

شبیه‌سازی عددی آبشستگی ناشی از جریان در مجاورت پایه‌های استوانه‌ای با استفاده از مدل دوفازه اوپلر- اوپلر

محمد محمدبیگی کاسوائی^۱، محمدحسین کاظمی‌نژاد^{۲*}، عباس یگانه‌بختیاری^۳

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، پست الکترونیکی: mmbeigi@inio.ac.ir

۲- استادیار، پژوهشکده فناوری و مهندسی دریا، پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، پست الکترونیکی: mkazeminezhad@inio.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، پست الکترونیکی: yeganeh@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۵/۲۸

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۴

چکیده

در این مطالعه شبیه‌سازی عددی سه بعدی آبشستگی تحت اثر جریان یکطرفه در مجاورت پایه‌های استوانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار اوپن‌فوم توسعه داده شد. بدین منظور، معادلات حاکم بر جریان سیال و رسوب به صورت دوفازه با رویکرد اوپلر- اوپلر بر فضای محاسباتی با روش حجم محدود گسسته سازی شده و با استفاده از حل‌گر SedFoam-2 حل شدند. مدل‌سازی تا زمان تعادل آبشستگی صورت گرفته و عمق آبشستگی در بالادست پایه با داده‌های آزمایشگاهی و روابط تجربی موجود مقایسه شد. در این میان اختلافی برابر با ۸٪ بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی دیده شد. خطوط جریان و بردارهای سرعت نیز برای مشاهده تغییرات میدان جریان در فرآیند آبشستگی مورد بررسی قرار گرفتند. شیب حفره آبشستگی در جهت طولی و عرضی جریان مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که شیب حفره در طرفین پایه در جهت عرضی یکسان بوده در حالی که در جهت طولی، شیب حفره آبشستگی در بالادست در مقایسه با شیب حفره در پایین دست بیشتر است که در راستای نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی است.

کلمات کلیدی: اوپن‌فوم، معادلات رینولدز، مدل دوفازه، اندرکنش سیال- رسوب، اوپلر- اوپلر، انتقال رسوب.

۱. مقدمه

پایه هستند. با تشکیل حفره آبشستگی در اطراف پایه طول آزاد آن افزایش یافته و احتمال خرابی سازه ناشی از عدم پایداری آن افزایش خواهد یافت (DNV, 2014). بنابراین تعیین دقیق عمق آبشستگی در مجاورت پایه‌ها همواره از توجه ویژه‌ای در مسائل طراحی سازه‌های دریایی برخوردار بوده است.

در دهه‌های اخیر مسئله آبشستگی تحت اثر جریان یکطرفه مورد توجه محققین بوده است. این مطالعات غالباً به صورت آزمایشگاهی بوده و آبشستگی در مجاورت پایه پل‌های واقع در

پایه‌های استوانه‌ای به‌عنوان تکیه‌گاه اغلب سازه‌های دریایی نظیر اسکله‌ها، سکوه‌های دریایی و توربین‌های فراساحلی به‌کاربرده می‌شوند. با قرار گرفتن پایه در مسیر جریان‌های گردانی فشار ایجاد شده در اطراف پایه موجب تشکیل گردابه‌های نعل اسبی و افزایش تنش برشی بستر در این ناحیه می‌گردد که از جمله عوامل ایجاد پدیده آبشستگی در مجاورت

اویلر درحالت جریان توده‌ای رسوب^۳ تحت اثر جریان نوسانی پرداختند. Liu و Amoudry (۲۰۰۹) با توسعه یک مدل عددی دوفازه، انتقال رسوب در پای یک سازه کف‌بند^۴ را شبیه‌سازی نمودند. Yeganeh-Bakhtary و همکاران (۲۰۱۱) با توسعه یک مدل عددی دوفازه اویلر-اویلر برای انتقال رسوب به بررسی فرسایش تونلی در زیر یک خط لوله دریایی تحت اثر جریان یکطرفه دریایی پرداختند. Kazeminezhad و همکاران (۲۰۱۲) با ایجاد تغییرات در مدل Yeganeh-Bakhtary و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی آبشستگی در زیر یک خط لوله دریایی تحت اثر جریان نوسانی پرداختند. این در حالی است که مدل‌سازی عددی سه‌بعدی پدیده آبشستگی در مجاورت پایه‌های قائم به صورت دوفازه صورت نگرفته است.

در این مطالعه مدل‌سازی عددی پدیده آبشستگی ناشی از جریان یکطرفه در مجاورت پایه‌های استوانه‌ای به صورت سه بعدی و دوفازه صورت گرفته است. برای این منظور از کد منبع باز اوپن فوم^۵ و حل‌گر SedFoam-2 استفاده شده است. در این مدل معادلات دینامیک سیال و رسوب بر روی فضای محاسباتی گسسته سازی شده و حل می‌گردند. مدل پیش رو یک مدل اویلر- اویلر بوده و هر دو فاز سیال و رسوب را به صورت محیط پیوسته در نظر می‌گیرد و همچنین قادر به در نظرگیری اندرکنش سیال- رسوب و ذرات رسوب با یکدیگر است. مدل دوفازه اویلر- اویلر قادر به در نظر گرفتن پروفیل کلی انتقال رسوب بوده و در آن نیازی به جداسازی بار بستر و بار معلق نیست. پس از مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی قابلیت مدل در پیش بینی آبشستگی ارزیابی شده و موارد دیگری نظیر خطوط جریان، بردارهای سرعت و فرآیند توسعه زمانی حفره آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ معادلات حاکم

روش تحقیق در این مطالعه مدل‌سازی عددی به صورت دوفازه بوده است، بنابراین ابتدا می‌بایست معادلات حاکم بر مسئله شرح داده شوند. به طور کلی هرگاه بتوان فازهای مختلف یک جریان چند فازه را به صورت یک محیط پیوسته فرض نمود،

