

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

محمد محمدیگی کاسوائی^۱، محمدحسین کاظمی نژاد^{۲*}، عباس یگانه بختیاری^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: ۹۷/۸/۱۹

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۲۹

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: اوپن فوم، معادلات رینولتز، مدل دوفازه، اندرکنش سیال- رسوب، اوپلر- اوپلر، انتقال رسوب.

۱. مقدمه

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 سازه- های 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 دریایی، گرادیان فشار ایجادشده 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 پایه هستند. با

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-Bakhtiary 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-Bakhtiary و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی آبخستگی در زیر یک خط لوله دریایی تحت اثر جریان نوسانی پرداختند. این در حالی است که مدل‌سازی عددی سه بعدی پدیده آبخستگی در مجاورت پایه‌های قائم به صورت دوفازه صورت نگرفته است.

در این مطالعه مدل‌سازی عددی پدیده آبخستگی 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 حل گر 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 آبخستگی ارزیابی شده و موارد دیگری نظیر خطوط جریان، بردارهای سرعت و فرآیند توسعه زمانی حفره آبخستگی 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

رودخانه‌ها مد نظر بوده است. در برخی تحقیقات رابطه‌ای تجربی نیز برای تعیین عمق آبخستگی 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 آبخستگی 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 آبخستگی 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 آبخستگی 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 آبخستگی با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداختند. Jia و همکاران (۲۰۱۷) با توسعه یک مدل عددی به بررسی آبخستگی 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 آبخستگی 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 آبخستگی را دارند. در سال‌های اخیر مدل‌سازی‌های عددی دوفازه انتقال رسوب و آبخستگی در مجاورت سازه‌هایی نظیر استوانه‌های افقی به صورت دوبعدی صورت گرفته است، به طور مثال: Chauchat و Guillou (۲۰۰۸) با مدل‌سازی دوفازه انتقال رسوب در کانال‌های باز به بررسی مدل‌های آشفستگی 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

رابطه ۳

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

رابطه ۴

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

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. \bar{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:

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

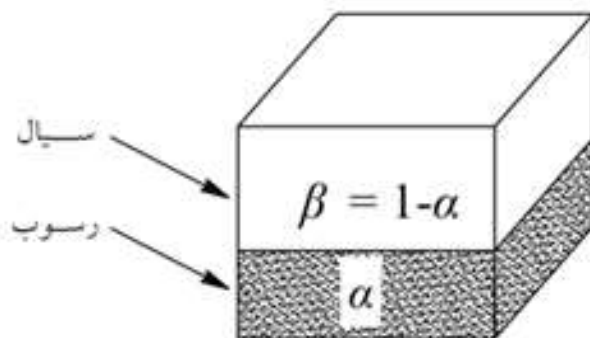
در رابطه بالا، k و ω به ترتیب برابر با انرژی جنبشی آشفته سیال و نرخ ویژه اتلاف انرژی هستند. این پارامترها برای مدل دوفازه سیال و رسوب اصلاح شده و به صورت زیر بیان می‌شوند:

رابطه ۶

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

² Drag force

یک جریان چند فازه را به صورت یک محیط پیوسته فرض نمود، 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 خصوصیات 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 کارتزین 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 کارتزین هستند. همچنین معادلات مومنتوم برای فاز سیال و رسوب به صورت زیر بیان می‌شوند:

^۱ Reynolds Average Navier Stokes

رابطه ۷

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

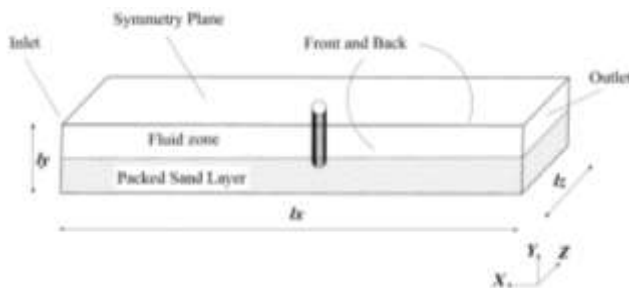
در روابط بالا R_{ij}^{bt} برابر با مؤلفه بزرگ‌مقیاس تنش سیال (مانند تنش‌های رینولدز) است. همچنین ضرایب مختلف مورد استفاده قرار گرفته برابر با مدل Chauchat و همکاران (۲۰۱۷) بوده که در جدول (۱) مشخص شده‌اند.

