

## بررسی تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی و تنش برشی در جلوی پایه پل

مجتبی کریمائی طبرستانی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸-۰۴-۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸-۰۹-۱۸ تاریخ چاپ: ۱۳۹۹-۰۲-۲۲

### چکیده

گرداب نعل اسبی در جلوی پایه پل نتیجه نهایی ناشی از گرادبان فشار معکوس بر روی بستر بالادست پایه می باشد. بررسی مراجع نشان می دهد دیدگاه های مختلفی در مورد نحوه و زمان تشکیل شدن گرداب نعل اسبی وجود دارد. بر این اساس در تحقیق حاضر اقدام به بررسی نظرات مختلف در مورد نحوه شکل گیری گرداب نعل اسبی در جلوی پایه پل می گردد. بررسی مراجع نشان می دهد که هر سه شکل وجود گرداب نعل اسبی قبل از شکل گیری حفره آبستنگی، در لحظه شکل گیری و بعد از آن مورد تایید محققین مختلف است. در ادامه با جمع آوری داده های آزمایشگاهی مختلف اقدام به محاسبه اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره و همچنین تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی با افزایش عمق آبستنگی می گردد. نتایج محاسبات نشان می دهد که منحنی تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی مشابه با عمق آبستنگی بوده که در نهایت به یک مقدار ثابت میل می کند. همچنین اندازه گرداب نعل اسبی محاسبه شده با روش های مختلف در شرایط تعادل حفره از ۰/۳ تا ۳/۳ برابر عمق آبستنگی تعادلی بوده و تابعی از پارامترهای مختلف نظیر اندازه دانه های بستر و قطر پایه پل می باشد. در نهایت روشی برای محاسبه تغییرات زمانی تنش برشی اعمالی به بستر جلوی پایه با توجه به اندازه گرداب نعل اسبی ارائه شد. در این روش با افزایش اندازه گرداب نعل اسبی، تنش برشی در جلوی پایه پل از ۴ برابر تنش برشی در بالادست پایه تا مقدار تنش برشی آستانه حرکت دانه های بستر کاهش می یابد.

**واژه های کلیدی:** پایه پل، گرداب نعل اسبی، تنش برشی، عمق آبستنگی

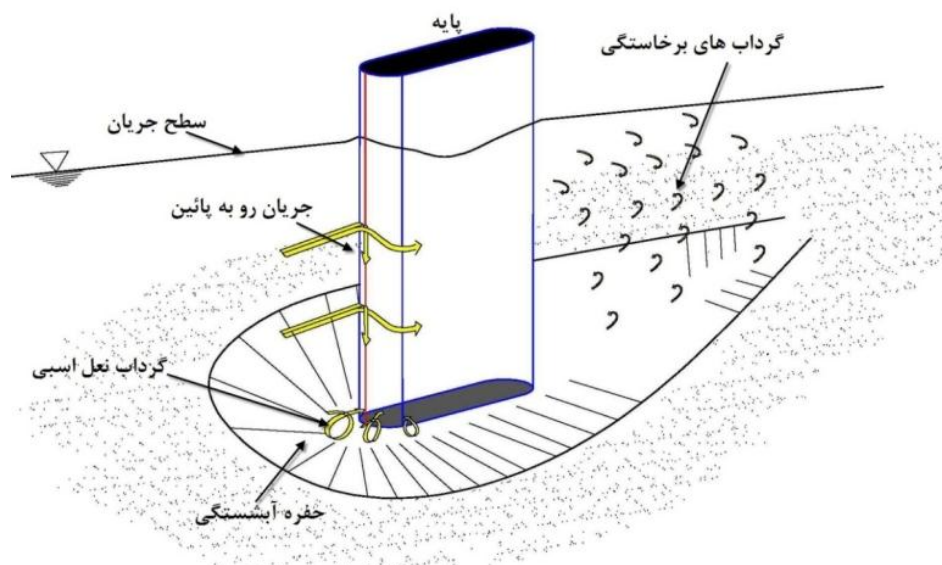
<sup>۱</sup> استادیار مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

\* نویسنده مسئول: karimaei@sru.ac.ir

## مقدمه

الگوی جریان و تنش برشی می‌شود. این موضوع علت عمده تخریب پل‌ها در جهان می‌باشد. رودکیوی (۱۹۹۸) الگوی جریان سه‌بعدی حول پایه را متشکل از جریان رو به پائین<sup>۱</sup> و دو نوع سیستم گردابی شامل گرداب نعل اسبی<sup>۲</sup> و گرداب‌های برخاستگی<sup>۳</sup> را به عنوان عامل مهم در فرآیند آبشستگی موضعی معرفی می‌کند. در شکل (۱) الگوی جریان سه‌بعدی به همراه گودال آبشستگی تشکیل شده در اطراف پایه مستطیلی نشان داده شده است.

وقتی که پایه‌ها و یا کوله‌های پل در مسیر یک آبراه رسوبی قرار می‌گیرند، الگوی جریان در اطراف این سازه‌ها دچار تغییرات شدیدی می‌شود. پایه پل تولید یک گردایان فشار معکوس در بالادست خود می‌کند. لایه مرزی در بالادست پایه متحمل یک جدانشدگی سه‌بعدی می‌شود. توزیع تنش برشی در اطراف پایه به علت شکل‌گیری گرداب نعل اسبی شدیداً تغییر می‌کند که نتیجه آن شکل-گیری حفره آبشستگی در اطراف پایه و در ادامه تغییر



شکل (۱) الگوی جریان سه‌بعدی به همراه گودال آبشستگی تشکیل شده در اطراف پایه مستطیلی.

دنباله گرداب نعل اسبی در پائین‌دست پایه ضعیف شده و در آشفتگی جریان محو می‌شود. افزایش عمق و وسعت گودال آبشستگی توسط گرداب نعل اسبی آنقدر ادامه می‌یابد تا حجم آب داخل گودال باعث استهلاک انرژی گرداب شود. در اینصورت، پیشرفت آبشستگی نامحسوس می‌گردد.

تحقیقات مختلفی در زمینه شناسایی ساختار و عملکرد گرداب‌های نعل اسبی در مراجع مختلف موجود است. ملویل (۱۹۷۵) اولین کسی بود که اقدام به اندازه-گیری میدان جریان آشفته در داخل حفره آبشستگی در شرایط بستر صاف، در میانه فرآیند آبشستگی و نیز در شرایط تعادل حفره نمود. طبق نظر این محقق بعد از شکل‌گیری حفره آبشستگی، گرداب نعل اسبی اولیه به داخل حفره آبشستگی کشیده شده و گسترش می‌یابد.

