



کنترل و کاهش آب شستگی موضعی در پایه های پل با استفاده از شکاف

محسن نادری بنی

دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

محمدرضا چمنی

استادیار گروه آب - دانشکده عمران - دانشگاه صنعتی اصفهان

منوچهر حیدر پور

استادیار گروه آبیاری - دانشکده کشاورزی - دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

از جمله روشهای پیشنهادی جدید، برای کنترل آب شستگی موضعی در پایه های پل، ایجاد شکاف در پایه می باشد. در تحقیق اخیر، کنترل آب شستگی موضعی در پایه پل با استفاده از چند مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. مدلها شامل یک پایه استوانه ای بدون شکاف و چهار پایه شکافدار بود که شکافها با ارتفاع مساوی قطر پایه و دو برابر آن و همچنین در دو موقعیت نزدیک سطح آب و نزدیک بستر قرار داشت .

آب شستگی در شرایط آب زلال بررسی گردید و بسته به سرعت جریان، زمان، اندازه و موقعیت شکاف، درصد کاهش عمق آب شستگی پایه شکافدار به پایه بدون شکاف از ۱۰۰ تا ۰ درصد و حتی منفی متغیر بود. نتایج نشان داد که در سرعتهای کم، شکاف در کنترل آب شستگی موضعی در دقایق ابتدایی مؤثرتر است و به مرور زمان، با نزدیک شدن به زمان تعادل، این اثر کاهش می یابد. در سرعتهای بالا، اثر شکاف در کاهش آب شستگی در دقایق اولیه کم، ولی به مرور زمان، بیشتر می شود. شکاف نزدیک سطح آب در سرعتهای بالا، نه تنها باعث کاهش آب شستگی نگردید، بلکه باعث افزایش آن نیز شد. همچنین شکاف بزرگ نزدیک بستر، بیشترین و شکاف کوچک نزدیک سطح آب، کمترین درصد کاهش عمق آب شستگی موضعی را ایجاد نمود.

واژه های کلیدی

کنترل آب شستگی موضعی، پایه پل، شکاف

مقدمه :

پلها مهمترین و حیاتی ترین سازه های ارتباطی می باشند. تخریب پلها، بیشتر در اثر آب شستگی موضعی صورت می گیرد. به عنوان مثال، در ایالات متحده آمریکا در طی سی سال گذشته، یکهزار از مجموع پانصد هزار پل ساخته شده بر روی رودخانه ها تخریب شده است که شصت درصد آنها در اثر آب شستگی موضعی بوده است، در حالیکه سهم زلزله در این تخریبها تنها دو درصد می باشد. متوسط هزینه خسارت تخریب پلها که بر اداره فدرال بزرگراههای آمریکا (F.H.W.A.) تحمیل می شود، سالانه حدود پنجاه میلیون دلار است [۱]. در کشور ما به دلیل عدم رعایت ملاحظات فنی در طراحی و اجرای پلها هر ساله دهها

دهانه پل، تخریب شده که اکثر آنها در اثر آب شستگی می باشد. این امر، علاوه بر تحمیل خسارات فراوان، باعث اختلال در سیستم حمل و نقل و غیره شده است. بنابراین شناخت این پدیده، پیش بینی میزان آب شستگی و لحاظ کردن آن در طراحی پلها و مهمتر از همه به کار بردن تمهیدات لازم برای کاهش و کنترل آب شستگی بسیار ضروری است.

آب شستگی موضعی در اطراف پایه به دو صورت انجام می پذیرد: آب شستگی بستر زنده (live-bed scour) و آب شستگی آب زلال (clear-water scour). در آب شستگی بستر زنده، سرعت متوسط جریان (V)، بیش از سرعت آستانه حرکت (threshold velocity of movement) ذرات بستر (V_c) می باشد که در آن، علاوه بر شسته شدن موضعی اطراف پایه، بستر بالا دست نیز فرسایش کلی یافته، ذرات بستر به داخل حفره آب شستگی وارد شده و باعث کاهش عمق آب شستگی می گردد. بنابراین، عمق آب شستگی با زمان بصورت نوسانی کم و زیاد می شود. در آب شستگی آب زلال، سرعت متوسط جریان، کمتر از سرعت آستانه حرکت ذرات بستر می باشد و در بالادست پایه، هیچگونه فرسایشی وجود ندارد و تنها در موضع اطراف پایه، حفره آب شستگی ایجاد می گردد [۲]. عمق این حفره در طول زمان افزایش می یابد و نرخ عمق آب شستگی در ساعت اول بیش از ساعات دیگر است، بطوریکه در شرایط $V=0.5V_c$ عمق آب شستگی در پایان ساعت اول، بیش از پنجاه درصد عمق آب شستگی متعادل است. برای حالت $V=0.93V_c$ ، این مقدار بالغ بر ۷۵ درصد است [۳].