جدول ۱: ضرایب به کاررفته در مدل آشفته‌گی

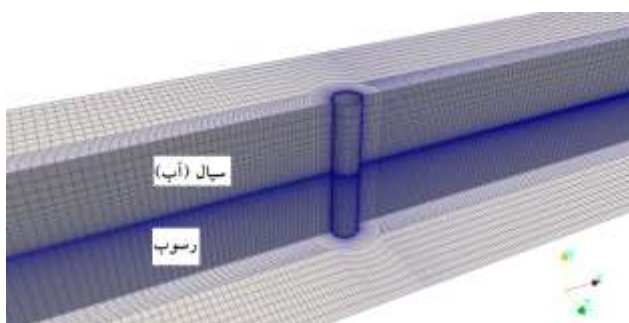
ضریب	C_μ	$C_{1\omega}$	$C_{2\omega}$	$C_{3\omega}$	$C_{4\omega}$	σ_k	σ_ω	S_{US}
مقدار	0.09	5/9	3/40	0.35	11/0	2.0	2.0	1.0

۲-۲ دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

تعبیه شده در کد اوپن فوم بوده و علیرغم عدم سهولت تولید و شبکه بندی دامنه محاسباتی با استفاده از آن، ویرایش شبکه بندی 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 فلوم با نزدیک شدن به پایه از سلول‌های محاسباتی ریزتری استفاده شده است (بعد سلول برابر با ۰/۱ قطر پایه در مجاورت آن). همچنین در ارتفاع فلوم 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

در این مطالعه یک فضای مکعب مستطیل، مطابق با شکل (۲)، به‌عنوان دامنه محاسباتی برای مدل‌سازی عددی پدیده آبستگي 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 به‌عنوان 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

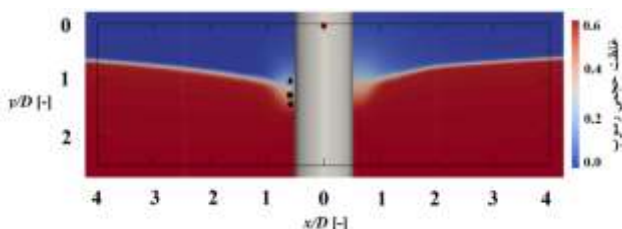
رابطه فوق توسط دانشگاه ایالتی کلرادو^۲ برای محاسبه عمق آبخستگی حول پایه پل‌ها تحت جریان یکطرفه ارائه شده است. این رابطه توسط Richardson و Davis (۲۰۰۱) بازنگری شد و با عنوان Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC-18) توسط اداره حمل و نقل امریکا منتشر گردید. Wilson (۱۹۹۵) نیز رابطه تجربی برای تعیین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

۳-۱ راستی آزمایشی مدل عددی

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

در روابط بالا Fr برابر با عدد فرود، y عمق آب، S و d_s عمق آبخستگی و D قطر پایه است. برای عدد فرود $Fr=0.25$ میزان عمق آبخستگی 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 آبخستگی را به همراه اعماق آبخستگی محاسبه شده از روابط تجربی مذکور و نتیجه آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق آبخستگی 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 آبخستگی ناشی از جریان یکطرفه در مجاورت پایه استوانه‌ای قائم را دارا است.