رودخانه‌ها مد نظر بوده است. در برخی تحقیقات رابطه‌ای تجربی نیز برای تعیین عمق آبشستگی ارائه شده است. در این باره می‌توان به مطالعات Dongol و Melville (۱۹۹۲)، Wilson (۱۹۹۵)، Raudkivi و Melville (۱۹۹۶)، Ettema و همکاران (۱۹۹۸)، Chiew و Melville (۱۹۹۹)، Davis و Richardson (۲۰۰۱)، Fredsoe و Sumer (۲۰۰۲)، Rouland و همکاران (۲۰۰۵) در سه دهه اخیر اشاره کرد. Sumer و همکاران (۲۰۰۱) مروری گسترده بر ادبیات فنی درباره این موضوع ارائه دادند. Rouland و همکاران (۲۰۰۵) با انجام یک سری آزمایشات و توسعه یک مدل عددی به بررسی جریان حول استوانه قائم و آبشستگی ناشی از جریان یکطرفه پرداختند. در مطالعه مذکور استوانه قائم به صورت مغروق بوده و میزان تاثیر ارتفاع آن یکی از موارد مورد بررسی بود. Stahlmann (۲۰۱۳) به مطالعه آبشستگی ناشی از جریان یکطرفه در مجاورت پایه استوانه‌ای توربین بادی با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداخت. در مدل تکفازه مذکور پس از حل معادلات سیال با استفاده از نتایج آن، معادلات انتقال رسوب حل می‌شدند و در نهایت میزان آبشستگی به دست می‌آمد. Baykal و همکاران (۲۰۱۴) در ادامه تحقیقات Rouland و همکاران (۲۰۰۵) به بررسی اثر در نظرگیری بار معلق در میزان عمق تعادلی آبشستگی با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداختند. Jia و همکاران (۲۰۱۷) با توسعه یک مدل عددی به بررسی آبشستگی ناشی از جریان در مجاورت پایه‌های پل پرداختند. مدل مذکور تنها قادر به در نظر گرفتن بار بستر^۱ بوده و بار معلق^۲ در آن منظور نشده بود.

در مدل‌های عددی مذکور پدیده آبشستگی در مجاورت پایه قائم به صورت تکفازه در نظر گرفته شدند، در حالی که مدل‌های چند فازه با در نظر گرفتن دینامیک فازهای مختلف و اندرکنش فازها با یکدیگر، قابلیت مدل‌سازی دقیق‌تر پدیده انتقال رسوب و آبشستگی را دارند. در سال‌های اخیر مدل‌سازی‌های عددی دوفازه انتقال رسوب و آبشستگی در مجاورت سازه‌هایی نظیر استوانه‌های افقی به صورت دویعدی صورت گرفته است، به طور مثال: Guillo و Chauchat (۲۰۰۸) با مدل‌سازی دوفازه انتقال رسوب در کانال‌های باز به بررسی مدل‌های آشفته‌گی برای سیال و رسوب در این‌گونه مدل‌ها پرداختند. Bakhtyar و همکاران (۲۰۰۹) به توسعه یک مدل عددی انتقال رسوب دوفازه اویلر-

³ Sheet Flow

⁴ Apron

⁵ OpenFoam®

¹ Bed Load

² Suspended Load

$$\frac{\partial \rho^a \alpha u_i^a}{\partial t} + \frac{\partial \rho^a \alpha u_i^a u_j^a}{\partial x_j} = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + \alpha f_i - \frac{\partial \tilde{p}^a}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}^a}{\partial x_j} + \alpha \rho^a g_i + \alpha f_i + \alpha \beta K (u_i^b - u_i^a) - S_{US} \beta K v_i^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}$$

رابطه ۳

$$\frac{\partial \rho^b \beta u_i^b}{\partial t} + \frac{\partial \rho^b \beta u_i^b u_j^b}{\partial x_j} = -\beta \frac{\partial p}{\partial x_i} + \beta f_i + \frac{\partial \tau_{ij}^b}{\partial x_j} + \beta \rho^b g_i + \beta f_i + \alpha \beta K (u_i^b - u_i^a) - S_{US} \beta K v_i^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}$$

رابطه ۴

در روابط بالا ρ^a, ρ^b به ترتیب برابر با چگالی سیال و رسوب هستند. g_i شتاب گرانش، p فشار سیال هستند. f_i یک نیروی حجمی خارجی بوده که باعث حرکت جریان می‌شود. τ_{ij}^b برابر با تنش سیال است که شامل دو بخش تنش سیال در مقیاس ذرات (لزج) و تنش‌های رینولدز سیال است. \tilde{p}^a, τ_{ij}^a به ترتیب برابر با تنش برشی و تنش‌های نرمال ذرات هستند. v_i^b برابر با لزجت آشفته بوده که با استفاده از مدل آشفته‌گی محاسبه می‌شود. همچنین $S_{US} = 1/\sigma_c$ برابر با معکوس عدد اشمیت است. K برابر با پارامتر نیروی پسا^۲ بوده که با استفاده از رابطه Schiller و Naumann (۱۹۳۳) مدل می‌شود.

در این مطالعه مدل $k-\omega$ برای مدل‌سازی آشفته‌گی مورد استفاده قرار گرفته است و لزجت آشفته گردابه‌ای v_i^b از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

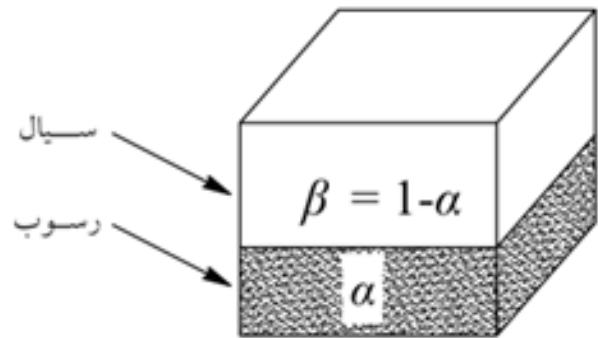
$$v_i^b = \frac{k}{\omega} \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه بالا، k و ω به ترتیب برابر با انرژی جنبشی آشفته سیال و نرخ ویژه اتلاف انرژی هستند. این پارامترها برای مدل دوفازه سیال و رسوب اصلاح شده و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j^b \frac{\partial k}{\partial x_j} = R_{ij}^{br} \frac{\partial u_i^b}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v^b + \frac{v_i^b}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - C_\mu k \omega - \frac{2K(1-t_{mf})\alpha k}{\rho^b} - \frac{S_{US}}{\beta} v_i^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \left(\frac{\rho^a}{\rho^b} - 1 \right) g_j$$

رابطه ۶

روش مدل‌سازی دوفازه کاربرد دارد. در به کارگیری روش دوفازه اوایلر-اوایلر در شبیه‌سازی پدیده انتقال رسوب، در حقیقت فاز رسوب به عنوان یک محیط پیوسته فرض می‌شود و کلیه خصوصیتی که برای محیط پیوسته سیال در نظر گرفته می‌شود برای فاز رسوب نیز به گونه‌ای تعریف می‌شود. در این روش هر سلول محاسباتی مطابق شکل (۱) به دو بخش فاز سیال و رسوب تقسیم بندی می‌شود. در این شکل α بیانگر غلظت حجمی رسوب و $\beta = 1 - \alpha$ بیانگر غلظت حجمی سیال است.