کنترل و کاهش آب شستگی موضعی به دو صورت انجام می گیرد: بالا بردن مقاومت مواد بستر که این کار معمولاً با قراردادن لایه سنگچین (riprap) به همراه فیلتر یا بدون آن در اطراف پایه انجام می شود و کاهش قدرت عامل فرسایش (گرداب نعل اسبی و جریان رو به پایین) که برای نیل به این هدف، استفاده از یک صفحه گسترده با ضخامت کم (collar) در زیر و اطراف پایه، روی بستر مؤثر است. همچنین استفاده از صندوقه یا پای ستون (caisson) مرسوم است. بعضی از طراحان استفاده از پایه های با مقاومت کم در برابر جریان (stream line piers) را با هدف کاهش گرادیان های فشار و جلوگیری از جدایی لایه مرزی توصیه می کنند [۴]. اخیراً استفاده از شکاف (slot) در پایه، به عنوان راه حلی برای کاهش گرادیان فشار بین سطح آب و بستر و همچنین کاهش شدت جریان رو به پایین پیشنهاد شده است [۴]. به دلیل اینکه تحقیقات کمی در این زمینه صورت گرفته است، انجام تحقیقات بیشتر و گسترده تر در این باره ضروری به نظر می رسد.

بررسی منابع

محققانی چون چابرت و انگلدینگر (Chabert&Engeldinger,1956)، هینکو (Hanco,1965)، شن (Shen,1977)، بروسرز (Breusers,1977)، نیکولت (Nicollet,1977)، چی (Chee,1982) و چو (Chiew,1987) روابطی را برای محاسبه عمق آب شستگی در شرایط بستر زنده ارائه نموده اند [۵ و ۶]. در شرایط آب زلال نیز بروسرز (Breusers,1977)، اتما (Ettema,1980)، چو (Chiew,1995)، جین (Jain,1980)، لارسون (Laurson,1963)، ملویل (Melville,1999) و... روابط مختلفی را بیان نموده اند [۳]. کاملترین رابطه ارائه شده برای محاسبه حداکثر عمق آب شستگی توسط ملویل (Melville,1999) بیان شده است [۳]:

$$ds_e = k_{yD} k_i k_d \quad (1)$$

که ds_e ، k_{yD} ، k_i و k_d به ترتیب عمق آب شستگی حداکثر (حالت تعادل)، ضریب عمق جریان و قطر پایه، ضریب شدت جریان و ضریب اندازه ذرات با تعاریف زیر می باشند:

$$k_i = \begin{cases} \frac{V}{V_c} & \frac{V}{V_c} < 1 \\ 1 & \frac{V}{V_c} \geq 1 \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 0.75 \log(2.24 \frac{D}{d_{50}}) & \frac{D}{d_{50}} < 25 \\ 1 & \frac{D}{d_{50}} > 25 \end{cases} \quad (2)$$

$$k_{yD} = \begin{cases} 2.4D & \frac{D}{y} < 0.7 \\ 2(yD)^{0.5} & 0.7 < \frac{D}{y} < 5 \\ 4.5y & \frac{D}{y} > 5 \end{cases}$$

در رابطه فوق، D قطر پایه، y عمق جریان و d_{50} متوسط اندازه ذرات می باشند.

برای محاسبه V_c از نمودار شیلدز یا از فرمول زیر استفاده می شود (برای آب ۲۰ درجه سانتیگراد) [۷]:

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (3)$$

$$u_{*c} = \begin{cases} 0.0115 + 0.0125d^{1.4} & 0.1 \text{mm} \leq d \leq 1 \text{mm} \\ 0.305d^{0.5} - 0.0065d^{-1} & 1 \text{mm} \leq d \leq 100 \text{mm} \end{cases}$$

در رابطه بالا، d اندازه ذرات بستر که برای یک خاک غیر چسبنده متوسط اندازه ذرات بستر (d_{50}) برحسب میلیمتر در نظر گرفته می شود و u_{*c} سرعت برشی ذرات بستر می باشد. تغییرات عمق آب شستگی (ds) برحسب زمان به صورت تابعی نمایی پیشنهاد شده است [۳]:

$$\frac{ds}{ds_e} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{V_c}{V} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (4)$$

مطابق این رابطه، با دانستن زمان تعادل t_e (زمانی که در آن تغییرات عمق آب شستگی در ۲۴ ساعت کمتر از پنج درصد قطر پایه است [۳]) و عمق آب شستگی تعادل یا حد اکثر، عمق آب شستگی در هر زمان t محاسبه می گردد. برای محاسبه زمان تعادل روابط زیرارائه شده است [۶]:

$$t_e (\text{days}) = \begin{cases} 30.89 \frac{D}{V} \left(\frac{V}{V_c} \right) \left(\frac{y}{D} \right)^{0.25} & \frac{y}{D} \leq 6 \\ 48.26 \frac{D}{V} \left(\frac{V}{V_c} - 0.4 \right) & \frac{y}{D} > 6 \end{cases} \quad (5)$$

به عنوان مثال، در زمانی برابر ۰/۱ زمان تعادل، عمق آب شستگی (بسته به سرعت جریان) بین ۷۰ تا ۹۰ درصد عمق آب شستگی حالت تعادل می باشد.

