰ درجه در سه موقعیت (ب، ج و د) و زاویه برخورد ۱۰ درجه در موقعیت (الف) است. تأثیر نامنظم پره‌ها بر کاهش آب‌شستگی در سایر موقعیت‌ها و زوایای برخورد متفاوت ناشی از برهمکنش موقعیت پره‌ها و زوایای برخورد است.



شکل ۱۰ نمودار بی‌بعد تغییرات زمانی آب‌شستگی در موقعیت‌های الف: (۰، ۳۰، ۴۵)، ب: (۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰)، ج: (۰، ۳۰، ۴۵) و د: (۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰).

از زاویه برخورد ۳۰ درجه به بعد، آب شستگی روندی نزولی داشته و برای برخی موقعیت‌ها با شیب ملایم، افزایش می‌یابد، به طوری که در زاویه برخورد ۹۰ درجه و در موقعیت‌های (2D, 1D, 0D)، (1D, 0D, 0D(30°)) و (30, 45, 90) به کمترین مقدار می‌رسد.

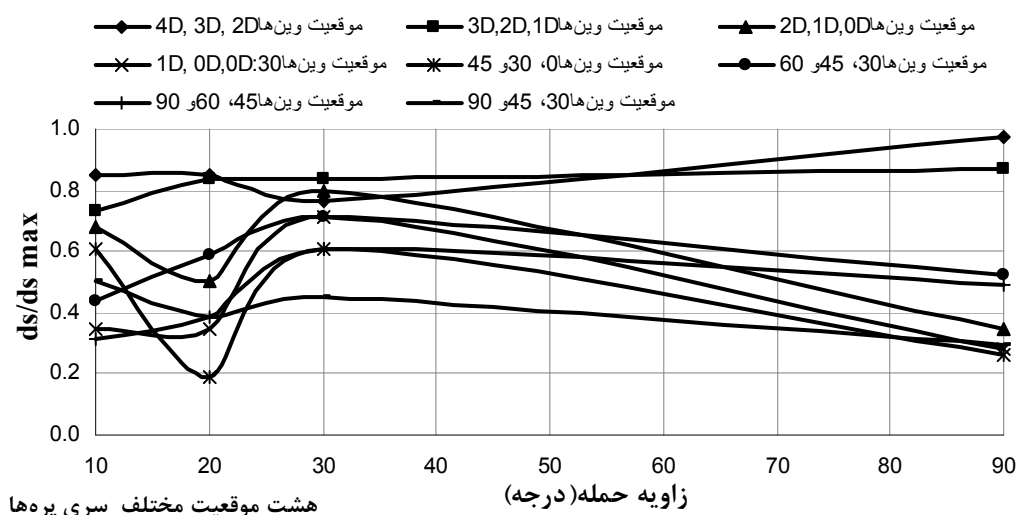
شکل ۱۱ نمودار بی‌بعد آب شستگی نسبت به زاویه برخورد را برای هشت موقعیت بررسی شده نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مربوط به قرارگیری گروه پره‌های مستغرق در بالادست پایه (منفک از پایه) و بر روی پایه (چسبیده به آن) می‌توان نتیجه گرفت که قرارگیری پره‌ها بر روی پایه موجب کاهش بیشتری در عمق آب شستگی می‌شود و در این موقعیت پره‌ها عملکرد بهتری را نشان می‌دهند.

#### ۴- نتیجه گیری

اگرچه آب شستگی ایجاد شده در اطراف پایه، با حضور گروه پره‌های مستغرق در تمامی موقعیت‌های قرارگیری با چهار زاویه برخورد متفاوت، کاهش می‌یابد، اما این عملکرد در تمامی موارد یکسان نیست.

نتیجه تحقیقات قربانی و کلز (۲۰۰۸) برای پره دوگانه - که در موقعیت ۳۰ درجه‌ای بر روی پایه بر بستری با قطر متوسط ۰/۵۷ میلیمتر با زاویه برخورد ۲۰ درجه قرار داشته - کاهش ۸۷/۷ درصدی در آب شستگی را برای پره‌هایی با ارتفاع صفر از بستر گزارش کرده‌اند. صمیمی بهبهان و همکاران (۱۳۸۵) نیز نتیجه گرفتند که استفاده از صفحات مستغرق با آرایش‌های مکانی مختلف در حالت چسبیده به پایه، بهترین عملکرد را در کاهش آب شستگی موضعی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای دارد. از سوی دیگر به نظر می‌رسد که بر طبق تحقیقات گذشته و مطالعه حاضر همتراز بودن پره‌ها با بستر، تأثیر بیشتری بر کاهش آب شستگی دارد.

