

مطالعه تأثیر لایه سپری بر آب‌شستگی پایه پل، تحت اثر جریان دائمی (بخش یکم)

عبدالرضا کبیری سامانی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

اصفهان، کد پستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

akabiri@cc.iut.ac.ir

چکیده - تحقیق حاضر، به مطالعه آزمایشگاهی اثر جریان دائمی بر آب‌شستگی موضعی پایه پل در بسترهای سپری شده، اختصاص دارد. آزمایش‌ها بر روی پایه‌هایی استوانه‌ای، با قطر ۴۲ و ۳۳ و ۲۲ میلی‌متر انجام شد و نتایج نشان داد که در تمامی آزمایش‌ها در آغاز آزمایش به دلیل تغذیه مداوم از مصالح لایه سپر در لبه بالادست چاله، لایه سپری ثانویه نسبتاً ضخیمی در جلوی پایه تشکیل می‌شود؛ اما به دلیل قدرت بالای گرداب نعل اسبی پایدار نیست و این مصالح به‌طور پیوسته به پایین دست انتقال داده می‌شوند. با گذشت زمان و با افزایش عمق چاله و کاسته شدن از قدرت گرداب نعل اسبی، پایداری حاصل شده و عمق تعادل آب‌شستگی به دست می‌آید. حداقل ضخامت لایه سپر ثانویه در حالت پایدار، وابسته به اندازه قطر ذرات سپر است. مشاهدات نشان داد که برای پایه‌های ۴۲ و ۳۳ میلی‌متری روند تغییر عمق فرسایش، وابستگی چندانی به B/d (ب قطر پایه و d قطر متوسط ذرات بستر) ندارد، اما برای پایه با قطر ۲۲ میلی‌متر، با افزایش نسبت B/d (یعنی کوچکتر شدن اندازه ذرات بستر) عمق فرسایش افزایش می‌یابد. سپر با اندازه ذرات ۲/۳۶ میلی‌متر، کمترین اثر پوششی را در این اندازه قطر پایه دارد. در مجموع می‌توان چنین نتیجه گرفت که پارامتر مهم و تأثیرگذار بر روند تغییر زمانی عمق فرسایش در جلوی پایه، اندازه ذرات لایه سپر و در نتیجه ضخامت لایه سپر است.

کلیدواژگان: آب‌شستگی، پایه پل، لایه سپر، جریان دائمی.

۱ - مقدمه

در برخی از شرایط، عبور آب از بین پایه‌های پل سبب وقوع پدیده فرسایش در اطراف پایه می‌شود که در غیاب پیش‌بینی و کنترل مناسب آن در طراحی، می‌تواند به کاهش پایداری سازه و حتی به تخریب سازه پل منجر شود. از روش‌های متعدد کنترل و کاهش عمق آب‌شستگی می‌توان به: (۱) کاهش قدرت عوامل فرسایش موضعی (از طریق استفاده از طوق یا پای ستون، استفاده از

شکاف و استفاده هم‌زمان از طوق و شکاف) و (۲) بالا بردن مقاومت مواد تشکیل‌دهنده بستر (از طریق استفاده از سنگ‌چین و استفاده از لایه سپر^۱) اشاره کرد. در فرایند آب‌شستگی، به علت نایک‌نواختی در اندازه مصالح بستر، ذرات کوچکتر با آهنگ سریعتری نسبت به ذرات درشت‌تر انتقال می‌یابند و این پدیده به باقی ماندن ذرات درشت‌تر بر سطح حفره آب‌شستگی منجر می‌شود.

1. Armor Layer

پارامتر جدیدی به نام اندازه مؤثر رسوبها توسعه دادند. آنان با تحلیل ابعادی و برازش چندگانه روی داده‌های پژوهشگران قبلی، رابطه‌ای را برای تخمین عمق تعادل آب‌شستگی در رسوبهای نایکنواخت ارائه کردند. Melville and Chiew (1999) تغییر زمانی عمق آب‌شستگی موضعی را در پایه‌های استوانه‌ای در شرایط آب زلال و در بسترهای ماسه‌ای یکنواخت مطالعه کردند. آنان بر این باورند که آب‌شستگی زمانی شروع می‌شود که نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی ذرات بستر برابر 0.4 باشد. Mia and Nago (2003) مطالعاتی آزمایشگاهی را با استفاده از پایه استوانه‌ای، رسوبهای یکنواخت و برای شرایط آب زلال انجام دادند و نوعی روش طراحی را برای پیش‌بینی تغییرات عمق آب‌شستگی موضعی نسبت به زمان پیشنهاد کردند. روش ایشان بر اساس نظریه رسوب یالین (1977) استوار بود.

در رابطه با شکل‌گیری لایه سپری، نظریه‌های متعددی ارائه شده که از میان آنها می‌توان به نظریه گسler (1971) اشاره کرد. او تشکیل لایه سپری را مشروط به برقراری $\sigma_g = d_{84}/d_{16} \geq 1.4$ دانست که d_{16} و d_{84} قطر ذراتی است که در منحنی دانه‌بندی به ترتیب ۱۶ و ۸۴ درصد وزنی از ذرات کوچکتر از این اندازه‌ها هستند (ماهرانی و همکاران ۱۳۸۹).

Raudkivi and Ettema (1984) به این نتیجه رسیدند که برای رسوبهایی با $\sigma_g < 1/5$ ، لایه سپری تشکیل نخواهد شد. Froehlich (1995) گزارشی را در رابطه با ضخامت لایه سپری در بسترهای طبیعی بر اساس اندازه و قطر ذرات لایه سپری ارائه کرد که در آن ضخامت لایه سپری، یک تا سه برابر قطر ذرات سپر است. بیکر (۱۹۸۶) نشان داد که سرعت مناسب برای شرایط حدی لایه سپری برای محاسبه عمق آب‌شستگی، برابر 80 درصد سرعت بحرانی مصالح سپر است (ماهرانی و همکاران ۱۳۸۹).

هنگامی که لایه‌ای از ذرات درشت رسوب به‌طور کامل بستر را بپوشاند، ذرات ریز در پناه آن از انتقال به پایین‌دست باز می‌مانند. با استقرار این فرایند، ذرات درشت بستر آبراهه به‌صورت نوعی سپر در آمده و در نتیجه لایه سپری نامیده می‌شود. توسعه لایه سپری مانعی در برابر انتقال رسوب است. لایه سپری همچنین باعث افزایش سرعت برشی بحرانی برای ذرات بستر می‌شود که در آستانه حرکت هستند. هرگاه سرعت جریان در حدود 50% سرعت بحرانی برای ذرات لایه سپری باشد، آب‌شستگی پایه با حضور لایه سپری آغاز می‌شود (Dey and Barbhuiya, 2004). با توسعه گودال آب‌شستگی، لایه سپری ثانویه با ضخامتی برابر با قطر ذرات لایه سپری در گودال آب‌شستگی و پیرامون تکیه‌گاه شکل می‌گیرد که از توسعه حفره آب‌شستگی جلوگیری می‌کند. نکته قابل توجه آن است که با تشکیل لایه سپری در گودال آب‌شستگی و مسلح شدن سطح گودال، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد (Van Rijn, 1984).

برای تخمین عمق گودال آب‌شستگی، پژوهشگران روابط و الگوریتم‌های مختلفی را ارائه کرده‌اند. Raudkivi and Ettema (1983) روابطی را برای محاسبه عمق آب‌شستگی ارائه کرده‌اند. Melville and Sutherland (1988) به کمک نتایج آزمایشگاهی نوعی روش طراحی را برای تخمین عمق آب‌شستگی نهایی ارائه کردند. این آزمایشها طیف وسیعی از متغیرها شامل: سرعت جریان، عمق جریان، اندازه ذرات رسوب و دانه‌بندی آنها، پایه و زاویه استقرار آنها نسبت به جریان را پوشش می‌داد. Kothyari et al. (1992) آزمایشهایی را برای ارزیابی تغییر زمانی آب‌شستگی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای در بسترهای یکنواخت و نایکنواخت لایه‌بندی شده، در شرایط آب زلال دائمی و غیردائمی انجام دادند. آنان برای تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی و برای مصالح غیریکنواخت در جریان دائمی، الگوریتمی را با تعریف

آب‌شستگی در اطراف پایه پل در حضور لایه سپری با استفاده از مدل آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. برای این منظور آزمایش‌هایی برای به‌دست آوردن عمق آب‌شستگی در شرایط جریان دائمی انجام و با تحلیل ابعادی، روابطی برای تعیین حداکثر عمق آب‌شستگی و تاریخچه زمانی افزایش عمق گودال آب‌شستگی ارائه می‌شود.