شکل ۱: ساختار یک سلول محاسباتی در مدل دوفازه اوایلر-اوایلر

معادلات پیوستگی (روابط ۱ و ۲) به همراه معادلات ناویر استوکس میانگین‌گیری شده زمانی، معروف به معادلات رینولدز (RANS^۱) در حالت سه‌بعدی (روابط ۳ و ۴) در مختصات کارتیزین به عنوان معادلات حاکم برای محاسبه فاز سیال و رسوب مورد استفاده قرار گرفتند. معادلات پیوستگی جرم برای فاز سیال و رسوب به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha u_i^a}{\partial x_i} = 0 \quad \text{رابطه ۱}$$

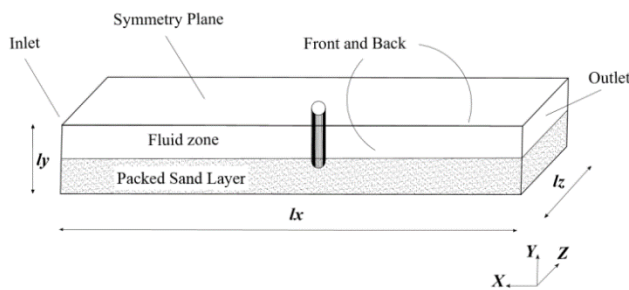
$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\partial \beta u_i^b}{\partial x_i} = 0 \quad \text{رابطه ۲}$$

در روابط بالا α و β ($\beta = 1 - \alpha$) به ترتیب برابر با غلظت ذرات رسوب و سیال هستند. u_i^a, u_i^b برابر با سرعت سیال و رسوب هستند. همچنین $i=1,2,3$ نشانگر جهات مختصات x,y,z در دستگاه کارتیزین هستند. همچنین معادلات مومنتوم برای فاز سیال و رسوب به صورت زیر بیان می‌شوند:

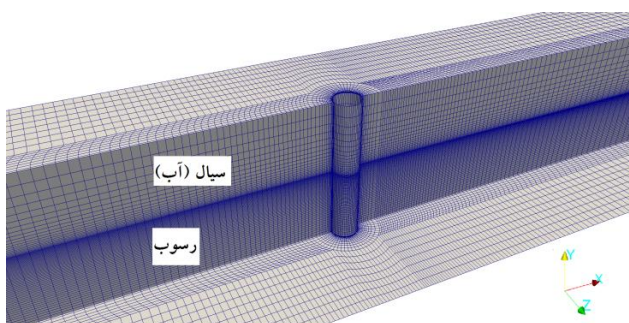
² Drag force

¹ Reynolds Average Navier Stokes

تعبیه شده در کد اوپن فوم بوده و علیرغم عدم سهولت تولید و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی با استفاده از آن، ویرایش شبکه‌بندی و تغییر در آن از سرعت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. همانطور که اشاره شد، دامنه محاسباتی در ارتفاع به دو بخش سیال (بالا) و رسوب (پایین) تقسیم می‌شود. سپس هر یک از بخش‌های سیال و رسوب به تعداد ۱۲ بلوک (جمعاً تعداد ۲۴ بلوک) تقسیم می‌شوند. شبکه‌بندی به صورت غیریکنواخت بوده، به طوری که در جهت طولی و عرضی فلووم با نزدیک شدن به پایه از سلول‌های محاسباتی ریزتری استفاده شده است (بعد سلول برابر با ۰/۰۱ قطر پایه در مجاورت آن). همچنین در ارتفاع فلووم با نزدیک شدن به مرز سیال و رسوب شبکه‌بندی ریزتر شده به طوری که بعد سلول محاسباتی در مجاورت مرز سیال و رسوب برابر با ۰/۱ میلی‌متر بوده است. چندین نوع شبکه‌بندی با ابعاد مختلف سلول‌های محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت تا از عدم وابستگی نتایج مدل به شبکه‌بندی و اندازه آن اطمینان کامل حاصل شود. تمامی سلول‌های محاسباتی شش‌وجهی بوده و تعداد کل آن‌ها از مرتبه ۱۰۵ است. شکل (۳) یک برش طولی در محل قرارگیری پایه را از دامنه محاسباتی شبکه‌بندی شده نشان می‌دهد.



شکل ۲: دامنه محاسباتی و شرایط مرزی در زمان شروع مدل‌سازی



شکل ۳: برشی از دامنه محاسباتی شبکه‌بندی شده

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j^b \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = C_{1\omega} \frac{\omega}{k} R_{ij}^{bt} \frac{\partial u_i^b}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu^b + \frac{\nu_t^b}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - C_{2\omega} \omega^2 - C_{3\omega} - \frac{2K(1-t_{mf})\alpha\omega}{\rho^b} - C_{4\omega} S_{US} \frac{\omega}{k\beta} \nu_t^b \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \left(\frac{\rho^a}{\rho^b} - 1 \right) g_j$$

رابطه ۷

در روابط بالا R_{ij}^{bt} برابر با مؤلفه بزرگ‌مقیاس تنش سیال (مانند تنش‌های رینولدز) است. همچنین ضرایب مختلف مورد استفاده قرار گرفته برابر با مدل Chauchat و همکاران (۲۰۱۷) بوده که در جدول (۱) مشخص شده‌اند.

جدول ۱: ضرایب به کار رفته در مدل آشفتگی

ضریب	C_μ	$C_{1\omega}$	$C_{2\omega}$	$C_{3\omega}$	$C_{4\omega}$	σ_k	σ_ω	S_{US}
مقدار	0.09	5/9	3/40	0.35	1/40	2.0	2.0	1.0

