

## بررسی تجربی و عددی فرایند آبشستگی در اطراف پایه‌های با مرزهای جانبی متناسب با پروفیل سرعت تحت جریان دائمی

حمیدرضا توحیدی<sup>1</sup>، حبیب حکیم زاده<sup>2\*</sup>

1- کارشناس ارشد عمران - سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

2- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

hakimzadeh@sut.ac.ir

چکیده - شکل پایه‌ها یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در فرایند آبشستگی اطراف آنهاست. بررسی تأثیر استفاده از پایه با مقطع متغیر در عمق در کاهش عمق آبشستگی یکی از موضوعات مورد توجه پژوهشگران بوده است. پایه‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل دو دسته اصلی پایه‌های مبتنی بر پروفیل لگاریتمی، پایه‌های مخروطی و یک پایه استوانه‌ای مینا می‌باشد. مقطع این پایه‌ها دایروی بوده و در پایه‌های لگاریتمی، عرض پایه از کف تا سطح آب با شیبی متناسب با پروفیل لگاریتمی سرعت کاهش می‌یابد. به دلیل افزایش عرض عبوری جریان در نواحی نزدیک تر به سطح آب در مورد پایه‌های لگاریتمی و مخروطی، جریانی که دارای حداکثر سرعت در این نواحی است، با سهولت بیشتری از اطراف پایه‌های مذکور نسبت به پایه استوانه‌ای عبور کرده و از سرعت آن کاسته می‌شود. بنابراین فشار دینامیکی در قسمت فوقانی این پایه‌ها نسبت به پایه استوانه‌ای کاهش یافته و جریان رو به پایین ضعیف‌تری در جلوی پایه ایجاد می‌شود که نتیجه امر کاهش عمق آبشستگی خواهد بود. در این بررسی تجربی و عددی، پایه‌های لگاریتمی به دلیل داشتن شیب غیرخطی زیاد در مجاورت بستر و شیب غیرخطی کم در نزدیکی سطح آب، در مقایسه با پایه‌های مخروطی با شیب خطی ثابت در عمق جریان، عملکرد بهتری از خود نشان دادند. نتایج تحقیق نشان داد که سه مدل با پروفیل لگاریتمی متناسب با (mm)  $d_{50}=0/78$ ، (mm)  $d_{50}=1/1$  و (mm)  $d_{50}=1/3$  و سه مدل با پروفیل مخروطی با زاویه  $(\varphi \cong 5/5^\circ)$ ،  $(\varphi \cong 7/5^\circ)$  و  $(\varphi \cong 9/5^\circ)$  (که در آنها  $\varphi$  زاویه شیب جانبی پایه‌هاست) به ترتیب با کاهش عمق آبشستگی نسبی  $55/9\%$ ،  $65/4\%$ ،  $73/2\%$ ،  $38/5\%$ ،  $47/2\%$  و  $52/7\%$  نسبت به مدل استوانه‌ای مینا (به قطر 4/5 سانتی متر) همراه بوده‌اند. در ادامه به شبیه‌سازی عددی برخی از آزمایش‌ها با مدل Flow-3D به روش حجم محدود پرداخته شده است. سرانجام نتایج مدل عددی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده و تطابق نسبی منطقی بین آنها مشاهده شده است.

کلیدواژه‌گان: آبشستگی موضعی، شکل پایه، کنترل آبشستگی، مدل عددی Flow 3D.

### 1- مقدمه

اجرا و نگهداری نامناسب از آنها را نیز نباید از نظر دور داشت. هزاران پل در سطح جهان وجود دارند که به دلیل وقوع سیلاب‌های فصلی، آبشستگی در اطراف آنها پدیدار شده و احتمال تخریب آنها در صورتی که برای محافظت از

یکی از عوامل اصلی خرابی بسیاری از پل‌ها قبل از پایان عمر مفید آنها، عدم توجه به معیارهای هیدرولیکی در طراحی است. در فرایند تخریب پل‌ها، عوامل دیگر مانند

سازه مخروطی شکل بر تنش برشی بستر اطراف سازه اشاره کرد. همچنین در این رابطه، آزمایش‌های انجام شده توسط Sumer et al. (1994) بر روی بستری ثابت و 3 شیب مختلف برای سازه‌هایی با زوایای 0، 45 و 60 درجه را نباید از نظر دور داشت. این پژوهشگران بدین نتیجه رسیدند که تنش برشی بستر با افزایش شیب سازه، کاهش می‌یابد و نیز اشاره داشتند که گردابه نعل اسبی در حالت مخروطی شکل همچنان وجود دارد، اما طول و شدت آن در مقایسه با سازه استوانه‌ای شکل کاهش می‌یابد.

Fredsoe and Sumer (1997) در ادامه مطالعات سال 1994 تأثیر شیب جانبی را در موج شکن قائم و یک سازه مخروطی شکل بررسی نمودند. آنها دو زاویه 30 و 45 درجه را مورد آزمایش قرار دارند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش زاویه، جریان در اطراف سازه به میزان بیشتری منحرف می‌شود و این سبب کاهش درگیری خطوط جریان در نزدیکی بستر خواهد شد و در نتیجه تنش برشی کمتر و عمق آبخستگی کمتری را بدنبال خواهد داشت. همچنین Sanoussi and Habib (2008) تأثیر دماغه شیب دار و گرد شده پایه پل را در آبخستگی موضعی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که هنگامی که دماغه شیب‌دار می‌شود، عمق آبخستگی کاهش می‌یابد. در ادامه این‌گونه تحقیقات، پوراحمدی (1389) با جایگزینی پایه‌های مخروطی شکل با پایه استوانه‌ای و پایه‌های هرمی در مقایسه پایه استوانه‌ای با مقطع مربع و انجام آزمایش‌هایی با شدت جریان‌های مختلف، کاهش محسوسی در حداکثر عمق آبخستگی مشاهده نمود. سرانجام، Hakimzadeh et al. (2012) به بررسی تجربی تأثیر پایه مخروطی بر کاهش پدیده آبخستگی پرداخته و حدود 30 درصد کاهش در عمق آبخستگی را برای زاویه شیب جانبی حدود 10 درجه گزارش نمودند. با توجه به تحقیقات و مشاهدات انجام شده در این گونه پایه‌ها، به دو دلیل کاهش تنش برشی بستر مشاهده می‌شود. نخست اینکه افزایش عرض عبوری جریان در نواحی نزدیک‌تر به سطح آب، سبب می‌شود جریانی که دارای حداکثر سرعت در این نواحی است با سهولت بیشتری از اطراف پایه عبور کند و نیز فشار دینامیکی کمتری در مقایسه با پایه‌های

آنها طرحی اندیشیده نشود، حتمی خواهد بود. الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده بوده و این پیچیدگی با تشکیل حفره آبخستگی در اطراف پایه بیشتر می‌شود. در جریان‌های آشفته، سامانه‌های گردابی در اطراف پایه به وجود می‌آیند که عملکرد آنها سبب حفر گودالی در اطراف پایه بنام حفره آبخستگی می‌شود. دو عامل مهم ایجاد کننده چنین سامانه‌هایی می‌توانند به برخورد جریان به پایه و جدایش جریان از پایه پل مربوط شوند. در برخورد جریان به پایه، ابتدا جریان روبه پایین و سپس گردابه نعل اسبی تشکیل می‌گردد که جت آب رو به پایین یکی از عوامل اصلی فرسایش مواد رسوبی بستر در اطراف پایه، به ویژه در جلوی آن محسوب می‌شود. پس از برخورد جریان آب به پایه، به تناسب سرعت جریان، در وجه بالادست پایه، یک گرداب فشار از بالا به پایین به وجود می‌آید. این گرداب فشار باعث ایجاد یک جریان رو به پایین<sup>1</sup> در جلو پایه می‌شود. به اعتقاد Tseng et al. (2000) جریان رو به پایین مزبور عامل اصلی تشکیل گرداب نعل اسبی<sup>2</sup> محسوب می‌شود. همچنین Johnson (1991) نشان داد که نرخ فرسایش در حفره آبخستگی به طور مستقیم به اندازه سرعت جریان رو به پایین مزبور وابسته است.