ایده استفاده از شکاف در پایه های پل، اولین بار توسط چو (Chiew, 1992) به عنوان یکی از راههای پیشگیری و کنترل آب شستگی موضعی مطرح گردید [۴]. وی تصریح کرد که شکاف در پایه دو عملکرد مختلف دارد. اگر شکاف نزدیک بستر قرار داشته باشد، با ایجاد جت جریان افقی، جریان رو به پایین که یکی از عوامل فرسایش اطراف پایه است را به فاصله ای دورتر از پایه، منحرف می کند و باعث کاهش عمق آب شستگی می شود. اگر شکاف نزدیک سطح آب قرار داشته باشد، باعث کاهش عمق مؤثر جریان و در نتیجه کاهش گرادیان فشار بین سطح آب و کف می شود. این امر شدت جریان رو به پایین را کاهش می دهد و باعث کاهش عمق آب شستگی می شود. عرض، طول و موقعیت شکاف، پارامترهای مهم در کاهش آب شستگی هستند. در آزمایشهای چو (Chiew, 1992)، حداکثر کاهش عمق آب شستگی توسط شکاف نزدیک بستر با عرض یک چهارم قطر پایه و ارتفاع دو برابر آن برابر ۲۰ درصد و برای شکاف نزدیک سطح آب با ابعاد فوق، برابر ۵ درصد بوده است. کومار (Kumar) و همکاران، در سال ۱۹۹۹ با انجام آزمایشهایی تاثیر شکاف در پایه بر کاهش آب شستگی را بررسی نمودند. آنها از شکافهایی با عرض برابر یک چهارم و نصف قطر پایه و با ارتفاع بین ۰/۲ تا ۱/۸ برابر عمق آب استفاده کردند، به طوری که قسمت فوقانی شکاف نزدیک سطح آب بود و قسمت تحتانی آن در وضعیتهای مختلف قرار داشت. در این حالت نسبت آب شستگی پایه شکافدار به بدون شکاف را به صورت تابعی از عرض شکاف به قطر پایه و ارتفاع شکاف به عمق جریان بیان کردند [۸].

طرح مدل و شرایط آزمایش

آزمایشها روی پایه استوانه ای فلزی شکافدار وبدون شکاف انجام شد. بدین منظور، یک مدل بدون شکاف و چهار مدل شکافدار، با موقعیتهای گوناگون شکاف، ساخته شد. شکافهای مستطیلی با عرض یک چهارم قطر پایه ($w=0.25D$) و ارتفاع مساوی و دو برابر قطریه ($h=2D, h=D$) و در دو موقعیت نزدیک سطح آب و نزدیک بستر بودند (شکل ۱). زاویه محور شکاف و محور جریان، برابر صفر بود. آزمایشها در یک فلوم به ابعاد $32 \times 700 \times 36$ سانتیمتر و با شیب صفر انجام گردید. کف فلوم به جز در یک محدوده یک متری در وسط طول کانال، به وسیله سکوی فلزی بالا آورده شد. سپس، مدل پایه در فاصله ۴۰ سانتیمتر از بالادست و ۶۰ سانتیمتر از پایین دست محدوده، کار گذاشته شد. داخل این محدوده به وسیله مصالح غیر چسبنده با d_{50} برابر ۰/۶۱ میلیمتر، انحراف معیار برابر ۱/۲۳ و وزن مخصوص برابر ۲/۶۵ برگردید. برای ایجاد جریان همسان در لایه مرزی محدوده آزمایش و بالادست و پایین دست آن، روی سکوی فلزی بوسیله مصالح بستر پوشانده شد. ابتدا به کمک فرمولهای ارائه شده و مشاهدات چشمی، سرعت آستانه حرکت بحرانی (V_C) محاسبه گردید و بر اساس حداکثر عمق آب شستگی در حالت حد اکثر سرعت ($V=V_C$) ضخامت مصالح بستر تعیین شد. ضخامت بستر، سی درصد بیش از عمق حد اکثر آب شستگی انتخاب گردید. از یک پمپ با دبی حد اکثر ۱۱ لیتر بر ثانیه برای ایجاد جریان بین منبع و فلوم به صورت سیکل گردشی استفاده شد. برای محاسبه دبی جریان، یک دبی سنج حجمی که در انتهای فلوم قرار داشت مورد استفاده قرار گرفت. دبی در کلیه آزمایشها برابر دبی حد اکثر بود و تغییر سرعت جریان بوسیله تغییر عمق آب در فلوم با استفاده از یک دریچه کشویی واقع در انتهای کانال، صورت پذیرفت. برای اندازه گیری عمق آب شستگی در زمانهای مختلف و همچنین ارتفاع سطح آب، از یک عمق سنج با دقت ۰/۵ میلیمتر استفاده شد (با توجه به اندازه ذرات، این دقت کافی بود). این وسیله بر روی ریلی که روی فلوم قرار داشت و آزادانه میتوانست در جهت عرضی و طولی فلوم حرکت کند، نصب شد. بر اساس سرعت حداقل، برای شروع آب شستگی موضعی ($V=0.5 V_C$) حدا کثر عمق آب در کانال برابر ۲۰ سانتیمتر، اختیار شد [۳]. حد اقل عمق نیز بر اساس حد اکثر سرعت ممکن ($V=0.93 V_C$) برابر ۱۲ سانتیمتر انتخاب گردید. شیوه انجام آزمایش، بدین صورت بود که ابتدا پنج آزمایش با عمق آب برابر ۲۰، ۱۸، ۱۶، ۱۴ و ۱۲ سانتیمتر روی پایه استوانه ای فلزی بدون شکاف به قطر ۳۲ میلیمتر انجام شد و همین آزمایشها