۲-۲ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

در این مطالعه یک فضای مکعب مستطیل، مطابق با شکل (۲)، به عنوان دامنه محاسباتی برای مدل‌سازی عددی پدیده آبشستگی ناشی از جریان یک‌طرفه حول پایه استوانه‌ای در نظر گرفته شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طول (l_x)، عرض (l_z) و ارتفاع (l_y) دامنه محاسباتی به ترتیب برابر با ۶/۵، ۰/۶ و ۰/۴ متر است. فضای مذکور در ارتفاع به دو بخش تقسیم شده است، به طوری که در لحظه ابتدای مدل‌سازی (شرایط اولیه) بخش بالایی شامل سیال (آب) با عمقی برابر با $h_0=20$ cm بوده و بخش زیرین مربوط به رسوب است. ارتفاع بخش رسوب برابر با $h_b=20$ cm بوده و متشکل از رسوبات ماسه‌ای با چگالی $\rho^a=2650$ kg/m³ و قطر متوسط دانه $d_{50}=0.5$ mm است. مرز سمت چپ به عنوان ورودی جریان در نظر گرفته شده و پروفیل لگاریتمی سرعت با فرض بستر زبر ($k_s=2/5 d_{50}$ ضریب زبری بستر) در آن اعمال می‌شود. پایه استوانه‌ای به قطر $D=7/6$ cm و با فرض سطح صاف هیدرولیکی^۱ در فاصله ۲ متری از مرز ورودی جریان قرار گرفته است. شرط مرزی تقارن^۲ و دیوار لغزنده^۳ برای مرز بالای دامنه محاسباتی و سطوح جلو و عقب در نظر گرفته شد. شبکه‌بندی دامنه محاسباتی با استفاده از ابزار «BlockMesh» صورت گرفته است. مزیت این روش این است که از بخش‌های

¹ Hydraulically smooth

² Symmetry Plane

³ Slip wall

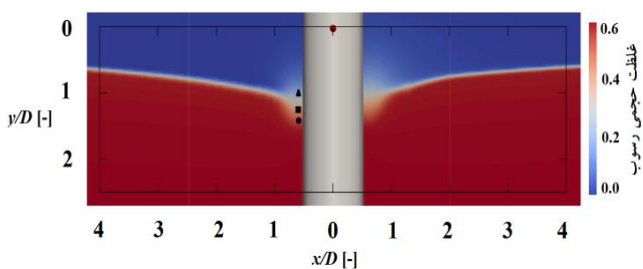
۳. نتایج و بحث

۳-۱ راستی آزمایشی مدل عددی

رابطه فوق توسط دانشگاه ایالتی کلرادو^۲ برای محاسبه عمق آبهستگی حول پایه پل‌ها تحت جریان یکطرفه ارائه شده است. این رابطه توسط Richardson و Davis (۲۰۰۱) بازنگری شد و با عنوان Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18) توسط اداره حمل‌ونقل امریکا منتشر گردید. Wilson (۱۹۹۵) نیز رابطه تجربی برای تعیین عمق آبهستگی ناشی از جریان یکطرفه حول پایه پل‌ها ارائه کرده است:

$$d_s = 0.9D^{0.6}y^{0.4} \quad \text{رابطه ۹}$$

در روابط بالا Fr برابر با عدد فرود، y عمق آب، S و d_s عمق آبهستگی و D قطر پایه است. برای عدد فرود $Fr = 0.25$ میزان عمق آبهستگی طبق رابطه (۸) برابر با $S/D = 1/33$ و طبق رابطه (۹) برابر با $S/D = 1/10$ است. شکل (۴) مقطع تغییر شکل یافته بستر در جهت جریان در زمان تعادل آبهستگی را به همراه اعماق آبهستگی محاسبه شده از روابط تجربی مذکور و نتیجه آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق آبهستگی در مجاورت پایه استوانه‌ای تطابق قابل قبولی (با اختلاف ۰/۸) با نتایج حاصل از آزمایش مذکور دارد. همچنین اختلاف نتایج مدل عددی با نتایج روابط تجربی (۸) و (۹) به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۳۵٪ بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل حاضر قابلیت پیش‌بینی عمق آبهستگی ناشی از جریان یکطرفه در مجاورت پایه استوانه‌ای قائم را دارا است.



شکل ۴: مقطع تغییر شکل یافته بستر در جهت جریان را در زمان تعادل آبهستگی، به همراه نتایج آزمایشگاهی و روابط تجربی

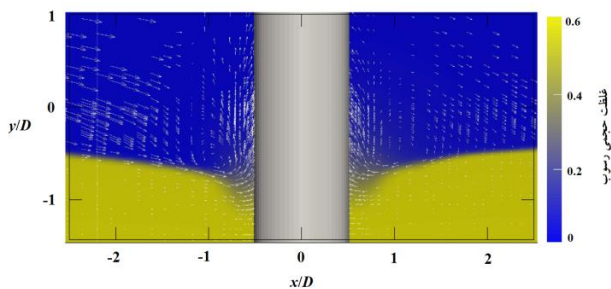
- نتیجه حاصل از رابطه (۸)،
- ▲ نتیجه حاصل از رابطه (۹)،
- نتیجه آزمایش Mostafa و Agamy (۲۰۱۱)

به منظور راستی آزمایشی مدل عددی می‌بایست نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی موجود و روابط تجربی پیش‌بینی آبهستگی مورد مقایسه قرار گیرد. به همین منظور مطالعه آزمایشگاهی Mostafa و Agamy (۲۰۱۱) در نظر گرفته شده و شرایط حاکم بر آن در مدل‌سازی اعمال شد. این آزمایش در فلوم دانشکده مهندسی دانشگاه عین‌الشمس^۱ قاهره در کشور مصر انجام شده است و به بررسی پدیده آبهستگی ناشی از جریان یکطرفه حول پایه استوانه‌ای پرداخته است. فلوم مذکور دارای ۲۳/۲ متر طول، ۰/۸ متر عرض و ۰/۹ متر ارتفاع است. پایه استوانه‌ای با قطر ۷/۶ سانتی‌متر در بستر فلوم ثابت شده و اطراف آن محفظه حاوی ماسه با قطر متوسط ۰/۵ میلی‌متر و چگالی 2650 kg/m^3 قرار گرفته است. پس از مشاهده عدم تغییر در عمق حفره آبهستگی، رسیدن به حالت تعادل در آبهستگی نتیجه‌گیری شده و آزمایش متوقف شده است. در این حالت عمق حفره آبهستگی در بالادست پایه اندازه‌گیری و ثبت شده است. شرایط مذکور در مدل عددی اعمال شده و نتایج حاصل از آن مورد مقایسه قرار گرفتند. تنها به منظور کاهش زمان محاسبات طول دامنه محاسباتی به صورت تقلیل یافته در نظر گرفته شد، و سایر مشخصات آزمایش از جمله عمق آب و سرعت جریان مطابق با آزمایش مذکور در مدل عددی اعمال شدند. همچنین شرایط مرزی و شبکه‌بندی دامنه محاسباتی مطابق با آنچه در بخش قبل شرح داده شد در نظر گرفته شده و صورت گرفت. مدل عددی به مدت ۲۵ ثانیه اجرا شده تا آبهستگی به حالت تعادل رسیده و پس از آن عمق آبهستگی تغییر قابل توجهی نخواهد داشت. در این زمان شکل فرسایش یافته بستر استخراج شده و با نتایج آزمایش مذکور مورد مقایسه قرار گرفت. علاوه بر آن عمق آبهستگی با استفاده از دو رابطه تجربی معتبر برای تعیین عمق تعادلی آبهستگی ناشی از جریان یکطرفه حول پایه پل‌ها محاسبه گردید و با نتایج مدل عددی مقایسه گردید. روابط مذکور به شکل زیر هستند:

$$\frac{S}{D} = 2.2 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.35} Fr^{0.43} \quad \text{رابطه ۸}$$