۲- پارامترهای مؤثر و مدل سازی آزمایشگاهی

۲-۱- تحلیل ابعادی

تأثیر مجموعه پارامترهای مختلف بر عمق آب‌شستگی در اطراف پایه در حضور لایه سپری (d_{sa}) را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$d_{sa} = f_1(U, \rho, \rho_s, g, B, v, \gamma, s, d_a, d, t) \quad (1)$$

در این رابطه U سرعت جریان، ρ و ρ_s به ترتیب جرم مخصوص سیال و رسوب، g شتاب گرانش، B قطر پایه، v لزجت سینماتیکی آب، γ عمق جریان، s ضخامت لایه سپری، d و d_a به ترتیب اندازه متوسط ذرات سپر و مصالح زیرین و t زمان است. با توجه به این که لایه سپری بر اثر مرتب شدن رسوب بستر توسط جریان حاصل می‌شود، جرم حجمی ذرات رسوب برای بستر و لایه سپری یکسان فرض می‌شود. دی و دبسنس (۲۰۰۱) عنوان کردند که برای جریان‌های دو فازی شامل مخلوط آب و رسوب، پارامترهای g ، ρ_s و ρ نباید به عنوان پارامترهایی مستقل در رابطه (۱) ظاهر شوند؛ بنابراین بهترین حالت برای در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای بالا استفاده از پارامتر Δg است که به صورت زیر تعریف می‌شود (Raudkivi and Ettema, 1984):

$$\Delta g = \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)g \quad (2)$$

علاوه بر این، با توجه به اینکه آب‌شستگی در اطراف پایه در زمانی آغاز می‌شود که سرعت جریان برابر ۵۰٪ سرعت بحرانی ذرات سپر باشد (Dey and Barbhuiya, 2004)، پارامتر $U_e - U - 0.5U_{ca}$ است- جایگزین

(Dey and Barbhuiya, 2004) با انجام آزمایش‌هایی تأثیر لایه سپری بر عمق آب‌شستگی پیرامون تکیه‌گاه‌ها را مطالعه کردند. بر اساس نظریه ایشان کاهش عمق فرسایش، ناشی از شکل‌گیری لایه سپری در گودال آب‌شستگی است. (Dey and Raikar, 2007) آزمایش‌هایی را برای پایه‌های دایره‌ای شکل، بستر ماسه‌ای و لایه سپری شنی انجام دادند و تأثیر لایه سپری بر عمق آب‌شستگی را برای شرایط جریان دائمی و آب زلال، بررسی کردند و دریافتند که فقط در صورت تشکیل لایه سپری ثانویه^۱ در گودال آب‌شستگی، عمق تعادل آب‌شستگی با حضور لایه سپری نسبت به شرایط بدون حضور لایه سپری کمتر می‌شود. آنان همچنین طبقه‌بندی جدیدی را برای آب‌شستگی در بسترهای سپر شده، بر اساس شکل چاله و میزان تخریب لایه سپری ارائه کردند.

(Dey and Raikar, 2008) با استفاده از نتایج مطالعات پیشین خود، رابطه‌ای را به صورت ضرایب K شامل اثر قطر دانه‌های لایه سپری ارائه کردند. آنها همچنین نتیجه گرفتند که حداکثر ممکن برای عمق تعادل آب‌شستگی، در این شرایط برای پایه‌های دایره‌ای به ۳/۱۵ برابر قطر پایه نیز می‌رسد. ماهرانی و همکاران (۱۳۸۹) تأثیر لایه سپری بر آب‌شستگی را در شرایط جریان دائمی برای تکیه-گاه‌های نیم‌دایره و نیم‌بیضی مطالعه کردند. آنان دریافتند که با افزایش قطر ذرات بستر در حضور لایه سپری ثابت، عمق آب‌شستگی افزایش می‌یابد و با افزایش قطر ذرات لایه سپر در حضور بستر ثابت، عمق آب‌شستگی کاهش می‌یابد.

به دلیل این که تحلیل نظری جریان آب و رسوب - به دلیل پیچیدگی معادلات حاکم بر جریان و همچنین تغییر شرایط مرزی مدل به علت حرکت بستر- بسیار دشوار است، بیشتر پژوهش‌ها به صورت آزمایشگاهی و روابط ارائه شده تجربی است. در این مقاله به مطالعه پدیده

متر بالا آورده شده است. این ناحیه بالا آمدگی شامل دو سکوی ۳ و ۲ متری به ترتیب در بالادست و پایین دست ناحیه آزمایش^۱ است. ناحیه آزمایش، با مصالح ماسه‌ای به ترتیبی که در ادامه توصیف می‌شود، پر شده است. طول ناحیه آزمایش به گونه‌ای است که تا حد امکان برای حفرة آب شستگی محدودیتی ایجاد نکند. بدین منظور طول این ناحیه به صورت تجربی برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شد که به وسیله دو لایه مصالح بستر- سپر، پر شده است. ارتفاع سکوها طوری انتخاب شد که در هیچ شرایطی عمق فرسایش به کف کانال نرسد. آب در کانال توسط یک پمپ با حداکثر دبی برابر ۸۰ لیتر بر ثانیه در مداری بسته جریان می‌یافت. دبی جریان توسط شیر فلکه‌ای که در بالادست کانال و مخزن تنظیم شد. برای اندازه‌گیری دبی از دبی‌سنج مغناطیسی با دقت ۲ درصد استفاده شد. آب پس از خروج از شیر فلکه و قبل از ورود به کانال به مخزنی مکعبی به ابعاد ۱/۵ × ۲ × ۲ متر وارد شده و سپس توسط دو صفحه انحنا دار به درون کانال هدایت می‌شد. این صفحات اثرهای ناشی از انقباض خطوط جریان در هنگام ورود آب به کانال را کاهش می‌دهند. وجود مخزن قبل از کانال، موجب یکنواختی جریان و کاهش آشفتگی جریان می‌شود. برای کنترل سطح آب، از دریچه آزاد قابل تنظیمی در انتهای کانال استفاده شده است. شکل ۱ طرح‌واره‌ای را از کانال آزمایشگاهی و اجزای آن نشان می‌دهد.

برای اینکه در ناحیه آزمایش، جریان توسعه یافته باشد، سکوی بالادست با استفاده از مصالح درشت‌دانه زبر شد به گونه‌ای که زبری در ابتدا و انتهای ناحیه آزمایش باعث ایجاد تغییری ناگهانی در زبری بستر نشود. بدین ترتیب از هر گونه شستگی موضعی در اثر تغییر زبری جلوگیری می‌شود. برای اطمینان از این که جریان در ناحیه آزمایش به مرز توسعه یافتگی رسیده، پروفیل سرعت در سه نقطه ابتدا، وسط و انتهای ناحیه آزمایش برداشت شد.

U می‌شود. بنابراین هنگامی که $U_e > 0$ ، آب شستگی آغاز می‌شود. از طرفی بر اساس توصیه بورا (۱۹۸۹) و فرلیچ (۱۹۹۵) ضخامت لایه سپری در بسترهای طبیعی بین ۱ تا ۳ برابر اندازه ذرات سپر است (Dey and Barbhuiya, 2004)، بنابراین در تحقیق حاضر $s=3d_a$ انتخاب شد و بنابراین رابطه (۱) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$d_{sa} = f_2(U_e, B, v, y, \Delta g, d_a, d, t) \quad (3)$$

با استفاده از نظریه π باکینگهام و انتخاب B و U_e به عنوان متغیرهای تکراری پایه می‌توان نوشت:

$$\hat{d}_{sa} = f_3(\hat{d}, \hat{y}, F_e, R_e, \hat{B}, t_*) \quad (4)$$

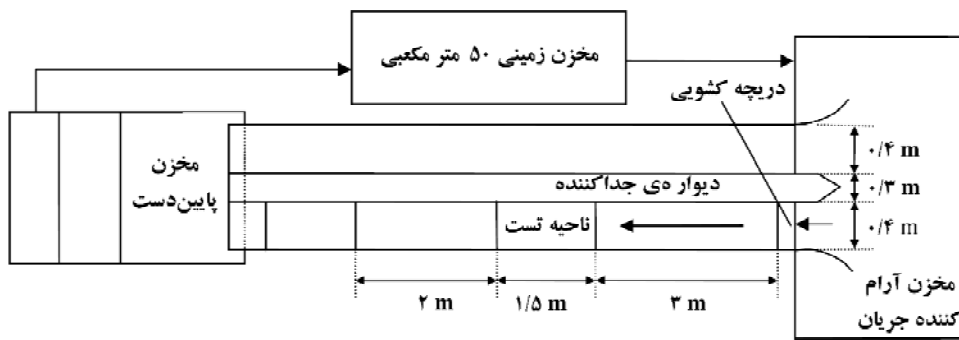
که در آن $\hat{d} = d_a / d$ ، $\hat{y} = y / B$ ، $\hat{d}_{sa} = d_{sa} / B$ ، $F_e = U_e / (\Delta g B)^{0.5}$ (عدد فرود پایه)، $R_e = U_e B / v$ (عدد رینولدز پایه)، $\hat{B} = B / d$ و $t_* = U_e t / B$ لیم و چو (۲۰۰۱) و ملویل (۱۹۹۲) اشاره کردند که در جریان‌های کاملاً آشفته در بسترهای زبر، تأثیر عدد رینولدز قابل صرف نظر است (Dey and Raikar 2008). از آنجا که در تحقیق حاضر این معیار به طور کامل ارضا شده، رابطه (۴) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\hat{d}_{sa} = f(\hat{d}, \hat{y}, F_e, \hat{B}, t_*) \quad (5)$$

در این تحقیق بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌ها در مدل آزمایشگاهی عمق تعادلی آب شستگی در اطراف پایه پل در حضور لایه سپری و در شرایط جریان دائمی مطالعه شده و بر اساس اطلاعات به دست آمده شکل تابع f با حداقل خطای ممکن تعیین می‌شود.