وقتی که جریان به دماغه پایه پل برخورد می‌کند، سرعتش صفر شده و تقریباً تمامی انرژی جنبشی آن به هد فشار تبدیل می‌شود. از آنجا که طبق پروفیل سرعت جریان نسبت به عمق، مقدار سرعت از بستر رودخانه به طرف سطح آب افزایش می‌یابد، فشار بیشتری در ترازهای بالاتر روی پایه ایجاد می‌شود. بعلاوه تمایل حرکت از ناحیه با فشار بالا به ناحیه با فشار پائین‌تر، یک جریان رو به پائین همانند یک جت آب قائم در جلوی پایه تشکیل می‌شود. با حفر بستر در جلوی پایه، جریان رو به پائین به داخل حفره نفوذ می‌کند و با چرخش به طرف بالادست، گردابی را به وجود می‌آورد که در پلان به نعل اسب شبیه است و به آن گرداب نعل اسبی می‌گویند (شکل ۱). سیستم گرداب نعل اسبی در ابتدا کوچک و ضعیف است ولی با رشد حفره آبشستگی به اندازه و قدرت این گرداب افزوده می‌شود.

<sup>3</sup> Wake vortices

<sup>1</sup> Down flow

<sup>2</sup> Horse-shoe vortex

$$A_s = \frac{1}{2} \times L_u \times d_s = \frac{m}{2} \cdot d_s^2 \quad (۴)$$

که در آن  $L_u$  طول حفره در بالادست پایه و  $d_s$  عمق آبشستگی می‌باشد. مقدار پارامتر  $m$  با توجه به شیب جداره حفره آبشستگی که برابر با زاویه قرار مصالح یعنی ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است برابر با ۱/۷۳ می‌باشد.

تی‌سنگ و همکاران (۲۰۰۰) یک مطالعه عددی بر روی میدان جریان آشفتنه و سه‌بعدی در اطراف پایه‌های دایره‌ای و مربعی انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که محدوده گرداب نعل اسبی و شدت تنش برشی بستر در حالت پایه مربعی بزرگتر از پایه دایره‌ای می‌باشند. موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) اقدام به مطالعه مشخصات گرداب نعل اسبی در اطراف یک پایه استوانه‌ای شکل نمودند. این محققین با اعتقاد به اینکه گرداب نعل اسبی اولیه در جلوی پایه عامل اولیه شکل‌گیری حفره آبشستگی در جلوی پایه پل می‌باشد، تغییرات آنرا در طول گسترش حفره آبشستگی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. طبق باور این محققین شکل مقطع گرداب نعل اسبی در صفحه قائم در جلوی پایه به صورت یک بیضی است. ایشان رابطه ساده زیر برای برآورد قطر گرداب نعل اسبی که به صورت متوسط قطرهای بزرگ و کوچک گرداب واقعی بیضی شکل تعریف می‌شود، ارائه نمودند:

$$\frac{D_v}{B} = 0.8 \frac{d_s}{B} \quad (۵)$$

نکته دیگر اینکه این محققین اشاره نمودند که ناحیه تحت تاثیر گرداب نعل اسبی در اطراف پایه برابر با  $1.8B$  تا  $2B$  است که می‌توان از آن برای طراحی محدوده سازه‌های حفاظت از آبشستگی در نظر گرفت. مطالعات مختلف در زمینه طراحی طوق بر روی بستر دور پایه نشان می‌دهد که قطر مناسب ۳ برابر قطر پایه می‌باشد که در تراز بستر نصب شده باشد (کریمایی و زراتی ۲۰۱۲).

درگاهی (۱۹۸۹) با انجام یک مطالعه گسترده بر روی ساختارهای جریان در اطراف پایه‌های پل بر روی بستر ثابت نشان داد که گرداب‌های نعل اسبی متعددی به طور همزمان در بالادست پایه حضور دارند. کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) در تحقیق آزمایشگاهی خود اقدام به برداشت اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط جریان مختلف نمود. این محققین اقدام به اندازه‌گیری ضخامت لایه مرزی جدا شده به عنوان اندازه گرداب اولیه نمودند. شکل (۲) نمایی از گرداب نعل اسبی اولیه و بعد از شکل‌گیری حفره آبشستگی را نشان می‌دهد. ایشان رابطه زیر را برای برآورد اندازه گرداب اولیه  $D_v$  ارائه نمودند (شکل ۲ - الف):

$$\frac{D_v}{y} = 0.28 \times \left( \frac{B}{y} \right)^{0.85} \quad (۱)$$

که در آن  $B$  قطر پایه دایره‌ای یا عرض پایه پیشانی - گرد و  $y$  عمق جریان است.

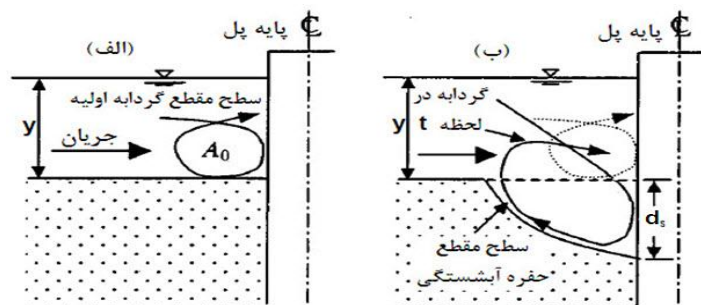
این محققین در ادامه با بیان اینکه با افزایش عمق آبشستگی، سطح مقطع گرداب نعل اسبی بزرگتر می‌شود، رابطه زیر را برای محاسبه اندازه گرداب نعل اسبی در زمان‌های مختلف ارائه نمودند (شکل ۲ - ب).

$$A_t = A_0 + A_s \quad (۲)$$

که در آن  $A_t$  سطح مقطع گرداب نعل اسبی تشکیل شده در جلوی پایه در لحظه  $t$  و  $A_0$  سطح مقطع گردابه اولیه که با توجه به شکل تقریباً دایره‌ای گرداب از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_0 = \frac{\pi}{4} D_v^2 \quad (۳)$$

و همچنین  $A_s$  سطح مقطع گودال آبشستگی در جلوی پایه پل که با توجه به شکل (۲ - ب) عبارت خواهد بود از:



شکل (۲) نمایی از گردابه نعل اسبی: (الف) قبل از آبشستگی و (ب) بعد از تشکیل حفره آبشستگی (کوتیاری و همکاران ۱۹۹۲).

$$T_0 = 0.25 \cdot F_t^{-3/2} (z_R / d_{50}) \quad (7)$$

$z_R$  طول مشخصه مربوط به ارتباط مابین قطر پایه و عمق جریان است که به صورت  $z_R = (y \cdot B^2)^{1/3}$  تعریف می‌شود.

$F_d$  عدد فرود دانه‌های رسوب بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_d = V_0 / (g' \cdot d_{50})^{1/2} \quad (8)$$

$g'$  شتاب ثقل کاهش یافته بوده و به صورت  $g' = (\rho_s - \rho / \rho)g$  تعریف می‌شود و در آن  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  و  $\rho_s$  به ترتیب چگالی جریان و دانه‌های رسوب می‌باشند و  $d_{50}$  اندازه متوسط دانه‌های بستر است.