² Colorado State University (CSU)

¹ Ain Shams University



شکل ۵: بردار سرعت رسوب (مولفه در جهت جریان)

برای درک بهتر مسئله می‌توان شکل (۶) را ملاحظه نمود. در این شکل خطوط جریان در ۵ مقطع زمانی از لحظه شروع مدل‌سازی تا رسیدن به حالت تعادل آبخستگی دیده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با شروع مدل‌سازی خطوط جریان در بالا دست پایه و اطراف آن منبسط شده‌اند. با گذشت زمان علاوه بر آن در پایین دست پایه، جریان‌های گردابه‌ای ایجاد شده و خطوط جریان دارای چرخش شده‌اند. با نزدیک شدن به زمان تعادل و توسعه حفره آبخستگی، خطوط جریان گردابه‌ای منبسط شده و موجب معلق شدن رسوبات می‌شوند.

شکل (۷) بردارهای سرعت در مقاطع طولی و عرضی فلوم در اطراف پایل را در مقطع زمانی قبل از تعادل آبخستگی (ثانیه $t = 24/2$) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در شکل (۷-الف) بردارهای سرعت با برخورد به پایه به سمت پایین حرکت کرده و منجر به تشکیل گردابه‌های نعل اسبی شده‌اند. در شکل (۷-ب) مشاهده می‌شود که بردارهای سرعت در مجاورت صفحه عرضی فلوم متمرکز شده‌اند، این موضوع باعث افزایش تنش برشی بستر گردیده و ظرفیت رسوب برداری افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به توسعه و افزایش عمق حفره آبخستگی در اطراف پایه شده است. همچنین سرعت جریان بر روی دیواره پایه صفر بوده و مقطع لگاریتمی سرعت در تماس با پایه شکل گرفته است. شکل حفره آبخستگی در جهت عرض فلوم در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حفره آبخستگی در طرفین پایه متقارن بوده و شیب رسوبات در هر دو طرف برابر است. در حالی که در جهت طولی، شیب رسوبات در بالادست پایه نسبت به این شیب در پایین دست بیشتر است. این موضوع در شکل (۹) که مقطع حفره آبخستگی تشکیل یافته در جهت طولی فلوم را در زمان تعادل نشان می‌دهد، قابل مشاهده بوده و در راستای نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی است (Sumer و Fredsoe، ۲۰۰۲).

همانطور که اشاره شد، مدل عددی مطابق با مشخصات مطالعه آزمایشگاهی مذکور با استفاده از کد منبع باز اوپن فوم و حل‌گر SedFOAM-2 که قابلیت حل معادلات انتقال رسوب و جریان سیال را به صورت دوفازه دارا است، توسعه داده شد. شرایط آبخستگی در مدل آزمایشگاهی در حالت آب زلال^۱ بوده است. بدین معنا که در نقاط دور از پایه رسوبات بستر حرکتی نداشته و انتقال رسوب به علت وجود پایه و در مجاورت آن به وجود می‌آید. این شرایط با اجرای مدل عددی مشاهده شده و پس از رسیدن به حالت تعادل در آبخستگی نتایج مدل استخراج شده و مورد پس پردازش و بررسی قرار گرفتند.

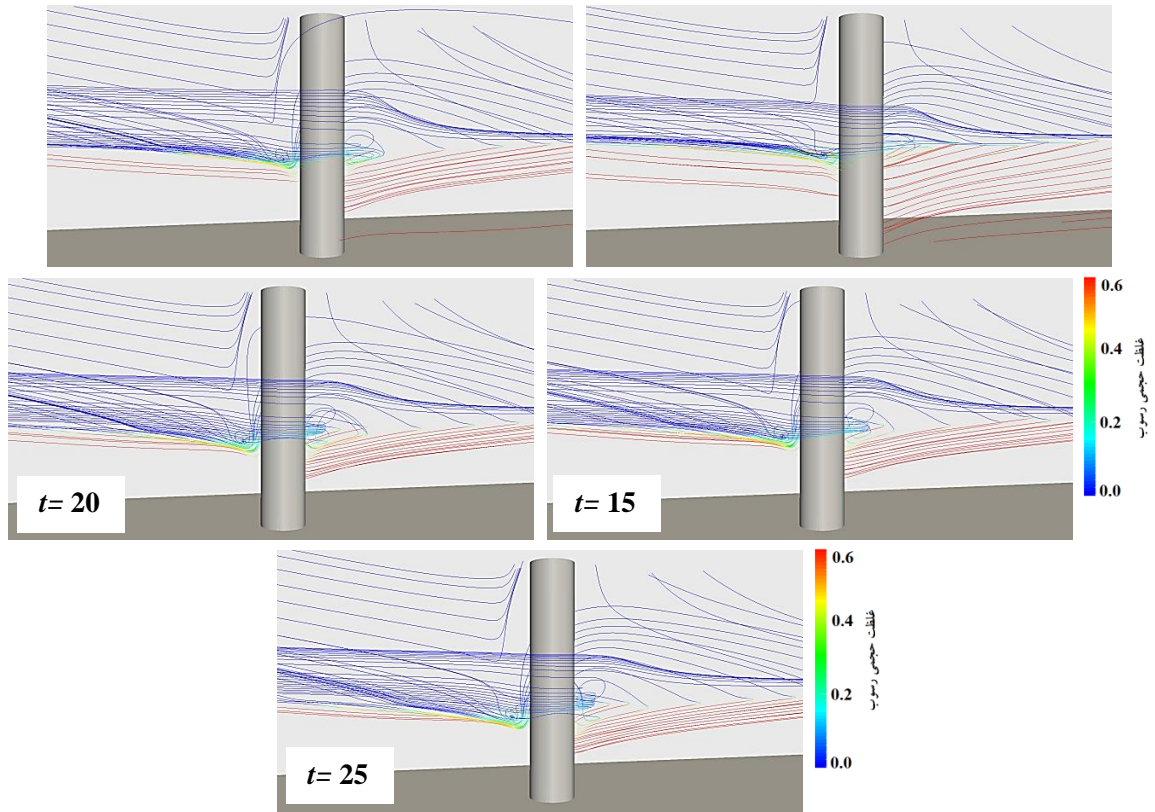
با قرار گرفتن پایه استوانه‌ای قائم، جریان گذرنده اطراف آن دچار تغییراتی می‌شود. یکی از مهم‌ترین پیامدهای آن تشکیل گردابه‌های نعل اسبی در نتیجه جدایش سه‌بعدی لایه مرزی جریان است. این جدایش ناشی از گرادیان فشار منفی در اثر وجود پایه است که در نهایت باعث چرخش لایه مرزی و تشکیل گردابه‌های مارپیچی شکلی در بالادست و مجاورت پایه می‌شود. مطابق با ادبیات فنی این گردابه‌ها از عوامل کلیدی در ایجاد پدیده آبخستگی ناشی از جریان یکطرفه هستند. بدین صورت که گردابه‌ها ذرات رسوب را با خود حمل کرده و در نهایت موجب تشکیل حفره آبخستگی می‌شوند. تشکیل حفره آبخستگی طی زمان صورت می‌گیرد و تا زمانی که شیب رسوبات در حفره به پایداری برسد ادامه خواهد داشت تا در این مرحله آبخستگی متوقف شده و اصطلاحاً به حالت تعادل^۲ می‌رسد.