در گذشته روش‌های مختلفی برای کنترل پدیده آبخستگی در اطراف پایه پل ارائه شده‌اند که همگی به نحوی سعی در کاهش تأثیر عوامل فرسایشی مذکور دارند. از روش‌هایی که با مکانیزم کاهش و مقابله با سرعت جریان رو به پایین عمل می‌کنند، می‌توان به استفاده از سنگ چین، طوق، شکاف و استفاده از پایه با مقطع متغیر در عمق اشاره کرد. در این خصوص، بررسی‌های انجام یافته نشان می‌دهند که استفاده از پایه‌های با مقطع متغیر در عمق سبب کاهش مقدار تنش برشی بستر در اطراف این پایه‌ها می‌شود. از کارهای مطالعاتی شبیه به این مورد، می‌توان به بررسی‌های انجام شده توسط Melville and Raudkivi (1996) در مورد اثر ارتفاع پی بزرگتر از پایه اصلی بر روی عمق آبخستگی و نیز به مطالعات ذکر شده توسط Sumer and Fredsoe (2002) در مورد تأثیر شیب

1. Down Flow

2. Horseshoe Vortex

استوانه‌ای در بالای پایه ایجاد شود. دوم اینکه با کاهش مقدار فشار دینامیکی در قسمت‌های فوقانی پایه جریان رو به پایین ضعیف‌تری در جلوی پایه ایجاد می‌شود. همچنین شیب سطوح پایه موجب تمایل جریان رو به پایین به سمت بالادست از روی سطح پایه می‌شود (Hakimzede et al, 2012).

بنابراین با توجه به مطالعات انجام شده در این زمینه، می‌توان اذعان نمود که بررسی‌ها تاکنون فقط بر روی پروفیل‌های خطی تغییر مقطع در عمق در پایه‌ها و سازه‌های مختلف متمرکز بوده است، در حالی که انتظار می‌رود شیب غیرخطی سازه‌ای عملکرد بهتری نسبت به شیب خطی داشته باشد، اگرچه اجرای این‌گونه شکل‌های پایه ممکن است در عمل اندکی پیچیده‌تر از حالت خطی باشد. بنابراین در تحقیق حاضر پروفیل غیرخطی متناسب با پروفیل سرعت (پروفیل سرعت لگاریتمی) برای روند تغییر مقطع پایه در عمق انتخاب شده و سعی بر این شده است که با اعمال پروفیل‌های مختلف لگاریتمی، پایه‌هایی با مرزهای جانبی متناسب با پروفیل سرعت طراحی و عملکرد آنها با پایه‌های مخروطی در کاهش عمق آبشستگی مقایسه شود. در این نوع پایه‌ها، با توجه به شیب غیرخطی زیاد در مجاورت بستر و شیب غیرخطی کم در نزدیکی سطح آب، عملکرد آنها در مقایسه با پایه‌های مخروطی که دارای شیب خطی ثابت در عمق جریان هستند، بهبود می‌یابد (توحیدی، 1392).

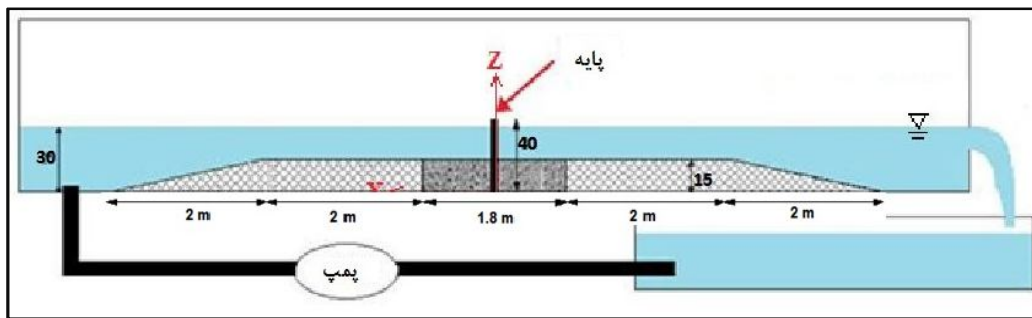
## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- مشخصات کانال و مصالح بستر

آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک و در کانالی به طول 12، عرض 1/02 و عمق 0/8 متر و شیب بستر صفر درجه انجام گرفت. دیواره و کف کانال آزمایشگاهی از شیشه با ضخامت 10 میلی‌متر ساخته شده و آب داخل آن قابل رؤیت بود. برای ملایم سازی جریان آب از شبکه فلزی توری که در قسمت ورودی کانال قرار داشت، استفاده شد. همچنین برای ملایم کردن جریان آب و کاستن آشفتگی در محل آزمایش، در قسمت‌های بالادست و پایین دست محل مورد نظر سکوهایی مطابق شکل 1 با

### 2-2- مشخصات جریان

مشخصات جریان برای تمام آزمایش‌ها مطابق جدول 1 آورده شده است. در این آزمایش‌ها ابتدا برای یافتن سرعت متوسط جریان در کانال از یک دستگاه سرعت سنج مولینه استفاده گردید. سرعت جریان در فاصله هر یک سانتی‌متر در امتداد عمق 15 سانتی متر و در فاصله سی سانتی‌متری از بالادست پایه اندازه‌گیری شد و پروفیل تقریبی سرعت جریان حاصل شد.



شکل 1 جزئیات کانال آزمایشگاهی

سرعت اصطکاکی تعیین و با داشتن رابطه شزی مقادیر شیب کانال و سرعت بحرانی بدست آمده است. سپس در آزمایشگاه برای بدست آوردن سرعت بحرانی، ابتدا کانال تا عمق 15 سانتی‌متر با دبی بسیار پایین پر شد و پس از آن، دبی به آرامی تا رسیدن به دبی بحرانی که در آن ذرات به طور مکرر در بسیاری از مکان‌ها شروع به حرکت می‌کردند، افزایش یافت. این آزمایش در شرایطی انجام پذیرفت که پایه درون کانال نصب نشده بود. از اینرو دبی را بطور بطئی تغییر داده و تا رسیدن به دبی آستانه حرکت، آزمایش ادامه یافت.

### 2-3- مشخصات مدل‌ها

مدل‌های مورد آزمایش در این تحقیق یک مدل استونه‌ای مینا، 3 مدل مخروطی شکل و 3 مدل با پروفیل لگاریتمی می‌باشند. برای دستیابی به شیب جانبی مناسب برای مدل‌های لگاریتمی پایه‌ها، ابتدا پروفیل لگاریتمی سرعت جریان برای 3 نوع زبری مواد و مصالح بستر ( $d_{50} = 0/78, 1/1, 1/3 \text{ mm}$ ) بدست آمد، سپس با توجه محدودیت‌های مدل‌سازی نمونه‌ها و عرض کانال آزمایشگاهی و به منظور دستیابی به ابعاد متعارف برای شکل مدل‌ها، شیب پروفیل‌های حاصل شده با اعمال ضریب 0/3 تعدیل شده و شیب نهایی مدل‌های لگاریتمی حاصل شد.

برای مدل‌های مخروطی نیز 3 شیب مختلف در نظر گرفته شده است. سطح تصویر پایه در مقابل جریان برای همه مدل‌ها یکسان و برابر با 67/5 سانتی‌متر مربع بوده است. تمام مدل‌ها اعم از مدل‌های مخروطی و مدل‌های لگاریتمی دارای مقطع دایروی بوده و جنس آنها از پلی‌اتیلن بود.