$F_t$  عدد فرود بحرانی جریان نزدیک شونده است که به صورت  $F_t = V_0 / V_t$  تعریف می‌شود و  $V_t$  سرعت متوسط بحرانی جریان نزدیک شونده به پایه جهت حرکت رسوبات بستر بوده که عبارتست از:

$$\begin{aligned} V_t &= 2.33 (g' \cdot d_{50})^{1/2} \cdot \sigma^{1/3} \cdot D_*^{-0.25} \cdot (R_h / d_{50})^{1/6} & D_* \leq 10 \\ V_t &= 1.88 (g' \cdot d_{50})^{1/2} \cdot \sigma^{1/3} \cdot D_*^{1/12} \cdot (R_h / d_{50})^{1/6} & 10 < D_* < 150 \\ V_t &= 1.65 (g' \cdot d_{50})^{1/2} \cdot \sigma^{1/3} (R_h / d_{50})^{1/6} & D_* \geq 150 \end{aligned} \quad (9)$$

ترتیب اندازه رسوبی که ۱۶ و ۸۴ درصد وزنی دانه‌های رسوب از آنها کمتر باشند.

لینک و همکاران (۲۰۰۸) اقدام به مطالعه اثر سیستم گرداب نعل اسبی بر روی توسعه گستره آبخستگی حفره آبخستگی در اطراف یک پایه استوانه‌ای نمودند. طبق نظر این محققین، سه گرداب نعل اسبی در داخل حفره آبخستگی قرار دارد (شکل ۳ - الف). این محققین اقدام به محاسبه عددی جریان در داخل حفره آبخستگی با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۲</sup> نمودند و توانستند گرداب‌های مختلف داخل حفره آبخستگی را بدست آورند (شکل ۳ - ب). داس و همکاران (۲۰۱۳) با مقایسه مشخصات گرداب نعل اسبی در جلوی پایه دایره‌ای و

آنر و هگر (۲۰۰۷) اقدام به مطالعه جریان رو به پایین و همچنین مشخصات گرداب نعل اسبی در اطراف پایه پل در معرض آبخستگی موضعی نمودند. در این مطالعه از روش PIV<sup>۱</sup> برای مطالعه ساختار داخلی جریان در اطراف پایه پل استفاده نمودند. این محققین با اندازه‌گیری میدان سرعت در نقاط مختلف جریان در اطراف پایه پل به این نتیجه رسیدند که در ابتدا یک گرداب اولیه که قابلیت ایجاد آبخستگی ندارد در جلوی پایه وجود دارد ولی به تدریج با شکل‌گیری حفره آبخستگی در جلوی پایه پل گرداب اولیه از بین رفته و گرداب نعل اسبی در داخل حفره آبخستگی شکل می‌گیرد که با افزایش عمق آبخستگی اندازه این گرداب افزایش می‌یابد. در نهایت این محققین با توجه به نتایج آزمایشگاهی رابطه زیر را برای اندازه گرداب نعل اسبی پیشنهاد نمودند:

$$\frac{d_v}{z_R} = 0.03 \cdot F_t^{-1/2} \cdot F_d^{3/2} \cdot \log (T_s / T_0) \quad (6)$$

که در آن  $T_0$  مدت زمان شکل‌گیری حفره آبخستگی از شروع آزمایش است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

که در آن  $R_h$  شعاع هیدرولیکی جریان و  $D_*$  عدد بی‌بعد مربوط به دانه‌های رسوب است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$D_* = (g' \cdot v^2)^{1/3} / d_{50} \quad (10)$$

که در آن لزجت  $\nu$  سینماتیک سیال می‌باشد.  $T_s$  زمان نسبی آبخستگی است که به صورت  $T_s = t / t_R$  تعریف می‌شود و در آن  $t$  زمان و  $t_R$  پارامتر زمان مرجع است که به صورت  $t_R = z_R / (\sigma^{1/3} (g' \cdot d_{50})^{1/2})$  بیان می‌شود و  $\sigma$  ضریب غیریکنواختی دانه‌های رسوب می‌باشد که به صورت  $\sigma = (d_{84} / d_{16})^{1/2}$  در آن  $d_{84}$  و  $d_{16}$  به

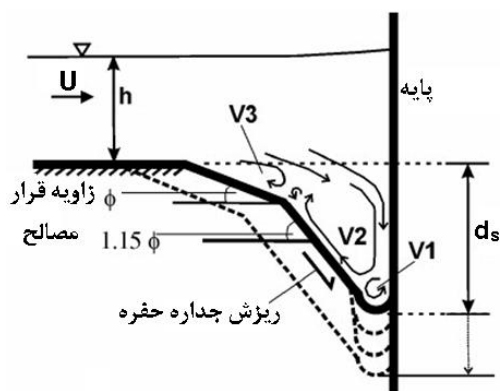
<sup>2</sup> Large Eddy Simulation

<sup>1</sup> Particle Image Velocimetry

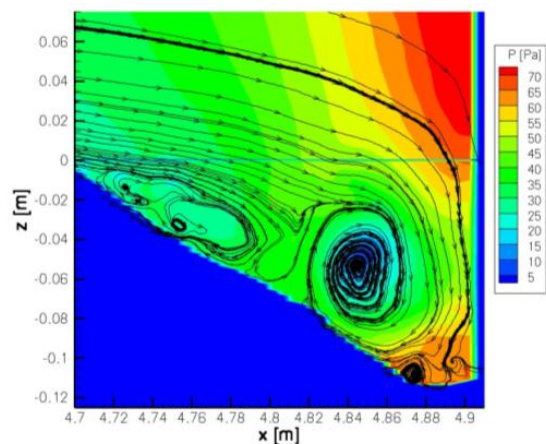
گرداب نعل اسبی اولیه شکل می‌گیرد و بعد ضمن ایجاد حفره آبشستگی، با افزایش اندازه گرداب نعل اسبی، عمق آبشستگی گسترش می‌یابد. محققین دیگر نظیر ملویل (۱۹۷۵) و موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) معتقدند که گرداب نعل اسبی اولیه وجود ندارد و بلافاصله با شکل‌گیری گرداب نعل اسبی، حفره آبشستگی شکل گرفته و با افزایش اندازه آن، عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. در نهایت محققینی چون آنگر و هگر (۲۰۰۷) معتقدند که گرداب نعل اسبی عامل اولیه آبشستگی نیست، بلکه این گرداب پس از ایجاد حفره آبشستگی و با گذشت یک زمان مشخص در جلوی پایه توسط جریان رو به پائین تشکیل می‌شود و سپس به پیشرفت آبشستگی کمک می‌کند. در نتیجه در مورد نحوه شکل‌گیری گرداب نعل اسبی، اندازه آن و در نهایت اثرات آن در مراجع مختلف اختلاف نظر وجود دارد. بر این اساس در تحقیق حاضر، ضمن مطالعه بر روی مراجع مختلف، اندازه گرداب نعل اسبی در جلوی پایه پل مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی مختلف اقدام به مقایسه سه نظریه فوق در مورد اندازه گرداب نعل اسبی می‌گردد. در نهایت نیز روشی جهت تعیین تغییرات تنش برشی با زمان در جلوی پایه پل ارائه می‌شود.