۲-۲- کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. طول این کانال برابر ۸/۵ متر، عرض آن برابر ۰/۴۰۵ متر و ارتفاع آن برابر ۰/۷ متر است. شیب کانال برابر صفر و کف آن از ۱ متری آغاز کانال به فاصله ۶/۵ متر تا پایین دست کانال، به اندازه ۰/۲



شکل ۱ طرح‌واره‌ای از کانال آزمایشگاهی

افزار متلب سطح فرسایش به دست می‌آید.

۲-۳- پارامترهای آزمایش

اگر دیواره کانال به پایه نزدیک باشد، آب‌شستگی متأثر از اثر دیواره‌ها خواهد بود. به منظور جلوگیری از تأثیر این عامل بر روند آب‌شستگی، محدودیتی برای بزرگی قطر پایه توسط محققین مختلف در نظر گرفته شده است. (Melville and Chiew 1999) عنوان کردند که به منظور کاهش اثر دیواره‌ها، نسبت فاصله دیواره تا مرکز پایه به قطر پایه نباید از پنج کمتر باشد.

(Raudkivi and Ettema 1984) حداقل این نسبت را برابر ۶/۲۵ ارائه کردند. در تحقیق حاضر با در نظر داشتن این که عرض کانال برابر ۰/۴۰۵ متر است، حداکثر قطر پایه به ۴۲ میلی‌متر محدود شد. با توجه به محدودیت بالا، در این تحقیق به منظور بررسی اثر قطر پایه بر آب‌شستگی از سه پایه استوانه‌ای با قطرهای ۴۲ و ۳۳ و ۲۲ میلی‌متر استفاده شد. جنس پایه‌ها از نوع لوله فولادی است که در انتها به ورق ۴×۱۰×۳۰ میلی‌متر جوش کاری شده‌اند. انتخاب اندازه ذرات بر اساس دو معیار زیر انجام شد:

الف- هرچه اندازه ذرات بزرگتر باشد، زمان رسیدن به تعادل کمتر شده و آزمایش کم هزینه‌تر می‌شود. در این تحقیق با توجه به محدودیت‌های عرض کانال و قطر پایه و نیز در نظر داشتن این معیار که حداقلی از سطح و عمق فرسایش باید رخ دهد، آزمایشهایی مقدماتی ترتیب داده

از آنجا که پروفیل‌های برداشته شده شباهت بسیاری به هم و رابطه لگاریتمی سرعت داشتند می‌توان نتیجه گرفت که در ناحیه آزمایش، جریان توسعه یافته بوده است. برای اندازه‌گیری سرعت، از لوله پیتوت استفاده شده است.

پیش از شروع هر آزمایش، دریچه انتهایی کانال بالا آورده شده و سپس شیر انتهایی سکوی پایین دست بسته می‌شد. به منظور جلوگیری از هر گونه فرسایش ناخواسته لازم است سطح آب به آرامی بالا آورده شود و بنابراین لازم است آب با دبی بسیار کمی به کانال وارد شود. بخشی از این آب از طریق نفوذ در بستر ماسه‌ای و عبور از ناحیه متخلخل به سکوی پایین دست وارد می‌شد. این کار تا پر شدن کامل سکوی پایین دست ادامه یافته و پس از پایدار شدن شرایط، دبی جریان تا رسیدن به دبی واقعی افزایش داده می‌شد. سپس توسط دریچه انتهایی، عمق جریان تنظیم و آزمایش شروع می‌شد. در پایان هر آزمایش، پس از فرو نشستن سطح آب تا سطح اولیه بستر، به منظور زهکشی بستر ماسه‌ای، شیر انتهایی باز می‌شد و با پایین رفتن سطح آب در ناحیه فرسایش یافته، اندازه‌گیری عمق‌ها شروع می‌گردید. برای اندازه‌گیری تغییرات عمق آب‌شستگی و نیز عمق نهایی آب‌شستگی، از روش پردازش تصاویر و نیز دستگاه لیمنومتر با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. برای به دست آوردن سطح نهایی فرسایش از روش پردازش تصاویر نیز استفاده شده است. با عکس‌برداری از ناحیه فرسایش و پردازش در نرم

گیرند (Dey and Raikar, 2007). جزئیات مصالح استفاده شده و درجه یکنواختی آن همراه با سایر مشخصه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ سرعت برشی آستانه حرکت ذرات رسوب

نوع مصالح	قطر متوسط (mm)	سرعت برشی بحرانی (m/s), (u_{*c})	σ_g
ذرات بستر	۰/۲۶	۰/۰۱۳	۱/۲۵
	۰/۵۴	۰/۰۱۶	۱/۱۳
	۰/۸۵	۰/۰۲۲	۱/۲۶
ذرات سپر	۱/۱۸	۰/۰۲۶	۱/۳۵
	۲/۳۶	۰/۰۴۰	۱/۲۶
	۳/۵۶	۰/۰۵۲	۱/۲۶

با توجه به اینکه حداکثر عمق آب‌شستگی در پایه‌های واقع شده در بسترهای سپری شده برابر $3/1B$ (Dey and Raikar, 2007) و نیز با توجه به اینکه حداکثر اندازه پایه برابر ۴۲ میلی‌متر انتخاب شده، ضخامت مصالح بستر برابر ۱۳ سانتی‌متر انتخاب شد. از آنجا که ضخامت لایه سپر در بسترهای طبیعی معمولاً حدود سه برابر اندازه قطر متوسط ذرات لایه سپری است، لذا در این تحقیق ضخامت لایه سپر برابر $3d_a$ انتخاب شد. برای جریان‌های با عمق کم، آب‌شستگی موضعی مستقل از قطر پایه است. هنگامی که عمق جریان زیاد باشد ($y/B > 3.5$) آب‌شستگی موضعی به عمق جریان بستگی ندارد. بر طبق نظر دیتز (۱۹۷۲) عمق آب‌شستگی با افزایش نسبت y/B (عمق جریان و B قطر پایه است) افزایش می‌یابد ولی برای $y/B > 3$ عمق آب‌شستگی ثابت است. محققان دیگر نیز به این نتیجه رسیده‌اند که اگر $y/B > 3$ باشد، عمق جریان بر عمق آب‌شستگی بی‌اثر است (Raudkivi and Ettema, 1984) همچنین برای $y/B > 3$ و $B/d_{50} > 75$ ضریب عمق جریان (K_y) - که نشان‌دهنده اثر عمق جریان بر عمق آب‌شستگی است - برابر یک است. در مطالعه حاضر

شد. این آزمایشها نشان داد که حد بالای اندازه مصالح سپر باید به ۴ میلی‌متر محدود شود. از سوی دیگر باید در نظر داشت که محدودیت‌هایی برای حداقل اندازه ذرات توصیه شده است. به نظر رودکیوی اگر قطر ذرات از ۰/۶ میلی‌متر کمتر باشد، به دلیل آشفتگی جریان در نزدیک بستر، هنگامی که سرعت برشی در کف به حدود ۰/۶ سرعت برشی بحرانی دانه‌ها برسد، ذرات بستر در بالادست شروع به حرکت کرده و پشته‌های کوچکی^۱ تشکیل می‌دهند. این پشته‌ها وضعیت جریان را آشفته‌تر کرده و آب‌شستگی از حالت آب زلال خارج می‌شود.

