

## اندازه‌گیری آزمایشگاهی ضریب پسای تلماسه‌ها و مقایسه آن با مقادیر برآوردی مدل

### آرتمیس معتمدی\* و مجید گلوئی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۶)

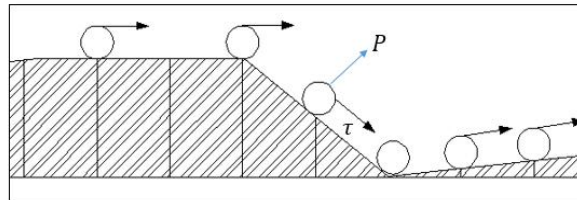
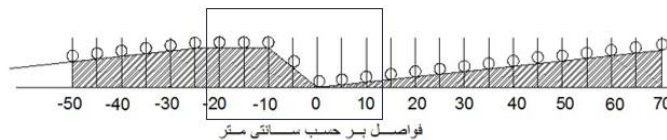
#### چکیده

با وجود چندین دهه کار و پژوهش تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد شکل‌های بستر، هنوز دانش برهمکنش شکل بستر و جریان و نیز تأثیر متقابل آنها بر پارامترهای هیدرولیکی نظیر تنش برشی، ضریب زبری و نیروی پسا بسیار ناکافی است. از جمله اهداف این تحقیق بررسی و تحلیل تأثیر شکل بستر بر روی الگوی جریان نزدیک تاج و تحلیل الگوهای پروفیل سرعت و نیروی پسا در صورت تغییر دانه‌بندی مواد بستر است. بدین منظور، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در فلوم هیدرولیکی ۱۲ متری مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی گراتس اتریش، روی تلماسه‌های شنی دو بعدی با ابعاد مشخص و ساخته شده از ذرات ۱۳ و ۶ میلی‌متری، صورت گرفت. نتایج حاصل از بررسی پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده با PIV و ADV و همچنین پروفیل‌های مدل شده با برنامه SSIM نشان می‌دهد که ضریب پسای ذرات مستقر بر روی تلماسه‌ها در شرایط هیدرولیکی مشابه، تأثیر چندان زیادی با افزایش دبی از خود نشان نمی‌دهند، در حالی که کاهش عمق سبب افزایش ناگهانی ضریب پسا تا سقف ۶۶ درصد می‌شود. کاهش قطر ذرات سازنده تلماسه نیز سبب افزایش ضریب پسا می‌شود. همچنین ضریب پسا به شکل هندسی تلماسه وابسته بوده و در نوع تخت تاج، ضریب پسا افزایش حدود ۳۲ درصد نسبت به نوع تاج تیز دارد.

واژه‌های کلیدی: هندسه تلماسه، ضریب پسا، سرعت برشی، میانگین دوگانه

۱. مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بویین زهرا، قزوین

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Artemis.mot@bzte.ac.ir



شکل ۱. شکل شماتیک از ذرات بستر و نیروهای وارد بر آن

### مقدمه

رودخانه‌ها همواره دارای شکل‌های مختلفی از بستر هستند. این شکل‌های بستر در اثر تعامل بین جریان و بستر متحرک به وجود می‌آیند و تابعی از ژئولوژی منطقه، مشخصات رسوبات حمل شده از بالادست، دبی عبوری و نیروهای هیدرودینامیک در رودخانه هستند. نوع شکل بستر اصولاً به اندازه قطر ذرات رسوب بستگی دارد و این شکل‌ها با استفاده از مفاهیم هیدرودینامیک تحت شرایط مشخصی از جریان، طبقه‌بندی می‌شوند. تلماسه‌ها از عمومی‌ترین شکل‌های بستر رودخانه بوده و بسته به عمق آب، سرعت جریان و نوع ذرات در ابعاد و اشکال مختلف تشکیل می‌شوند. با وجود چندین دهه مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد شکل‌های بستر از جمله تلماسه‌ها، هنوز اطلاعات کاملی در مورد تأثیر متقابل این شکل‌ها بر جریان سیال و نیز نحوه تأثیر ابعاد تلماسه، برهمکنش شکل آنها و همچنین تأثیر اندازه ذرات سازنده تلماسه بر پارامترهای هیدرولیکی جریان آشفته ارائه نشده است (۱۵).

اجسام قرار گرفته در جریان سیال، همواره از جانب سیال تحت تأثیر نیرویی هستند که به جسم وارد می‌شود. مؤلفه این نیرو در امتداد سرعت سیال، نیروی درگ (پسا) و در راستای عمود بر جریان نیروی لیفت (برآ) است. این نیروها بر حسب تنش‌های فشاری (P) و برشی (τ) بیان می‌شوند (شکل ۱).