مربعی پل نشان دادند که اندازه گرداب نعل اسبی در پایه دایره‌ای کوچکتر از پایه مربعی است و پارامتر چرخش گرداب یا ورتیسیتی ( $\omega$ ) مربوط به گرداب نعل اسبی در پایه دایره‌ای تقریباً به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد ضعیف‌تر از پایه مربعی است. راجو و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای را بر روی سیال هوا انجام دادند و نتایج این تحقیق نشان داد که اندازه گرداب نعل اسبی تابعی از شکل، اندازه و میزان کجی پایه نسبت به راستای جریان می‌باشد. در نهایت گوان و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای که هدف آن مطالعه بر روی جزئیات میدان جریان آشفته در داخل حفره آبشستگی در اطراف یک پایه دایره‌ای بود اشاره نمودند که در شرایط گسترش حفره آبشستگی، گرداب نعل اسبی از یک گرداب کوچک اولیه به یک سیستم شامل سه گرداب مختلف تبدیل می‌شود. مطالعات دیگری نیز اخیراً در زمینه ساختارهای جریان در اطراف پایه انجام شده است که عبارتند از آپسیلیدیس و همکاران (۲۰۱۶)، شاندرل و منهارت (۲۰۱۶)، چن و همکاران (۲۰۱۷)، و شاندرل و همکاران (۲۰۱۷).

جمع‌بندی بررسی مراجع مختلف نشان می‌دهد که گرداب نعل اسبی به عنوان اصلی‌ترین عامل در گسترش حفره آبشستگی مطرح است. همچنین در بعضی از موارد محققین مختلف نظرات متفاوتی نسبت به اثرات این ساختار دارند به عنوان نمونه محققینی چون درگاهی (۱۹۸۹) و کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) معتقدند که گرداب نعل اسبی اول بوجود می‌آید و باعث ایجاد آبشستگی دور پایه می‌شود. طبق نظر این محققین اول



(الف)



(ب)

شکل (۳) سیستم گرداب‌های جلوی پایه پل در مطالعه لینک و همکاران (۲۰۰۸).

(۴) تغییرات زمانی عمق آبشستگی در تحقیقات محققین مختلف ارائه شده است. نتایج این آزمایشات برای بررسی تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی به کار می‌روند. در جدول (۲) محدوده داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر برای بررسی اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره ارائه شده است. در نهایت اشاره می‌شود که برای محاسبه تغییرات تنش برشی در جلوی پایه در زمان-های مختلف از نتایج آزمایشگاهی محققین دیگر نظیر اتما (۱۹۸۰) چیو (۱۹۹۵)، میا و ناگو (۲۰۰۳)، چنگ و همکاران (۲۰۰۴) و کریمایی و زراتی (۲۰۱۷) استفاده می‌گردد.

### تحلیل نتایج

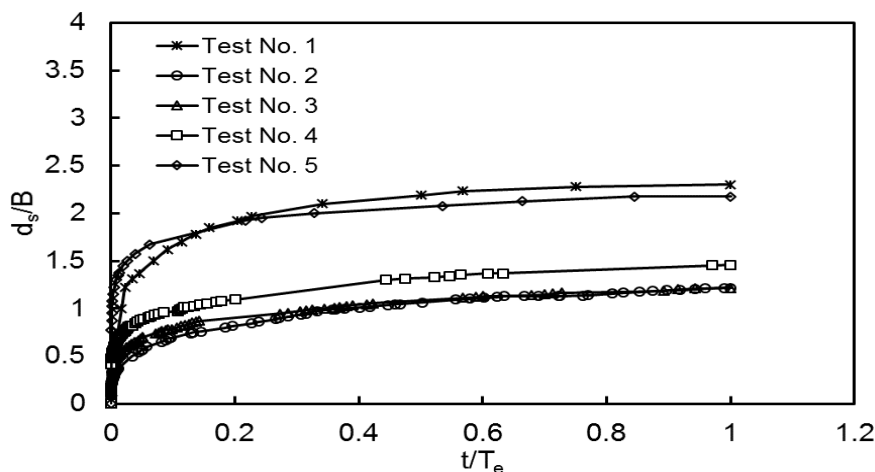
نتایج حاصل از تحقیق حاضر در سه بخش تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی، اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره آبشستگی و در نهایت تغییرات تنش برشی اعمالی بر بستر جلوی پایه ارائه می‌گردند.

### جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی در تحقیق حاضر از آزمایشات حاصل از تحقیق کریمایی و زراتی (۲۰۱۲)، مشاهیر و همکاران (۲۰۰۷)، آلابی (۲۰۰۶) و ملویل و چیو (۱۹۹۹) انتخاب شده است. در مجموع ۵ سری داده مربوط به تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای بررسی تغییرات زمانی گرداب نعل اسبی در جلوی پایه پل و ۸۴ سری داده برای بررسی اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۱) شرایط آزمایشگاهی مربوط به محققین مختلف برای بررسی تغییرات زمانی عمق آبشستگی ارائه شده است. در این جدول  $T_e$  و  $d_{se}$  عمق تعادل و زمان تعادل حفره آبشستگی می‌باشند و پارامتر  $u^*/u^*c$  به عنوان پارامتر بی‌بعد شدت جریان به صورت نسبت سرعت برشی جریان به سرعت برشی بحرانی حرکت دانه‌های بستر تعریف می‌شود. همچنین در شکل

جدول (۱) شرایط آزمایشگاهی مختلف جهت بررسی تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی.

شماره	$d_{50}$ (mm)	B (mm)	$V_0$ (m/s)	y (mm)	$d_{se}$ (mm)	$T_e$ (min)	$u^*/u^*c$	مرجع
No. 1	0.95	40	0.32	100	92	3036	0.85	مشاهیر و همکاران (۲۰۰۷)
No. 2	0.53	115	0.195	230	140	31841	0.7	آلابی (۲۰۰۶)
No. 3	0.53	115	0.249	230	140	4762	0.89	آلابی (۲۰۰۶)
No. 4	0.53	73	0.249	146	106.5	2910	0.89	آلابی (۲۰۰۶)
No. 5	0.85	40	0.289	120	87	4640	0.8	کریمایی و زراتی (۲۰۱۲)



شکل (۴) داده‌های آزمایشگاهی مربوط به تغییرات زمانی عمق آبشستگی جهت بررسی اندازه گرداب نعل اسبی در تحقیق حاضر.

جدول (۲) محدوده داده‌های آزمایشگاهی جهت بررسی اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره آبشستگی (برگرفته از ملویل و چپو ۱۹۹۹).

