

# بررسی آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها در حضور لایه سپری

مهرنوش ماهرانی<sup>۱</sup>، عبدالرضا کبیری سامانی<sup>۲\*</sup>، حسین افضل‌مهر<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

\* اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران

akabiri@cc.iut.ac.ir

**چکیده-** در این تحقیق اثر لایه سپری بر آب‌شستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی مطالعه شده است. اهداف این تحقیق عبارت است از: مطالعه و شناخت توسعه آب‌شستگی آب زلال در لایه سپری در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها، مطالعه و شناخت تأثیر شکل تکیه‌گاه‌ها بر آب‌شستگی واقع در لایه سپری و بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی مانند قطر ذرات سپر، قطر ذرات بستر و ضخامت لایه سپری بر روند و میزان آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه در حضور لایه سپری با استفاده از مدل آزمایشگاهی. آزمایش‌ها در کانالی به طول ۵/۶ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر انجام شده است. آزمایش‌ها برای دو نوع تکیه‌گاه به شکل نیم‌بیضی و نیم‌دایره به ابعاد  $b/l=3$  برای نیم‌بیضی ( $b$  عرض تکیه‌گاه و  $l$  پیش‌آمدگی تکیه‌گاه) و  $b/l=2$  برای نیم‌دایره انجام شده است. تکیه‌گاه‌ها در مقطعی از کانال به طول ۱ متر که کف آن با دو لایه از رسوبهای یکنواخت (بستر و سپر) پوشانده شده، قرار گرفته و قطرهای مختلف ذرات رسوب بستر و لایه سپری مورد آزمایش قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش قطر ذرات بستر در حضور لایه سپری ثابت، عمق آب‌شستگی افزایش یافته و با افزایش قطر ذرات لایه سپری در حضور بستر ثابت، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. در ضخامت ثابت لایه سپری، با افزایش قطر ذرات بستر، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. در قطرهای کوچک بستر -که بیشتر تحت اثر حفاظتی لایه سپری قرار دارند- افزایش سرعت -تا زمانی که لایه سپر را تحت تأثیر قرار ندهد- سبب افزایش عمق لایه سپری ثانویه می‌شود. همچنین عمق آب‌شستگی در تکیه‌گاه نیم‌بیضی کمتر از تکیه‌گاه نیم‌دایره است.

**کلید واژگان:** آب‌شستگی موضعی، تکیه‌گاه، لایه سپری، هیدرولیک جریان.

## ۱- مقدمه

بستر (استفاده از سنگ‌چین یا لایه سپری)، کاهش قدرت عوامل فرسایش موضعی (استفاده از طوق یا پای ستون، استفاده از شکاف) و افزایش مقاومت مواد بستر، هم‌زمان

از میان روشهای کنترل و کاهش میزان آب‌شستگی موضعی می‌توان به بالا بردن مقاومت مواد تشکیل دهنده

با استفاده از عوامل کاهش‌دهنده فرسایش موضعی اشاره کرد. پتانسیل آب‌شستگی را اولین بار ملویل در سال ۱۹۷۵ بررسی کرد (Melville, 1975). تحقیقات در زمینه توسعه آب‌شستگی در اطراف پایه‌های دایره‌ای توسط اتما و رود کیوی در ۱۹۸۳ ادامه یافت (Ettema and Raudkivi, 1983). Kwan در ۱۹۸۸ دریافت که گردابه‌های اولیه در پایین‌دست جریان - که شبیه به گردابه‌های نعل اسبی در پایه‌ها هستند - عامل اصلی آب‌شستگی در تکیه‌گاه‌ها هستند. Kwan و Melville در ۱۹۹۴ دریافتند که گردابه‌های برخاستگی ناشی از جدایی جریان در بالادست باعث آب‌شستگی کنار تکیه‌گاه‌ها در پایین‌دست می‌شوند. در ۲۰۰۴، Dey و Barbhuiya، فرایند آب‌شستگی را برای تکیه‌گاه‌هایی با مقاطع مستطیل، دوزنقه و نیم‌دایره بررسی و با استفاده از ADV سرعت را در سه بعد اندازه‌گیری کردند. آنان بر اساس آزمایشها به این نتیجه رسیدند که گردابه‌های اولیه در بالادست جریان در تکیه‌گاه شدت بیشتری دارند، اما در کناره‌های تکیه‌گاه کاهش می‌یابند که علت آن ایجاد آشفتگی در بالادست تکیه‌گاه به کمک جریان پایین‌دست است. روشهای مختلفی برای کنترل و مهار آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل‌ها وجود دارد. یکی از روشهای کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی استفاده از سنگ‌چین است. اگر تنش برشی در بالادست به بیش از ۵۰ درصد تنش برشی در مجاورت لایه سپر افزایش یابد، آب‌شستگی آغاز می‌شود. اگر در اطراف پایه، ذراتی بسیار درشت‌تر از ذرات بستر ریخته شود، این ذرات درشت در سرعتی بیشتر از  $0.5U_c$  به آستانه حرکت خواهند رسید. در ۱۹۷۳، Neill، سرعت  $1/5$  برابر سرعت جریان را به عنوان سرعت طراحی قطر سنگ در سنگ‌چین پیشنهاد کرده است. Parola و Jones در ۱۹۹۱،  $1/5$  تا  $1/7$  برابر سرعت جریان را به ترتیب برای پایه‌های دایروی و

مستطیلی پیشنهاد کرده‌اند. استفاده از صفحه‌ای به شکل طوقه که موازی با کف رودخانه و عمود بر پایه نصب می‌شود، می‌تواند در منطقه دماغه بالادست پایه، جلوی جریان رو به پایین را گرفته و مانع از حفر گودال آب‌شستگی توسط آن شود. Dargahi، در ۱۹۹۰ با استفاده از طوقه سعی در کاهش آب‌شستگی موضعی کرد. آزمایش وی که در شرایط آب زلال انجام شد، نشان داد که با استفاده از طوقه، عمق آب‌شستگی در بالادست پایه تا حدود ۵۰ درصد و در پایین‌دست پایه تا حدود ۷۵ درصد کاهش می‌یابد. زراتی و عزیزی در ۱۳۷۶ با استفاده از طوقه‌ای با پهنای عرض پایه بر روی پایه‌های مستطیلی پیشانی گرد در ترازهای مختلف، آزمایشهایی انجام دادند و نتیجه‌گیری کردند که نصب چنین طوقه‌ای در تراز بستر می‌تواند تا ۸۰ درصد عمق آب‌شستگی را کاهش دهد. Kayaturk، در ۲۰۰۵ در زمینه اثر طوق بر توسعه آب‌شستگی در پایه‌های کناری پل مطالعاتی را انجام داد. در این مطالعه توسعه زمانی آب‌شستگی موضعی دور پایه کناری با و بدون طوق بررسی شد. Chiew در ۱۹۹۲ استفاده از شکاف در پایه را به‌عنوان یکی از راههای پیشگیری و کنترل آب‌شستگی موضعی مطرح کرد. وی عرض، ارتفاع و موقعیت شکاف را پارامترهای مهم در کاهش آب‌شستگی می‌داند. در Kumar ۱۹۹۹ اثر توأم طوق و شکاف و همچنین اثر محل قرارگیری و ابعاد طوق را بر حداکثر عمق آب‌شستگی بررسی کرد. یکی دیگر از روشهای کنترل آب‌شستگی، افزایش مقاومت ذرات بستر با ایجاد لایه سپری بر روی آنها است. هنگامی که توانایی انتقال رسوب آبراهه بر میزان رسوب انتقالی از بالادست آن فزونی یابد، بستر آبراهه شروع به فرو افتادن می‌کند. به علت غیریکنواختی در اندازه مصالح بستر، ذرات کوچکتر با آهنگ سریع‌تری نسبت به ذرات درشت‌تر انتقال می‌یابند که این به باقی‌ماندن ذرات درشت‌تر بر سطح بستر منجر

بستر با لایه سپری حاوی مجموعه‌ای از ذرات غیریکنواخت، کمتر مورد توجه بوده است. تاریخچه مطالعه آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل بیانگر این واقعیت است که در زمینه اثر لایه سپری بر آب‌شستگی، به‌ویژه در ارتباط با تکیه‌گاه نیم‌بیضی، مطالعه‌ای انجام نشده است. همچنین مسأله آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای به‌صورت فیزیکی بررسی و تحلیل جدی نشده است. لذا در تحقیق حاضر اثر لایه سپری بر آب‌شستگی در تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم بیضی به‌صورت جامع مطالعه می‌شود.

## ۲- مدل آزمایشگاهی و اطلاعات اندازه‌گیری شده

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاه مکانیک سیالات و هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است. شکل ۱ شمای کلی مدل و تجهیزات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. طول کانال برابر ۶ متر و مقطع آن مستطیلی به عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴ متر است. دیواره کانال از جنس شیشه سکوریت و کف کانال افقی بوده و در محدوده ورود آب به کانال تا فاصله ۳ متری از ورودی توسط سکویی شیشه‌ای بالا آورده شده است. فاصله مورد نیاز به‌منظور فراهم ساختن شرایط توسعه کامل جریان در مقطع مورد آزمایش با اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت از ورودی کانال تعیین شده است. پس از این ناحیه، محدوده‌ای به طول ۱ متر که بازه انجام آزمایشها است، بسته به نوع آزمایش توسط ذرات ماسه پر شده و با ذرات شن و قلوه سنگ با شیب ملایمی به کف کانال اتصال یافته است.