برروی پایه های شکافدار نیز اعمال گردید.

انتخاب پارامترهای مختلف، با توجه به موارد زیر صورت گرفت:

برای جلوگیری از اثرات دیواره کانال بر آب شستگی موضعی نسبت عرض پایه به عرض کانال باید حداکثر $6/25$: باشد [۹]. در این آزمایشها، نسبت $10 : 1$ انتخاب شده است. با توجه به عرض 32 سانتیمتری فلوم، عرض پایه نیز 32 میلیمتر انتخاب شد.

برای جلوگیری از پدیده ریبیل (ripple)، باید متوسط اندازه ذرات، از $0.6 \text{ mm} < d_{50}$ [۳]. ضمناً برای اینکه اندازه ذرات در آب شستگی موضعی بی تاثیر باشد، باید نسبت قطر پایه به متوسط اندازه ذرات بیشتر از 50 باشد [2] $(D/d_{50} > 50)$. با توجه به انتخاب اندازه قطر پایه برابر 32 میلیمتر، محدوده متوسط اندازه ذرات باید بین 0.6 و 0.64 میلیمتر باشد. مصالح انتخابی گذشته از الکهای متوالی یونیفاید دارای متوسط اندازه ذرات برابر 0.61 میلیمتر بود. انحراف معیار اندازه ذرات باید کمتر از $1/3$ باشد که برابر $1/23$ بود [۲].

برای حذف اثر عمق جریان بر آب شستگی موضعی، عمق جریان باید بیش از سه برابر اندازه قطر پایه $(y/D > 3)$ باشد [۲]. بنابر این، عمق جریان در بالادست پایه باید حداقل $9/6$ سانتیمتر باشد. لیکن، چون حداکثر سرعت برای ایجاد آبشستگی آب زلال در آزمایشها در عمق 12 سانتیمتر اتفاق می افتد، لذا حداقل عمق آب در بالادست پایه برابر 12 سانتیمتر انتخاب گردید. حد اکثر عمق نیز متناسب با حد اقل سرعت $(V=0.5 \text{ Vc})$ برابر 20 سانتیمتر در نظر گرفته شد. با توجه به حداکثر عمق آب شستگی در حداکثر سرعت، با آزمایش و محاسبه و افزایش حدود 30 درصدی آن، ضخامت بستر برابر 10 سانتیمتر انتخاب شد.

نتیجه گیری و بحث

آزمایشهای انجام شده برروی پایه بدون شکاف نشان داد (جدول ۱) که عمق آب شستگی حداکثر نسبت به فرمول (۱) بین $12/2$ تا 5 درصد، اختلاف دارد. این اختلاف در سرعتهای پایین که آب شستگی کمتری را ناشی می شوند، بیشتر و در سرعتهای بالا کمتر است. در شکلهای شماره ۲ تا ۶ نیز این موضوع نمایان است.

با توجه به شکلهای ۲ تا ۶ مشاهده می شود که شکاف نزدیک بستر عملکرد بهتری نسبت به شکاف نزدیک سطح آب در کاهش آب شستگی دارد. تنها استثنا در حداقل سرعت (عمق برابر 20 سانتیمتر) اتفاق می افتد که شکاف بزرگ سطح آب نسبت به شکافهای دیگر در مراحل نهایی عمق آب شستگی کمتری دارد.