شماره	$d_{50}$ (mm)	B (mm)	$V_0$ (m/s)	y (mm)	$V_c$ (m/s)	$d_{se}$ (mm)
1~84	0.8~7.8	16~200	0.165~1.208	20~600	0.302~1.272	1.98~318

### تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی

در این بخش معادلات ارائه شده توسط کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) (معادله ۲)، موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) (معادله ۵) و آنگر و هگر (۲۰۰۷) (معادله ۶) برای محاسبه توسعه زمانی اندازه گرداب نعل اسبی در آزمایشات جدول (۲) مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل (۵) تغییرات زمانی عمق آبشستگی آزمایشگاهی و اندازه گرداب نعل اسبی محاسباتی با روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق آبشستگی، اندازه گرداب نعل اسبی در همه روش‌ها مشابه با عمق آبشستگی به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد و در نهایت به یک مقدار ثابت میل می‌کند. همچنین اندازه گرداب نعل اسبی حاصل از معادله کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) و روش آنگر و هگر (۲۰۰۷) به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار می‌باشند. در مورد اندازه گرداب نعل اسبی حاصل از روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) باید گفت که ایشان معتقدند یک گرداب اولیه وجود دارد که اندازه آن با استفاده از معادله (۱) بدست می‌آید. از طرفی در مورد روش آنگر و

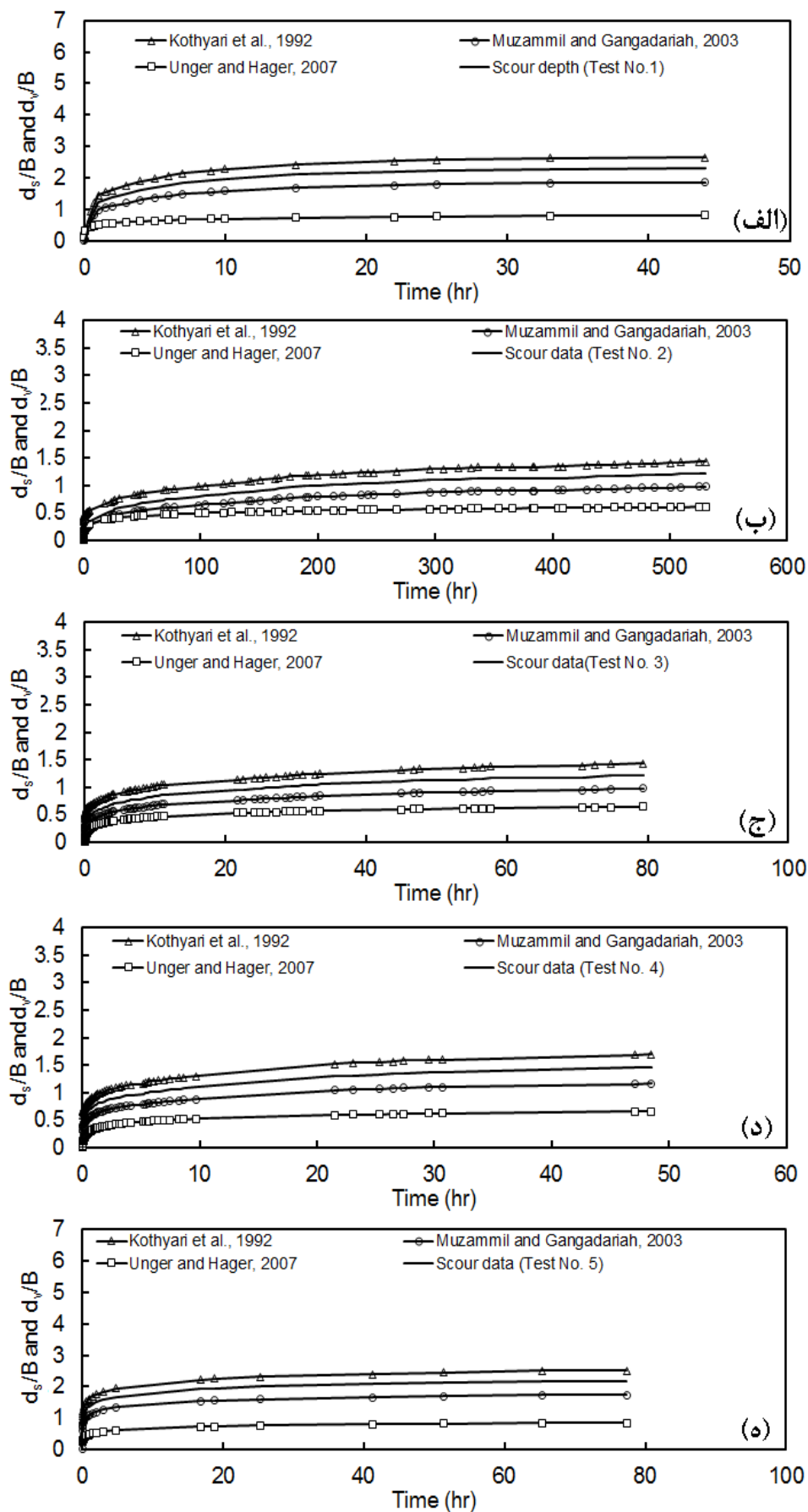
هگر (۲۰۰۷) باید گفت که طبق نظر این محققین در ابتدا گرداب نعل اسبی شکل نمی‌گیرد و بعد از گذشت یک زمان مشخص از شروع آبشستگی ( $T_0$  در معادله ۷) گرداب نعل اسبی شکل گرفته و به سرعت توسعه می‌یابد. در جدول (۳) زمان شکل‌گیری گرداب نعل اسبی و عمق آبشستگی در این زمان ( $d_s(T_0)$ ) در روش آنگر و هگر (۲۰۰۷) برای هر یک از شرایط آزمایشات مربوط به جدول (۱) ارائه شده است. همچنین در این جدول مشخص می‌شود که زمان شکل‌گیری گرداب نعل اسبی کمتر از ۰/۰۵ درصد از زمان تعادل آبشستگی و عمق آبشستگی نیز در این زمان کمتر از ۲۹ درصد عمق تعادل آبشستگی می‌باشد. در جدول (۴) اندازه گرداب نعل اسبی نهایی با توجه به روش‌های مختلف ارائه شده است. در این جدول اختلاف اندازه گرداب نعل اسبی حاصل از روش‌های مختلف با روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) ارائه شده است. همانگونه که مشخص است گرداب نعل اسبی حاصل از روش‌های موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) و آنگر و هگر (۲۰۰۷) به طور متوسط به ترتیب به میزان ۳۱ درصد و ۶۲ درصد کمتر از روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) می‌باشند.

### جدول (۳) زمان شکل‌گیری گرداب نعل اسبی در روش آنگر و هگر (۲۰۰۷).

شماره	$u*/u_{*c}$	$T_0$ (s)	$d_s(T_0)$ (mm)	$t/T_e$ (%)	$d_s(T_0)/d_{se}$ (%)
No. 1	0.85	20.2	0.5	0.011	0.54
No. 2	0.7	173.6	11	0.009	7.86
No. 3	0.89	120.3	25	0.042	17.86
No. 4	0.89	68.6	30	0.039	28.17
No. 5	0.8	27.3	3	0.010	3.45

### جدول (۴) اندازه گرداب نعل اسبی حاصل از روش‌های مختلف و مقایسه آنها.

شماره آزمایش	$D_v$ (mm)			اختلاف نسبت به روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲)	
	کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲)	موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳)	آنگر و هگر (۲۰۰۷)	موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳)	آنگر و هگر (۲۰۰۷)
No. 1	105.8	73.6	32.4	-30.4	-69.3
No. 2	164.5	112.0	70.2	-31.9	-57.3
No. 3	164.5	112.0	74.2	-31.9	-54.9
No. 4	124.0	85.2	48.4	-31.3	-61.0
No. 5	100.2	69.6	34.0	-30.5	-66.0



شکل (۵) تغییرات زمانی عمق آبشستگی آزمایشگاهی و اندازه گرداب نعل اسبی محاسباتی با روش‌های مختلف.



### اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره

در شکل (۶) تغییرات اندازه گرداب نعل اسبی محاسبه شده با روش‌های مختلف نسبت به عمق تعادل آبشستگی آزمایشگاهی ارائه شده در جدول (۲) نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است تغییرات اندازه گرداب نعل اسبی محاسباتی با روش‌های کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) و موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) به صورت خطی نسبت به عمق تعادل آبشستگی افزایش می‌یابد در حالیکه در روش آنگر و هگر (۲۰۰۷) اندازه گرداب روند مشخصی ندارد و با افزایش عمق آبشستگی کاهش و یا افزایش می‌یابد. همچنین اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره محاسبه شده با روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) به میزان حدوداً ۳۰ درصد بزرگتر از عمق آبشستگی تعادلی است در حالیکه در روش موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) به میزان ۲۰ درصد کوچکتر است. در روش آنگر و هگر (۲۰۰۷) نیز اندازه گرداب تعادلی به میزان ۰/۳ تا ۳/۳ برابر عمق آبشستگی تعادلی می‌باشد که این میزان بستگی به پارامترهای مختلفی نظیر زمان، شدت جریان، اندازه دانه بستر و غیره دارد. همچنین عمده داده‌های مربوط به روش آنگر و هگر (۲۰۰۷) کمتر از دو روش دیگر می‌باشند. با توجه به اختلاف نتایج حاصل از روش‌های موجود، آزمایشات جدیدی لازم است تا ضمن اندازه‌گیری مشخصات گرداب نعل اسبی، روشی مطمئن‌تر برای تعیین اندازه گرداب نعل اسبی ارائه گردد.

### تغییرات زمانی تنش برشی وارد بر بستر

عمق آبشستگی را می‌توان به صورت دقیق‌تری یافت در صورتیکه فهم مناسبی از مکانیزم آبشستگی بر اساس دیدگاه جریان و مشخصات آشفتگی مربوط به گردابه نعل اسبی حاصل گردد. در این قسمت روشی برای محاسبه تنش برشی اعمالی بر بستر جلوی پایه در داخل حفره آبشستگی ارائه می‌گردد. مبنای فکری این روش توسط کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) ارائه شد و بعدها توسط میا و ناگو (۲۰۰۳) گسترش یافت. در این تحقیق ضمن بررسی این روش، اقدام به اصلاح ضرایب ثابت این روش با توجه به نتایج آزمایشگاهی می‌گردد.

در ابتدای آبشستگی در اطراف پایه پل به علت زیاد بودن قدرت گرداب نعل اسبی و جریان رو به پایین، مقدار تنش وارد بر بستر جلوی پایه زیاد می‌باشد و در نتیجه نرخ آبشستگی شدید است ولی به تدریج با افزایش عمق آبشستگی و از بین رفتن انرژی ناشی از گرداب نعل اسبی به علت سیال موجود در داخل حفره آبشستگی، مقدار تنش وارد بر بستر کاهش یافته و در نتیجه نرخ آبشستگی کاهش می‌یابد. داده‌های آزمایشگاهی و همچنین نتایج محققین مختلف نظیر کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲)، رودکیوی<sup>۱</sup> (۱۹۹۸) و کریمایی و زراتی (۲۰۱۷) نشان می‌دهد که مقدار پارامتر شدت جریان در لحظه شروع آبشستگی اعمالی به بستر باید برابر با  $u^*/u^*_c=0.5$  باشد. بر این اساس می‌توان گفت که سرعت برشی در اطراف پایه پل در زمان شروع آبشستگی ۲ برابر سرعت برشی در بالادست پایه می‌باشد. در نتیجه با توجه به اینکه  $\tau = \rho \cdot u^*^2$  است می‌توان گفت که در لحظه شروع آبشستگی، تنش برشی در جلوی پایه تقریباً ۴ برابر تنش برشی ناشی از جریان ورودی ( $\tau_u$ ) می‌باشد.

نتایج تحقیقات مختلف نشان داد که با گذشت زمان اندازه گرداب نعل اسبی افزایش می‌یابد. همانگونه که سطح مقطع گرداب نعل اسبی افزایش می‌یابد، تنش برشی در زیر گردابه‌ها که به بستر جلوی پایه اعمال می‌شود کاهش می‌یابد. براین اساس تنش برشی در جلوی پایه در هر لحظه عبارت است از (کوتیاری و همکاران، ۱۹۹۲):

$$\tau_{p,t} = 4 \times \tau_u \left( \frac{A_0}{A_t} \right)^\alpha \quad (11)$$

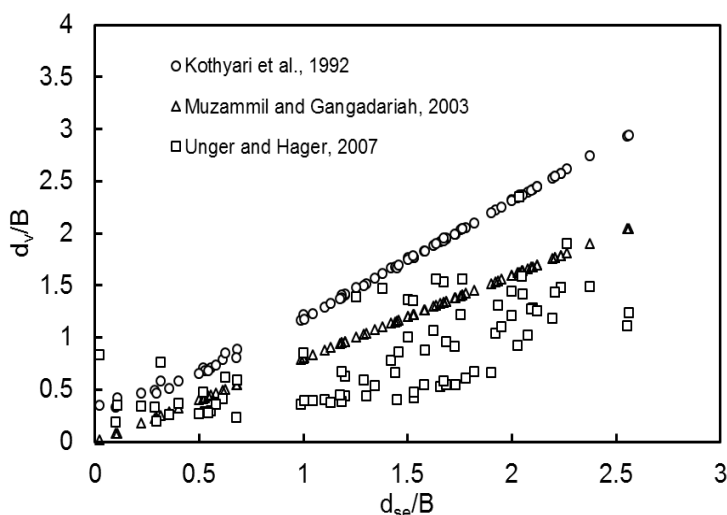
در رابطه فوق  $\tau_{p,t}$  تنش برشی در جلوی پایه در لحظه  $t$  و  $\alpha$  یک ضریب ثابت است که باید محاسبه گردد.  $A_0$  سطح مقطع گرداب اولیه است که با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود و  $A_t$  سطح مقطع گرداب در لحظه  $t$  است که با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌گردد. نکته مهم این است که وقتی  $A_t \gg A_0$  می‌شود  $\tau_{p,t}$  کوچک می‌شود بنابراین می‌توان فرض کرد که آبشستگی زمانی به پایان می‌رسد که  $\tau_{p,t}$  تا حد  $\tau_c$  یعنی تنش برشی بحرانی حرکت دانه‌ها کاهش می‌یابد. برای محاسبه ضریب  $\alpha$  از نتایج آزمایشات آبشستگی مربوط به داده‌های آزمایشگاهی محققین مختلف استفاده می‌شود. در این حالت با داشتن