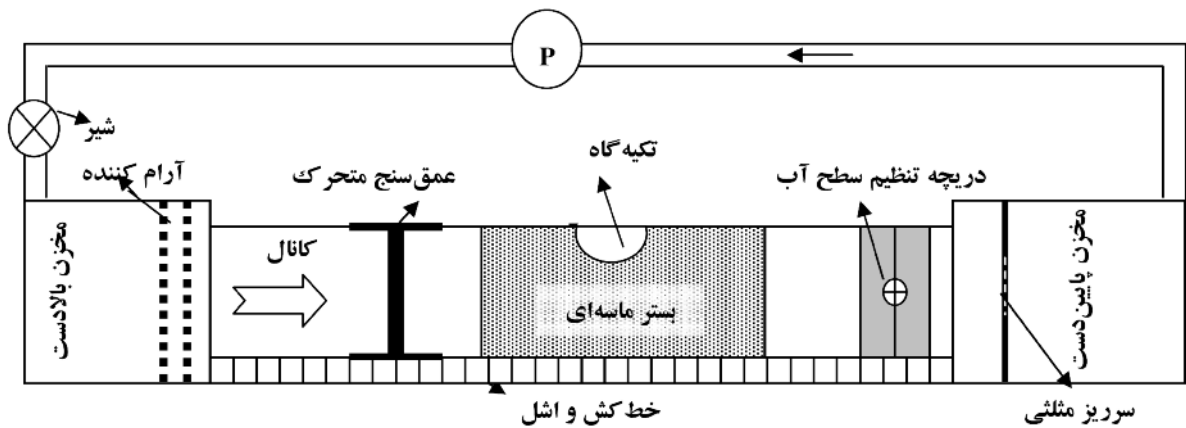
آب در کانال توسط پمپی با دبی حداکثر ۱۵ لیتر بر ثانیه در مدار بسته جریان می‌یافت. میزان دبی به وسیله یک

خواهد شد. در این موقع فرایند درشت‌تر شدن ذرات سطح بستر به تعادل رسیده و بستر تا تغییر رژیم جریان پایدار باقی می‌ماند. با شکل‌گیری این فرایند، ذرات درشت در بستر آبراهه به صورت لایه سپر ظاهر می‌شوند. لایه سپری باعث افزایش سرعت برشی بحرانی برای ذرات بستر که در آستانه حرکت هستند، می‌شود. هنگامی که سرعت برشی جریان تقریباً برابر ۵۰٪ سرعت برشی بحرانی برای ذرات لایه سپری باشد، آب‌شستگی تکیه‌گاه با حضور لایه سپری آغاز می‌شود. با توسعه گودال آب‌شستگی، لایه سپری ثانویه با ضخامتی برابر قطر ذرات لایه سپری در گودال آب‌شستگی و پیرامون تکیه‌گاه شکل گرفته و مانعی در برابر آب‌شستگی خواهد شد. باربویاه و دی، آغاز سپری شدن در گودال آب‌شستگی را ناشی از شستشوی ذرات ریز توسط سیلاب و باقی‌ماندن ذرات درشت دانستند. نکته مهم آن است که با تشکیل لایه سپری در گودال آب‌شستگی و مسلح شدن سطح گودال، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد (Dey and Barbhuiya, 2004). در گزارشی را در رابطه با ضخامت لایه سپری در بسترهای طبیعی براساس اندازه و قطر ذرات لایه سپری ارائه کرد که در آن ضخامت لایه سپری یک تا سه برابر قطر ذرات سپر شناخته شده است. براساس نظریه Dey و Barbhuiya (۲۰۰۴) و Dey و Raiker (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) تأثیر اندازه ذرات بر عمق آب‌شستگی برای رسوبهای غیر یکنواخت قابل ملاحظه است. براین اساس کاهش عمق آب‌شستگی، ناشی از شکل‌گیری لایه سپری در گودال آب‌شستگی است. دی و باربویا (۲۰۰۴)، با انجام آزمایشهایی تأثیر لایه سپری را بر عمق آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه‌ها بررسی کردند.

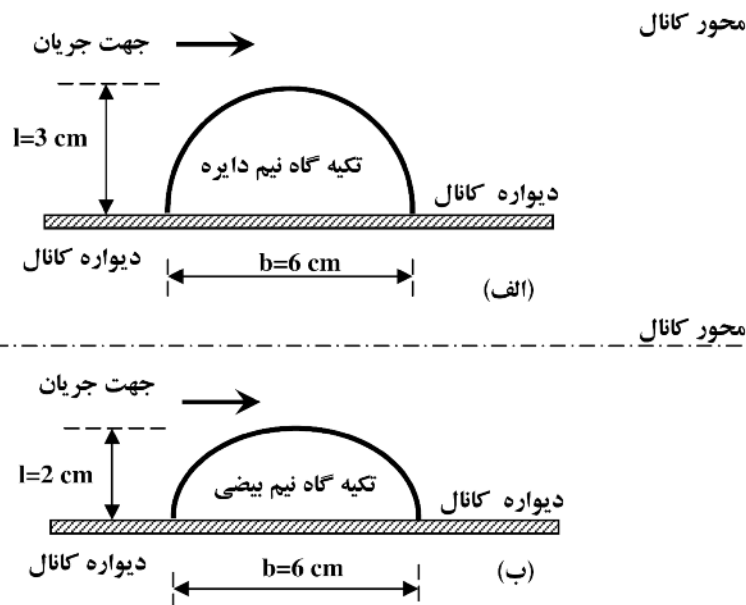
اگرچه فرایند آب‌شستگی تکیه‌گاه‌ها برای بستر یکنواخت توسط محققان مختلفی بررسی شده، ولی شناسایی و محاسبه آب‌شستگی در تکیه‌گاه‌ها و در شرایط وجود

مشخصی از آب پر می‌شد. برای اندازه‌گیری تغییرات عمق آب‌شستگی و نیز عمق نهایی آب‌شستگی از دستگاه لیمنومتر (عمق سنج) با دقت  $0/1$  میلی‌متر استفاده شده است. تکیه‌گاه از نوع استوانه‌ای با مقطع نیم‌دایره به قطر  $60$  میلی‌متر از جنس پلاستیک تفلون انتخاب شده است (شکل ۲- الف).

شیر فلکه در پایین‌دست کانال قابل تنظیم بود. برای اندازه‌گیری دبی از سرریز لبه تیز مثلثی و اسنجی شده با زاویه رأس  $90$  درجه در پایین‌دست کانال استفاده شده است. به منظور جلوگیری از شسته شدن ماسه‌ها در ابتدای آزمایش (در لحظات اول عمق کم و سرعت جریان بالا است) دریچه کنترل پایین‌دست بسته شده و پیش از شروع آزمایش و روشن کردن پمپ، کانال تا ارتفاع



شکل ۱ طرحواره مدل آزمایشگاهی و تجهیزات



شکل ۲ الف- طرحواره تکیه‌گاه نیم دایره ب- تکیه‌گاه نیم بیضی

(Raudkivi, 1998). با توجه به اینکه نقش اندازه ذرات برای بستر و لایه سپر پوشش دهنده آن، در فرایند آب‌شستگی متغیر است، قطر ذرات سپر در سه اندازه ۱/۱۵، ۲/۳۶ و ۴ میلی‌متر انتخاب شده و با اعمال این شرط که قطر ذرات سپر بزرگتر از قطر ذرات بستر باشد، ذرات بستر با توجه به معیار اندازه ۰/۶ میلی‌متر در سه قطر ۰/۲۶ میلی‌متر، ۰/۵۲ میلی‌متر و ۰/۸۴ میلی‌متر پیش‌بینی شد، به نحوی که کوچکتر، بزرگتر و نزدیک به عدد ۰/۶ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گیرند.

- توزیع دانه‌بندی ذرات: با توجه به اینکه مطالعه حاضر روی بستری ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت انجام شده، درجه یکنواختی توزیع اندازه ذرات رسوب براساس نظریه Dey et al. (1995) با انحراف معیار کمتر از ۱/۴ انتخاب شد تا ذرات رسوب با یکنواختی بالا آزمایش شوند. بر اساس منحنی دانه‌بندی مصالح انتخاب شده بستر،  $D_{50}=0.52\text{mm}$  و  $\sigma_g=1/23$  است که با شرایط گفته شده همخوانی دارد (Dey et al., 1995).

- شکل ذرات: برای ایجاد تشابه هندسی بین مدل و نمونه واقعی، باید شکل مصالح نیز یکسان باشند. از آنجا که رسوبهای رودخانه‌ای بیشتر شن و ماسه گرد گوشه هستند، در این تحقیق، از نوعی ماسه گرد گوشه با دانه‌بندی یکنواخت استفاده گردید. چگالی نسبی مصالح  $G_s$  برابر ۲/۶۵ است. با توجه به اینکه حداکثر عمق آب‌شستگی برابر 2.41 بوده و احتمال افزایش ۳۰ درصدی آن وجود دارد، ضخامت مصالح بستر برابر ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد. اگر گرداب نعل اسبی که عامل اصلی آب‌شستگی است متأثر از موج سطحی در جلوی پایه باشد، کم عمق بودن جریان عمق آب‌شستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای جریان‌هایی با عمق کم، آب‌شستگی موضعی مستقل از قطر پایه است. هنگامی که عمق جریان زیاد باشد

تکیه‌گاه دوم، با مقطع نیم‌بیضی به قطر کوچک ۴۰ میلی‌متر و قطر بزرگ ۶۰ میلی‌متر از جنس چوب با رنگ و روکش با زبری مشابه با زبری مدل تکیه‌گاه نیم‌دایره انتخاب شد (شکل ۲-ب). با توجه به شکل مقطع، ساخت تکیه‌گاه نیم‌بیضی از جنس پلاستیک فشرده ممکن نبود. همچنین محدودیتی برای بزرگی ابعاد تکیه‌گاهها وجود دارد. زیرا نباید که دیواره کانال آن قدر به تکیه‌گاه نزدیک شود که در آب‌شستگی اثر بگذارد. نسبت فاصله دیوار کناری از مرکز پایه به قطر پایه از نظر محققانی مانند Melville and Chiew (1999)، باید برابر ۵ باشد؛ در حالی که Ettema and Raudkivi (1983) آن را برابر ۶/۲۵ می‌دانند. اگر این نسبت برابر ۶/۲۵ در نظر گرفته شود، قطر تکیه‌گاه ۵۰ میلی‌متر خواهد بود اما در صورت به‌کارگیری معیار ملویل و چپو قطر تکیه‌گاه ۶۲ میلی‌متر می‌شود. بنابراین قطر تکیه‌گاه برابر ۶۰ میلی‌متر انتخاب شد.

- انتخاب ذرات براساس دو معیار انجام شد:

(۱) در انتخاب اندازه ذرات؛ هرچه اندازه ذرات، کوچک‌تر باشد، زمان رسیدن به تعادل کمتر و آزمایش کم‌هزینه‌تر و ساخت مدل‌ها ساده‌تر خواهد بود. هرچند این کاهش قطر محدودیت‌هایی را نیز به دنبال دارد. بر طبق نظر Raudkivi (1998) اگر قطر ذرات از ۰/۶ میلی‌متر کمتر باشد، به دلیل آشفتگی جریان در نزدیکی بستر، هنگامی که سرعت برشی در کف به حدود ۰/۶ سرعت برشی بحرانی دانه‌ها برسد، ذرات بستر در بالادست پایه شروع به حرکت کرده و پشته‌های کوچکی را تشکیل می‌دهند. این پشته‌ها وضعیت جریان را آشفته‌تر کرده و آب را از حالت زلال خارج می‌سازد.