شکل (۵) مولفه سرعت رسوب را در جهت طول فلوم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود رسوبات به واسطه چرخش جریان و تشکیل گردابه‌های نعل اسبی در بالادست پایه معلق شده و به حرکت درآمده و در نهایت باعث ایجاد حفره آبخستگی پیرامون پایه شده‌اند. همانطور که در شکل مشخص است رسوبات در بالا و پایین دست پایه حرکات چرخشی دارند که می‌توان در اثر وجود بار معلق دانست. در بار معلق میزان غلظت حجمی رسوب نسبتاً کم بوده و حرکت آن عمدتاً ناشی از اندرکنش با گردابه‌های آشفته^۳ است (Chauchat و همکاران، ۲۰۱۷).

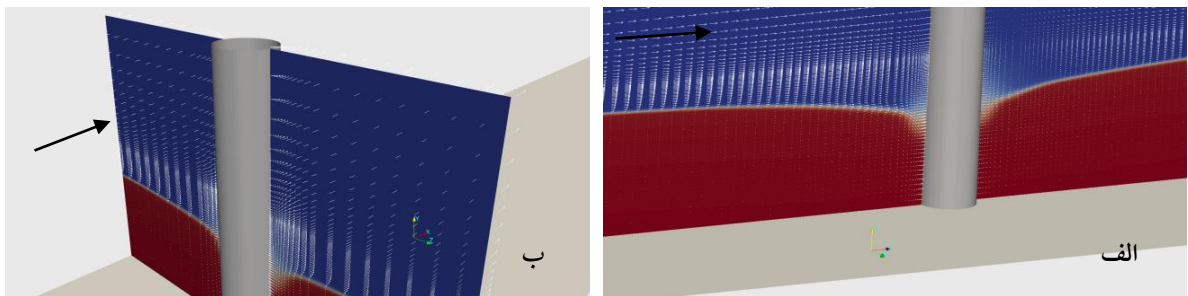
¹ Clear water

² Equilibrium Stage

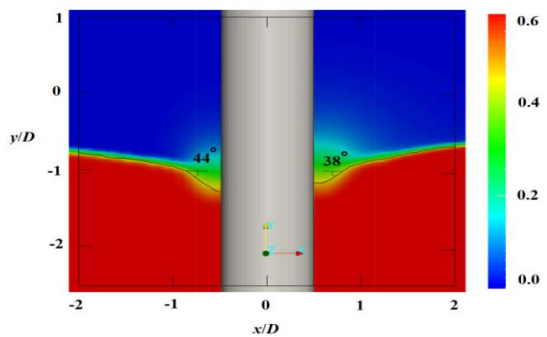
³ Turbulent Eddies



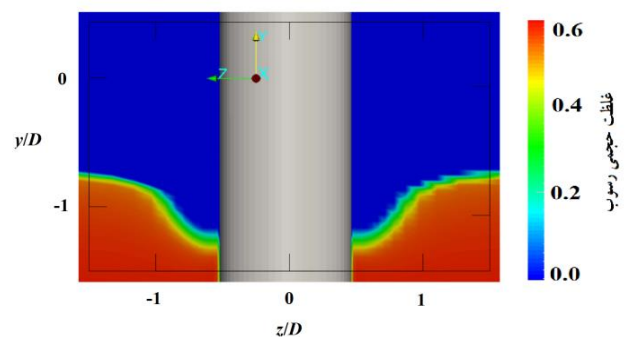
شکل ۶: خطوط جریان در مجاورت پایه طی فرآیند آبشستگی



شکل ۷: بردار سرعت (مؤلفه در جهت جریان)، برش طولی فلوم (الف)، برش عرضی فلوم (ب) در مقطع زمانی قبل از تعادل آبشستگی (ثانیه $t=24/2$)