جدول 1 مشخصات جریان

شدت جریان	دبی (لیتر بر ثانیه)	سرعت متوسط (متر بر ثانیه)	عمق جریان (سانتی متر)
0/92	41/5	0/272	15

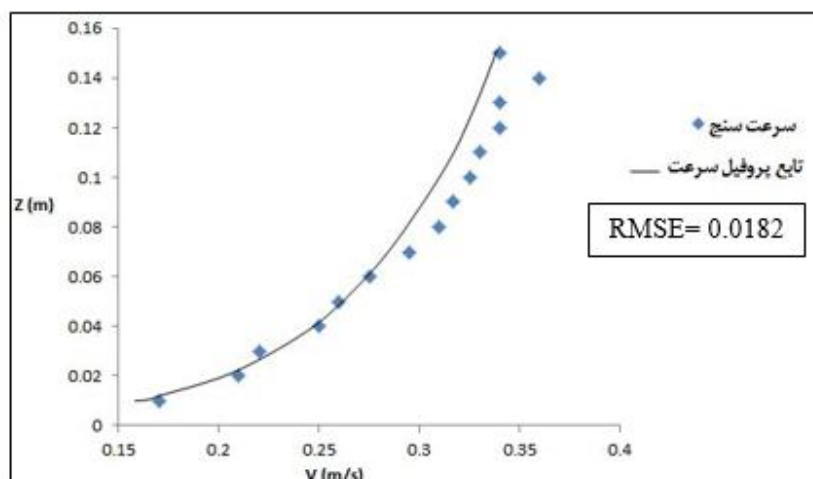
بدین ترتیب مقدار سرعت متوسط جریان طبق پروفیل بدست آمده، برابر 0/272 متر بر ثانیه برآورد شد. مقایسه پروفیل بدست آمده توسط سرعت سنج و منحنی پروفیل سرعت حاصل از رابطه لگاریتمی پروفیل سرعت (رابطه نیکورادزه<sup>1</sup>) به صورت ذیل در شکل 2 ارائه شده است.

$$u(z) = \frac{u_f}{K} \ln \left( 30 \frac{z}{k_s} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه  $Z$  فاصله از بستر،  $u_f$  سرعت اصطکاکی<sup>2</sup>،  $k_s$  زبری نیکورادزه (برابر است با  $2/5d_{50}$ ) و  $K$  ضریب فن کارمن<sup>3</sup> است، که برابر با 0/41 می‌باشد.

همچنین در جدول فوق شدت جریان عبارت از نسبت سرعت برشی جریان موجود در کانال به سرعت برشی جریان بحرانی مربوط به حرکت دانه‌ها و یا نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت متوسط بحرانی است. همچنین برای ممانعت از تشکیل شکنج و نیز حصول حداکثر عمق آبخستگی در شرایط آب زلال، تمام آزمایش‌ها تحت شدت جریان 0/92 انجام شده است. در ابتدا برای برآورد سرعت بحرانی آستانه حرکت ذرات، محاسباتی بر اساس نمودار شیلدز انجام پذیرفت. در این محاسبات با فرض برقراری جریان یکنواخت در کانال، ابتدا مقدار پارامتر شیلدز با توجه به قطر 50 درصد دانه‌های مورد استفاده در آزمایش محاسبه شده، سپس از روی رابطه تنش برشی بستر مقدار

1. Nikuradse  
2. Friction Velocity  
3. Von Karman



شکل 2 مقایسه پروفیل سرعت به دست آمده از دستگاه سرعت سنج و رابطه لگاریتمی

محاسباتی و انتقال رسوب دارد. Flow 3D از روش حل حجم محدود با المان‌های سه بعدی متعامد بهره می‌گیرد. بکارگیری روش  $VOF^1$  در پیش‌بینی سطح آزاد سیال و ترکیب آن با روش  $FAVOR^2$  در تشخیص مرزهای صلب و نیز ایجاد موانع با هندسه پیچیده از ویژگی‌های مهم این نرم‌افزار عددی محسوب می‌شوند. در مدل هیدرودینامیک این نرم‌افزار از معادلات متوسط‌گیری در زمان ناویر استوکس و معادله بقای جرم استفاده شده است. در مورد مدل آشفتگی از مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  از نوع (RNG) بهره گرفته شده است. برای محاسبه بار بستر از مدل جبری شناخته شده Mayer Peter and Muller (1948) استفاده شده است. تغییرات بستر نیز از روی معادله موازنه جرم محاسبه و تعیین گردیده است.

ابتدا برای مدل استوانه‌ای مینا با تغییر دادن شبکه‌بندی و شرایط مرزی، عمق آبشستگی را با توجه به نتیجه ساعت نخست مدل‌سازی آزمایشگاهی کالیبره کرده و سپس بدون تغییر در شبکه‌بندی و شرایط مرزی مدل‌های دیگر تحلیل شدند. مدل‌های انتخاب شده برای تحلیل عددی در این مقاله و مقایسه با نتایج تجربی مربوطه، مدل استوانه‌ای مینا (B)، مدل مخروطی (C2) و مدل لگاریتمی (L2) می‌باشند. هندسه کانال و پایه‌های مورد نظر ابتدا در نرم‌افزار CATIA در ابعاد واقعی به صورت شکل 4-الف ساخته شده سپس در نرم‌افزار Flow 3D فراخوانی شدند.

ساخت مدل‌ها با استفاده از دستگاه تراش مجهز به CNC انجام شده بود. برای این منظور، نقشه مدل‌ها ابتدا در نرم‌افزار CATIA طراحی و برای ساخت آنها از دستگاه CNC فرز با دقت 0/001 میلی‌متر استفاده شد. پروفیل مدل‌ها در قسمت‌هایی که داخل ماسه قرار گرفته و خارج از آب بوده، استوانه‌ای در نظر گرفته شده‌اند، به عبارت دیگر در این نواحی مقطع مدل ثابت می‌باشد. مشخصات نهایی مدل‌ها در جدول 2 و تصاویر آنها در شکل 3 نشان داده شده‌اند. برای از بین بردن اثر دیواره‌های کانال بر روی حداکثر عمق آبشستگی، معیارهای مختلفی توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است که برخی از آنها بسیار محدود کننده و بسیاری از آنها متعارف هستند. در این تحقیق، به منظور تعدیل و کاهش اثر دیواره‌های کانال (و یا به حداقل رساندن آن) با احتساب محدودیت‌های کانال آزمایشگاهی و مدل‌سازی پایه‌ها، معیار Shen and Schneider (1969) انتخاب شده است. بر این اساس در صورتی که نسبت عرض پایه به عرض کانال از 12/5% کمتر باشد، دیواره‌های جانبی بر آبشستگی بی تأثیر خواهد بود، که این امر برای تمام پایه‌ها رعایت شده است.

## 2-4- شبیه‌سازی عددی

در ادامه این تحقیق، برای شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال رسوب از نرم‌افزار Flow 3D استفاده شده است. این مدل توسط شرکت Flow Science توسعه یافته و کاربردهای وسیعی از جمله در دینامیک سیالات

1. Volume of Fluid

2. Fractional Area-Volume Obstacle Representation

بلوک محاسباتی دوم در نزدیکی پایه و با شبکه نسبی ریز در نظر گرفته شده است. جزئیات شبکه بندی محاسباتی در شکل 4- ب و جدول 3 قابل مشاهده است.