ب- در شرایطی که $B/d_a > 50$ ، اندازه ذرات سپر بر عمق آب‌شستگی بی‌اثر است (ماهرانی و همکاران ۱۳۸۹). با توجه به اینکه یکی از پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، تأثیر اندازه ذرات سپر بر عمق آب‌شستگی است، لذا باید $B/d_a < 50$ باشد تا اثر اندازه ذرات قابل بررسی باشد. لذا:

$$d > \frac{B}{50} = \frac{42 \text{ mm}}{50} = 0.84 \text{ mm} \quad (6)$$

با توجه به اینکه نقش اندازه ذرات به‌عنوان بستر یا لایه سپر پوشش‌دهنده آن، در فرایند آب‌شستگی متفاوت است و با توجه به توضیحاتی که در بالا آورده شد، قطر ذرات سپر در سه اندازه ۱/۱۸، ۲/۳۶ و ۳/۵۶ میلی‌متر انتخاب شد. بررسی‌های (Dey and Raikar, 2007) نشان داده است که اندازه مصالح بستر (d) تأثیر چندانی بر عمق فرسایش در بسترهای سپری شده ندارد؛ آنچه اهمیت دارد نسبت d_a/d است. با این توضیح و به‌منظور رعایت کردن این توصیه، ذرات بستر در سه قطر ۰/۲۶، ۰/۵۴ و ۰/۸۵ میلی‌متر انتخاب شد. با توجه به اینکه مطالعه حاضر بر روی بسترهای ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت انجام شده، درجه یکنواختی توزیع اندازه ذرات رسوب یا $(d_{84}/d_{16})^{0.5} = \sigma_g$ بر اساس نظریه دی کمتر از ۱/۴ انتخاب شد تا ذرات رسوب با یکنواختی بالا مورد آزمایش قرار

1. Ripple

اما در مورد زمان تعادل در بسترهای سپری شده نظرها تا اندازه‌ای متفاوت است. دی و باربویا (۲۰۰۴)، زمان انجام آزمایش را برای تکیه‌گاه‌های واقع در بسترهای سپری شده ۱۵-۱۲ ساعت عنوان کردند و دی و ریکر (۲۰۰۷) این زمان را برای پایه‌های واقع در بسترهای سپری شده ۳۶-۲۴ ساعت عنوان کردند. در تحقیق حاضر با توجه به اینکه قطر پایه‌های استفاده شده بسیار کمتر از پایه‌های آزمایش شده توسط (Dey and Raikar, 2007) است، انتظار می‌رود که زمان تعادل کمتر باشد. آزمایشهای مقدماتی نشان داد که بر مبنای تعریف زمان تعادل چپو (۱۹۹۲)، زمان ۱۵ تا ۲۴ ساعت، زمان مناسبی برای رسیدن به حالت تعادل است و در این تحقیق مبنای برنامه‌ریزی آزمایش‌ها قرار گرفت. در تحقیق حاضر برای حصول اطمینان از انتخاب مناسب زمان تعادل، آزمایشهای مقدماتی تا ۷۲ ساعت نیز ادامه یافت.

۳- تحلیل نتایج

۳-۱- ساختار آزمایشها و نتایج حاصل

در جدول ۲ خلاصه پارامترهای مؤثر در آزمایش‌های جریان دائمی آورده شده و در ادامه در جدول ۳ نتایج این آزمایشها ارائه شده است. عمق‌های به‌دست آمده برای آب‌شستگی، عمق نهایی فرسایش است که پس از ۱۵-۲۴ ساعت حاصل شده‌اند. برای هر یک از آزمایش‌ها با جریان دائمی، تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی نیز به‌دست آمد. برای پایه ۲۲ میلی‌متری و سپر ۳/۵۶ میلی‌متری به علت کم بودن عمق فرسایش، تغییرات زمانی آب‌شستگی ثبت نشد. برای به‌دست آوردن تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی در اطراف پایه، از آنجا که نرخ فرسایش در ابتدای آزمایش زیاد است، فواصل زمانی اندازه‌گیری عمق در ابتدای آزمایشها کم در نظر گرفته شده (در آغاز با فاصله زمانی پنج دقیقه‌ای) که با گذشت زمان، زیاد می‌شد. برای اندازه‌گیری عمق، از شاخصی که در کنار پایه نصب شده، استفاده می‌شد.

به‌منظور بررسی تأثیر عمق جریان بر فرایند آب‌شستگی، عمق جریان ثابت و برابر ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این صورت y/B برای پایه‌های ۴/۲، ۳/۳ و ۲/۲ سانتی‌متری به ترتیب برابر ۱/۶۷، ۲/۱۲ و ۳/۱۸ است. پیش از محاسبه سرعت جریان، لازم است شرایط آستانه حرکت ذرات بستر تعیین شود. بدین منظور و برای محاسبه سرعت برشی آستانه حرکت مصالح بستر، از منحنی شیلدز استفاده شده که نتایج برای مصالح لایه سپری و بستر در جدول ۱ آورده شده است. به دلیل رابطه مستقیم بین تعداد آزمایشها و تعداد شرایط جریان و نیز تعدد حالت‌های مختلف پایه و بستر، در این تحقیق، به یک وضعیت جریان بسنده شد. برای اطمینان از تحقق شرایط آب زلال در شرایط بسیار نزدیک به شرایط آستانه حرکت ذرات سپر و نیز کاهش حساسیت شرایط آزمایش نسبت به سرعت جریان، $u^*/u_{*ca} = 0/8$ در نظر گرفته شد. این شرایط جریان برای ترکیب‌های مختلف بستر-سپر در نظر گرفته شد و مبنای آزمایشها قرار گرفت. در ادامه به‌منظور محاسبه سرعت جریان، از معادله لگاریتمی سرعت متوسط برای لایه‌های سپر مورد آزمایش استفاده شد (Dey and Barbhuiya, 2004):

$$\frac{U_{ca}}{u_{*ca}} = 5.75 \log \frac{y}{2d_a} + 6 \quad (7)$$

در این رابطه U_{ca} و u_{*ca} به ترتیب سرعت متوسط بحرانی جریان و سرعت برشی بحرانی است.

۲-۴- شرح آزمایشها

هدف از این آزمایشها، مطالعه رابطه تغییرات عمق آب‌شستگی با نسبت اندازه مصالح، عمق جریان، قطر پایه پیل و تاریخچه زمانی فرسایش است. به‌منظور جلوگیری از انتقال رسوب از بالادست پایه به داخل چاله فرسایش، آزمایشها در شرایط آب زلال انجام شد. با در نظر گرفتن شش ترکیب بالا و تلفیق آن با سه قطر مختلف پایه‌ها، در مجموع ۱۸ آزمایش در شرایط جریان دائمی تعریف شد.

۳-۲- تهیه پروفیل فرسایش به روش پردازش تصویر

همانطور که اشاره شد یکی از راه‌های تعیین عوارض سطح، استفاده از پردازش تصویر است. در این روش، بیشتر بر ویژگی‌های دیداری تصویر مانند شدت رنگ و کیفیت آن تأکید می‌شود.

به دلیل دشواری‌های کار با ابزار مکانیکی برای برداشت عوارض سطح، سعی شد بر مبنای تناسب شدت رنگ با عمق آب، عوارض سطح به دست آید. از این رو در پایان آزمایشها - یعنی در شرایطی که سطح آب هم‌تراز بستر

است- مایعی رنگی (محلول رقیق پرمنگنات پتاسیم) به موضع فرسایش تزریق شد. پس از این مراحل، سعی شد تا با تابش نور زمینه مناسب، تصاویری از موضع فرسایش توسط دوربین دیجیتال ثبت شود و پس از انجام اصلاحات اولیه، تصاویر برای ارسال به نرم‌افزار مت‌لب آماده می‌شد. شکل ۲ نمونه‌ای از تصویر چاله آب شستگی در آزمایش S7 را نشان می‌دهد.

جدول ۲ پارامترهای مؤثر در آزمایش‌های جریان دائمی

شماره آزمایش	D (mm)	d_n (mm)	s (mm)	B (mm)	u_{*ca} (m/s)	y (mm)	U_{ca} (m/s)	U (m/s) ($u_{*ca} = 0.8$)
S1	۰/۲۶	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۴۲	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S2	۰/۲۶	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۳۳	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S3	۰/۲۶	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۲۲	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S4	۰/۲۶	۲/۳۶	۷/۰۸	۴۲	۰/۰۴۰	۷۰	۰/۵۰۹	۰/۴۰۸
S5	۰/۲۶	۲/۳۶	۷/۰۸	۳۳	۰/۰۴۰	۷۰	۰/۵۰۹	۰/۴۰۸
S6	۰/۲۶	۲/۳۶	۷/۰۸	۲۲	۰/۰۴۰	۷۰	۰/۵۰۹	۰/۴۰۸
S7	۰/۲۶	۱/۱۸	۳/۵۴	۴۲	۰/۰۲۶	۷۰	۰/۳۷۶	۰/۳۰۱
S8	۰/۲۶	۱/۱۸	۳/۵۴	۳۳	۰/۰۲۶	۷۰	۰/۳۷۶	۰/۳۰۱
S9	۰/۲۶	۱/۱۸	۳/۵۴	۲۲	۰/۰۲۶	۷۰	۰/۳۷۶	۰/۳۰۱
S10	۰/۵۴	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۴۲	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S11	۰/۵۴	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۳۳	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S12	۰/۵۴	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۲۲	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S13	۰/۵۴	۲/۳۶	۷/۰۸	۴۲	۰/۰۴۰	۷۰	۰/۵۰۹	۰/۴۰۸
S14	۰/۵۴	۲/۳۶	۷/۰۸	۳۳	۰/۰۴۰	۷۰	۰/۵۰۹	۰/۴۰۸
S15	۰/۵۴	۲/۳۶	۷/۰۸	۲۲	۰/۰۴۰	۷۰	۰/۵۰۹	۰/۴۰۸
S16	۰/۸۵	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۴۲	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S17	۰/۸۵	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۳۳	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷
S18	۰/۸۵	۳/۵۶	۱۰/۶۸	۲۲	۰/۰۵۲	۷۰	۰/۶۰۹	۰/۴۸۷