به منظور راستی آزمایشی مدل عددی می‌بایست نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی موجود و روابط تجربی پیش‌بینی آبخستگی 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 آبخستگی 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 آبخستگی، رسیدن به حالت تعادل در آبخستگی نتیجه‌گیری شده و آزمایش متوقف شده است. در این حالت عمق حفره آبخستگی 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 آبخستگی به حالت تعادل رسیده و پس از آن عمق آبخستگی 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 آبخستگی با استفاده از دو رابطه تجربی معتبر برای تعیین عمق تعادلی آبخستگی ناشی از جریان یکطرفه حول پایه پل‌ها محاسبه گردید و با نتایج مدل عددی مقایسه گردید. روابط مذکور به شکل زیر هستند:



شکل ۴: مقطع تغییر شکل یافته بستر در جهت جریان را در زمان تعادل آبخستگی، به همراه نتایج آزمایشگاهی و روابط تجربی
● نتیجه حاصل از رابطه (۸)، ▲ نتیجه حاصل از رابطه (۹)، ■ نتیجه آزمایش Mostafa و Agamy (۲۰۱۱)

۳-۲ بررسی پدیده آبخستگی

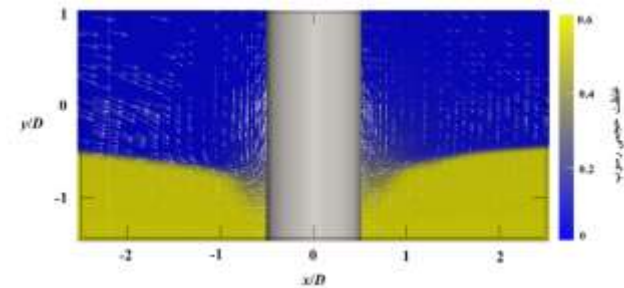
همان‌طور که اشاره شد، مدل عددی مطابق با مشخصات مطالعه آزمایشگاهی مذکور با استفاده از کد منبع باز اوپن فوم و حل‌گر

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

² Colorado State University (CSU)

¹ Ain Shams University

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 آبشستگی، خطوط جریان گردابه‌ای منبسط شده و موجب معلق شدن رسوبات می‌شوند.



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

شکل (۷) بردارهای سرعت در مقاطع طولی و عرضی فلوم در اطراف پایل را در مقطع زمانی قبل از تعادل آبشستگی (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 آبشستگی 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 آبشستگی در جهت عرض فلوم در شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حفره آبشستگی 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 آبشستگی 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 (Fredsoe و Sumer, 2002). 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 (Roulund و همکاران, 2005).

SedFOAM-2 که قابلیت حل معادلات انتقال رسوب و جریان سیال را به صورت دوفازه دارا است، توسعه داده شد. شرایط آبشستگی 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 آبشستگی نتایج مدل استخراج شده و مورد پس پردازش و بررسی قرار گرفتند.