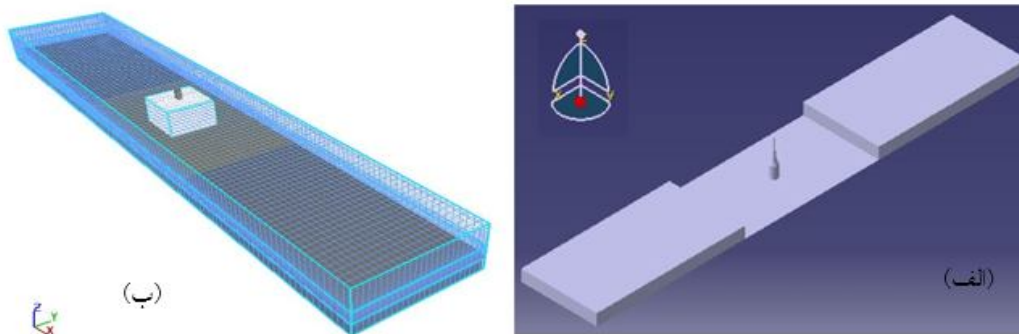
در این تحقیق با توجه به قابلیت ریز کردن اندازه شبکه در یک بلوک، برای کاهش زمان اجرای برنامه از دو بلوک محاسباتی استفاده شده است. ابتدا یک بلوک محاسباتی با ابعاد شبکه درشت در کل کانال در نظر گرفته شده و

جدول 2 مشخصات مدل‌ها

کد مدل	عرض مدل در سطح آب $D_1$ (سانتی‌متر)	عرض مدل در کف $D_2$ (سانتی‌متر)	نسبت عرض مدل در کف به عرض کانال	پروفیل مدل
B	4/5	4/5	0/045	استوانه‌ای
C1	3	6	0/06	مخروطی ( $\varphi \cong 5/5^\circ$ )
C2	2/5	6/5	0/065	مخروطی ( $\varphi \cong 7/5^\circ$ )
C3	2	7	0/07	مخروطی ( $\varphi \cong 9/5^\circ$ )
L1	2/7	8/2	0/082	لگاریتمی ( $d_{50}=0/78 \text{ mm}$ )
L2	2/3	9/1	0/091	لگاریتمی ( $d_{50}=1/1 \text{ mm}$ )
L3	2	10	0/10	لگاریتمی ( $d_{50}=1/3 \text{ mm}$ )



شکل 3 تصویر مدل‌ها



شکل 4 الف) مدل سه بعدی کانال و پایه در نرم‌افزار CATIA ب) شبکه‌بندی و بلوک‌های محاسباتی

جدول 3 ابعاد و تعداد سلول‌های بلوک‌های محاسباتی

N(total)	Z (Ncell)	Y (Ncell)	X (Ncell)	Z (cm)	Y (cm)	X (cm)	
128000	16	40	200	40	100	600	بلوک محاسباتی 1
288000	80	60	60	40	40	40	بلوک محاسباتی 2

تجربی محاسبه می‌شوند، ولی در اینجا مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش جایگزین آنها گردیدند. همچنین متوسط خطای نسبی در این اعتبارسنجی برابر 16/63 درصد بوده است.

$$\frac{d_s}{d_{se}} = \exp \left[ -0.03 \left| \frac{u_c}{u} \ln \left( \frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right] \quad (2)$$

برای مدل مذکور، آبشستگی از زوایای تقریباً 45 درجه نسبت به محور جریان آغاز شده و به سمت بالادست پایه توسعه یافت. مواد رسوبی از جلو و اطراف پایه شسته شده و در پشت پایه تجمع می‌یافتند. برای بی بعد کردن عمق آبشستگی  $d_s$  و زمان  $t$  از عمق آبشستگی نهایی  $d_{sm}$  و زمان تعادل نسبی آبشستگی  $t_e$  (12 ساعت) استفاده شده است.

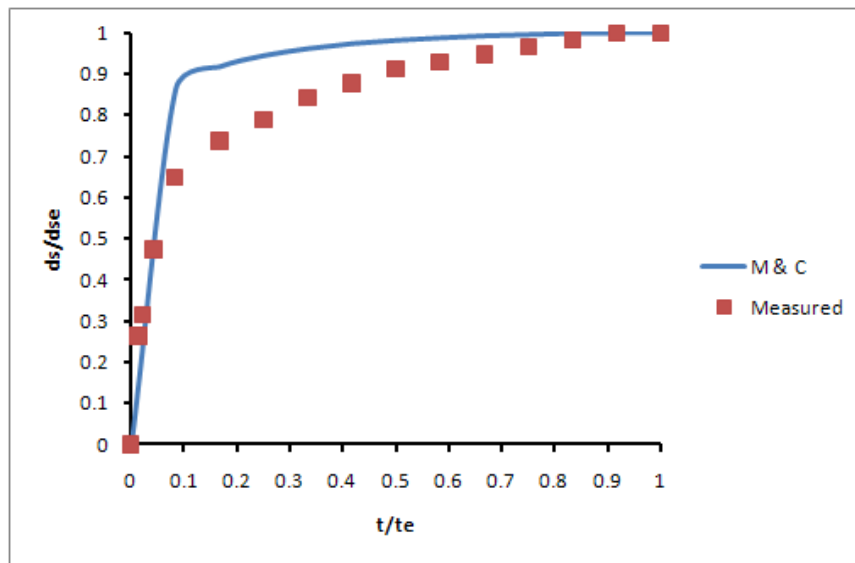
برای کنترل عملکرد سیستم آزمایشی، نتایج بدست آمده از آزمایش‌های این تحقیق در مورد مدل استوانه‌ای مبنا (مدل B) با نتایج حاصل از بکارگیری روابط تجربی ارائه شده توسط محققان دیگر مقایسه گردید که در جدول 4 قابل مشاهده است. نتیجه این تحقیق به مقادیر بدست آمده از روابط (Garde and Raju (1985) و Jain (1981) بسیار نزدیک بوده و با نتایج مربوط به روابط Hancu (1971) و Shen (1971) اختلاف اندکی دارند. ولی همان‌گونه که از روی نتایج عددی جدول مذکور مشاهده می‌شود، اختلاف نتایج این تحقیق با رابطه تجربی ارائه شده توسط Breusers (1977) چشمگیر است و به مقدار بیش از 20 درصد میرسد. همچنین در شکل 6 منحنی-های تغییرات عمق نسبی آبشستگی با زمان برای تمامی مدل‌ها نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که از روی این شکل مشاهده می‌شود، در تمامی مدل‌ها تقریباً 60 تا 65 درصد عمق آبشستگی در 1 ساعت نخست مدت زمان آزمایش، یعنی اندکی بیش از 8 درصد زمان تعادل نسبی آبشستگی توسعه می‌یابد و پس از آن به آرامی افزایش یافته و به عمق تعادلی نسبی می‌رسد.

برای دیواره‌ها شرط مرزی غیر لغزشی دیواره (Wall) و در ورودی کانال شرط مرزی فشار مشخص (Specified pressure) با اعمال تراز سطح آب و مقدار سرعت به عنوان ورودی و در خروجی کانال شرط مرزی جریان خروجی (Outflow) و برای سطح آزاد نیز شرط مرزی تقارن (Symmetry) در نظر گرفته شده است.

### 3- نتایج و بحث

در ابتدا برای تعیین مدت زمان انجام آزمایش (زمان تعادل آبشستگی)، آزمایشی به مدت 24 ساعت بر روی مدل استوانه‌ای مبنا (مدل B) انجام گرفت و تغییرات زمانی عمق آبشستگی ثبت شد. نتایج مؤید آن بود که سرعت فرایند آبشستگی در لحظات اولیه بیشتر بوده و با توسعه حفره آبشستگی از شدت آن کاسته می‌شود.