ابعاد و موقعیت شکاف، اثرات مختلفی بر عمق آب شستگی داشت. جداول ۲ تا ۵ در صد کاهش عمق آب شستگی پایه شکافدار نسبت به پایه بدون شکاف را در زمانهای مختلف، نشان می دهند. مطابق جداول ۳ و ۲، شکافهای بزرگ و کوچک نزدیک بستر اثرات متفاوتی را بر آب شستگی دارند، به طوری که شکاف با طول بزرگتر نزدیک بستر در طی زمان، رفته رفته میزان عمق آب شستگی را نسبت به شکاف کوچکتر، بیشتر کاهش می دهد. به عنوان مثال، در عمق برابر 20 سانتیمتر که کمترین سرعت را داریم گرچه در 2 ساعت اول آزمایش، شکاف کوچکتر، عمق آب شستگی را بیشتر کاهش داده است، ولی پس از آن درصد این کاهش برای شکاف بزرگتر، بیشتر بوده است. در سرعتهای بالاتر (عمقهای کمتر جریان)، شکاف بزرگتر از همان دقایق ابتدایی مؤثرتر از شکاف کوچک عمل می کند و این روند تا پایان آزمایش ادامه دارد. به عنوان مثال، در سرعت حداکثر متناسب با عمق 12 سانتیمتر، درصد کاهش آب شستگی در 5 دقیقه اول، برای شکاف بزرگ و کوچک نزدیک بستر به ترتیب $9/5$ و $2/7$ درصد بوده است، در حالیکه در زمان برابر 6 ساعت، این مقدار برای شکاف بزرگ، $6/5$ درصد و برای شکاف کوچک، صفر درصد می باشد.

جداول ۴ و ۵ درصد کاهش عمق آب شستگی، توسط شکاف بزرگ و کوچک نزدیک سطح آب را نشان می دهد. با مقایسه اعداد موجود در دو جدول، مشاهده می شود که شکاف بزرگتر اثر بهتری در کنترل آب شستگی دارد. به عنوان مثال، در

عمق حداکثر و در زمان ۵ دقیقه، میزان کاهش آب شستگی برای شکافهای بزرگ و کوچک به ترتیب ۷۵ و ۱۶/۷ درصد بوده است. با افزایش سرعت، این میزان کاهش یافته و حتی به صفر و مقدار منفی می رسد. این بدان معناست که شکاف نزدیک سطح آب به جز در دقایق اولیه، نه تنها باعث کاهش و کنترل آب شستگی موضعی نمی شود، بلکه آن را نیز افزایش می دهد. بنابر این، به نظر می رسد شکاف نزدیک سطح آب راه حل خوبی برای کنترل و کاهش آب شستگی موضعی نباشد. نمودارهای ۲ تا ۶ تغییرات عمق آب شستگی نسبت به زمان را برای پایه بدون شکاف و پایه های شکافدار در عمقهای مختلف جریان، نشان می دهند.

مراجع

- [1] Chiew, Y.M. (1995). "Mechanics of riprap failure at bridge piers." *J. Hydr. Engrg ASCE*, 121(9), 635-643.
- [2] Raudkivi A.J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherland.
- [3] Melville, B.W. and Chiew Y.M. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125(1), 59-65.
- [4] Chiew, Y.M. (1992). "Scour protection at bridge piers." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 118(9), 1260-1269.
- [5] Breusers, H.N.C., Nicollet, G., and Shen, H.W. (1977). "Local scour around cylindrical piers." *J. Hydr. Res., IAHR*, 15(3), 211-252.
- [6] Chiew, Y.M., and Melville, B.W. (1987). "Local scour at bridge piers." *J. Hydr. Res., IAHR*, 25(1), 15-26.
- [7] Melville, B. W. (1997). "Pier and abutment scour-an integrated approach." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 123(2), 125-136.
- [8] Kumar, V., Ranga Raju, K. G., and Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collar." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 125(12), 1302-1305.
- [9] Ettema, R. and Raudkivi, A. J. (1983) . "Clear water scour at cylindrical piers." *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 109(3) 338-349.

جدول ۱ - نتایج آزمایشهای اندازه گیری عمق آب شستگی پایه بدون شکاف

عمق آب y(cm)	سرعت جریان V(cm/sec)	سرعت آستانه V _C (cm/sec)	V/V _C	ds _e (cm) تئوری	ds _e (cm) آزمایش	اختلاف تئوری و آزمایش (درصد)
۲۰	۱۷/۲	۳۳/۲	-۰/۵۱	۳/۹۲	۴/۴	۱۲/۲
۱۸	۱۹/۱	۳۲/۷	-۰/۵۸	۴/۴۵	۴/۹	۱۰/۱
۱۶	۲۱/۵	۳۲/۱	-۰/۶۷	۵/۱۴	۵/۷	۱۰/۸
۱۴	۲۴/۵	۳۱/۵	-۰/۷۸	۶	۶/۴	۶/۶
۱۲	۲۸/۶	۳۰/۹	-۰/۹۳	۷/۱۴	۷/۵	۵

جدول ۲ - درصد کاهش عمق آب شستگی پایه شکافدار در نزدیک بستر نسبت به پایه بدون شکاف (D=3.2cm, h=6.4cm)