جدول ۳ نتایج آزمایش‌های جریان دائمی

شماره آزمایش	δ (mm)	d_s (mm)	شماره آزمایش	δ (mm)	d_s (mm)	شماره آزمایش	δ (mm)	d_s (mm)
S1	۳۲	۵۹	S7	۲۰	۷۷	S13	۲۱	۷۶
S2	۲۶	۴۲	S8	۱۷	۶۸	S14	۱۸	۶۲
S3	۲۷	۲۲	S9	۱۵	۵۱	S15	۱۵	۳۹
S4	۲۱	۷۸	S10	۲۹	۶۱	S16	۲۴	۵۷
S5	۲۰	۶۲	S11	۲۵	۴۰	S17	۲۰	۴۴
S6	۱۶	۴۰	S12	۲۳	۱۹	S18	۲۵	۱۷

رنگی به تصویر خاکستری و اعمال اصلاحات، تصویری مانند شکل ۳ حاصل شد که ماتریس متناظر با آن، درایه-هایی متناظر با پیکسل‌های تصویر دارد. هر یک از این درایه‌ها متناسب با پیکسل مربوط مقداری بین ۰ تا ۲۵۵ را اختیار می‌کند (۰ معادل سیاه و ۲۵۵ معادل سفید است). برای یافتن رابطه‌ای بین شدت رنگ خاکستری و عمق آب، لازم است در چند نقطه، هم عمق آب و هم شدت رنگ مشخص باشند. بنابراین در حداقل پنج نقطه عمق فرسایش توسط عمق‌سنج مکانیکی اندازه‌گیری شد و متناظر با آن نقاط، از روی ماتریس هم ارزش تصویر، شدت رنگ در آن نقاط به‌دست آمد. به داده‌های فوق رابطه‌ای نمایی به صورت زیر برازش داده شد:

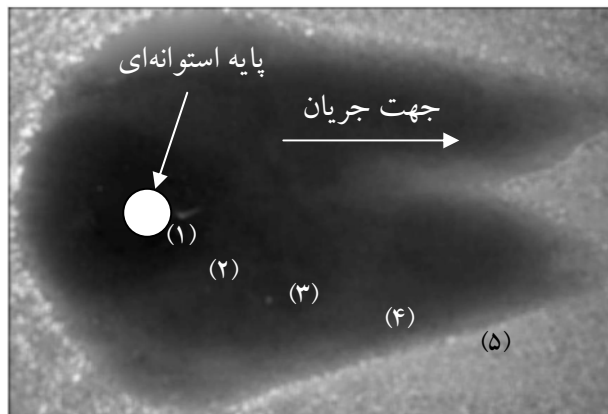
$$h = 30.519e^{-0.0345I} \quad , \quad R^2 = 0.996 \quad (۸)$$

به این ترتیب رابطه شدت رنگ (I) و عمق (h) برای هر تصویر به‌دست می‌آید. با اعمال این رابطه در نرم افزار به‌راحتی می‌توان از روی ماتریس شدت رنگ تصویر اصلاح شده، ماتریس عمق را به‌دست آورد. با داشتن طول مشخصی در تصویر و مشخص بودن تعداد پیکسل‌ها در آن طول، به راحتی می‌توان مختصات هر پیکسل را تعیین کرد.



شکل ۲ تزریق مایع رنگی در داخل چاله فرسایش در آزمایش S7

همان‌طور که دیده می‌شود، با نزدیک شدن به پایه، شدت رنگ بیشتر می‌شود که این نشانه افزایش عمق است. از آنجا که کار با تصاویر رنگی (RGB) دشوار و وقت‌گیر است، لذا تصاویر رنگی به خاکستری تبدیل شد. به‌منظور شروع پردازش تصویر، در آغاز لازم است اصلاحاتی روی تصویر انجام شود. یکی از این اصلاحات، حذف تصویر پایه و سایه ناشی از آن است. اصلاح بعدی حذف نور ناشی از فلاش دوربین است که در بالای چاله فرسایش دیده می‌شود. به‌منظور به‌دست آمدن تصویری شفاف از شکل و کاهش نویزها، از فیلترهای حذف نویز میانگین یا تطابقی استفاده شد. در مورد این تصویر، فقط از فیلتر حذف نویز میانگین استفاده شد. با تبدیل تصویر



شکل ۳ تصویر خاکستری نهایی شکل ۲

تشکیل نوعی پوشش محافظ در گودال (لایه سپری ثانویه)، از آب‌شستگی بیشتر گودال و افزایش عمق آن جلوگیری می‌کنند. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در تمامی آزمایش‌ها به استثنای پایه ۲۲ میلی‌متری و سپر ۳/۵۶ میلی‌متری، در ابتدای هر آزمایش -به دلیل تغذیه مداوم از مصالح لایه سپری در بالا دست چاله- لایه سپری ثانویه نسبتاً ضخیمی در جلوی پایه تشکیل می‌شود؛ اما به دلیل قدرت بالای گرداب نعل اسبی، این لایه پایدار نیست و مصالح به‌طور پیوسته به پایین دست انتقال می‌یابند. با گذشت زمان و با افزایش عمق چاله و کاسته شدن از قدرت گرداب نعل اسبی، این لایه پایدار شده و عمق تعادل آب‌شستگی حاصل می‌شود. همچنین مشاهدات نشان داد که حداقل ضخامت لایه سپری ثانویه در حالت پایدار، به اندازه قطر ذرات سپر است و این ذرات به گونه‌ای در کنار هم چیده شده‌اند که کمترین فضای خالی برای فرار مصالح زیرین فراهم شود.

در آزمایش‌های با سپر ۱/۱۸ میلی‌متر مشاهده شد که با وجود تشکیل لایه سپری ثانویه در داخل چاله فرسایش، این لایه پایداری چندانی ندارد و حتی در مواردی -به دلیل نوسانهای جریان جت رو به پایین در جلوی پایه- لایه سپری متلاشی شد، اما بار دیگر پس از چند دقیقه، شکل و تراکم اولیه خود را بازیافت.

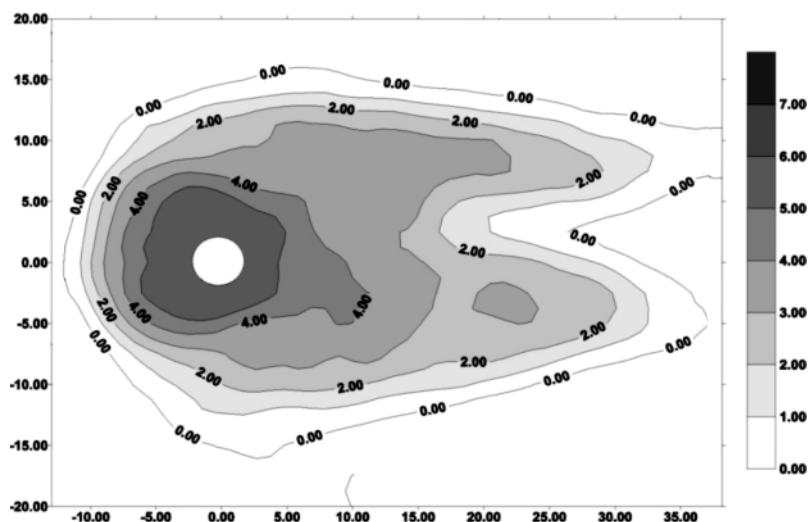
پس از این عملیات، ماتریسی به دست می‌آید که طول و عرض و ارتفاع نقاط را به دست می‌دهد. با کوچک کردن ماتریس به دست آمده، می‌توان مختصات به دست آمده را به نرم افزار Surfer وارد و عوارض ناحیه را ترسیم کرد. شکل ۴ محصول نهایی پردازش شکل ۲ است. برای بررسی دقت روش پردازش تصاویر، پروفیل سطح به روش اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از لیمنومتر نصب شده بر روی کانال نیز اندازه‌گیری و نتایج مربوط به کل محدوده برداشت سطح نهایی فرسایش، به دو روش با هم مقایسه شدند. مقایسه نتایج حاکی از حداکثر خطای ۴ درصد و متوسط خطای ۰/۸ درصد بود. بیش از ۹۵ درصد اطلاعات حاصل از روش پردازش تصاویر در محدوده ± 5 درصد نتایج واقعی قرار داشتند که بیانگر دقت بالای این روش ساده و کم‌هزینه است.

۳-۳- مشاهدات آزمایشگاهی

هنگامی که سرعت برشی جریان تقریباً برابر ۵۰٪ سرعت برشی ذرات لایه سپر شود، آب‌شستگی در اطراف پایه آغاز می‌شود. گودال آب‌شستگی از کنار پایه آغاز شده و به سمت جلو و عقب پایه سرایت کرده و با افزایش زمان عبور جریان از مجاورت پایه، گسترش می‌یابد. همزمان با توسعه گودال آب‌شستگی، ذرات سپر از لبه بالادست گودال آب‌شستگی به داخل چاله سقوط می‌کنند و با

در مجموع با توجه به سیمای کلی ناحیه فرسایش یافته، سه دسته الگوی فرسایش مشاهده شد که به تفصیل در جدول ۴ ارائه شده‌اند. شکل ۵ وضعیت چاله فرسایش را در هر یک از حالت‌های جدول ۴ نشان می‌دهد.