<sup>1</sup> Raudkivi, 1998

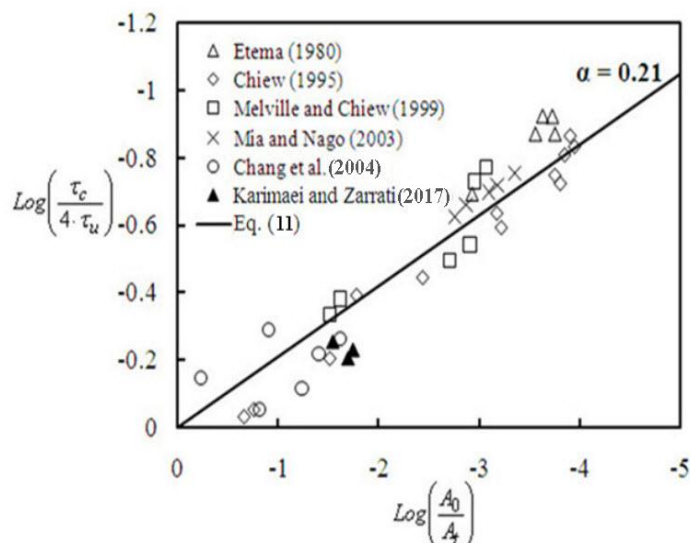
کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) معتقد به وجود گرداب نعل اسبی اولیه قبل از شکل‌گیری حفره آبشستگی است در نتیجه محاسبات این روش تنها از طریق محاسبه اندازه گرداب نعل اسبی در روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) امکان‌پذیر است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است تنش برشی اعمالی به بستر در جلوی پایه پل در ابتدا زیاد بوده که موجب تغییرات شدید عمق آبشستگی می‌شود ولی به تدریج با افزایش عمق آبشستگی، تنش برشی اعمالی به بستر کاهش یافته و در نهایت با نزدیک شدن عمق آبشستگی به مقدار تعادلی، تنش برشی در جلوی پایه نیز به مقدار آستانه حرکت دانه‌های بستر در بالادست پایه میل می‌کند.

عمق آبشستگی تعادلی ( $d_{se}$ ) و همچنین تنش برشی اعمالی به بستر در شروع آزمایش، مقدار ضریب  $\alpha$  با استفاده از معادله (۱۱) و فرض  $\tau_{p,t} = \tau_c$  در شرایط تعادل حفره آبشستگی قابل محاسبه خواهد بود. در شکل (۷) تحلیل داده‌های آزمایشگاهی برای محاسبه ضریب  $\alpha$  نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است با برازش منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی مقدار ضریب  $\alpha$  برابر با ۰.۲۱ بدست می‌آید.

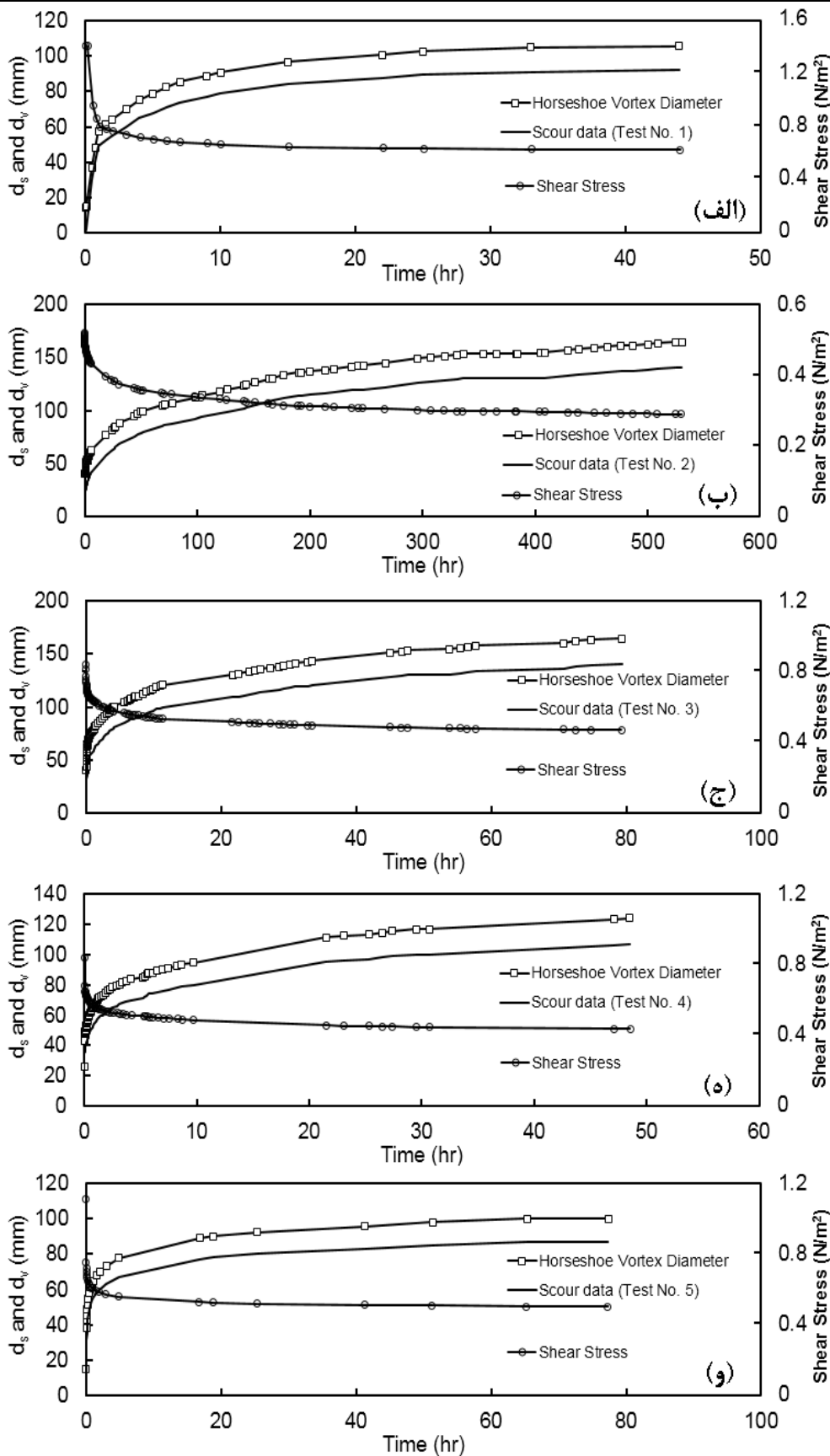
با توجه به تغییرات عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف مربوط به داده‌های آزمایشگاهی جدول (۱)، تغییرات زمانی تنش برشی اعمالی به بستر محاسبه شده و به همراه اندازه گرداب نعل اسبی و عمق آبشستگی در هر آزمایش در شکل (۸) رسم شده است. از آنجا که تنها روش



شکل (۶) تغییرات اندازه گرداب نعل اسبی محاسبه شده با روش‌های مختلف نسبت به عمق آبشستگی آزمایشگاهی در شرایط تعادل حفره آبشستگی.



شکل (۷) محاسبه ضریب  $\alpha$  در معادله (۱۱).



شکل (۸) تغییرات تنش برشی (محاسباتی)، اندازه گرداب نعل اسبی (محاسباتی با روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) و عمق آبستنگی (آزمایشگاهی) در جلوی پایه پل برای آزمایشات مختلف جدول (۱).