برآورد این نیروها با توجه به لایه مرزی و نحوه رشد آن، به الگوی جریان در پیرامون جسم بستگی دارد.

پسا، اصطلاحی است که نشان‌دهنده مقاومت در مقابل جریان است و به انواع پسای فشاری (ناشی از عدم تعادل فشار اعمالی در جلو و پشت جسم مستقر در جریان)، پسای اصطکاک پوسته‌ای یا لزجت (ناشی از اثر اصطکاکی لزجت سیال روی سطح) و پسای مزاحم (مجموع همه پساها) طبقه‌بندی می‌شوند (۱۰ و ۱۷). نیروی پسا ( $F_d$ ) را می‌توان برای ذره با مساحت (A) به صورت معادله (۱) ارائه نمود:

$$F_d = \int (P \sin \theta + \tau \cos \theta) dA \quad [1]$$

میزان پسا به نوع جریان وابسته است ولی متأسفانه در بسیاری از موارد، نمی‌توان الگوی جریان و توزیع فشار روی جسم را به‌طور کامل تعیین کرد و معادله (۱) اگرچه صحیح است ولی ارزش عملی محدودی دارد. لذا اغلب معادله نیروی پسا با استفاده از ضرایب تجربی ارائه می‌شود.

بررسی مشخصه‌ها و رفتار جریان سیال و همچنین به‌دست آوردن ضرایب بی‌بعد، جزء مسائل مهم و قابل توجه در رشته‌های مهندسی به‌شمار می‌رود. ضریب پسا یک کمیت بدون بعد است که در علم دینامیک سیالات و برای محاسبه نیروی پسا وارد بر یک جسم در حال حرکت در یک سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد و در واقع مقیاسی از چگونگی تبدیل فشار دینامیکی به نیروی پسا است. کمیت  $C_d$  هرچه کمتر باشد،

مطلوب‌تر است.

این کمیت به صورت ریاضی به شکل زیر قابل تعریف است (۱۷):

$$c_d = CD = \frac{\gamma F_d}{\rho v^2 A} \quad [2]$$

در این رابطه:  $F_d$  نیروی پسا،  $\rho$  دانسیته سیال،  $v$  سرعت حرکت سیال و  $A$  سطح مقطع عبور سیال است.

ضریب پسا برای صفحه تخت در لایه مرزی آرام برابر با

$$c_d = \frac{1.328}{\sqrt{Re}}$$

درهم شده و مقدار آن را با معادله  $c_d = \frac{0.074}{Re^{1/5}}$  می‌توان برآورد

کرد. در حالت‌های سه‌بعدی و برای ذرات کروی شکل، ضریب پسا برای اعداد رینولدز انتقالی بیش از  $10^3$ ، معادل  $0.4$  و برای اجسام استوانه‌ای (سیلندری) با نسبت طول به قطر یک،  $(L/D = 1)$ ، معادل  $0.9$  برآورد شده است. لازم به ذکر است تمامی معادلات تجربی مذکور در بستر صاف، حاصل شده‌اند و تاثیر شکل بستر نادیده گرفته شده است (۱۰ و ۱۷).

ضریب پسا وابسته به اندازه و ابعاد شکل بستر است. همچنین پیش‌بینی شرایط تعادل هیدرولیکی در شکل‌های بستر نیاز به دانش تعامل ضریب پسا و ذرات بستر دارد. نیروی حاصل نیز برای ذرات با شکل و هندسه مختلف در بستر تخت یکسان نیست.

$$\tau = \frac{F_d}{A}; \quad \rho U_*^2 = \frac{1}{2} \rho V^2 \times C_d \times \sin \alpha \quad [3]$$

که در آن،  $F_d$  نیروی پسا،  $A$  مساحت روبه‌روی جسم یا عمود بر جهت جریان است.  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $V$  سرعت متوسط سیال،  $U_*$  سرعت برشی سیال و  $C_d$  ضریب پسا است که مقدار آن به نوع جسم ( $\alpha$  زاویه شیب قرارگیری ذرات با سطح افق) وابسته است که به‌طور تجربی تعیین می‌شود (۱۹).