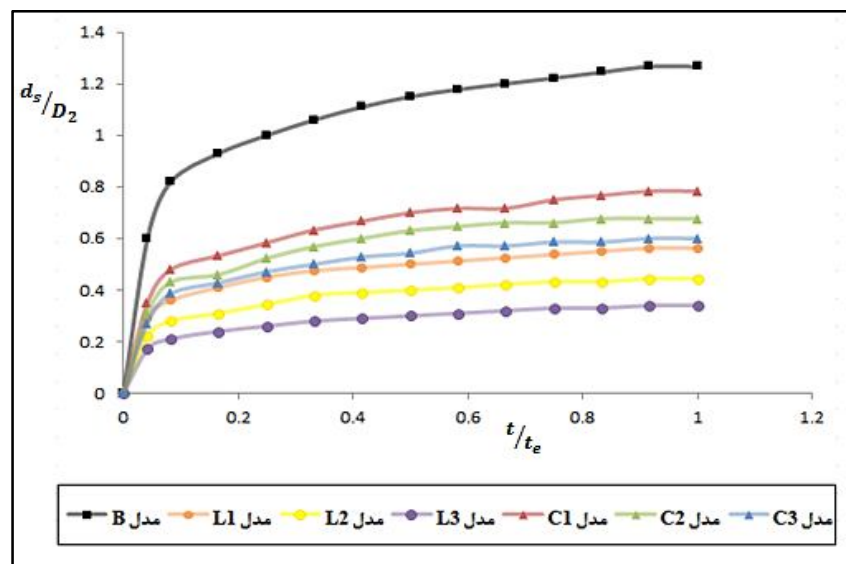
بر اساس معیار Melville and Chiew (M&C) (1999) چنانچه تغییر عمق آبشستگی پس از یک بازه زمانی 24 ساعته از 5 درصد قطر پایه تجاوز نکند، آن عمق به عنوان عمق نهایی آبشستگی پذیرفته می‌شود. همچنین از روی نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که پس از گذشت حدود 12 ساعت از شروع آزمایش، عمق آبشستگی در جلوی پایه به 95% حداکثر مقدار خود در 24 ساعت رسیده و از ساعت 12 به بعد تغییرات عمق آن چندان محسوس نبوده و کمتر از 5 درصد قطر پایه بود. با توجه به این نتایج زمان تعادل نسبی آبشستگی (زمان انجام آزمایش) تمامی آزمایش‌ها 12 ساعت انتخاب شد بعلاوه، بر اساس یافته‌های برخی از محققان، 90% عمق تعادل پس از 7 یا 8 ساعت برای بیشتر آزمایش‌ها به وجود می‌آید. همچنین، مطالعات آزمایشگاهی عمق آبشستگی به وسیله فرمول تجربی ملویل و چپو (1999) صحت‌سنجی شده است (شکل 5). اگرچه در این فرمول‌بندی که در ذیل آمده است مقادیر آبشستگی و زمان تعادل از روابط جداگانه



شکل 5 مقایسه تغییرات زمانی عمق آبشستگی موضعی در مقابل مدل مینا ( $d_{se} = 57mm$ )

جدول 4 مقایسه عمق آبشستگی مدل B با برخی از روابط تجربی موجود

تحقیق حاضر	Colorado University (2000)	Johnson (1991)	Garde and Raju (1985)	Jain (1981)	Breusers (1977)	Shen (1971)	Hancu (1971)	Laurson and Toch (1956)	محقق
57	69	65	59	61	70	63	51	65	عمق آبشستگی تعادل $d_{se}$ (mm)
-	% 21	% 14	% 3/5	% 7	% 22/8	% 10/5	% 10/5	% 14	درصد اختلاف



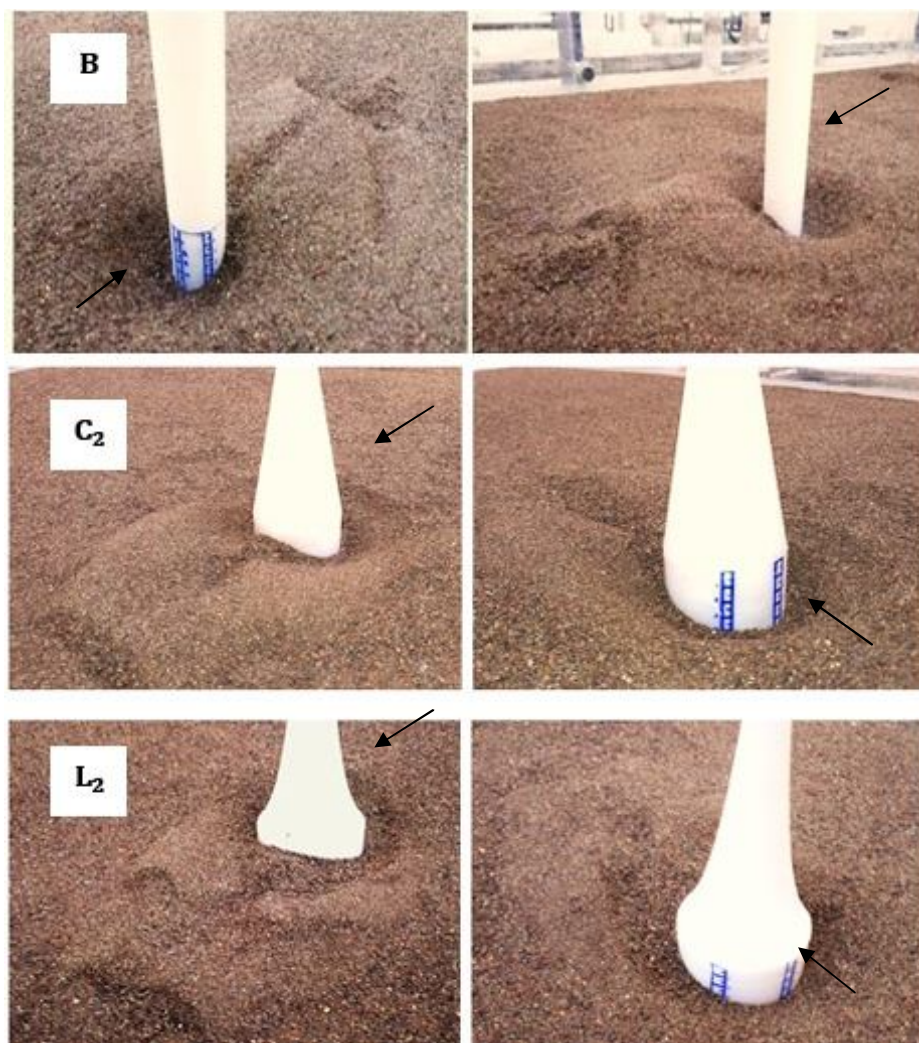
شکل 6 تغییرات زمانی عمق نسبی آبشستگی جلوی تمام مدل ها



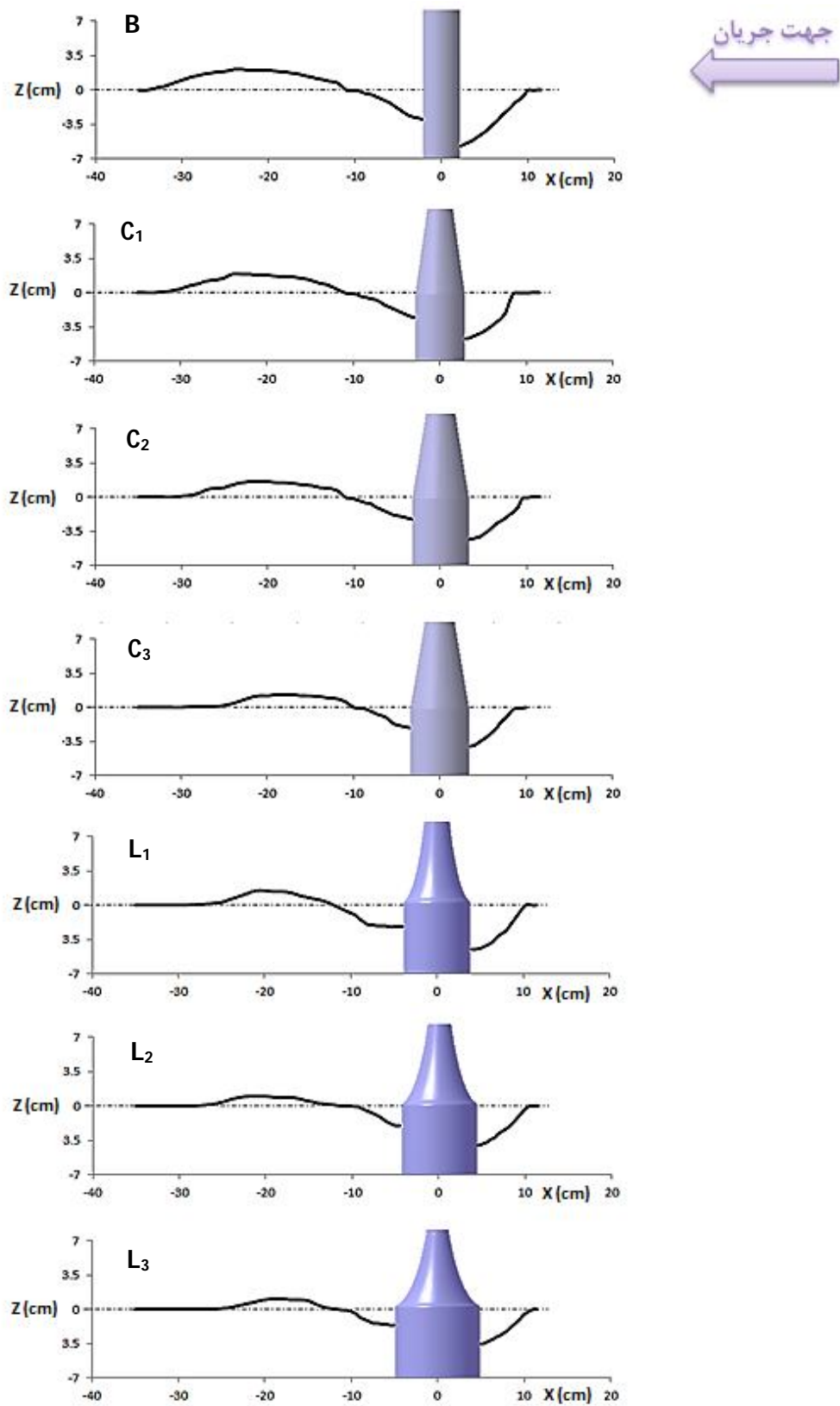
و لگاریتمی، سطح قسمت حفر شده و قسمت انباشت رسوب نیز، با افزایش شیب و انحنا کاهش می‌یابد. در این قسمت به بررسی پارامترهای آبستگي که در شکل 9 نشان داده شده است، پرداخته می‌شود. این پارامترها در ذیل تعریف شده و پس از 12 ساعت آزمایش برای تمام مدل‌ها، اندازه‌گیری و در جدول 5 آورده شده است.