## نتیجه‌گیری

در نهایت روشی برای محاسبه تغییرات زمانی تنش برشی اعمالی به بستر جلوی پایه با توجه به اندازه گرداب نعل اسبی بر اساس رابطه ارائه شده توسط کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) شد. در این روش پس از کالیبراسیون تغییرات تنش برشی اعمالی بر بستر جلوی پایه با نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که با افزایش اندازه گرداب نعل اسبی، تنش برشی در جلوی پایه پل از ۴ برابر تنش برشی در بالادست پایه تا مقدار تنش برشی آستانه حرکت دانه‌های بستر کاهش می‌یابد.

گرداب نعل اسبی با مقطعی بیضی شکل، یک گرداب اجباری بوده و در داخل حفره آبستنگی محصور شده است. در تحقیق حاضر زمان شکل‌گیری و اندازه گرداب نعل اسبی در جلوی پایه پل مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، در ابتدا با توجه به دیدگاه‌های مختلف در مورد نحوه و زمان تشکیل گرداب نعل اسبی در جلوی پایه پل، اقدام به بررسی نظرات مختلف گردید. این نظرات شامل سه شکل وجود گرداب نعل اسبی قبل از شکل‌گیری، همزمان با شکل‌گیری و بعد از شکل‌گیری حفره آبستنگی می‌باشند. در این تحقیق با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی مختلف اقدام به محاسبه اندازه گرداب نعل اسبی در شرایط تعادل حفره و همچنین تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی با افزایش عمق آبستنگی با توجه به روابط ارائه شده توسط محققین مختلف شد. برای این منظور از سه رابطه ارائه شده توسط کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) بر اساس شکل‌گیری گرداب قبل از آبستنگی، موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) بر اساس شکل‌گیری گرداب در لحظه شروع آبستنگی و آنگر و هگر (۲۰۰۷) بر اساس شکل‌گیری گرداب بعد از آبستنگی استفاده شده است.

نتایج محاسبات حاضر نشان داد که منحنی تغییرات زمانی اندازه گرداب نعل اسبی مشابه با عمق آبستنگی به صورت لگاریتمی بوده که در نهایت به یک مقدار ثابت میل می‌کند. همچنین اندازه گرداب نعل اسبی حاصل از معادله کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) و روش آنگر و هگر (۲۰۰۷) به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار می‌باشند به گونه‌ای که گرداب نعل اسبی حاصل از روش‌های موزامیل و گانگادهریا (۲۰۰۳) و آنگر و هگر (۲۰۰۷) به طور متوسط به ترتیب به میزان ۳۱ درصد و ۶۲ درصد کمتر از روش کوتیاری و همکاران (۱۹۹۲) می‌باشند. از طرفی با توجه به نتایج بدست آمده با استفاده از روش آنگر و هگر (۲۰۰۷) مشخص شد که زمان شکل‌گیری گرداب نعل اسبی کمتر از ۰/۰۵ درصد از زمان تعادل آبستنگی و عمق آبستنگی نیز در این زمان کمتر از ۲۹ درصد عمق تعادل آبستنگی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که اندازه گرداب نعل اسبی محاسبه شده با روش‌های مختلف در شرایط تعادل حفره از ۰/۳ تا ۳/۳ برابر عمق آبستنگی تعادلی بوده و تابعی از پارامترهای مختلف نظیر اندازه دانه‌های بستر و قطر پایه پل می‌باشد.

## منابع

- 1) Alabi, P.D., 2006. Time development of local scour at a bridge pier fitted with a collar. M.Sc thesis, Civil and Geological Eng. Dept., University of Saskatchewan, Canada.
- 2) Apsilidis, N., Diplas, P., Dancey, C. L., and Bouratsis, P. 2016. Effects of wall roughness on turbulent junction flow characteristics. *Experiments in Fluids*, 57(1), 12.
- 3) Chiew, Y. M. 1995. Mechanics of riprap failure at bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(9): 635-643.
- 4) Guan, D., Chiew, Y. M., Wei, M. and Hsieh, S. C., 2019. Characterization of horseshoe vortex in a developing scour hole at a cylindrical bridge pier, *International Journal of Sediment Research*, 34(2): 118-124.
- 5) Chang, W. Y., Lai, J. S., and Yen, C. L., 2004. Evolution of scour depth at circular bridge piers” *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9): 905-913.
- 6) Chen, Q., Qi, M., Zhong, Q., and Li, D. 2017. Experimental study on the multimodal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system around a circular cylinder. *Physics of Fluids*, 29(1), 015106.
- 7) Dargahi B., 1989. The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experimental Fluids* 8(1):1-12.
- 8) Das, S., Das, R., and Mazumdar, A., 2013. Comparison of characteristics of horseshoe vortex at circular and square piers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(17): 4373-4387.
- 9) Ettema, R., 1980. Scour at bridge piers. PhD Thesis, Auckland University, Auckland, New Zealand.
- 10) Karimae Tabarestani M., Zarrati A. R., 2012. Effect of collar on time development and extension of scour hole around cylindrical bridge pier. *International Journal of Engineering*, 25 (1): 11-16.
- 11) Karimae Tabarestani M, Zarrati A. R., 2017. Local scour calculation around bridge pier during flood event. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(4): 1462-1472.
- 12) Kothyary, U. C., Garde, R. J., and Range Raju, K. G., 1992. Temporal variation of scour around

circular bridge pier. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(8): 1091-1106.

13) Link, O., Gobert, C., Manhardt, M. and Zanke, U., 2008. Effect of the horseshoe vortex system on the geometry of a developing scour hole at a cylinder. *Fourth International Conference on Scour and Erosion*, 162-168.

14) Mashahir, M.B., Zarrati, A.R. and Mokallaf, E., 2007. Effect of Bed Shear Stress on Development of Scouring around Bridge Piers Protected by a Collar. *Proceeding 32nd Congress, IAHR, Venice, Italy*.

15) Melville, B.W. 1975. *Local Scour at Bridge Sites*. University of Auckland, School of Engineering, Auckland, New Zealand, Rep. No. 117.

16) Melville, B. W. and Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1): 59-65.

17) Mia, M. F., and Nago, H. 2003. Design method of time-dependent local scour at circular bridge pier, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6): 420– 427.

18) Muzzammil M, Gangadharaiah T., 2003. The mean characteristics of horseshoe vortex at a cylindrical pier. *Journal of Hydraulic Research*, 41(3):285–297.

19) Rajeev, K., Amitesh, N., Sangam, S., Gurpreet, S., Jagdeep, S., Vishal, S., Paramveer, S., Akhalesh, S., and Ramandeep, S., 2018. Oil film visualization of horseshoe vortices around surface mounted obstacles, *Proceedings for research and innovations in science, engineering and technology, At Jammu, India*.

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

21) Schanderl, W., and Manhart, M. 2016. Reliability of wall shear stress estimations of the flow around a wall-mounted cylinder. *Computers and Fluids*, 128, 16-29.

22) Schanderl, W., Jenssen, U., Strobl, C., and Manhart, M. 2017. The structure and budget of turbulent kinetic energy in front of a wall-mounted cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 827, 285-321.

23) Tseng, M. H., Yen, C. L. and Song, C. C. S. 2000. Computation of three dimensional flow around square and circular piers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 34: 207– 227.

24) Unger J, and Hager WH. 2007. Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers. *Experimental Fluids*. 42(1):1–19.