(۲) در شرایطی که  $l/D_{50} > 50$  (عرض تکیه‌گاه) باشد، اندازه ذرات بستر بر عمق آب‌شستگی بی‌اثر است

سپری بر بیشینه عمق آب‌شستگی به‌کار رفته است. به‌منظور محاسبه سرعت جریان در هر یک از نسبت‌های  $u^*/u_{*ca}$  از توزیع لگاریتمی سرعت متوسط برای لایه‌های سپری مورد آزمایش استفاده شده است. این توزیع در حالت کلی به‌صورت زیر است (Dey and Barbhuiya, 2004).

$$\frac{U_{ca}}{u_{*ca}} = 5.75 \log \frac{h}{2d_a} + 6 \quad (1)$$

که در آن  $h$  عمق جریان (m)،  $d_a$  قطر ذرات سپر (m)،  $U_{ca}$  سرعت بحرانی ذرات سپر (m/s) و  $u_{*ca}$  سرعت برشی بحرانی ذرات سپر (m/s) است. جدول ۱ اطلاعات کلی هندسی و هیدرولیکی آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین زمان تعادل آب‌شستگی، ابتدا آزمایش‌های مفصلی با زمان اجرای طولانی (تا حدود ۷۲ ساعت) انجام شد. بررسی روند توسعه گودال آب‌شستگی نشان داد که بر اساس معیارهای مختلف، زمان تعادل در این دسته از آزمایش‌ها برابر ۱۰ تا ۱۲ ساعت است، اما برای اطمینان بیشتر زمان هر آزمایش به استثنای آزمایش‌هایی که با  $d_a=1.15$  mm انجام شد، برابر ۱۲ تا ۱۵ ساعت در نظر گرفته شد.

( $h/d > 3/5$ ) (عمق جریان) آب‌شستگی موضعی به عمق جریان بستگی ندارد. بر طبق نظر دیتز (۱۹۷۲) عمق آب‌شستگی متناسب با  $h/l$  افزایش می‌یابد اما برای  $h/l > 3$  عمق آب‌شستگی ثابت است. محققان دیگر نیز به این نتیجه رسیده‌اند که وقتی  $h/l > 3$ ، عمق جریان بر عمق آب‌شستگی بی‌اثر است (Dey and Barbhuiya, 2004). در مجموعه مورد مطالعه، آزمایش‌ها بر روی تکیه‌گاه کوتاهی صورت می‌گیرد که با محدودیت عمق جریان همراه است ( $l/h \leq 1$ ). در این شرایط عمق جریان آب در کانال محدود به  $h/l \leq 2/6$  و بنابراین  $3 \leq h \leq 7/8$  سانتی‌متر که در این آزمایش‌ها  $h$  برابر ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه پل در سرعت  $0.5U_c$  اتفاق می‌افتد، بر اساس اندازه ذرات به‌کار رفته و با استفاده از دیاگرام شیلدز، سرعت برشی بحرانی به‌دست آمد. آزمایش‌ها برای ترکیب‌های مختلف ذرات بستر و سپر برای نسبت‌های  $u^*/u_{*ca}=0.7, 0.8, 0.9$  انجام شده است ( $u^*$  سرعت برشی جریان و  $u_{*ca}$  سرعت برشی بحرانی ذرات سپر). نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر لایه

جدول ۱ ویژگی‌های هیدرولیکی و هندسی ذرات بستر و سپر

$d$ (mm)	$\phi_d$ (درجه)	$d_a$ (mm)	$\phi_{da}$ (درجه)	$t$ (mm)	$u_{*ca}$ (m/s)	$h$ (mm)	$u_{ca}$ (m/s)	$U(m/s)$ ( $u^*/u_{*ca}=0.7$ )	$U(m/s)$ ( $u^*/u_{*ca}=0.8$ )	$U(m/s)$ ( $u^*/u_{*ca}=0.9$ )
۰/۲۶	۲۹	۱/۱۵	۳۰	۳/۴۵	۰/۰۲۵	۶۰	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۳۲
۰/۲۶	۲۹	۲/۳۶	۳۱	۷/۰۸	۰/۰۴	۶۰	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۴۴
۰/۲۶	۲۹	۴	۳۲/۷	۱۲	۰/۰۵۳	۶۰	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۴۷	۰/۵۳
۰/۵۲	۲۹/۵	۲/۳۶	۳۱	۷/۰۸	۰/۰۴	۶۰	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۴۴
۰/۵۲	۲۹/۵	۴	۳۲/۷	۱۲	۰/۰۵۳	۶۰	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۴۷	۰/۵۳
۰/۸۴	۲۹/۹	۴	۳۲/۷	۱۲	۰/۰۵۳	۶۰	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۴۷	۰/۵۳

در این تحقیق بر اساس توصیه دی و باربویا (۲۰۰۴) زمان تعادل آب شستگی بر اساس پایداری عمق گودال آب شستگی پیش‌بینی شده که عبارت است از زمانی که تغییراتی در گودال آب شستگی در فاصله دو ساعت پس از زمان لازم برای تشکیل لایه سپری ثانویه (۱۰ ساعت) مشاهده نشود یا ناچیز (حداکثر برابر ۱ میلی‌متر) باشد. آزمایش‌های انجام شده در  $d_a=1.15$  mm به دلیل کندی یا عدم شکل‌گیری لایه سپری ثانویه، در دو دوره به مدت ۲۴ ساعت (با هدف تامین زمان لازم برای تشکیل لایه سپری ثانویه) و ۱۵ ساعت (با هدف مقایسه عمق آبشستگی با آزمایش‌های نمونه‌های دیگر) انجام شد. در مجموع ۵۰ آزمایش در شرایط مختلف با هدف تعیین محدوده توسعه یافتگی جریان، تعیین عمق آبشستگی، تشکیل لایه سپری ثانویه و تعیین مدت زمان تعادل آب شستگی انجام شده است. جدول ۱ اطلاعات کلی هیدرولیکی و هندسی آزمایشها را نشان می‌دهد.

پس از آزمایش، ابتدا دریچه کاملاً بسته و سپس پمپ خاموش می‌شد. پس از تخلیه کاملاً آرام آب از کانال، پروفیل سطح بستر در شبکه‌ای مربعی برداشت شده و عمق تعادلی آب شستگی در بستر و لایه سپری ثانویه و نیز روند توسعه گودال آب شستگی بررسی و اندازه‌گیری می‌شد.

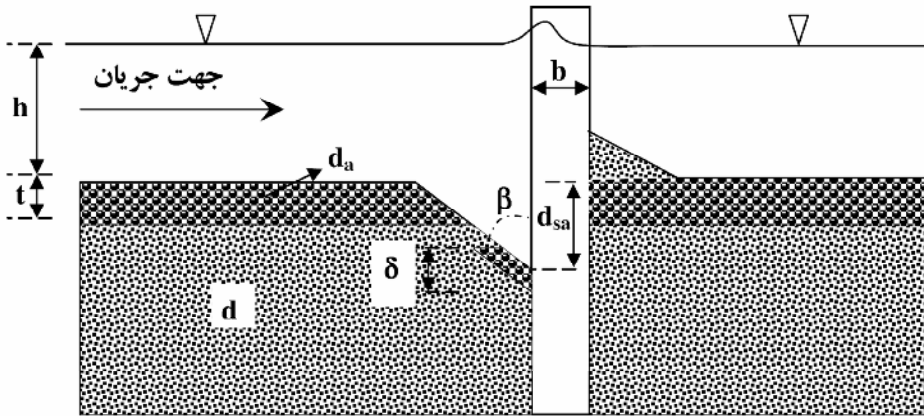
### ۳- نتایج

تعادل گودال آب شستگی در اطراف تکیه‌گاه و در حضور لایه سپری، متأثر از ثبات لایه سپری در مجاورت تکیه‌گاه است و ثبات لایه سپری به پارامترهایی مانند شرایط جریان عبوری (سرعت، دبی، عمق جریان)، اندازه ذرات لایه سپر و ضخامت لایه سپر بستگی دارد. Melville در ۱۹۷۷ طرحی تجربی را برای محاسبه و تخمین عمق

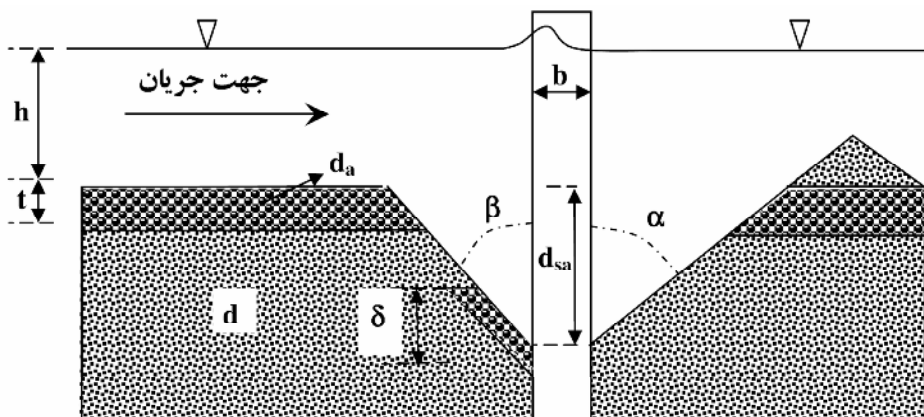
آب شستگی در تکیه‌گاه‌ها ارائه کرد که در آن رابطه‌ای بین عوامل مختلف موثر بر مسأله تعریف شده بود. در این رابطه، اثر پارامترهای مؤثر در عمق آب شستگی مانند: عمق جریان، اندازه تکیه‌گاه، شدت جریان، مشخصات رسوب، شکل تکیه‌گاه، طول تکیه‌گاه و مشخصات کانال در نظر گرفته شده بود. هنگامی که سرعت برشی جریان تقریباً برابر  $50\%$  سرعت برشی بحرانی ذرات لایه سپر باشد، آب شستگی در اطراف تکیه‌گاه و در لایه سپری آغاز می‌شود. توسعه گودال آب شستگی از لبه خارجی گودال در بالادست آغاز می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد که آب شستگی در امتداد خطی با زاویه ۴۰ تا ۵۰ درجه از جدار کانال آغاز شده و با افزایش مدت زمان عبور جریان از کنار تکیه‌گاه، گودال آب شستگی گسترش می‌یابد. همزمان با توسعه گودال آب شستگی، ذرات سپر از لبه گودال آب شستگی به داخل آن سقوط کرده و با تشکیل پوشش محافظی در گودال - که لایه سپری ثانویه نامیده شده است - از آب شستگی بیشتر گودال و افزایش عمق آن جلوگیری می‌کند. در این مطالعه فرایند آب شستگی و تشکیل لایه سپری ثانویه در شرایط  $u^*/u^*_{ca} = 0.7, 0.8, 0.9$  با قطرهای متفاوتی از رسوبهای بستر و ذرات سپر بررسی شده است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی در  $u^*/u^*_{ca} = 0.7$  و  $d_a > 2$  mm، لایه سپری ثانویه تشکیل شده در گودال آب شستگی، با توسعه گودال شسته نمی‌شود. به بیانی دیگر در ناحیه‌ای که لایه سپری ثانویه تشکیل شده، بر اثر شسته شدن ذرات ریزتر در سطح رسوب، از طریق شکاف‌های موجود در لایه سپری ثانویه، عمق گودال آب شستگی افزایش می‌یابد. در شکل ۳ طرحواره‌ای از وضعیت گودال آب شستگی برای  $u^*/u^*_{ca} = 0.7$  و  $d_a > 2$  mm نشان داده شده است. در این شکل و شکل‌های ۴ و ۵، پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مانند عمق