$a$  طول گودال آبستگي،  $2b$  عرض گودال آبستگي،  $c$  طول بخش آبستگي در پایین دست پایه،  $d$  طول انباشت مواد رسوبي در پایین دست پایه،  $e$  حداکثر ارتفاع بخش رسوب گذاری،  $\alpha$  زاویه گودال آبستگي در بالادست پایه و  $\beta$  زاویه گودال آبستگي در پایین دست پایه است.

همچنین می‌توان مشاهده کرد که در تمامی مدل‌ها با افزایش شیب و انحنای جانبی به ترتیب در مدل‌های مخروطی و مدل‌های لگاریتمی، کاهش عمق آبستگي حداکثر بیشتر محسوس می‌شود و در مورد مدل‌های لگاریتمی کاهش مزبور محسوس‌تر است. در شکل 7 تصویر آبستگي جلو و انباشت رسوب پشت مدل‌های B،  $C_2$  و  $L_2$  به عنوان نمونه آورده شده است. در ادامه نیز در شکل 8 منحنی‌های پروفیل طولی تراز بستر رسم شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در تمامی پروفیل‌ها، بیشترین عمق آبستگي در جلوی پایه شکل گرفته است و عمق آبستگي ایجاد شده در پشت پایه همواره کوچکتر از عمق آبستگي جلوی پایه است. در مدل‌های مخروطی



شکل 7 تصویر آبستگي جلو و انباشت رسوب پشت مدل‌های B،  $C_2$  و  $L_2$  (جهت جریان در شکل مشخص شده است)



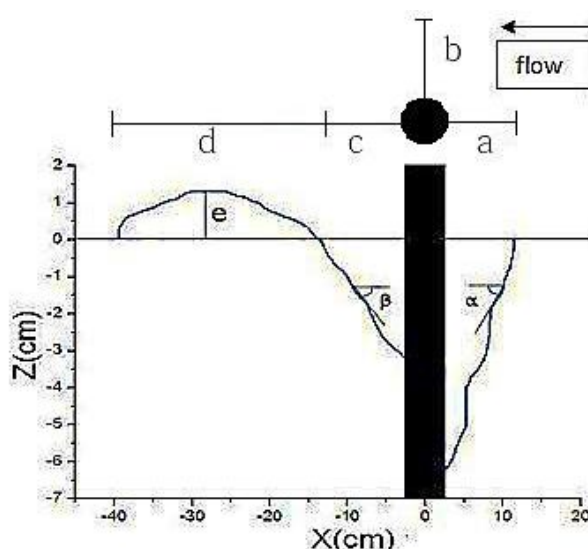
شکل 8 پروفیل‌های طولی تراز بستر برای تمام مدل‌ها بعد از 12 ساعت آزمایش

Fredsoe (2002) و Zhao (2010) برابر زاویه ایستایی خاک می باشد. همچنین مشاهده می شود که در همه موارد زاویه گودال آبشستگی در بالادست پایه از زاویه پایین دست بیشتر است.

همچنین در جدول 6 عمق آبشستگی نهایی و میزان کاهش عمق آبشستگی تمامی مدل ها نسبت به مدل استوانه ای مبنا آورده شده است.

این مقادیر شامل میزان کاهش حداکثر عمق مطلق آبشستگی و حداکثر عمق نسبی آبشستگی (نسبت به قطر مدل در بستر) بیان شده اند که در ادبیات فنی برای ارائه گزارش از مورد دوم بیشتر استفاده می شود. همان طور که مشاهده می شود بیشترین کاهش آبشستگی مربوط به مدل لگاریتمی L3 می باشد و برای تمامی مدل ها با افزایش شیب و انحنای عمق آبشستگی کاهش بیشتری از خود نشان می دهد.

جدول 7 نتایج توسعه زمانی عمق آبشستگی از روی شبیه سازی عددی برای یک ساعت اول و مقایسه آن ها با نتایج تجربی را نشان می دهد.



شکل 9 پارامترهای فعال آبشستگی

همان طور که از جدول 5 مشاهده می شود طول و عرض گودال آبشستگی، طول بخش آبشستگی و رسوب گذاری و همچنین بیشترین ارتفاع رسوب گذاری در پایین دست پایه با تبدیل شدن پایه استوانه ای به پایه مخروطی و لگاریتمی کاهش می یابد. شیب بالادست گودال آبشستگی در همه پایه ها تقریباً ثابت و بنا بر مطالعات Sumer and

جدول 5 پارامترهای فعال آبشستگی

پارامتر	مدل B	مدل C1	مدل C2	مدل C3	مدل L1	مدل L2	مدل L3
a (cm)	8/5	7/6	7/1	6/6	6/8	6	5/4
b (cm)	8	7	6/4	6	7/3	7	5
c (cm)	9	8/3	8	7/8	7/9	7/4	6/4
d (cm)	24	21/5	19	18/3	19	17/8	17
e (cm)	1/2	1/9	1/6	1/3	1/6	1/1	0/9
$\alpha$ (درجه)	33/85	32/41	32/15	32/47	33/49	33/69	32/19
$\beta$ (درجه)	18/43	16/76	16/03	15/76	16/23	15/77	14/03

جدول 6 میزان کاهش عمق آبشستگی مدل های مورد آزمایش نسبت به مدل استوانه ای مبنا

کد مدل	مدل B	مدل C1	مدل C2	مدل C3	مدل L1	مدل L2	مدل L3
عمق آبشستگی (mm)	57	47	44	42	45	40	34
کاهش عمق آبشستگی (درصد)	-	38/5 %	47/2 %	52/7 %	55/9 %	65/4 %	73/2 %

**جدول 7** نتایج توسعه زمانی عمق آبخستگی در یک ساعت اول شبیه‌سازی عددی و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی

مدت زمان (دقیقه)	عمق آبخستگی		درصد اختلاف مدل عددی و تجربی
	عمق آبخستگی (mm)	عمق آبخستگی (mm)	
10	13	15	13%
15	16	18	11%
30	25	27	7%
60	34	37	8%
10	8	10	20%
15	10	13	23%
30	17	20	15%
60	26	28	7%
10	7	10	30%
15	9	12	25%
30	16	20	20%
60	23	25	8%