بنابراین به نظر می‌رسد که با وجود ناپایداری لایه سپری ثانویه، به دلیل کاهش قدرت گرداب نعل اسبی، در اثر افزایش عمق چاله آب‌شستگی و در نتیجه کاهش قدرت انتقال مصالح موجود در لایه سپری ثانویه به پایین دست، عمق تعادل حاصل می‌شود.



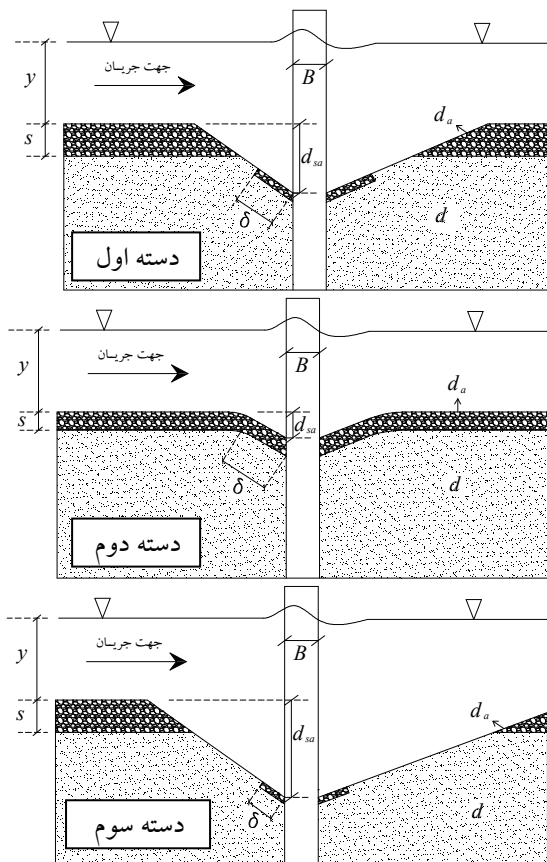
شکل ۴ منحنی سطح فرسایش یافته به دست آمده به روش پردازش تصویر

جدول ۴ دسته‌بندی آزمایش‌های جریان دائمی

توضیح	شماره آزمایش	
<p>- لایه سپری در جلو و عقب پایه دست نخورده باقی می‌ماند.</p> <p>- فرسایش بر اثر جوشش ذرات بستر از لابه‌لای مصالح لایه سپری اتفاق می‌افتد و رفتار فرسایش در چنین وضعیتی مشابه عملکرد سنگچین است.</p>	S3, S12, S18	دسته اول
<p>- در شروع آزمایش لایه سپری در جلو و عقب پایه متلاشی می‌شود اما لایه سپری ثانویه مستحکم در جلوی پایه تشکیل می‌شود.</p> <p>- تا فاصله کمی در پایین دست لایه سپری متلاشی و شسته می‌شود، اما پس از این ناحیه به شکل پراکنده‌ای در بستر چاله باقی می‌ماند.</p> <p>- زمان کمی برای رسیدن به تعادل دارند.</p>	S2, S6, S11, S15, S17	دسته دوم
<p>- لایه سپری در جلو و ناحیه وسیعی از عقب پایه متلاشی و کاملاً شسته می‌شود و فقط در محدوده کوچکی در اطراف پایه باقی می‌ماند.</p> <p>- ضخامت لایه سپری در این وضعیت به اندازه قطر متوسط ذرات سپر است.</p> <p>- پیشروی چاله فرسایش در پایین دست زیاد بوده و حتی ممکن است بستر تختی نیز ایجاد شود.</p>	S1, S4, S5, S7, S8, S9, S10, S13, S14, S16	دسته سوم

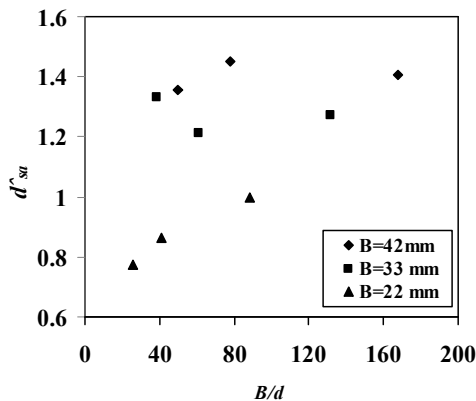
به نظر می‌رسد دو عامل اصلی در گسترش محدوده فرسایش و تخریب لایه سپری در پایین‌دست پایه دخالت دارند. اول آن‌که مصالح بستر همواره بسیار کوچکتر از مصالح لایه سپری هستند و بر اثر جریانی که مصالح سپر را در ۰/۸ شرایط آستانه حرکت قرار داده‌اند با سرعت بالایی شسته شده و از چاله فرسایش خارج می‌شوند. این از یک سو سبب شسته شدن بستر در نزدیکی مرز پایین‌دست لایه سپری اصلی می‌شود و از سوی دیگر برخورد ذرات شسته شده در داخل گودال در زمان خروج از گودال با ذرات لایه سپری سبب تشدید تنش اعمال شده به ذرات سپر و بالا رفتن احتمال حرکت ذره می‌شود.

به منظور مقایسه شکل فرسایش و بررسی تأثیر اندازه ذرات لایه سپری و ضخامت آن بر شکل و گستردگی ناحیه فرسایش، منحنی عوارض حاصل از فرسایش برای آزمایشهای مختلف به روش پردازش تصاویر مطابق شکل ۴ به دست آمد. نکته حائز اهمیت در این شکل‌ها آن است که گسترش گودال فرسایش در جلوی پایه محدود است. به گونه‌ای که در این آزمایشها، زاویه گودال فرسایش در بالادست از ۶۰ درجه بیشتر نمی‌شود (زاویه سطح بالادست با پایه)، اما در عقب پایه، بستر تا فاصله زیادی متأثر از فرسایش است؛ به گونه‌ای که لایه سپری تا فاصله زیادی تخریب شده و این گسترش محدوده فرسایش در پایین‌دست سبب تخت شدن نسبی بستر می‌شود و لایه سپری فقط در محدوده کوچکی در اطراف پایه باقی می‌ماند.



شکل ۵ وضعیت کلی چاله فرسایش در هر یک از حالات مطرح شده در جدول ۴

حاصل از آن، توانایی شکافتن لایه سپری را دارد، (حالت‌های دوم و سوم شکل ۵)، اندازه مصالح زیرین تأثیر چندانی بر عمق آب‌شستگی ندارد.



شکل ۶ تغییرات d_{sa}^* با B/d برای بستر با قطر سپر $d_a=3.56\text{ mm}$

در شکل ۷ تأثیر d^* بر عمق فرسایش نسبی برای پایه‌های مختلف در تحقیق حاضر نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که برای پایه ۴۲ میلی‌متری، با افزایش d^* - که به معنای افزایش قطر ذرات سپر است - عمق آب‌شستگی، در آغاز با شیب بسیار کمی روندی افزایشی و سپس کاهشی دارد. این در واقع گویای آن است که سپر با اندازه ذرات ۲/۳۶ میلی‌متر کمترین اثر پوششی را برای این اندازه قطر پایه دارد. از سوی دیگر برای دو پایه دیگر، دیده می‌شود که با افزایش قطر پایه، کاهش عمق بر اثر افزایش d^* شدت می‌یابد، به گونه‌ای که برای پایه ۲۲ میلی‌متری بیشترین شیب کاهشی دیده می‌شود.

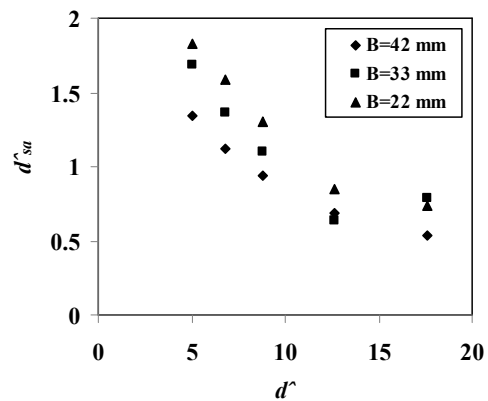
مشاهدات نشان داد که ترکیب سپر - بستر (۲/۳۶-۰/۲۶) تا حدودی ناپایدار است و این ناپایداری باعث افزایش نسبی عمق فرسایش برای این ترکیب می‌شود. در ترکیب (۳/۵۶-۰/۲۶) به علت بالا بودن نسبی d_a/d ، سپر شرایط نسبتاً پایداری دارد و احتمال گسترش آب‌شستگی به بالادست و کنار پایه کمتر است.