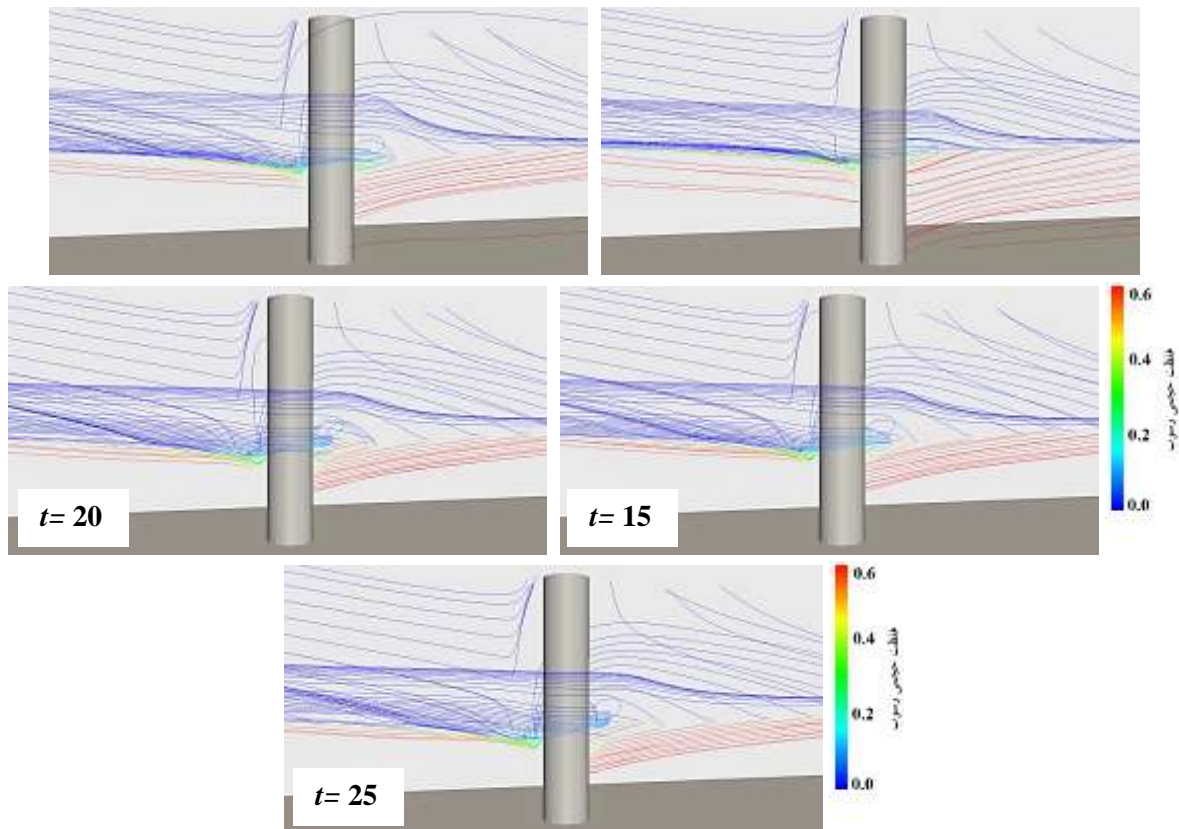
با قرار گرفتن پایه استوانه‌ای قائم، جریان گذرنده اطراف آن دچار تغییراتی می‌شود. یکی از مهم‌ترین پیامدهای آن تشکیل گردابه‌های نعل اسبی در نتیجه جدایش سه‌بعدی لایه مرزی جریان است. این جدایش ناشی از گرادیان فشار منفی در اثر وجود پایه است که در نهایت باعث چرخش لایه مرزی و تشکیل گردابه‌های مارپیچی شکلی در بالادست و مجاورت پایه می‌شود. مطابق با ادبیات فنی این گردابه‌ها از عوامل کلیدی در ایجاد پدیده آبشستگی ناشی از جریان یکطرفه هستند. بدین صورت که گردابه‌ها ذرات رسوب را با خود حمل کرده و در نهایت موجب تشکیل حفره آبشستگی می‌شوند. تشکیل حفره آبشستگی طی زمان صورت می‌گیرد و تا زمانی که شیب رسوبات در حفره به پایداری برسد ادامه خواهد داشت تا در این مرحله آبشستگی 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 آبشستگی 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, 2017). 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 آبشستگی دیده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با شروع مدل‌سازی خطوط جریان

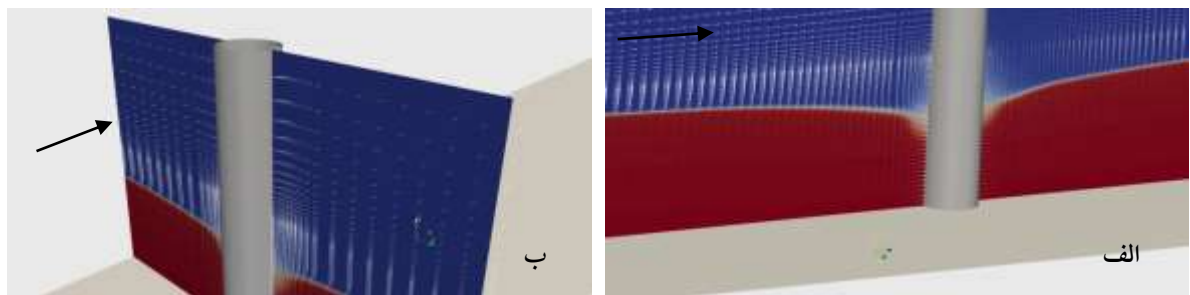
¹ Clear water

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 فلوام (الف)، برش عرضی فلوام (ب) در مقطع زمانی قبل از تعادل آبشستگی (ثانیه ۲۴/۲)

در حالی که رسوب برداری در پایین دست پایه در نتیجه ایجاد دنباله‌ها^۱ 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

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 رسوب برداری 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.