شکل ۸: برش عرضی بستر تغییر شکل یافته در زمان تعادل آبشستگی در جهت طولی فلوم

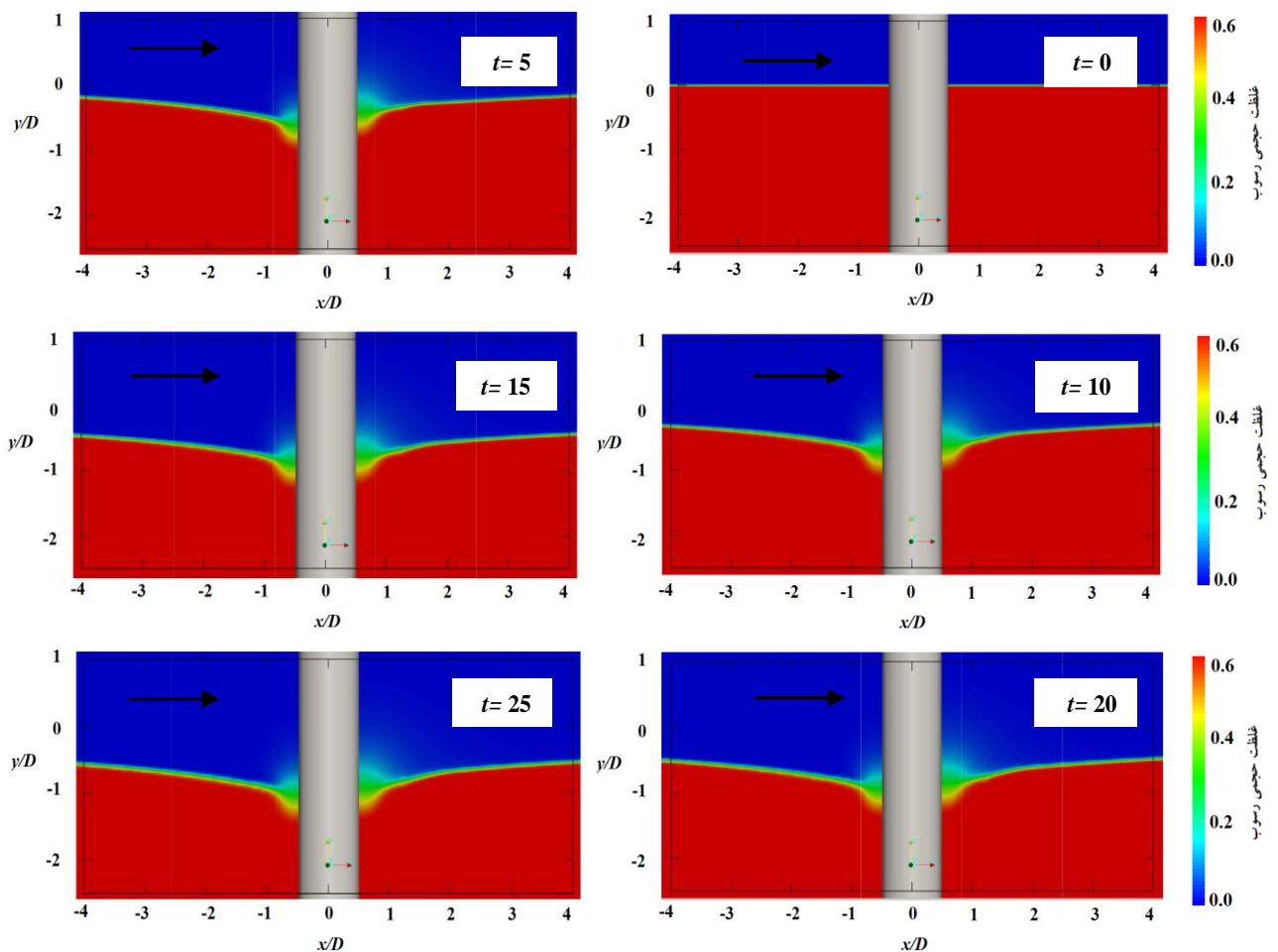


شکل ۹: برش عرضی بستر تغییر شکل یافته در زمان تعادل آبشستگی

در حالی که رسوب برداری در پایین دست پایه در نتیجه ایجاد دنباله‌ها (wakes) و در نهایت گردابه‌افشانی است که با تاخیر صورت می‌گیرد. با ایجاد گردابه‌افشانی رسوب برداری در پایین دست افزایش یافته و از اختلاف عمق حفره آبشستگی در بالا دست و پایین دست کاسته می‌شود. اگرچه همچنان با رسیدن به حالت تعادل، عمق فرسایش یافته و زاویه قرارگیری رسوبات در بالا دست پایه نسبت به پایین دست پایه بیشتر بوده و تقریباً فضایی مانند یک مخروط ناقص در اطراف پایه ایجاد می‌شود. همچنین وجود بار معلق در اطراف پایه از همان لحظات ابتدایی رسوب برداری تا رسیدن به حالت تعادل کاملاً مشهود است. منظور از بار معلق نواحی است که غلظت حجمی رسوب $\alpha \leq 0.3$ است که از خصوصیات مدل دوفازه قابلیت مدل‌سازی این نواحی است (Chauchat و همکاران، ۲۰۱۷).

مشاهدات نشان داده‌اند که شیب حفره آبشستگی در بالادست معمولاً برابر با زاویه اصطکاک داخلی رسوبات است و در پایین دست این شیب قدری کمتر خواهد بود (Rouland و همکاران، ۲۰۰۵).

شکل (۱۰) فرآیند آبشستگی و پیشرفت آن در طول زمان را از لحظه آغاز مدل‌سازی تا رسیدن به حالت تعادل نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با عبور جریان و برخورد با پایه و افزایش ظرفیت رسوب‌برداری آبشستگی آغاز شده و رسوبات اطراف پایه در حالات بار بستر و بار معلق جابه‌جا می‌شوند. در مراحل ابتدایی عمق فرسایش یافته در بالا دست پایه تفاوت مشهودی نسبت به این عمق در پایین دست پایه دارد. این موضوع را می‌توان به تشکیل گردابه‌های نعل اسبی در بالا دست پایه نسبت داد که با رسیدن جریان گذرنده به پایه ایجاد می‌شوند.



شکل ۱۰: توسعه زمانی فرآیند آبشستگی تا رسیدن به حالت تعادل

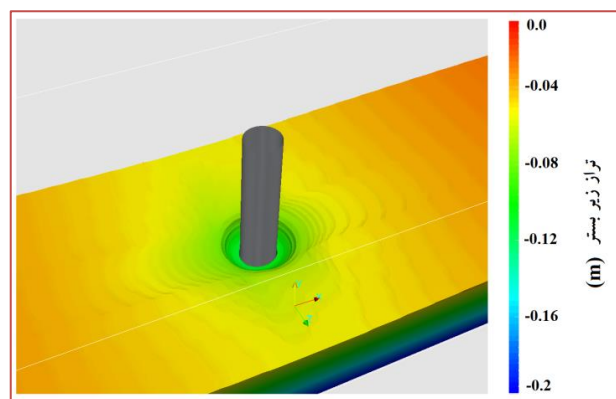
- خطوط جریان و بردارهای سرعت در اطراف پایه ترسیم شد. مشاهده شد فرآیند آبشستگی در نتیجه هر دو عامل گردابه‌های نعل اسبی و گردابه‌افشانی است. با این حال وجود گردابه‌های نعل اسبی در بالا دست پایه یک عامل کلیدی محسوب شده، زیرا شیب حفره آبشستگی در نواحی زیرین آن بیشتر بود. با بررسی شیب حفره آبشستگی در بالا و پایین دست پایه مشاهده شد که شیب حفره در بالا دست تقریباً برابر با زاویه اصطکاک داخلی رسوب و در پایین دست کمتر از این مقدار است، که در راستای نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی نیز است.