نهایی	۲۴ ساعت	۱۲ ساعت	۶ ساعت	۳ ساعت	۲ ساعت	۶۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۱۰ دقیقه	۵ دقیقه	V _C cm/s	V cm/s	Y Cm
---	---	۱۸/۸	۲۴/۳	۱۸/۲	۲۰/۶	۱۹/۲	۱۸/۸	۳۰/۸	۶۸/۴	۱۰۰	۳۳/۲	۱۷/۲	۲۰
---	---	۱۷/۴	۲۲/۲	۲۳/۸	۲۲/۵	۲۵	۳۵/۳	۴۹/۱	۷۵	۱۰۰	۳۲/۷	۱۹/۱	۱۸
۷	۷/۱	۷/۶	۸/۲	۹/۸	۱۳/۳	۹/۹	۱۴/۷	۱۵/۷	۱۲/۹	۸	۳۲/۱	۲۱/۵	۱۶
---	---	۱۳/۲	۱۵/۸	۱۷/۳	۱۶/۳	۱۹/۱	۱۷/۵	۱۸/۴	۲۵	۱۹/۴	۳۱/۵	۲۴/۵	۱۴
---	۵/۶	۶/۱	۶/۵	۱۲/۳	۱۴/۵	۸/۷	۱۲/۲	۱۱/۱	۸/۸	۹/۵	۳۰/۹	۲۸/۶	۱۲

کنترل و کاهش آب شستگی موضعی

جدول ۳ - درصد کاهش عمق آب شستگی پایه شکافدار در نزدیک بستر نسبت به پایه بدون شکاف (D=3.2cm, h=3.2cm)

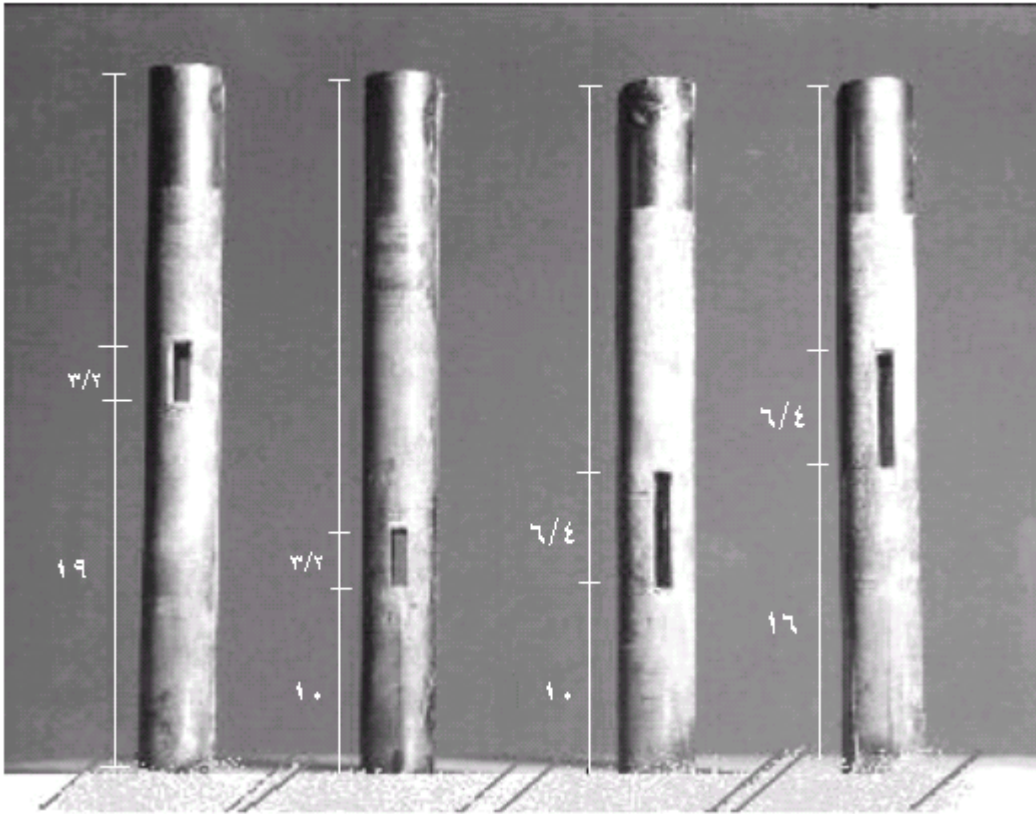
نهایی	۲۴ ساعت	۱۲ ساعت	۶ ساعت	۳ ساعت	۲ ساعت	۶۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۱۰ دقیقه	۵ دقیقه	V_c cm/s	V cm/s	y cm
---	---	۱۰	۱۱/۲	۱۸/۲	۳۰/۲	۵۰	۵۰	۵۳/۸	۱۰۰	۱۰۰	۳۳/۲	۱۷/۲	۲۰
---	۱۰/۸	۱۳	۱۸/۵	۱۵/۵	۱۶/۲	۱۶/۷	۲۰/۶	۱۵/۳	۱۶/۷	۲۶	۳۲/۷	۱۹/۱	۱۸
---	---	۱۲/۳	۱۴/۸	۱۴/۹	۱۳/۳	۱۵/۶	۱۵/۶	۱۷/۸	۱۶/۹	۱۷/۳	۳۲/۱	۳۱/۵	۱۶
---	---	۱۱/۶	۱۰/۵	۹/۶	۷/۱	۷/۸	۷/۵	۷/۹	۱۱/۱	۹/۷	۳۱/۵	۲۴/۵	۱۴
۰	۰	۰	۰	۴/۸	۳/۴	۰	۶/۱	۳۳/۳	۲/۵	۲/۷	۳۰/۹	۲۸/۶	۱۲