مشهودتر است. برخلاف این مسأله، در مدل استوانه‌ای مینا بردارهای سرعت در مرز بالا دست پایه از تراز بستر تا حدود دو سوم عمق به سمت پایین تمایل دارند. این امر نشان دهنده عملکرد بسیار خوب مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق در کاهش سرعت جت عمودی (سرعت رو به پایین) بوده و در عمل نیز به کاهش عمق آبخستگی در این مدل‌ها نسبت به مدل استوانه‌ای مینا منجر شده است. در ابتدا نتایج این بررسی نشان داد که پایه‌های مخروطی شکل با کاهش حداکثر عمق آبخستگی در مقایسه با پایه استوانه‌ای همراه بوده اند و این کاهش با افزایش شیب جانبی پایه‌ها بیشتر می‌شدند، به طوری که مدل‌های  $C1(\varphi \cong 5/5^\circ)$ ،  $C2(\varphi \cong 7/5^\circ)$  و  $C3(\varphi \cong 9/5^\circ)$  حداکثر عمق مطلق آبخستگی را به ترتیب به میزان 17/5%، 22/8% و 26/3% و حداکثر عمق آبخستگی نسبی (نرمال شده به قطر مدل‌ها در بستر) را به میزان 38/5%، 47/2% و 52/7% نسبت به مدل استوانه‌ای مینا کاهش دادند.

همچنین پایه‌های لگاریتمی (منحنی الخط) نیز در مقایسه با پایه استوانه‌ای و پایه‌های مخروطی با کاهش حداکثر عمق آبخستگی همراه بوده‌اند، به طوری که مدل‌های L1، L2 و L3 که به ترتیب با پروفیل سرعت مربوط به  $(d_{50}=0/78)$ ،  $(d_{50}=1/1)$  و  $(d_{50}=1/3)$  متناسب بوده اند، حداکثر عمق مطلق آبخستگی را به ترتیب به میزان 21%، 29/8% و 40/3% و حداکثر عمق آبخستگی نسبی (نرمال شده به قطر مدل‌ها در بستر) را به میزان 55/9%، 65/4% و 73/2% نسبت به مدل استوانه‌ای مینا کاهش می‌دهند. برای تمامی مدل‌ها با افزایش شیب و انحنای عمق آبخستگی کاهش بیشتری از خود نشان می‌دهد و این امر در مورد مدل‌های لگاریتمی بیشتر مشهود است.

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق ملاحظه شد که پایه مخروطی و لگاریتمی نسبت به پایه استوانه‌ای مینا کارایی بهتری در کاهش عمق آبخستگی دارند و نیز تطابق نسبتاً قابل توجه نتایج مدل عددی و تجربی مشاهده شد.

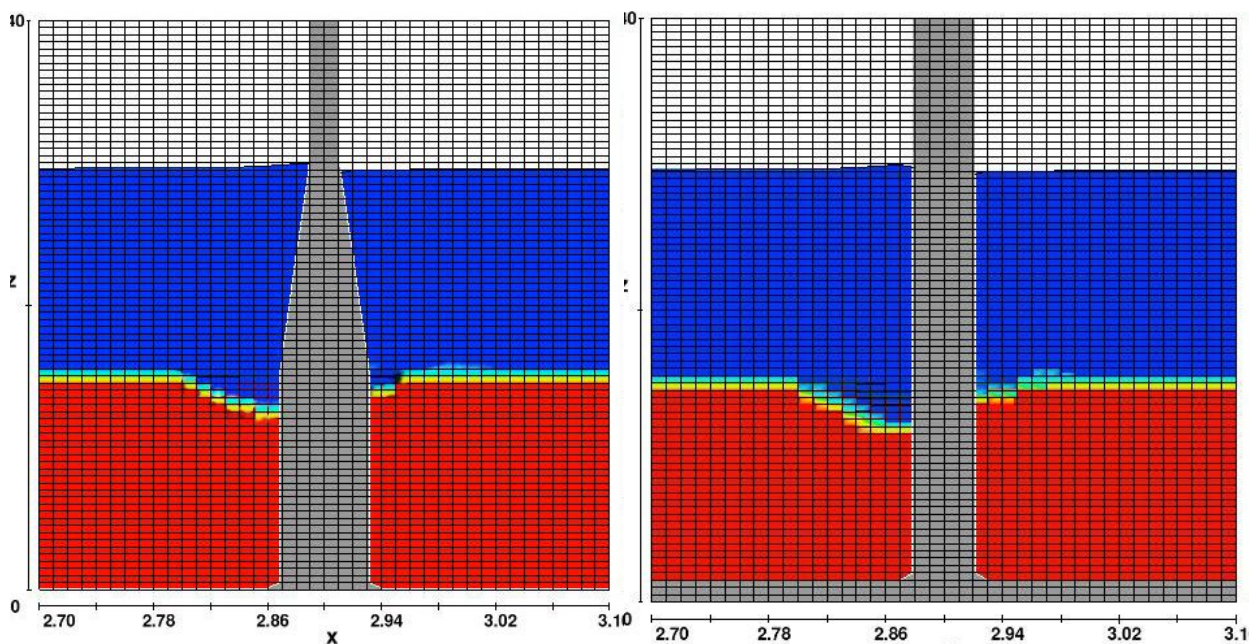
با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که مدل‌سازی عددی در کوتاه مدت اختلاف نسبی قابل توجهی با نتایج تجربی داشته، ولی با گذشت زمان این اختلاف کم شده و به مقدار قابل قبولی می‌رسد. با ادامه روندی که برای همه مدل‌ها مشهود است، می‌توان چنین انتظار داشت که در صورت عدم محدودیت استفاده از مدل عددی برای کل مدت زمان آزمایش اختلاف نتایج به حداقل برسد. در این تحقیق با توجه به نتایج عددی بدست آمده از نرم‌افزار Flow-3D می‌توان نتیجه گرفت که این مدل عددی برای اهداف تحقیقاتی مشابه می‌تواند جایگزین مناسبی برای کار تجربی باشد. در شکل 10 توپوگرافی طولی آبخستگی پس از شبیه‌سازی یک ساعته برای مدل‌های B، C2 و L2 ارائه شده است.

یکی از موارد قابل توجه در بخش شبیه‌سازی عددی این تحقیق، تمایل به بالاروی جریان آب در مرز بالادست مدل‌های C2 و L2 می‌باشد. همان‌طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، در مدل‌های C2 و L2 بردارهای سرعت در نزدیکی مرز بالادست پایه از تراز بستر تا حدود یک سوم عمق رو به پایین بوده و از آن تراز به بعد تمایل به بالاروی از مرز بالادست پایه دارند و این امر در مدل L2

بالا دست پایه از تراز بستر تا حدود دو سوم عمق به سمت پایین تمایل دارند.

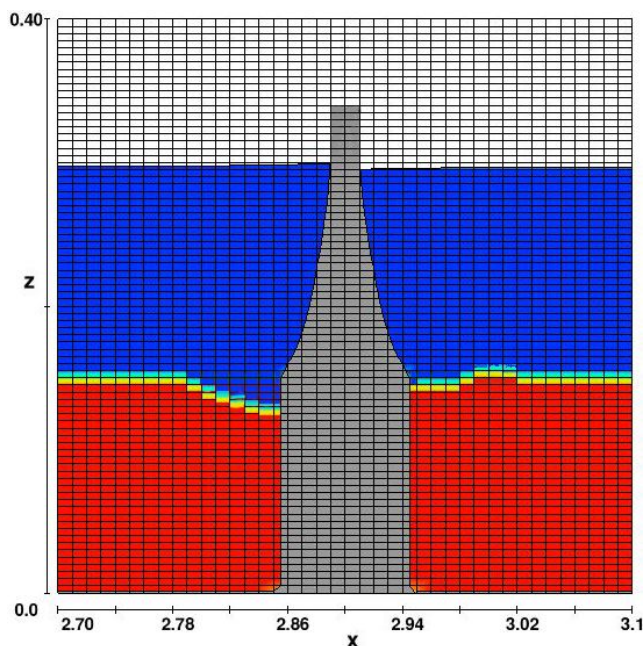
نتایج شبیه‌سازی عددی برای عمق حداکثر آبشستگی، در کوتاه مدت اختلاف نسبی قابل توجهی با نتایج تجربی داشته ولی با گذشت زمان و توسعه روند محاسبات این اختلاف کم شده و به مقدار قابل قبولی نیل می‌کند.