آب‌شستگی ( $d_{sa}$ )، عمق آب در کانال ( $h$ ) و عرض تکیه‌گاه ( $b$ ) مشخص شده است.

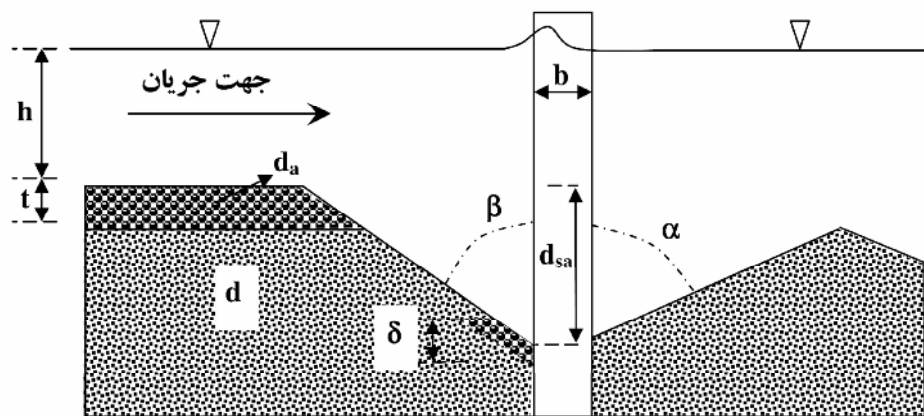
تشکیل لایه سپری ثانویه ( $\delta$ )، ضخامت لایه سپری ( $t$ )، قطر ذرات بستر ( $d$ )، قطر ذرات سپر ( $d_a$ )، عمق



شکل ۳ شمایی از گودال آب‌شستگی در  $u^*/u_{*ca} = 0.7$



شکل ۴ شمایی از گودال آب‌شستگی در  $u^*/u_{*ca} = 0.8$



شکل ۵ طرحواره گودال آب‌شستگی برای  $u^*/u_{*ca} = 0.9$



در بالادست  $60^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$  بوده است. در این بررسی مشخص شد که در شرایط  $d_a < 2mm$  لایه سپری تشکیل نمی‌شود.

برای  $u^*/u_{*ca} = 0.7$  و  $d_a > 2mm$  لایه سپری ثانویه، گودال آب‌شستگی را به‌طور نسبی پوشش داده و در برابر خروج ذرات رسوب و توسعه گودال آب‌شستگی مقاومت می‌کند، اما برای  $d_a < 2mm$  هیچ نشانه‌ای از تشکیل لایه سپری ثانویه مشاهده نمی‌شود. با افزایش سرعت جریان در پشت تکیه‌گاه، گودال آب‌شستگی در لبه پایین‌دست، بدون متلاشی کردن لایه سپری توسعه می‌یابد، به طوری که با افزایش  $u^*/u_{*ca}$  از  $0.7$  به  $0.8$ ، سرعت جریان غالب شده و برای  $d_a > 2mm$  لایه سپری ثانویه تشکیل شده و تقریباً نیمی از گودال آب‌شستگی را پوشش می‌دهد و مقاومت در برابر آب‌شستگی نسبت به حالت  $u^*/u_{*ca} = 0.7$  کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان و برای  $u^*/u_{*ca} = 0.9$ ، عمق گودال آب‌شستگی بیشتر و عمق تشکیل لایه سپری ثانویه کمتر می‌شود، به نحوی که لایه سپری ثانویه در برابر آب‌شستگی مقاومت کمتری کرده و لایه سپری در پایین‌دست گودال متلاشی شده است. در جدول ۲ نتایج برداشت‌های انجام شده در خصوص محدوده فرسایش‌یافته در بالادست و پایین‌دست تکیه‌گاه برای دانه‌بندی‌های مختلف بستر و سپر ارائه شده است. همان‌گونه که بیشتر گفته شد، زاویه  $\alpha$  برای  $u^*/u_{*ca} = 0.7$  تشکیل نشده و زاویه  $\beta$  در این سرعت کمتر از  $60^\circ$  و در تکیه‌گاه نیم‌بیضی کوچک‌تر از نیم‌دایره است. زاویه  $\alpha$  در  $u^*/u_{*ca} = 0.8$  در تکیه‌گاه نیم‌دایره کمتر از  $68^\circ$  و در تکیه‌گاه نیم‌بیضی کمتر از  $62^\circ$  است. در این سرعت زاویه  $\beta$  همواره از  $\alpha$  کوچک‌تر و در تکیه‌گاه نیم‌دایره کمتر از  $64^\circ$  و در تکیه‌گاه نیم‌بیضی کمتر از  $62^\circ$  است.

مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که در گودال آب‌شستگی، لایه سپری ثانویه در فاصله زمانی ۴ تا ۵ ساعت تشکیل شده و گودال آب‌شستگی پس از ۱۲ تا ۱۵ ساعت به حالت تعادل می‌رسد. در این نسبت سرعت، به دلیل غالب بودن گردابه‌های نعل اسبی، تنها محدوده بالادست تحت تأثیر فرسایش قرار می‌گیرد و زاویه سطح گودال فرسایش نسبت به قائم  $60^\circ \leq \beta \leq 35^\circ$  بوده و به دلیل پایین بودن سرعت جریان، گسترش گودال آب‌شستگی به سمت پایین‌دست متوقف می‌شود. در بررسی‌های آزمایشگاهی برای  $u^*/u_{*ca} = 0.8$  و  $d_a > 2mm$  مشاهده شد که با توسعه گودال آب‌شستگی، لایه سپری ثانویه تشکیل شده در ناحیه داخلی در پایین‌دست گودال، به میزان اندکی شسته می‌شود، اما بار دیگر شکل گرفته و در عین حال گودال آب‌شستگی به سمت بالادست تکیه‌گاه گسترش می‌یابد. زاویه سطح بستر نهایی گودال فرسایش نسبت به راستای قائم در پایین‌دست  $75^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$  و در بالادست  $75^\circ \leq \beta \leq 55^\circ$  است. شکل ۴، تشکیل لایه سپری در ته گودال و شسته شدن گودال آب‌شستگی در پایین‌دست را نشان می‌دهد. در این آزمایش‌ها برای  $d_a < 2mm$  ملاحظه شد که لایه سپری ثانویه اساساً تشکیل نمی‌شود.

به‌ازای  $u^*/u_{*ca} = 0.9$  و برای  $d_a > 2mm$  - که به نزدیک شدن شرایط هیدرولیکی جریان به سرعت بحرانی ذرات لایه سپری منجر می‌شد - مشاهدات حاکی از آن است که لایه سپری در پایین‌دست تکیه‌گاه به‌طور کامل متلاشی شده و در قسمت‌های عمقی گودال آب‌شستگی و نزدیک به بالادست تکیه‌گاه متمرکز شده است. در شکل ۵ محل تشکیل لایه سپری ثانویه نشان داده شده است.

برای  $u^*/u_{*ca} = 0.9$  آب‌شستگی در بالادست تکیه‌گاه به‌خوبی توسط ذرات سپر مهار شده و زاویه بستر نهایی گودال آب‌شستگی با قائم در پایین‌دست  $80^\circ \leq \alpha \leq 65^\circ$  و

جدول ۲ مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  در محدوده فرسایش‌یافته در بالادست و پایین‌دست تکیه‌گاه

		نیم دایره						نیم بیضی					
		$\alpha$			$\beta$			$\alpha$			$\beta$		
$d$	$d_a$	$u^*/u^*_{ca}$			$u^*/u^*_{ca}$			$u^*/u^*_{ca}$			$u^*/u^*_{ca}$		
		۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۹	۰/۷	۰/۸	۰/۹
۰/۲۶	۱/۱۵	-	۵۸	۷۲	۴۴	۵۴	۶۷	-	۵۳	۶۲	۳۸	۴۹	۶۳
	۲/۳۶	-	۶۴	۷۴	۵۹	۶۲	۶۹	-	۵۱	۵۳	۴۸	۵۰	۵۵
	۴	-	۶۷	۷۷	۵۳	۶۰	۶۶	-	۶۲	۷۱	۴۹	۵۷	۶۴
۰/۵۲	۲/۳۶	-	۶۱	۶۷	۴۹	۵۶	۶۴	-	۶۱	۷۰	۴۶	۵۵	۶۳
	۴	-	۶۴	۶۸	۵۲	۶۰	۶۶	-	۶۰	۶۳	۴۷	۵۸	۶۰
۰/۸۴	۴	-	۶۶	۷۴	۴۶	۶۴	۶۷	-	۶۲	۷۲	۴۵	۶۲	۶۵

بیشتری شکل می‌گیرند، اما برای تکیه‌گاه با مقطع نیم‌دایره تپه‌های ماسه‌ای کمتری شکل می‌گیرند. مقایسه دو این شکل نشان می‌دهد که زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  برای تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای بزرگتر است. شکل‌های (الف و ب ۷) پروفیل‌های نهایی فرسایش و رسوب‌گذاری به‌ازای  $d_a=4\text{mm}$ ،  $d=0.26\text{ mm}$  و  $u^*/u^*_{ca}=0.9$  را به‌ترتیب برای تکیه‌گاه‌های با مقاطع نیم‌دایره و نیم‌بیضی نشان می‌دهند. در این شرایط عرض گودال آب‌شستگی زیاد شده و ذرات سپر در پشت تکیه‌گاه تجمع یافته و لایه سپر به صورت پراکنده در دیواره گودال آب‌شستگی تشکیل می‌شود. به‌علاوه بستر کمتر تحت تأثیر فرسایش قرار می‌گیرد. مشابه نتایج کلی حاصل از شکل ۶ با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ نیز می‌توان دریافت که با افزایش سرعت جریان دامنه فرسایش در پایین‌دست بیشتر گسترش می‌یابد.