جدول ۴ - درصد کاهش عمق آب شستگی پایه شکافدار در نزدیک سطح آب نسبت به پایه بدون شکاف (D=3.2cm, h=6.4cm)

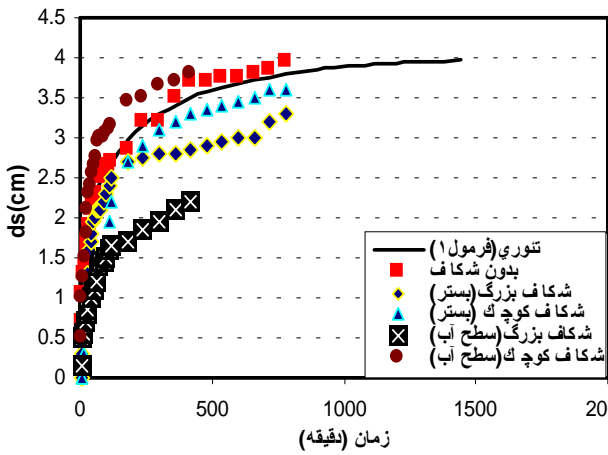
نهایی	۲۴ ساعت	۱۲ ساعت	۶ ساعت	۳ ساعت	۲ ساعت	۶۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۱۰ دقیقه	۵ دقیقه	V_c cm/s	V cm/s	y cm
---	---	---	۴۷/۳	۴۸/۵	۴۷/۶	۵۳/۸	۴۶/۸	۴۶/۱	۴۷/۳	۷۵	۳۳/۲	۱۷/۲	۲۰
---	---	---	۶/۷	۴/۸	۵	۵/۶	۱۰/۳	۵/۱	۴/۲	۶/۷	۳۲/۷	۱۹/۱	۱۸
---	---	---	۵	۴/۳	۳/۳	۲/۴	۳/۹	۶/۸	۷/۷	۳۴/۱	۳۲/۱	۳۱/۵	۱۶
---	---	-۱	۵/۲	۳/۷	۱	۱/۱	-۲/۴	-۲/۵	۰	-۱۲	۳۱/۵	۲۴/۵	۱۴
---	---	-۱/۵	-۱/۶	۴/۹	۳/۳	-۵/۶	-۶/۱	-۸/۹	-۱۰	-۶/۵	۳۰/۹	۲۸/۶	۱۲

جدول ۵ - درصد کاهش عمق آب شستگی پایه شکافدار در نزدیک سطح آب نسبت به پایه بدون شکاف (D=3.2cm, h=3.2cm)

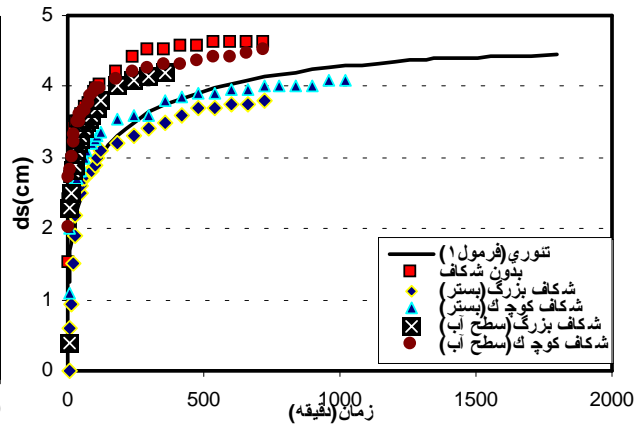
نهایی	۲۴ ساعت	۱۲ ساعت	۶ ساعت	۳ ساعت	۲ ساعت	۶۰ دقیقه	۳۰ دقیقه	۲۰ دقیقه	۱۰ دقیقه	۵ دقیقه	V_c cm/s	V cm/s	y cm
---	---	---	-۲/۸	-۴/۵	۰	-۶	-۳۱	-۱۵	-۵/۳	۱۶/۷	۳۳/۲	۱۷/۲	۲۰
---	۰	۲/۲	۴/۴	۲/۴	۱/۳	-۱/۴	۲/۹	-۱/۷	-۱۲	-۳۳	۳۲/۷	۱۹/۱	۱۸
---	---	---	۴	۲/۱	۲/۲	۳/۶	۳/۹	۴/۱	۶/۱۵	۱۰/۳	۳۲/۱	۳۱/۵	۱۶
---	---	-۲/۱	-۱/۷	-۲/۴	-۲/۷	-۲/۳	-۲/۴	-۲/۵	۲/۷	-۳/۱	۳۱/۵	۲۴/۵	۱۴
---	-۴/۳	-۶	-۵/۶	-۱/۴	۰	-۵/۸	-۲	-۷/۷	-۱۰	-۸/۱	۳۰/۹	۲۸/۶	۱۲