دوم آن‌که می‌توان گفت زمانی که جریان از اطراف پایه خارج می‌شود و به سمت پایین دست حرکت می‌کند، در حین خروج از گودال فرسایش با تغییر زبری بستر مواجه می‌شود، به گونه‌ای که بستر زیرتر می‌شود و این نیز به نوبه خود به تشدید تنش اعمال شده به ذرات مرزی لایه سپری منجر شده و موجب گسترش فرسایش در پایین دست می‌شود.

۴-۳- تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق تعادل آب‌شستگی

تعادل گودال آب‌شستگی در اطراف پایه و در حضور لایه سپری، متأثر از ثبات لایه سپری در نزدیکی پایه است. ثبات لایه سپری وابسته به پارامترهایی مانند شرایط جریان عبوری، اندازه ذرات لایه سپری و ضخامت لایه سپری است. بدیهی است جریانی که بر اساس آستانه حرکت ذرات لایه سپری محاسبه می‌شود، گرداب‌های بسیار قوی‌تری را تولید می‌کند. شکل ۶ تغییرات d_{sa}^* با B/d را برای بستر با اندازه سپر $d_a=3.56\text{ mm}$ در تحقیق حاضر برای هر یک از قطرهای پایه مورد بررسی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای پایه‌های ۴۲ و ۳۳ میلی‌متری روند تغییر عمق فرسایش، وابستگی چندانی به B/d ندارد. اما در مورد پایه ۲۲ میلی‌متری مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت B/d ، یعنی کوچکتر شدن اندازه ذرات بستر، عمق فرسایش نیز افزایش می‌یابد. از آنجا که سازوکار فرسایش در چنین پایه‌ای مشابه عملکرد سنگ‌چین است و فرسایش از طریق شستشوی ذرات زیرین از لابه‌لای مصالح درشت بالایی صورت می‌گیرد، بدیهی است که هر چه مصالح زیرین ریزدانه‌تر باشند، فرار آنها از لابه‌لای مصالح لایه سپری آسان‌تر بوده و در نتیجه عمق فرسایش بالاتری حاصل می‌شود. با توجه به نتایج این تحقیق و نتایج دی و ریکر (۲۰۰۷) می‌توان گفت که برای پایه‌های نسبتاً ضخیمی که گرداب اصلی

که مجموع مربعات خطاها، حداقل شود. در حالت کلی a و b و $d_{sa(u)}$ برای جریان دائمی و یکنواخت و سیال مشخص، تابعی از عمق، سرعت، اندازه و شکل پایه پل و نسبت اندازه ذرات است. برای برازش داده‌ها به رابطه‌ای نمایی مانند رابطه (۹) و تعیین پارامترهای مجهول، برای هر آزمایش، از نرم‌افزار SPSS15 استفاده شد. اگر معیار چپو (۱۹۹۲) به‌عنوان زمان تعادل آزمایش در نظر گرفته شود، با توجه به منحنی‌های برازش داده شده بر نتایج می‌توان عمق تعادل و نیز زمان تعادل آب‌شستگی را به‌دست آورد. در اینجا، فقط برای مقایسه، تغییر عمق آب‌شستگی با زمان برای آزمایش‌های $S1$ و $S8$ در شکل ۸ آورده شده است.



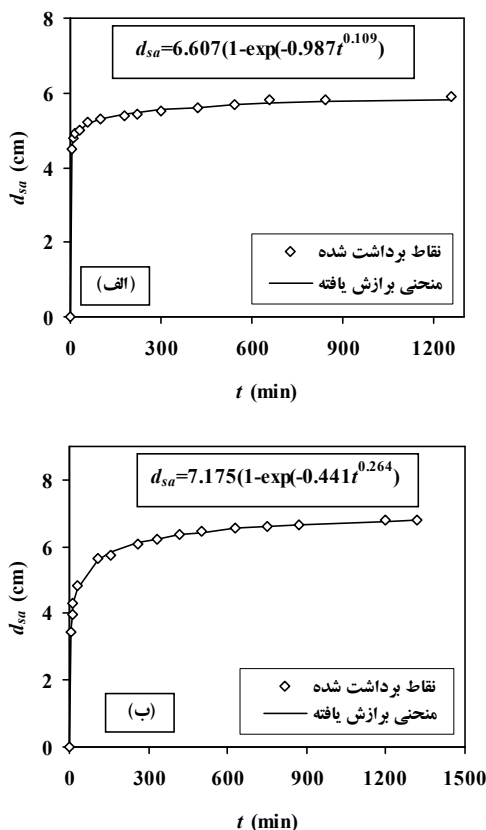
شکل ۷ تغییر d_{sa} با d^r برای بستر با قطر ذرات $d=0.26$ mm

۳-۵- مطالعه تاریخیچه زمانی آب‌شستگی

یکی از راه‌های مطالعه فرسایش و نیز تأثیر پارامترهای مختلف بر آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها، تحلیل منحنی‌های روند توسعه فرسایش با زمان است. در این تحقیق نیز برای آزمایش‌های جریان دائمی، روند تغییر عمق فرسایش در جلوی پایه با زمان به‌دست آمد. گام زمانی ثبت عمق در آغاز آزمایش، به‌دلیل سرعت بالای فرسایش کوتاه بوده است (پنج دقیقه‌ای)، اما به‌تدریج این گام افزایش یافت و در پایان آزمایش به چند ساعت رسید. محققان پیشین روابط مختلفی را برای تغییر آب‌شستگی با زمان ارائه کرده‌اند. در تحقیق حاضر تابع نمایی بر نتایج، برازش داده شد که نتایج مناسبی را در پی داشت. شکل کلی تابع برازش چنین است:

$$\hat{d}_{sa}(t) = \hat{d}_{sa(u)}(1 - e^{-at^b}) \quad (9)$$

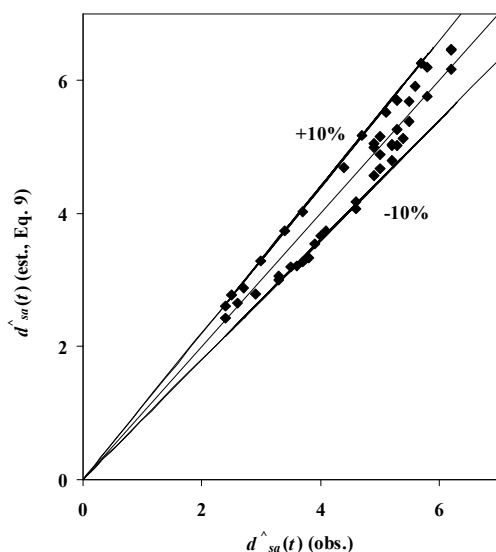
که در آن $d_{sa}(t)$ عمق چاله آب‌شستگی در زمان t و $d_{sa(u)}$ عمق نهایی چاله آب‌شستگی و t زمان بر حسب دقیقه است و a و b ضرایبی هستند که با توجه به مشخصات جریان و هندسه سازه و مصالح رسوبی تعیین می‌شوند. از آنجا که $d_{sa(u)}$ مربوط به زمان بی‌نهایت است، قابل اندازه‌گیری نیست و مانند a و b به گونه‌ای تعیین می‌شود



شکل ۸ تغییرات عمق آب‌شستگی در جلوی پایه نسبت به

زمان در آزمایش الف ($S1$) و ب ($S8$)

نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در ارتباط با تاریخچه زمانی آب‌شستگی و مقادیر به‌دست آمده از رابطه (۹) در شکل ۹ ارائه شده است. دیده می‌شود که دو دسته نتایج در محدوده $\pm 10\%$ درصد نسبت به یکدیگر قرار دارند و با توجه به نوع مسأله و خطاهای قطعی آزمایشگاهی، این مقدار خطا قابل قبول است.



شکل ۹ مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در ارتباط با تاریخچه زمانی آب‌شستگی و مقادیر به‌دست آمده از رابطه (۹)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی پدیده آب‌شستگی در حضور لایه سپری در شرایط جریان دائمی پرداخته شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بیشتر آزمایشها، در آغاز هر آزمایش به دلیل تغذیه مداوم از مصالح لایه سپری در لبه بالادست چاله، لایه سپری ثانویه نسبتاً ضخیمی در جلوی پایه تشکیل می‌شود. این لایه در آغاز پایدار نیست و مصالح به‌طور پیوسته به پایین دست انتقال می‌یابند. با گذشت زمان و با افزایش عمق چاله و کاهش قدرت گرداب نعل اسبی پایدار شده و عمق تعادل آب‌شستگی حاصل می‌شود. با توجه به سیمای کلی ناحیه فرسایش یافته، سه دسته الگوی فرسایش معرفی شد

در مجموع با افزایش d^* (متغیر و $d_a = 0.26$ mm) برای پایه ۳۳ میلی‌متری: (۱) نرخ افزایش عمق آب‌شستگی در ابتدای آزمایش افزایش می‌یابد و (۲) شرایط تعادل زودتر حاصل می‌شود، به‌گونه‌ای که آزمایش S2 در ۲۰۰ دقیقه و آزمایش S8 در حدود ۱۳۰۰ دقیقه به تعادل می‌رسد. همین روند به‌گونه‌ای تقریباً مشابه برای پایه‌های ۲۲ و ۴۲ میلی‌متری قابل توصیف است. از سوی دیگر با توجه به تغییرات زمانی عمق آب‌شستگی، می‌توان گفت که با تغییر B^* ، در شرایطی که قطر پایه ثابت است، منحنی روند تغییرات زمانی عمق، تفاوت قابل ملاحظه‌ای نمی‌یابد. از تحلیل انجام شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که پارامتر مهم و تأثیرگذار بر روند تغییرات زمانی عمق فرسایش در جلوی پایه، اندازه ذرات لایه سپری و در نتیجه ضخامت لایه سپری است.