تحلیل‌های عددی نشان دادند که در مدل‌های مخروطی و لگاریتمی بردارهای سرعت در نزدیکی مرز بالادست پایه از تراز بستر تا حدود یک سوم عمق رو به پایین بوده ولی از آن تراز به بعد تمایل به بالاروی از مرز بالادست پایه دارند و این امر در مدل لگاریتمی مشهودتر است. برخلاف این مسأله، در مدل استوانه‌ای مینا، بردارهای سرعت در مرز



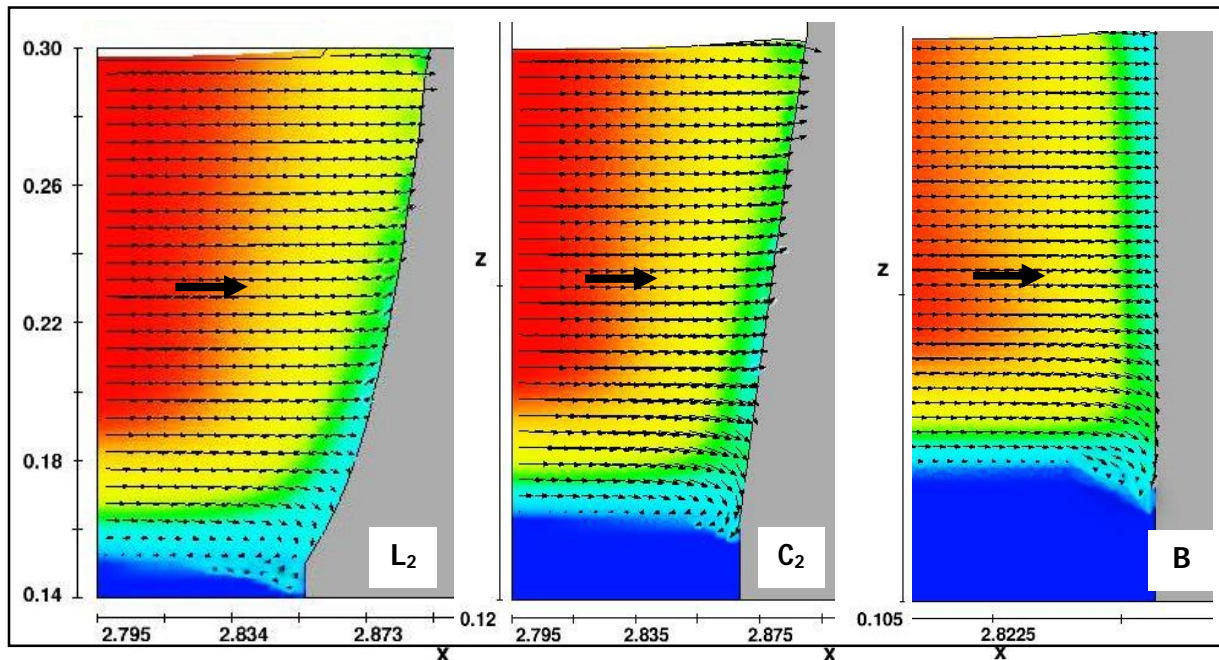
ب- مدل مخروطی C2

الف- مدل استوانه‌ای B



ج- مدل لگاریتمی L2

شکل 10 توپوگرافی طولی آبشستگی پس از شبیه‌سازی یک ساعته (جهت جریان در شکل مشخص شده است)



شکل 11 بردارهای سرعت در بالا دست مدل ها در صفحه xy

$u_f$	سرعت اصطکاکی
$Z$	فاصله از بستر
$\alpha$	زاویه گودال آبشستگی در بالادست پایه
$\beta$	زاویه گودال آبشستگی در پایین دست پایه
$\varphi$	زاویه مدل مخروطی

### 6- منابع

پور احمدی، م. (1389). "بررسی تجربی و عددی پدیده آبشستگی اطراف پایه مخروطی و هرمی". پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

توحیدی، ح. (1392). "بررسی عددی و تجربی فرایند آبشستگی اطراف پایه‌هایی با مرزهای جانبی متناسب با پروفیل سرعت تحت جریان دائمی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.

Breusers, H. and Raudkivi, A. (1991). "Scouring, hydraulic structures design manual", Vol. 2, Balkema, Rotterdam.

Flow Science, Inc. (2010). Flow-3D User's Manual.

Fredsoe, J. and Sumer, B. M. (1997). "Scour at the round head of a rubble-mound breakwater", Journal

با ادامه روندی که برای همه مدل‌ها مشهود است، می‌توان چنین انتظار داشت که در صورت عدم محدودیت استفاده از مدل عددی برای کل مدت زمان آزمایش، اختلاف نتایج به حداقل برسد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای آزمایش‌های تجربی شود.

لازم به ذکر است که برای این نوع پایه‌های پیشنهادی باید مباحث و تحلیل‌های سازه‌ای متناسب نیز صورت پذیرد.

### 5- فهرست علائم

$a$	طول گودال آبشستگی
$2b$	عرض گودال آبشستگی
$D$	طول رسوب گذاری در پایین دست پایه
$D_1$	قطر مدل در سطح آب
$D_2$	قطر مدل در کف
$d_{50}$	اندازه متوسط مواد رسوبی
$d_s$	عمق آبشستگی
$E$	حداکثر ارتفاع بخش رسوب گذاری
$K$	ضریب فن کارمن
$k_s$	زبری نیکورادزه
$U$	سرعت جریان در راستای x
$U_c$	سرعت جریان بحرانی در راستای x

Building Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, D(41), 439-461.

Shen, H.W. (1971). "River mechanics", Vol. 1 and Vol. 2, water resources publication. Department of Civil Engineering. Colorado State University.

Shen, H. and Schneider, V. (1969). "Local scour around bridge piers", Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, 95(6): pp. 1919-1941.

Sumer, B.M., Fredsoe, J., Christiansen, N., and Hensen, SB. (1994). "Bed shear stress and scour around coastal structures", Proc., 24th International Coastal Engineering Conference, e. Robert M. Ragan, ed., Kobe, Japan, ASCE, 1595-1609.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2002). *The mechanics of the scour in the marine environment*, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 17, Word Scientific.

Tseng, M., Yen, C. and Song, C. (2000). "Computation of three-dimensional flow around square and circular piers", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 34, No. 3, pp. 207-27.

Zhao, M. (2010). "Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents", Journal of Coastal Engineering 57.

of Coastal Engineering, Vol. 29, pp. 231-262.

Garde, R.J. and Ranga Raju, K.G. (1985). "Mechanism of sediment transportation and alluvial stream problems". Published by New Age International Limited, New Delhi.

Hakimzadeh, H., Mehrzad, R. and Azari, N. (2012). 'Experimental investigation of the effects of slotted conical shaped piers on scour process due to steady flow'. 6<sup>th</sup> Conference on Scour and Erosion, Paris, France.

Johnson, P. (1991) "Advancing bridge-pier scour engineering". Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, Vol. 117.

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

Melville, B. and Raudkivi, A. (1996). "Effects of foundation geometry on bridge pier scour". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 4, pp. 203-9.

Raudkivi, A. and Ettema, R. (1983). "Clear-Water scour at cylindrical piers". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, No. 3, pp. 338-50.

Sanoussi, A. and Habib, A. (2008). "Local scour at rounded and sloped face piers with skew angles", The International Conference on Construction and