¹ wakes

جریان سیال و رسوب را به صورت دوفازه با دیدگاه اویلر-اویلر داراست، استفاده شد.

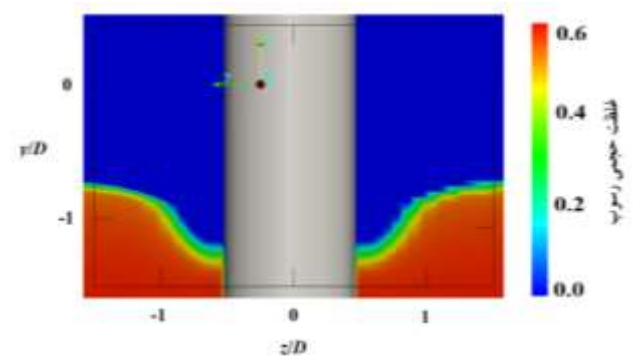
در این مدل دوفازه اندرکنش میان سیال- رسوب، رسوب- رسوب و سازه- سیال منظور شد. معادلات حاکم بر سیال و رسوب با قابلیت در نظرگیری تنش بین ذرات در فضای محاسباتی حل شدند و از مدل دو معادله‌ای $k-\omega$ برای در نظر گرفتن آشفتنی استفاده شد. مدل عددی تا رسیدن به حالت تعادل آبشستگی اجرا شد و به طور خلاصه موارد 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 حل گر 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.

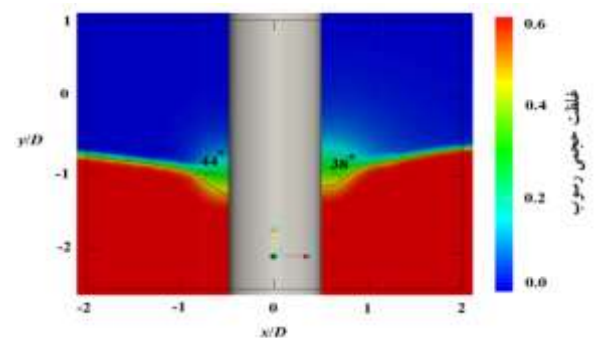
- خطوط جریان و بردارهای سرعت در اطراف پایه ترسیم شد. مشاهده شد فرآیند آبشستگی در نتیجه هر دو عامل گردابه‌های نعل اسبی و گردابه‌افشانی است. با این حال وجود گردابه‌های نعل اسبی در بالا دست پایه یک عامل کلیدی محسوب شده، زیرا شیب حفره آبشستگی در نواحی زیرین آن بیشتر بود. با بررسی شیب حفره آبشستگی در بالا 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 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 سریعاً ایجاد می‌شوند. در حالی که رسوب برداری در پایین دست پایه در نتیجه ایجاد دنباله‌ها و در نهایت گردابه‌افشانی است که با تاخیر صورت می‌گیرد.

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).