به‌منظور برازش رابطه‌ای کلی برای تمامی حالتها، از رابطه (۹) استفاده شد. برای بهینه‌سازی مدل برازش یافته، از روش کمینه‌سازی مجموع مربعات خطاها استفاده شد. پارامترهای معادله به قرار زیر به‌دست آمدند:

$$a = 1.83(B^*)^{-4.063}(\hat{d}^*)^{4.084}(\hat{y})^{-0.449}(F_e)^{-5.680} \quad (10)$$

$$b = 0.087(B^*)^{0.542}(\hat{d}^*)^{-0.557}(\hat{y})^{-0.354}(F_e)^{0.170} \quad (11)$$

$$\hat{d}_{sa}^*(u) = 1.835 \ln(2.625F_e^{4.941}(B^*)^{2.609}(\hat{y})^{0.581}(\hat{d}^*)^{-2.591}) + 0.774 \quad (12)$$

که در آن $\hat{d}_{sa}^*(u)$ برابر $d_{sa(u)}/B$ است. اگر f مقادیر اندازه‌گیری شده برای عمق فرسایش، \bar{f} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و F مقادیر محاسبه شده عمق فرسایش از رابطه (۹) باشد، تابع خطای $NRMSE$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum (f - F)^2}{\sum (f - \bar{f})^2}} \quad (13)$$

مقدار تابع خطا برای رابطه (۹) برابر ۰/۱۶ به‌دست می‌آید که بیانگر دقت بالای رابطه برازش داده شده است. رابطه بالا در شرایطی به‌دست آمده که از عمق‌های نهایی واقعی هر آزمایش استفاده شده است. مقایسه

و کنار پایه کمتر است. در مجموع رابطه (۹) برای تعیین تاریخچه زمانی گودال آب‌شستگی و رابطه (۱۲) برای تعیین حداکثر عمق گودال آب‌شستگی بر اساس پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر جریان ارائه شد.

۵- فهرست علائم

B	قطر پایه
$\hat{B} = B / d$	نسبت بی‌بعد قطر پایه
d	اندازه متوسط ذرات مصالح زیرین
d_{16}	قطر ذراتی که در منحنی دانه‌بندی ۱۶ درصد وزنی ذرات کوچکتر از این اندازه هستند
d_{84}	قطر ذراتی که در منحنی دانه‌بندی ۸۴ درصد وزنی ذرات کوچکتر از این اندازه هستند
d_a	اندازه متوسط ذرات سپر
d_{sa}	عمق تعادلی چاله آب‌شستگی
$\hat{d}_{sa} = d_{sa} / B$	نسبت بی‌بعد عمق آب‌شستگی
$\hat{d} = d_a / d$	نسبت بی‌بعد اندازه ذرات
$F_e = U_e / (\Delta g B)^{0.5}$	عدد فرود پایه
g	شتاب گرانش
$R_e = U_e B / \nu$	عدد رینولدز پایه
s	ضخامت لایه سپری
t	زمان
$t_* = U_e t / B$	نسبت بی‌بعد زمان
U	سرعت جریان
$U_e = U - 0.5U_{ca}$	سرعت مؤثر
y	عمق جریان
$\hat{y} = y / B$	نسبت بی‌بعد عمق آب
ν	لزجت سینماتیکی آب
ρ	جرم مخصوص سیال
ρ_s	جرم مخصوص رسوب

۶- منابع

ماهرانی م.، کبیری سامانی ع. و افضل‌مهر ح. (۱۳۸۹). "بررسی آب‌شستگی در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها در حضور لایه

(جدول ۴). به دلیل دشواری‌های کار با ابزار مکانیکی برای برداشت سطح نهایی فرسایش از روش پردازش تصاویر استفاده شد. برای بررسی دقت روش پردازش تصاویر پروفیل سطح به روش اندازه‌گیری مستقیم مکانیکی نیز اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج، دقت بالای روش پردازش تصاویر را نشان می‌دهد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در تمامی آزمایش‌ها به استثنای پایه ۲۲ میلی‌متری و سپر ۳/۵۶ میلی‌متری، در ابتدای هر آزمایش به دلیل تغذیه مداوم از مصالح لایه سپری در بالا دست چاله، لایه سپری ثانویه نسبتاً ضخیمی در جلو پایه تشکیل می‌شود. اما به دلیل قدرت بالای گرداب نعل اسبی، این لایه پایدار نیست و مصالح به‌طور پیوسته به پایین‌دست انتقال می‌یابند. در آزمایش‌های با سپر ۱/۱۸ میلی‌متر مشاهده شد که با وجود تشکیل لایه سپری ثانویه در داخل چاله فرسایش، این لایه پایداری چندانی ندارد و حتی در مواردی به دلیل نوسانهای جریان جت رو به پایین در جلوی پایه، لایه سپری متلاشی شد، اما بار دیگر و پس از چند دقیقه، شکل و تراکم اولیه خود را بازیافت. برای پایه ۴۲ میلی‌متری، با افزایش \hat{d} - که به معنای افزایش قطر ذرات سپر است - عمق آب‌شستگی در ابتدا با شیب بسیار کمی روندی افزایشی و سپس کاهش‌ی دارد و در واقع گویای آن است که سپر با اندازه ذرات ۲/۳۶ میلی‌متر، کمترین اثر پوششی را برای این اندازه قطر پایه ایجاد می‌کند. از سوی دیگر برای دو پایه دیگر، دیده می‌شود که با افزایش قطر پایه، کاهش عمق بر اثر افزایش \hat{d} شدت می‌یابد به‌گونه‌ای که برای پایه ۲۲ میلی‌متری بیشترین شیب کاهش مشاهده می‌شود. مشاهدات نشان داد که ترکیب سپر - بستر (۲/۳۶-۰/۲۶) تا اندازه‌ای ناپایدار است و این ناپایداری باعث افزایش نسبی عمق فرسایش برای این ترکیب می‌شود. در ترکیب (۳/۵۶-۰/۲۶) به علت بزرگ بودن نسبی d_a/d ، سپر شرایط نسبتاً پایداری دارد و احتمال گسترش آب‌شستگی به بالادست

- Melville B.W. and Chiew Y.M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers", J. Hydraul. Eng., Vol. 125, No. 1, pp. 59-65.
- Melville B.W. and Sutherland A.J. (1988). "Design method for local scour at bridge piers", J. Hydraul. Eng., Vol. 114, No. 10, pp. 1210-1226.
- Mia M.F. and Nago H. (2003). "Design model of time-dependent local scour at circular bridge pier", J. Hydraul. Eng., Vol. 129, No. 6, pp. 420-427.
- Raudkivi A.J. and Ettema R. (1983). "Clear-water scour at cylindrical piers", J. Hydraul. Eng., Vol. 109, No. 2, pp. 338-350.
- Raudkivi A.J. and Ettema R. (1984). "Scour at cylindrical piers in armored beds", J. Hydraul. Eng., Vol. 111, No. 4, pp. 713-731.
- Van Rijn L. C. (1984c). "Sediment transport. 3: Bed forms and alluvial roughness", J. Hydraul. Eng., Vol. 110, No. 12, pp.1733-1754.
- سپری، "مجله علمی-پژوهشی هیدرولیک، دوره ۵، شماره ۱، صص. ۱-۱۹.
- Dey S. and Raikar R.V., (2008). "Maximum scour depth at piers in armor-beds", J. Civil. Eng., KSCE, Vol. 13, No. 2, pp. 137-142.
- Dey S. and Raikar R.V. (2007). "Clear-water scour at piers in sand beds with an armor layer of gravels", J. Hydraul. Eng., Vol. 133, No. 6, pp. 703-711.
- Dey S. and Barbhuiya A.K. (2004). "Clear-water scour at abutments in thinly armored beds", J. Hydraul. Eng., Vol. 130, No.7, pp. 622-634.
- Froehlich D.C. (1995). Contraction scour at bridges-clear water conditions with armoring. Water Resources Research, San Antonio, TX, ASCE, pp. 981-985.
- Kothyari U.C., Garde R.J. and Ranga Raju K.G. (1992). "Temporal variation of scour around circular bridge piers", J. Hydraul. Eng., Vol. 118, No. 8, pp. 1091-1106.