برای  $u^*/u^*_{ca}=0.9$  زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  به حداکثر خود رسیده و همچنان  $\beta$  از  $\alpha$  کوچکتر است. لازم است ذکر شود که در تمامی حالتها با افزایش اندازه ذرات بستر و لایه سپری، زوایای  $\alpha$  و  $\beta$  افزایش می‌یابند. در ادامه، تغییرات پروفیل بستر، برای بررسی تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مختلف به ویژه  $u^*/u^*_{ca}$  آورده شده است. شکل‌های (الف و ب ۶) پروفیل‌های نهایی فرسایش و رسوب‌گذاری را به‌ازای  $d_a=4\text{mm}$ ،  $d=0.26\text{ mm}$  و  $u^*/u^*_{ca}=0.7$  به‌ترتیب برای تکیه‌گاه‌هایی با مقاطع نیم‌دایره و نیم‌بیضی نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که گستردگی محدوده تحت‌تأثیر فرسایش و رسوب‌گذاری در پایین‌دست تکیه‌گاه برای تکیه‌گاه نیم‌بیضی بیشتر است، اما گستردگی این محدوده در مورد مقطع نیم‌دایره‌ای به‌مراتب بیشتر است. در حالت مقطع نیم‌بیضی تپه‌های

پدیده آب‌شستگی، به بررسی تأثیر سرعت و قطر ذرات سپر و بستر بر عمق آب‌شستگی پرداخته می‌شود. شکل ۱۰ تغییرات عمق نهایی آب‌شستگی با سرعت جریان را در شرایط  $d=0.26\text{mm}$  و  $d_a=1.15\text{mm}$  نشان می‌دهد. در این شکل نتایج برای دو نوع پایه با مقطع نیم‌دایره و نیم‌بیضی ارائه گردیده است.

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش سرعت، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. ملیناس و همکاران در ۱۹۹۸ با بررسی پدیده آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه مستطیلی نشان دادند که تنش برشی در محل قرارگیری تکیه‌گاه تا ۱۰ برابر تنش برشی جریان افزایش می‌یابد (Molinas et al., 1998). وجود این سازه در محل عبور جریان همچنین باعث افزایش سرعت تا ۱/۵ برابر سرعت جریان می‌شود. لذا وجود تکیه‌گاه علاوه بر افزایش سرعت سبب افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش پتانسیل فرسایش می‌شود.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی در این تحقیق، برای قطر ۱/۱۵ میلی‌متری ذرات سپر، علی‌رغم آنکه مدت آزمایش برابر ۲۴ ساعت بوده و مدت زمان بیشتری برای رسیدن به عمق تعادل در آب‌شستگی و تشکیل لایه سپری ثانویه اختصاص داده شد، لایه سپری ثانویه تشکیل نشد.

با توجه به اینکه ۱/۱۵ میلی‌متر کوچکترین قطر در میان قطرهای انتخابی برای تشکیل لایه سپر در این مطالعه بوده، فقط قطر ۰/۲۶ میلی‌متر برای تهیه بستر این لایه سپر در نظر گرفته شده است. علت این را می‌توان نزدیک شدن قطر لایه سپر به ذرات بستر برای قطرهای ۰/۵۲ و ۰/۸۴ میلی‌متری ذرات بستر و تشکیل نشدن لایه سپری ثانویه در بستر ۰/۲۶ میلی‌متر دانست.

دی و باربویا در ۲۰۰۴ برای تشکیل لایه سپری در شرایط مشابه بستر فوق، ۷۲ ساعت زمان صرف کردند، اما اثری از تشکیل لایه سپری ثانویه مشاهده نشد.

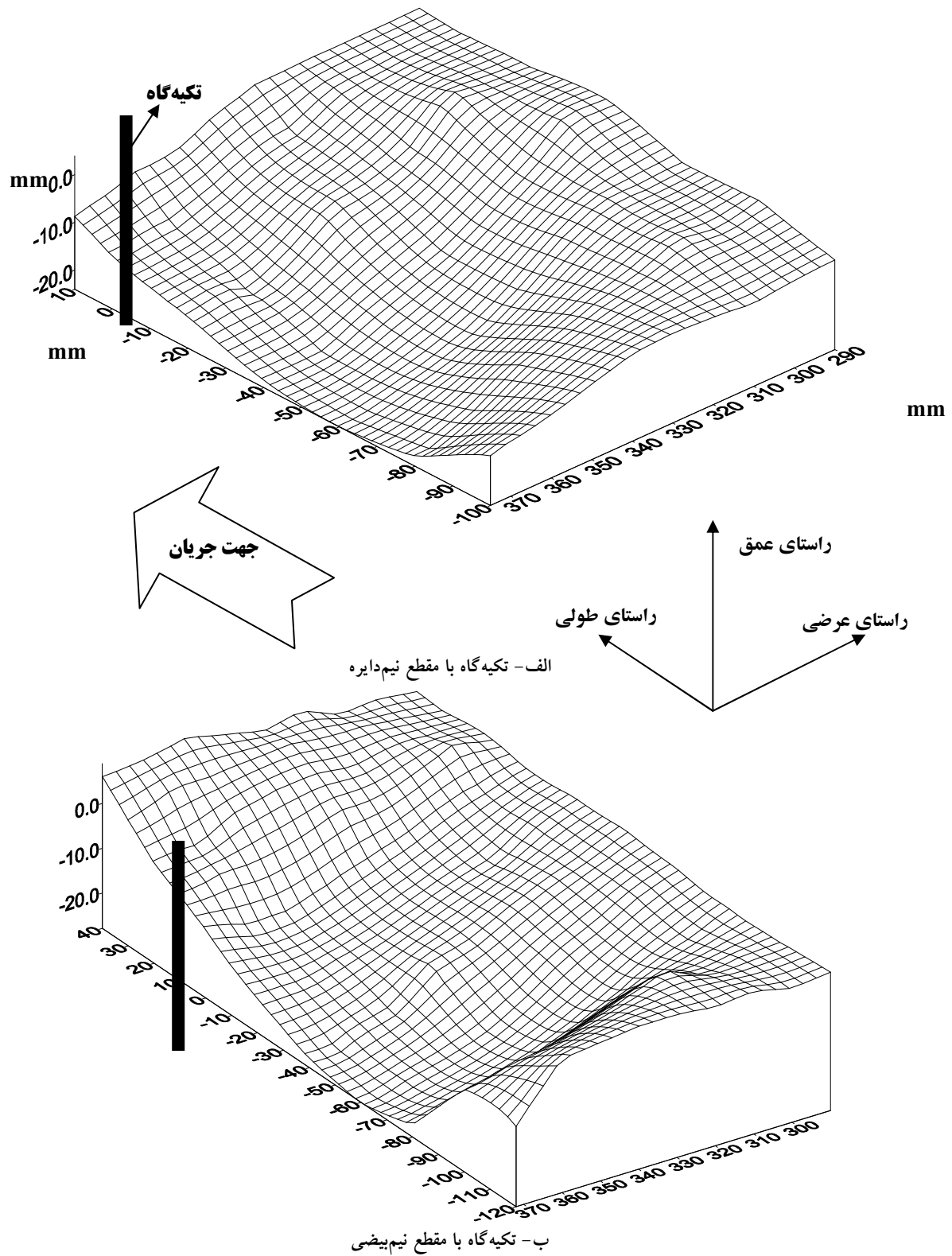
شکل ۸ (الف و ب) پروفیل‌های نهایی فرسایش و رسوب‌گذاری را به‌ازای  $d=0.52\text{mm}$  و  $d_a=2.36\text{mm}$  و  $u^*/u_{*cd}=0.7$  به‌ترتیب برای تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی نشان می‌دهند. در این حالت در پایین‌دست تکیه‌گاه عمق گودال آب‌شستگی چشمگیر نیست، اما لایه سپری به‌طور کامل تشکیل می‌شود.

با مقایسه شکل‌های ۶ و ۸ می‌توان دریافت که با افزایش قطر ذرات سپر و بستر غیریکنواختی محدوده تحت تأثیر فرسایش و رسوب‌گذاری بیشتر می‌شود. ضمن اینکه دامنه فرسایش در پایین‌دست بیشتر گسترش می‌یابد. مقایسه این شکل‌ها نشان می‌دهد که افزایش اندازه ذرات همچنین تأثیر زیادی بر موقعیت و اندازه چاله‌ها و تپه‌ها دارد.