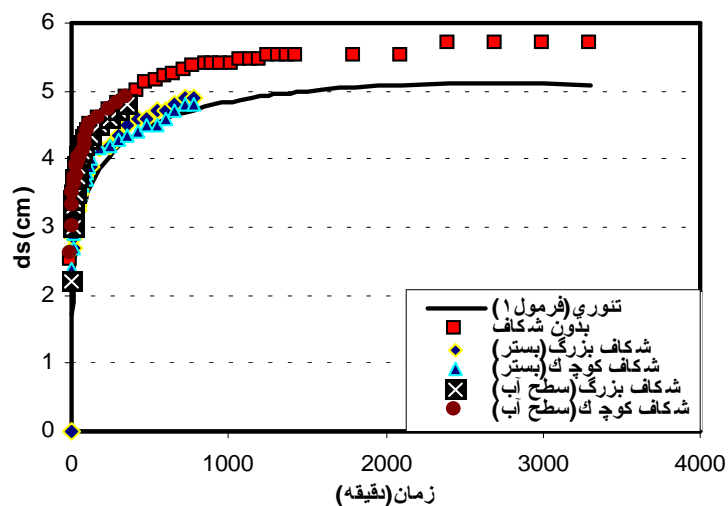
شکل ۱- مدل پایه پیل استوانه ای شکافدار



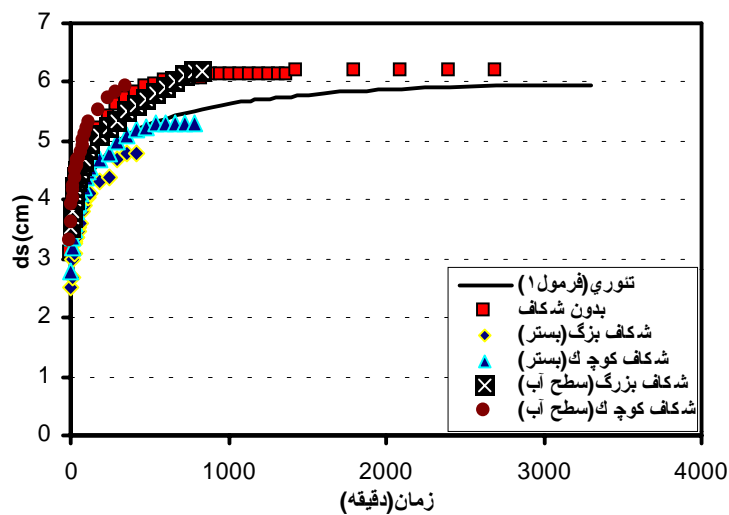
شکل ۲- تغییرات عمق آب شستگی بر حسب زمان (عمق ۲۰ سانتیمتر)



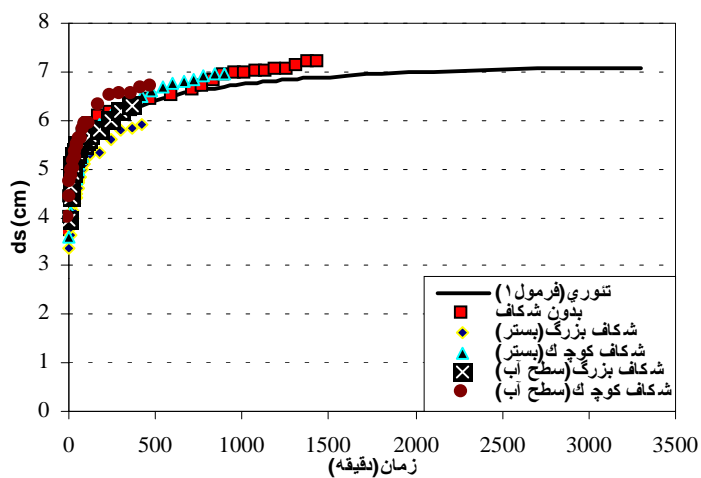
شکل ۳- تغییرات عمق آب شستگی بر حسب زمان (عمق ۱۸ سانتیمتر)



شکل ۴- تغییرات عمق آب شستگی بر حسب زمان (عمق برابر ۱۶ سانتیمتر)



شکل ۵- تغییرات عمق آب شستگی بر حسب زمان (عمق برابر ۱۴ سانتیمتر)



شکل ۶- تغییرات عمق آب شستگی بر حسب زمان (عمق برابر ۱۲ سانتیمتر)