به‌طور کلی نتایجی که از این نمودارها به دست می‌آید به شرح زیر است: با کاهش فاصله پره‌ها از پایه، تأثیر حفاظتی آنها بر پایه افزایش یافته و بهترین نتیجه وقتی حاصل می‌شود که پره‌ها بر روی پایه قرار گیرند. علاوه بر آن با افزایش زاویه برخورد تا ۲۰ درجه، درصد آب شستگی کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱ نمودار بی‌بعد آب شستگی نسبت به زاویه برخورد در هشت موقعیت مختلف سری پره‌ها

Fr	عدد فرود	نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که وقتی گروه پره‌های
g	شتاب ثقل	مستغرق از بالادست پایه و با حداکثر فاصله 4D چیده
n	ضریب زبری مانینگ	شوند و مرحله به مرحله به پایه نزدیک شوند، تأثیر آنها بر
$\tau_0$	تنش برشی	کاهش عمق آب‌شستگی بیشتر می‌شود، به‌طوری که در
Q	دبی	موقعیت ( 1D,0D,0D(30) کمترین میزان آب‌شستگی در
R	شعاع هیدرولیکی	زاویه برخورد ۹۰ درجه با ۷۲/۱۷ درصد کاهش حاصل
S	شیب خط انرژی	می‌شود.
y	عمق جریان	در ادامه آزمایشها در این تحقیق و چیدمان پره‌ها بر روی
p	چگالی	پایه و چسبیده به آن، روند کاهش آب‌شستگی تداوم

### ۶- منابع

بهشتی، ع. و عطایی آشتیانی، ب. (۱۳۸۷). بررسی عددی الگوی جریان و آب‌شستگی در اطراف گروه شمع، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

زراتی، الف. ر. (۱۳۷۹). نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل‌ها، چاپ اول، انتشارات دانشگاه هرمزگان.

شفاعی بجستان، م. (۱۳۷۳). هیدرولیک رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز.

صمیمی بهبهان، ت. و بارانی، غ. (۱۳۸۵). مقایسه آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق دو زاویه ای و انحنادار بر تثبیت سواحل رودخانه، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۲ تا ۱۴ اردیبهشت، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز.

صمیمی بهبهان، ت.، بارانی، غ.، رحیم خانلی، م. و خانجانی، م. (۱۳۸۵). بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آب‌شستگی پایه پل‌ها. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۲ تا ۱۴ اردیبهشت، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

ناصحی، م. (۱۳۷۳). پروفیل آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌های آبی، چهارمین کنفرانس دانشجویی عمران، دانشگاه ارومیه، ص ۸۲ تا ۸۵.

در ادامه آزمایشها در این تحقیق و چیدمان پره‌ها بر روی پایه و چسبیده به آن، روند کاهش آب‌شستگی تداوم داشته و در بهترین حالت در موقعیت ۰، ۳۰، ۴۵ بر روی پایه، ۸۰/۸۷ درصد کاهش در آب‌شستگی کنار پایه ملاحظه شد. لذا می‌توان گفت که قرارگیری پره‌ها بر روی پایه با چپش ۰، ۳۰، ۴۵ و زاویه برخورد ۲۰ درجه بهترین تأثیر در کاهش آب‌شستگی و پایداری پایه‌های استوانه‌ای را خواهد داشت.

نتایج مطالعات گذشته و تحقیق حاضر نشان می‌دهد که تأثیر پره‌های مستغرق، وقتی همتراز بستر قرار گیرند، در کاهش آب‌شستگی بیشتر از حالتی است که پره‌ها ارتفاعی بیشتر از بستر داشته باشند.

### ۵- فهرست علائم

$\sigma_g$	انحراف معیار
$C_u$	ضریب یکنواختی
$\phi$	زاویه ایستایی
$\eta$	در صد تخلخل
$G_s$	جرم مخصوص
D	قطر پایه
$D_{15.9}$	قطر ۱۵/۹ درصد ذرات کوچکتر
$D_{50}$	متوسط قطر ذرات
$D_{84.1}$	قطر ۸۴/۱ درصد ذرات کوچکتر

- Melville, B.W. and Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers., J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 114, No.10, pp. 1210-1226.
- Odgaard, A.J and Kennedy, J. F. (1983). River-Ben protection by submerged vanes, J. of Hydraulic Eng., ASCE 109(8), pp. 1161-1173.
- Odgaard, A.J. and Wang, Y. (1987). Scour prevention at bridge piers, Proceeding National Conference of Hydraulic Engineering, ASCE, Williamsburg, Virginia, pp. 523- 527.
- Raudkivi, A.J. and Ettma, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers, J. of Hyd. Engrg., ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 338-350.
- Raudkivi, A.J. (1998). Loose boundary hydraulics, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherland.
- Nortek Company (2004) User guide of VECTRINO velocimeter., [www.nortet-as.com](http://www.nortet-as.com) and [www.nortek.no](http://www.nortek.no).
- Breuser, N.H.C. and Raudkivi, A.J. (1991). Scouring 2<sup>nd</sup> hydraulic structures design manual, IAHR, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Chiew, Y.M. (1992). Scour protection at bridge piers, J. of Hyd. Eng., ASCE, Vol. 118, No. 11, pp. 1260-1269.
- Ettma, R. (1980). Scour at bridge piers. Report No. 216, University of Auckland, Newzealand.
- Garcia, M.H. (2008). Sedimentation Engineering, ASCE Manual and Reports on Engineering practices No.110 Pub: ASCE, p. 1110.
- Ghorbani, B. and Kells, J. A. (2008). Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier. J. of Hyd. Res., Vol. 46, No. 4, pp. 610-619.
- Johnson, P.A., Hey, R.D., Tessier, M. and Rosgen, D.L. (2001). Use of vanes for control of scour at vertical wall abutment. J. Hydraulics Eng., ASCE 127(9), pp. 772- 779.
- Lauchlan, C. S. (1999). Pier scour countermeasures, Ph.D Thesis, University of Auckland, New Zealand, pp. 299- 316.