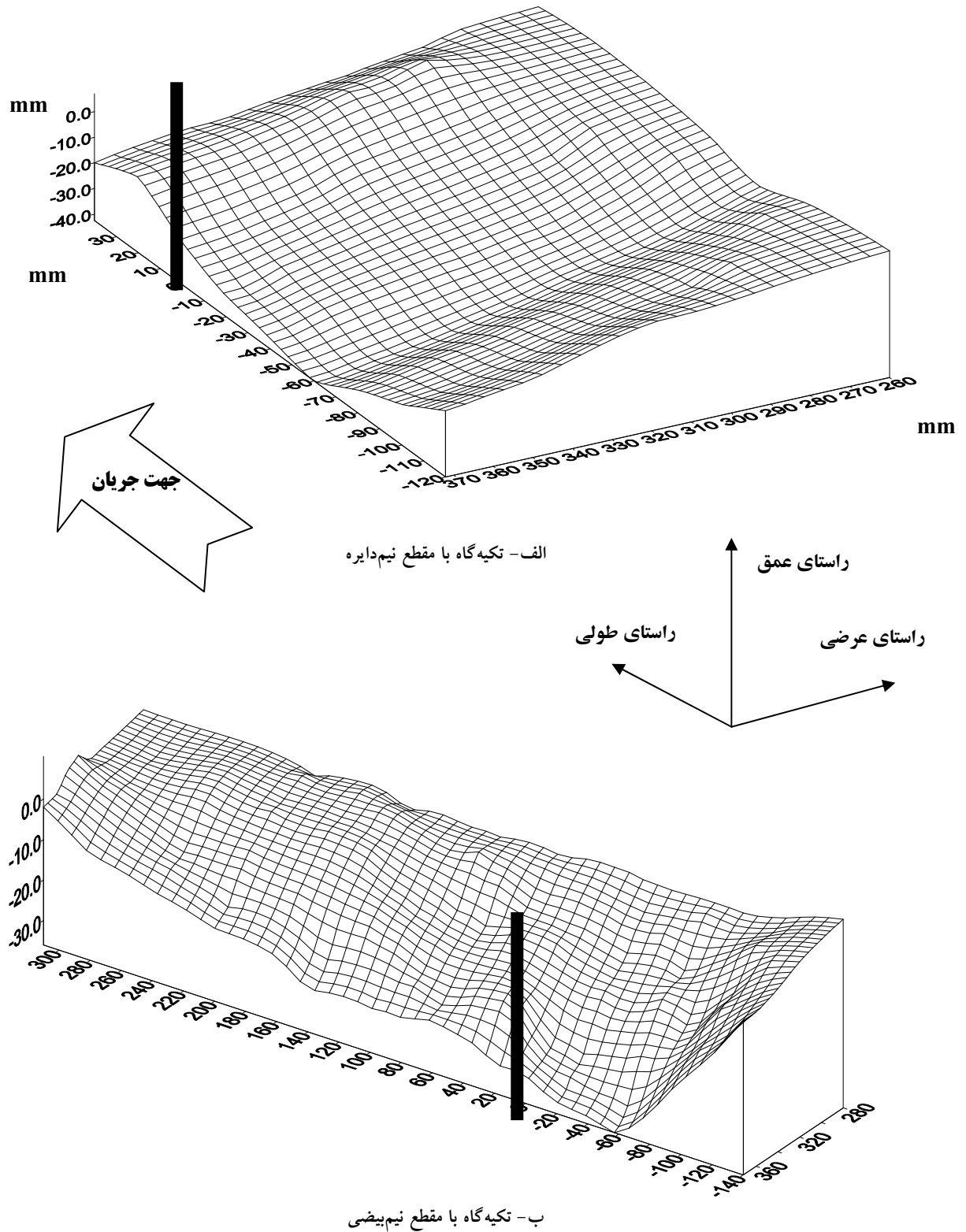
شکل ۹ (الف و ب) پروفیل‌های نهایی فرسایش و رسوب‌گذاری را به‌ازای  $d=0.52\text{mm}$  و  $d_a=4\text{mm}$  و  $u^*/u_{*cd}=0.7$  به‌ترتیب برای تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی نشان می‌دهند.

مقایسه شکل‌های ۶ تا ۹ نشان می‌دهد که افزایش قطر ذرات سپر باعث کاهش ابعاد چاله‌ها و تپه‌ها در محدوده فرسایش و رسوب‌گذاری شده است، به نحوی که با درشت‌تر شدن ذرات سپر محدوده یکنواخت‌تری ایجاد می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش اندازه ذرات بستر باعث گستردگی و غیریکنواختی بیشتر محدوده فرسایش و رسوب‌گذاری شده، اما افزایش قطر ذرات سپر سبب پر شدن چاله‌ها و کوچک شدن تپه‌ها و در نتیجه ایجاد ناحیه یکنواخت‌تری می‌شود.

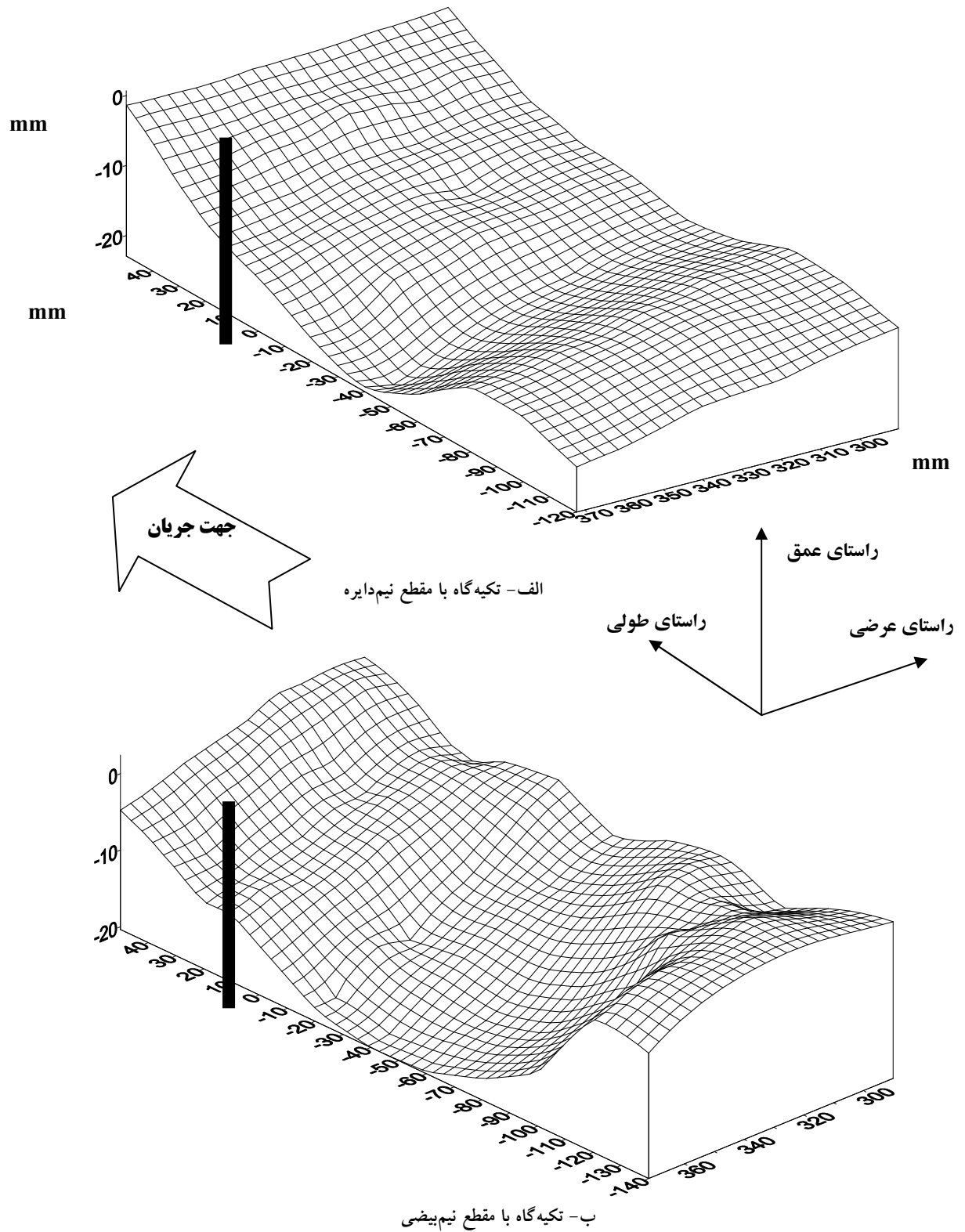
بررسی نتایج این تحقیق نشان داد که حضور لایه سپری در شرایط آب‌شستگی آب زلال در حالتی مؤثر خواهد بود که  $u^* > u_{*c}$  باشد. با توجه به عوامل معرفی شده توسط Melville (1997) و نیز تأثیر حضور لایه سپری بر