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

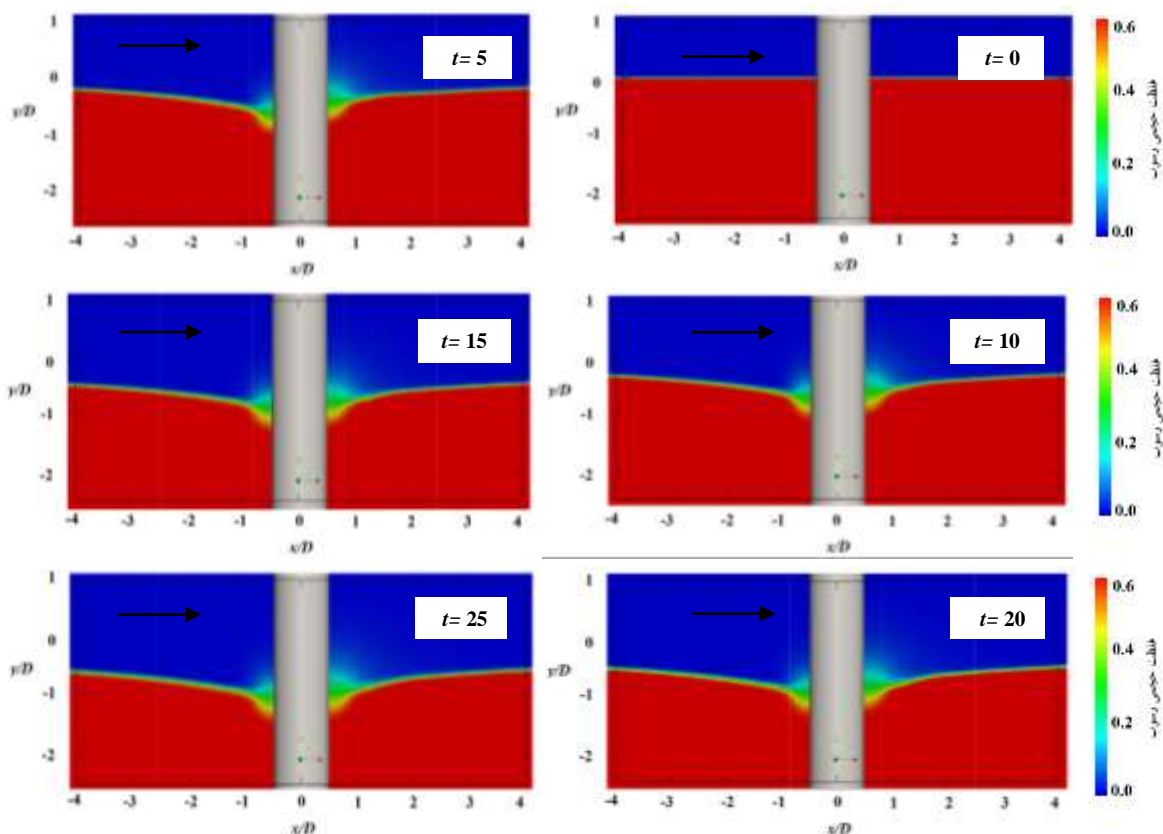


شکل ۹: زوایای حفره آبشستگی در بالادست و پایین دست پایه استوانه‌ای در جهت طولی فوم

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).

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 حل گر SedFoam-2 که قابلیت مدل‌سازی



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

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>

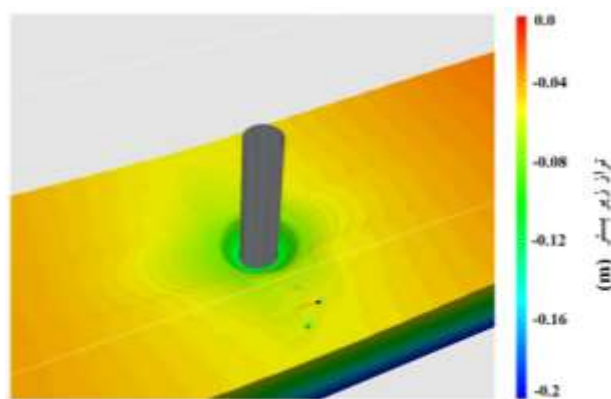
Chauchat, J., Cheng, Z., Nagel, T., Bonamy, C., Hsu, T. J., 2017. SedFoam-2.0: a 3-D two-phase flow numerical model for sediment transport. *Geoscientific Model Development*, 10(12).

<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*



شکل ۱۱: بستر تغییر شکل یافته در زمان تعادل آبهستگی

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>

- [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>
- 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.
[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.