- با رسم بردارهای سرعت در اطراف پایه حرکت چرخشی رسوبات مشاهده شد. همچنین با بررسی پیشرفت زمانی فرآیند آبشستگی در مقطع طولی حفره آبشستگی مشاهده شد که در مراحل ابتدایی عمق فرسایش یافته در بالای دست پایه تفاوت مشهودی نسبت به این عمق در پایین دست پایه دارد. این موضوع را می‌توان به تشکیل گردابه‌های نعل اسبی در بالا دست پایه نسبت داد که با رسیدن جریان گذرنده به پایه سریعاً ایجاد می‌شوند. در حالی که رسوب‌برداری در پایین دست پایه در نتیجه ایجاد دنباله‌ها و در نهایت گردابه‌افشانی است که با تاخیر صورت می‌گیرد.

منابع

- Amoudry, L. O., and Liu, P. F., 2009. Two-dimensional, two-phase granular sediment transport model with applications to scouring downstream of an apron. *Coastal Engineering*, 56(7): 693-702.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.01.006>
- Bakhtyar, R., Yeganeh-Bakhtiary, A., Barry, D. A., Ghaehri, A., 2009. Two-phase hydrodynamic and sediment transport modeling of wave-generated sheet flow. *Advances in Water Resources*, 32(8): 1267-1283.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.05.002>
- Chauchat, J., Cheng, Z., Nagel, T., Bonamy, C., Hsu, T. J., 2017. SedFoam-2.0: a 3-D two-phase flow numerical model for sediment transport. *Geoscientific Model Development*, 10(12).

شکل (۱۱) نمایی سه بعدی از حفره ایجاد شده در اطراف پایه را به همراه تراز بستر تغییر یافته در زمان تعادل آبشستگی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در پایین دست پایه حفره با شیب ملایم‌تری نسبت به بالا دست و در فاصله بیشتری از پایه ادامه پیدا کرده است که در راستای نتایج آزمایشگاهی موجود در ادبیات فنی است (Rouland و همکاران، ۲۰۰۵).



شکل ۱۱: بستر تغییر شکل یافته در زمان تعادل آبشستگی

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل‌سازی عددی پدیده آبشستگی ناشی از جریان یکطرفه با استفاده از نرم‌افزار اوپن فوم صورت گرفت. برای این منظور از حل‌گر SedFoam-2 که قابلیت مدل‌سازی جریان سیال و رسوب را به صورت دوفازه با دیدگاه اوپنلر-اوپنلر داراست، استفاده شد.

در این مدل دوفازه اندرکنش میان سیال-رسوب، رسوب-رسوب و سازه-سیال منظور شد. معادلات حاکم بر سیال و رسوب با قابلیت در نظرگیری تنش بین ذرات در فضای محاسباتی حل شدند و از مدل دو معادله‌ای $k-\omega$ برای در نظر گرفتن آشفتگی استفاده شد. مدل عددی تا رسیدن به حالت تعادل آبشستگی اجرا شد و به‌طور خلاصه موارد زیر حاصل شد: - راستی‌آزمایی مدل عددی با مقایسه نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی Mostafa و Agamy (۲۰۱۱) و نتایج حاصل از دو رابطه تجربی برای تعیین آبشستگی صورت گرفت و قابلیت حل‌گر SedFoam-2 در محاسبه عمق آبشستگی در مجاورت پایه‌های استوانه‌ای ارزیابی شد. تطابق قابل قبولی (به میزان ۸٪) میان نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی مشاهده گردید.

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:9\(1306\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:9(1306))
- Melville, B. W., Raudkivi, A. J., 1996. Effects of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(4): 203-209.
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:4\(203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:4(203))
- Stahlmann, A., 2013. Numerical and experimental modeling of scour at foundation structures for offshore wind turbines. In *The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Sumer, B. M., 2002. *The mechanics of scour in the marine environment* (Vol. 17). World Scientific Publishing Company. <https://doi.org/10.1142/4942>
- Sumer, B. M., Whitehouse, R. J., Tørum, A., 2001. Scour around coastal structures: a summary of recent research. *Coastal Engineering*, 44(2): 153-190.
- [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00024-2)
- Richardson, E. V., Davis, S. R., 2001. Evaluating scour at bridges: Hydraulic engineering circular No. 18. Rep. FHWA NHI, 01-001.
- Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., Michelsen, J., 2005. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, 534: 351-401.
- <https://doi.org/10.1017/S0022112005004507>
- Van Wilson Jr, K., 1995. Scour at selected bridge sites in Mississippi. *Water-Resources Investigations Report*, 94, 4241.
- Yeganeh-Bakhtiary, A., Kazeminezhad, M. H., Etemad-Shahidi, A., Baas, J. H., Cheng, L., 2011. Euler–Euler two-phase flow simulation of tunnel erosion beneath marine pipelines. *Applied Ocean Research*, 33(2): 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2011.01.001>
- <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4367-2017>
- Chauchat, J., and Guillou, S., 2008. On turbulence closures for two phase sediment laden flow models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C11).
- <https://doi.org/10.1029/2007JC004708>
- Cheng, Z. H. E. N., Hsu, T. J., 2014. A multi-dimensional two-phase eulerian model for sediment transport—twophaseeulersedfoam (version 1.0). In *Tech. Rep CACR-14-08*. University of Delaware.
- DNV, O. S. D. O. (2014). J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures.
- Ettema, R., Melville, B. W., & Barkdoll, B. (1998). Scale effect in pier-scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(6): 639-642.
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:6\(639\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:6(639))
- Jia, Y., Altinakar, M., Guney, M. S., 2018. Three-dimensional numerical simulations of local scouring around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 56(3): 351-366.
- <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1356389>
- Kazeminezhad, M.H, Yeganeh-Bakhtiary, A., Etemad-Shahidi, A., Baas, J. H., 2011. Two-phase simulation of wave-induced tunnel scour beneath marine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6): 517-529.
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000540](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000540)
- Melville, B. W., Chiew, Y. M., 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1): 59-65.
- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:1\(59\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:1(59))
- Melville, B. W., Dongol, D. M., 1992. Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9): 1306-1310.