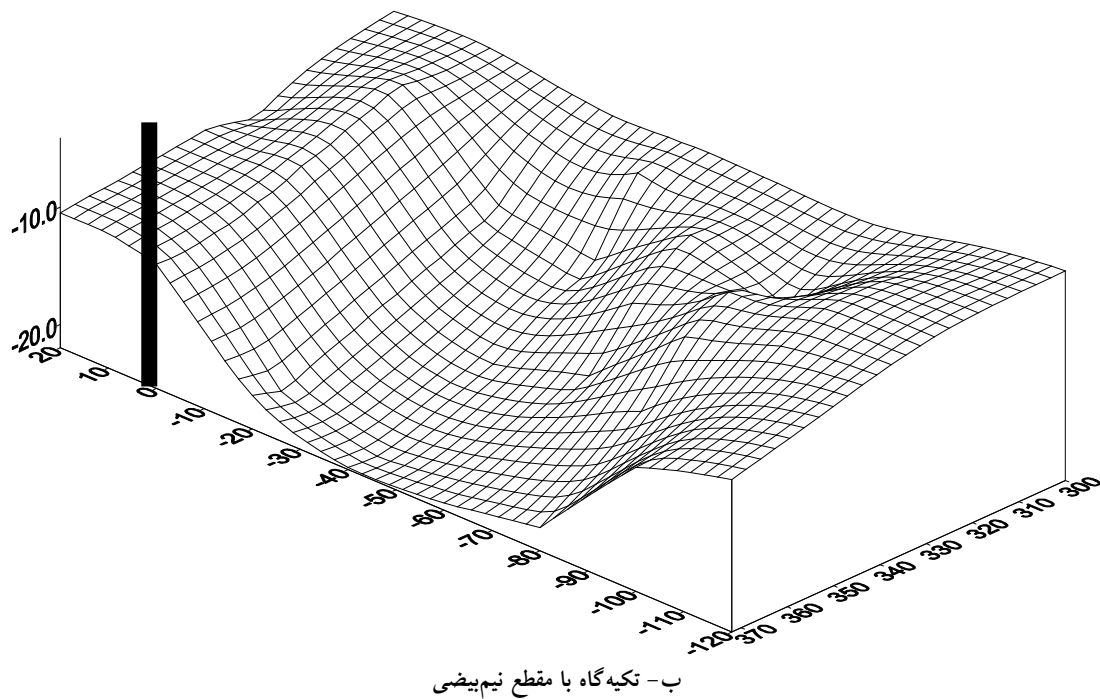
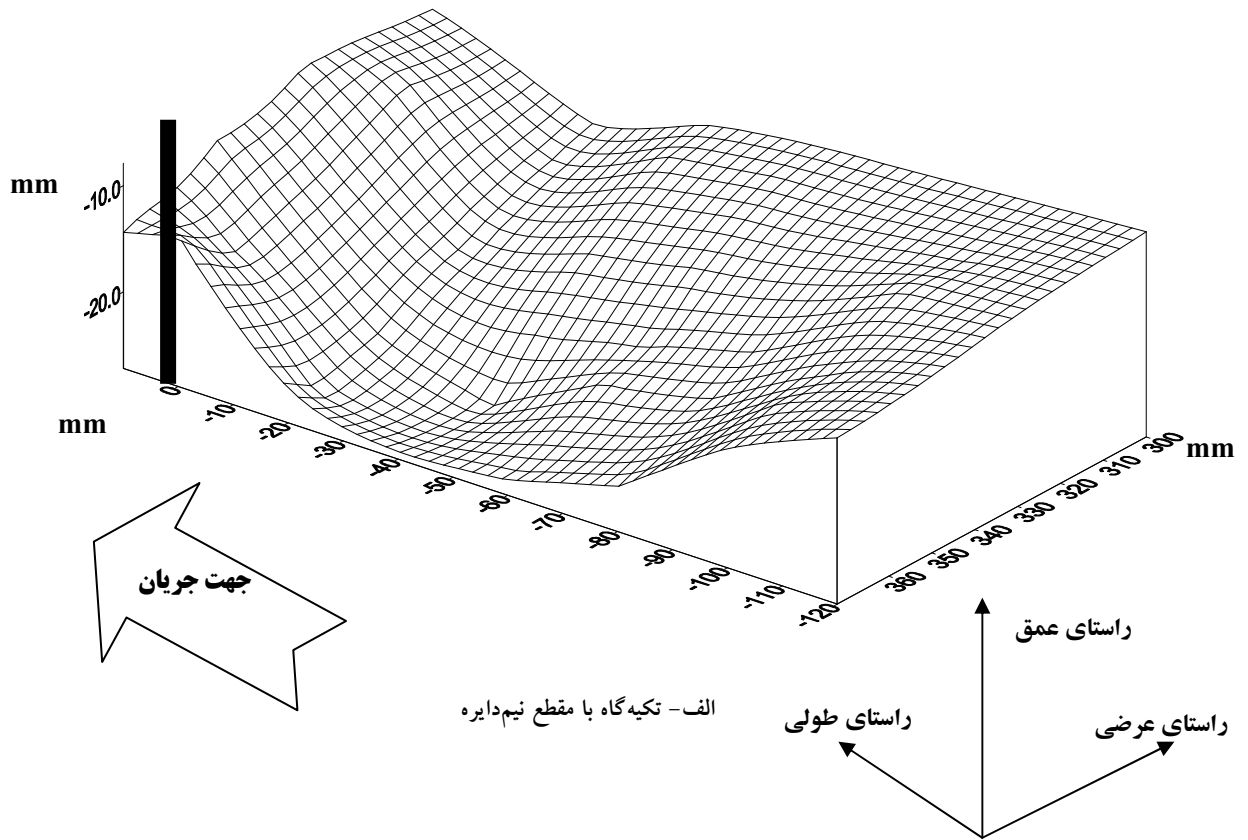
شکل ۶ پروفیل‌های فرسایش و رسوب‌گذاری به‌ازای  $d_a=4 \text{ mm}$  و  $d=0.26 \text{ mm}$  و  $u_*'/u_{*ca}=0.7$



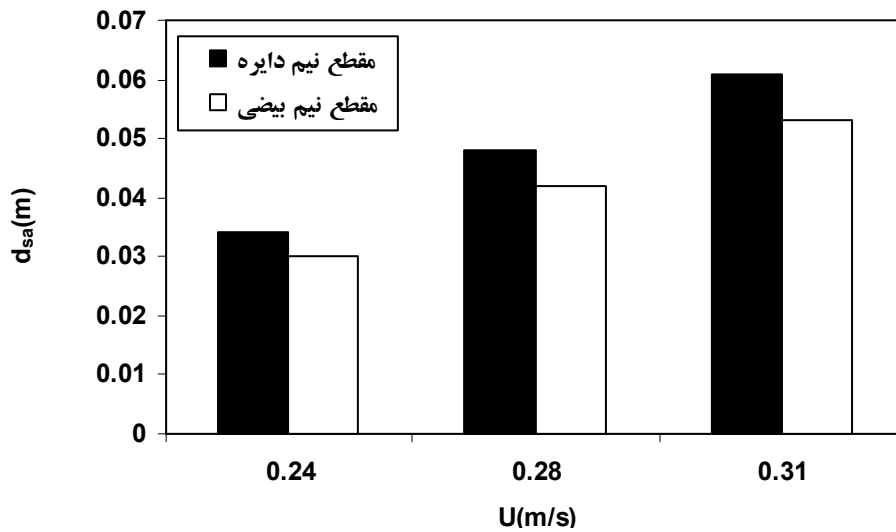
شکل ۷ پروفیل های فرسایش و رسوب گذاری به ازای  $d_a=4 \text{ mm}$  و  $d=0.26 \text{ mm}$  و  $u^*/u_{*ca}=0.9$



شکل ۸ پروفیل‌های فرسایش و رسوب‌گذاری به‌ازای  $d_a=2.36 \text{ mm}$  و  $d=0.52 \text{ mm}$  و  $u*/u_{*ca}=0.7$



شکل ۹ پروفیل‌های فرسایش و رسوب‌گذاری به‌ازای  $d_a=4\text{ mm}$  و  $d=0.52\text{ mm}$  و  $u^*/u_{*cd}=0.7$



شکل ۱۰ تأثیر سرعت بر عمق آب‌شستگی در  $d_a=1.15\text{mm}$

افزایش داده شده، برای بستری با قطر ثابت، با افزایش قطر ذرات سپر، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. از مقایسه منحنی‌ها برای قطرهای متفاوت بستر و لایه سپری ثابت می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با افزایش قطر ذرات بستر و در حضور لایه سپری ثابت، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد.

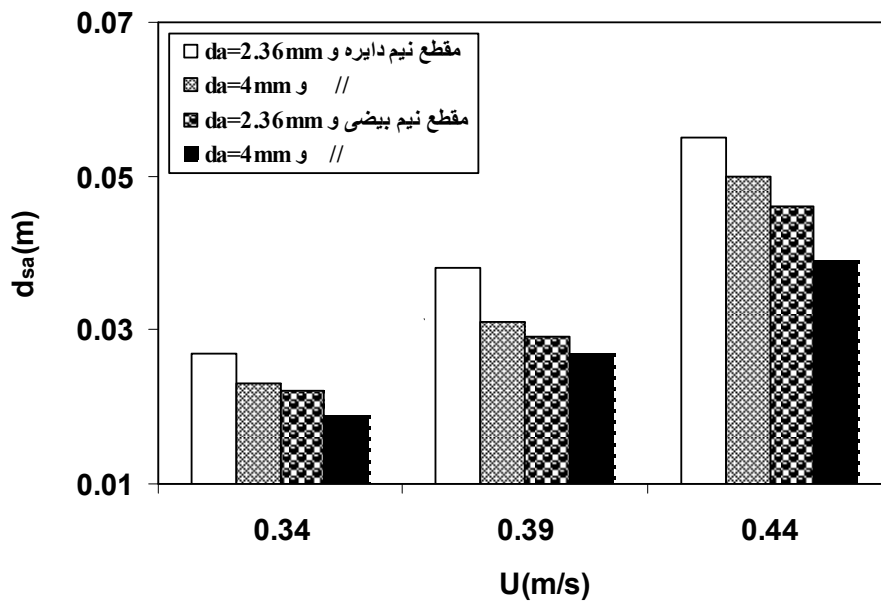
با مقایسه نمودارهای آب‌شستگی برای تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی، مشاهده می‌شود که در شرایط یکسان آزمایش ( $U$  و  $d$ ،  $d_a$ )، عمق آب‌شستگی ( $d_{sa}$ ) در تکیه‌گاه نیم‌دایره بیشتر از نیم‌بیضی است. علت این پدیده را می‌توان شرایط جریان نزدیک شده به تکیه‌گاه دانست. در تکیه‌گاه نیم‌بیضی، به دلیل ایجاد شرایط خطوط جریانی از قدرت گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی کاسته می‌شود که این پدیده منجر به کاهش عمق آب‌شستگی در تکیه‌گاه‌های نیم‌بیضی نسبت به تکیه‌گاه نیم‌دایره‌ای می‌شود.

همان‌گونه که در بخش‌های قبل اشاره شد، لایه سپری به عنوان پوششی محافظ روی بستر جای گرفته و مانع فرسایش بستر می‌شود؛

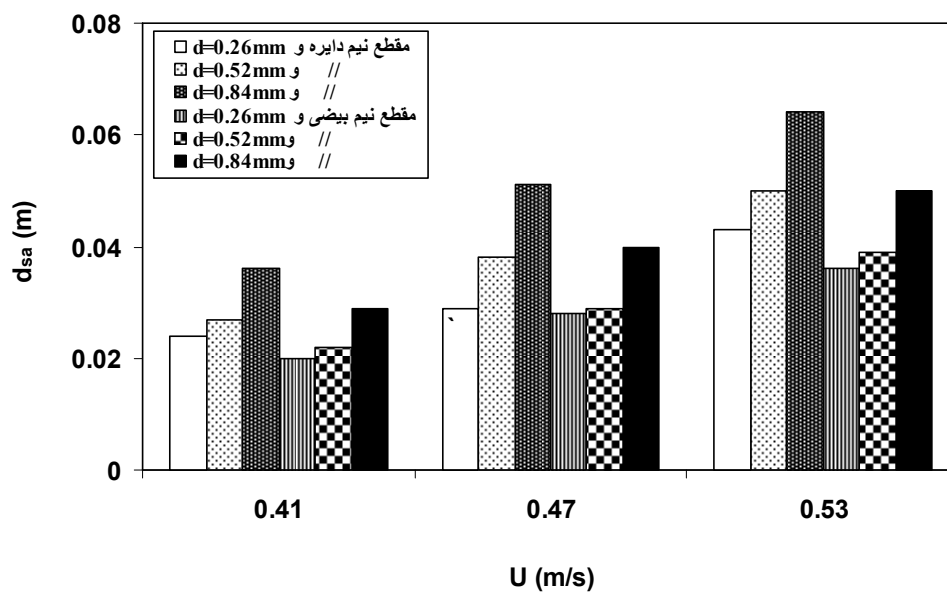
در شکل ۱۱، تغییرات عمق آب‌شستگی با سرعت برای تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی در حضور بستر ثابت ( $d=0.52\text{ mm}$ ) و اندازه ذرات لایه سپر متغیر نشان داده شده است. شکل ۱۲ تغییرات عمق آب‌شستگی با سرعت را برای تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی در حضور لایه سپری ثابت ( $d_a=4\text{ mm}$ ) و اندازه متغیر ذرات بستر نشان می‌دهد. Froehlich در ۱۹۹۵ دریافت که اگر قطر ذرات سپر نزدیک به قطر ذرات بستر باشد، لایه سپری نامتعادل به وجود می‌آید و امکان حرکت تمامی ذرات و کاهش اثر حفاظتی لایه سپری وجود خواهد داشت. لذا همان‌گونه که گفته شد، افزایش قطر ذرات بستر باعث نزدیک شدن قطر ذرات سپر به بستر شده و به افزایش  $d_{sa}$  منجر خواهد شد. بر اساس شکل‌های ۱۱ و ۱۲ که نشان دهنده تغییرات عمق آب‌شستگی با افزایش سرعت برای بسترهای متفاوت و لایه‌های سپری به قطرهای ۲/۳۶ و ۴ میلی‌متر ارائه شده، می‌توان دریافت که:

با توجه به اینکه با افزایش قطر ذرات سپر در هر مرحله، سرعت جریان به طور متناسب و بر اساس محاسبات مربوط به ذرات مورد استفاده توسط رابطه (۱) محاسبه و





شکل ۱۱ تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی برای  $d=0.52\text{ mm}$



شکل ۱۲ تأثیر سرعت بر عمق آب شستگی برای  $d_a=4\text{ mm}$

گودال آب شستگی در برابر فرسایش جریان کمتر محافظت می شود. لذا افزایش قطر ذرات بستر در حضور لایه سپری ثابت منجر به افزایش عمق آب شستگی خواهد شد.

در این حالت با افزایش قطر ذرات بستر، اثر پوششی ذرات سپر کاهش یافته و به خوبی توسط لایه سپر محافظت نمی شود و همچنین با افزایش قطر ذرات بستر ضخامت لایه سپری ثانویه چندان تغییر نمی کند. بنابراین

با افزایش سرعت، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد. اما با افزایش قطر ذرات سپر و در شرایط ثابت بودن قطر ذرات بستر، با افزایش سرعت جریان، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش قطر ذرات سپر باعث کاهش عمق آب‌شستگی و افزایش قطر ذرات بستر باعث افزایش عمق آب‌شستگی می‌شود. علت این پدیده را می‌توان اثر حفاظتی لایه سپر دانست که با افزایش قطر ذرات سپر تقویت و با افزایش قطر ذرات بستر تضعیف می‌شود. در تمامی حالتها عمق آب‌شستگی در تکیه‌گاه نیم‌دایره بیشتر از تکیه‌گاه نیم‌بیضی است که علت آن را می‌توان آیرودینامیک بودن شکل تکیه‌گاه نیم‌بیضی دانست. در مجموع تعادل گودال آب‌شستگی در تکیه‌گاه‌ها و با حضور لایه سپری متأثر از پایداری لایه سپری در اطراف تکیه‌گاه است.

#### ۵- فهرست علائم

$b$	عرض تکیه‌گاه
$D_{50}$	قطر متوسط ذرات بستر
$d$	قطر ذرات بستر
$d_a$	قطر ذرات سپر
$d_{sa}$	عمق تعادلی آب‌شستگی
$G_s$	چگالی نسبی مصالح
$h$	عمق جریان
$l$	پیش‌آمدگی تکیه‌گاه
$t$	ضخامت لایه سپری
$U$	سرعت جریان
$U_c$	سرعت بحرانی ذرات بستر
$U_{ca}$	سرعت بحرانی ذرات سپر
$u^*$	سرعت برشی جریان
$u^*_c$	سرعت برشی ذرات بستر
$u^*_{ca}$	سرعت برشی ذرات سپر
$\alpha$	زاویه گودال آب‌شستگی با راستای قائم در بالادست

بررسی جامع‌تر نتایج این تحقیق نشان داد که در آزمایش‌های با قطر بستر ۰/۲۵ میلی‌متر، با افزایش اندازه ذرات لایه سپر، عمق آب‌شستگی به طور کامل روندی نزولی را طی نکرده و برای  $d_a=2.36mm$  کمترین عمق آب‌شستگی رخ داده است. علت این پدیده را می‌توان شکل گیری لایه سپری ثانویه با عمق مناسب نسبت به عمق آب‌شستگی دانست. علاوه بر آن در  $d_a=4mm$  عمق آب‌شستگی نسبت به  $d_a=1.15mm$  کاهش یافته است. Laursen و Toch در ۱۹۶۵ به این نتیجه رسیدند که بیشینه عمق آب‌شستگی، مستقل از اندازه ذرات رسوب است، اما برخلاف نظر آنان، (1961) Garde et al. گزارش کردند که اندازه ذرات رسوب بر بیشینه عمق آب‌شستگی مؤثر است. با مقایسه نتایج این تحقیق و نتایج مطالعات پیشین می‌توان دریافت که نتایج تحقیق حاضر به نظر گارد و همکاران نزدیکتر است. با افزایش قطر ذرات سپر، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد، این پدیده با نزدیک شدن  $u^*$  به  $u^*_{ca}$  (افزایش سرعت) بیشتر مشهود است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر لایه سپری بر آب‌شستگی موضعی در اطراف تکیه‌گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی به صورت آزمایشگاهی مطالعه شده است. آزمایش‌ها در کانالی با سطح مقطع مستطیلی روی دو نوع تکیه‌گاه به شکل نیم‌بیضی و نیم‌دایره و در مقطعی از کانال به طول ۱ متر که با دو لایه از رسوبهای یکنواخت پوشانده شده، انجام شد. با ثابت در نظر گرفتن عمق، آزمایشها برای جریان‌هایی با  $u^*/u^*_{ca}=0.9$  و  $u^*/u^*_{ca}=0.8$ ،  $u^*/u^*_{ca}=0.7$  در هر دو تکیه‌گاه با قطرهای مختلف ذرات برای لایه سپر و بستر تکرار شد. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش قطر ذرات بستر و در حضور لایه سپری ثابت،

Garde, R. J., Subramanya, K. and Nambudripad, K. D., (1961). "Study of scour around spur-dikes", J. Hyd. Div., ASCE, 87(HY6), pp. 23-37.

Kayaturk, S. Y. (2005). Scour and scour protection at bridge abutments. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Middle East Technical University, Turkey.

Kumar, V., Ranga Raju, K. G. and Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars", J. Hyd. Eng., ASCE, 125(12), pp. 1302-1305.

Kwan, T. F. (1988). A study of abutment scour. Rep. No. 451, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.

Kwan, T. F. and Melville, B. W., (1994). "Local scour and flow measurements at bridge abutments", J. Hyd. Res., 32(5), pp.661-673.

Laursen, E.M., and Toch, A. (1956). Scour around bridge piers and abutments. Iowa City, IA, Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, p. 60.

Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers", J. Hyd. Eng., ASCE, 125(1), pp. 59-65.

Melville, B. W. (1997). "Pier and abutment scour integrated approach", J. Hyd. Eng., ASCE, 123(2), pp. 125-136.

Melville, B. W. (1975). Local scour at bridge sites. University of Auckland, New Zealand, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng., Rep. No. 117.

Molinas, A., Kheireldin, K. and Wu, B. (1998). "Shear stress around vertical wall abutments", J. Hyd. Eng., ASCE, 124(8), pp. 822-830.

Neill, C. R. (1973). Guide to Bridge Hydraulics. Roads and Transportation Association of Canada, University of Toronto Press, p. 191.

Parola, A. C., and Jones, J. S. (1991). "Sizing of rip-rap to protect bridge piers", Transportation Research Record, 1290(2), pp. 276-280.

Raudkivi, A. J. (1998). Loose boundary hydraulics. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherland.

$\beta$	زاویه گودال آب‌شستگی با راستای قائم در پایین‌دست
$\delta$	عمق لایه سپری ثانویه
$\varphi_d$	زاویه اصطکاک داخلی ذرات بستر
$\varphi_{da}$	زاویه اصطکاک داخلی ذرات سپر

## ۶- منابع

زرانی، ا.، عزیز، م.، "روش‌های محافظت پایه پل در برابر آب‌شستگی"، اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه خواجه نصیر، تهران، ۱۳۷۶.

Chiew, Y. M. (1992). "Scour protection at bridge piers", J. Hyd. Eng., ASCE, 118(9), pp. 1260-1269.

Dargahi, B. (1990). "Controlling mechanism of local scouring", J. Hyd. Eng., ASCE, 116(10), pp. 1197-1214.

Dey, S., Raiker, R. V., (2008). "Maximum scour depth at piers in armor-beds", J. Civil. Eng., KSCE, 13(2), pp.137-142.

Dey, S. and Raiker, R.V. (2007). "Clear-water scour at piers in sand beds with an armor layers of gravels", J. Hyd. Eng., 133(6), pp. 703-711.

Dey, S. and Barbhuiya, A. K. (2004a). "Clear-water scour at abutments", Water Management J., Proc. Inst. Civ. Eng., 157(2), pp. 77-97.

Dey, S. and Barbhuiya, A. K. (2004b). "Clear-water scour at abutments in thinly armored beds", J. Hyd. Eng., ASCE, 130(7), pp. 622-634.

Dey S, Bose, S. K. and Sastry, G. L. N. (1995). "Clear water scour at circular piers: a model", J. Hyd. Eng., ASCE, 121(12), pp. 869-876.

Ettema R. and Raudkivi, A. J. (1983). "clear-water scour at cylindrical pier", J. Hyd. Eng., ASCE, 109(3), pp. 338-350.

Froehlich, D.C. (1995). Contraction scour at bridges-clear water conditions with armoring. Water Resources Research, San Antonio, TX, ASCE, pp. 981-985.

Froehlich, D. C. (1989). "Local scour at bridge abutments", Proc. Natl. Conf. Hydraulic Engineering, ASCE, New Orleans.