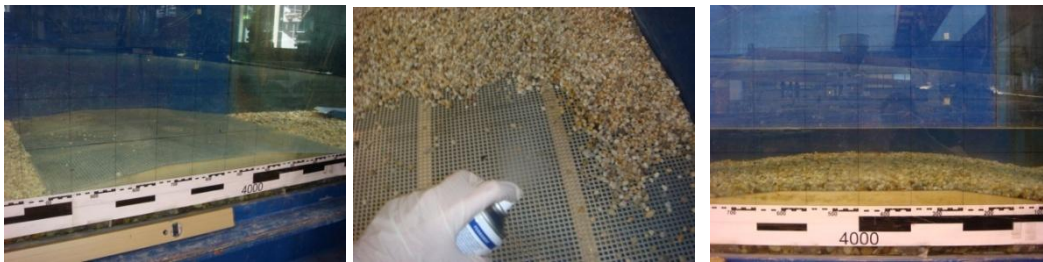
مطالعات بر روی تلماسه‌ها به صورت مانعی در مقابل جریان و تغییر مقاومت هیدرولیکی کانال در پژوهش‌های افضل‌ی مهر و همکاران نشان می‌دهد که در صورت لحاظ شکل بستر در مطالعه، بیش از ۷۰ درصد مقاومت جریان ناشی از اثر شکل بستر بوده و فقط تا ۳۰ درصد ناشی از اندازه زبری ذره است (۴).

مطالعات مربوط به ضریب پسا در رودخانه‌ها تاکنون اغلب به صورت بررسی نیروهای حاصل از سقوط تنه‌های درختان در رودخانه‌ها و بررسی خسارات ناشی از آن به سازه‌های هیدرولیکی گزارش شده است (۹). این موضوع در برخی از کشورها مانند ژاپن در وضعیت‌های سیلابی و سوئد در زمانی که درختان از بار برف زیاد شکسته و در رودخانه‌ها شناور می‌شوند، بسیار مهم است. مطالعات متعدد در این زمینه نشان می‌دهد، نیروی پسا حاصل بر تنه‌های شناور و یا غوطه‌ور با ابعاد و اشکال مختلف در بررسی‌های آزمایشگاهی لی و شن (۱۹۷۳)، باب تیست (۲۰۰۷) و سو و همکاران (۲۰۰۸) و بررسی‌های صحرائی و ندر و همکاران (۲۰۱۰)، تاناک و یاگیزوا (۲۰۱۰) و مورینگا و همکاران (۲۰۱۲)، تحت تأثیر مستقیم ساختار جریان و شرایط هیدرولیکی متنوعی از قبیل سرعت و عمق‌های کم و زیاد هستند (۹ و ۱۱). با وجود مطالعات تجربی و عددی متعدد در خصوص تغییر ضریب پسا در رودخانه‌ها، تاکنون مطالعات خاصی در زمینه تأثیر شکل هندسی بستر و ضریب مذکور انجام نشده است و پژوهش حاضر با الگوبرداری از تأثیر متقابل حضور تنه‌های درختان در رودخانه‌ها و نیروی پسا (۱۸)، به بررسی تغییرات ساختار جریان تحت تأثیر شکل‌های بستر می‌پردازد.

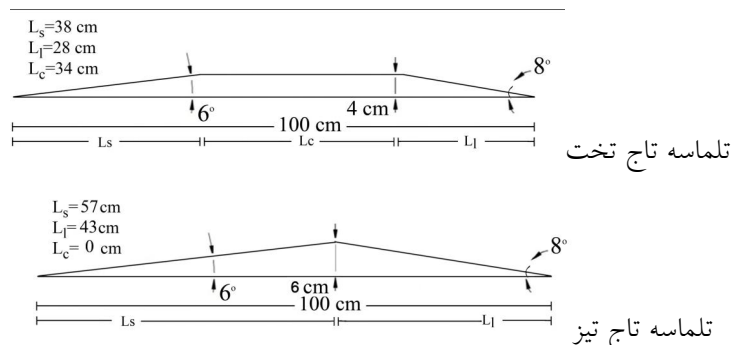
هندسه تلماسه نه تنها تغییرات بر ساختار جریان را سبب می‌شود، بلکه شکل ذرات سازنده تلماسه و اندازه آنها نیز بر تغییر ساختار جریان مؤثر است. هدف از انجام این مطالعه، برآورد ضریب پسا جریان عبوری از تلماسه‌های مختلف است. در این پژوهش، علاوه بر بررسی‌های آزمایشگاهی تغییرات پروفیل سرعت، سرعت برشی و ضریب پسا در یک طول موج از تلماسه، مدل‌سازی با نرم‌افزار SSIIM نیز جهت شبیه‌سازی جریان عبوری از روی تلماسه‌های ساخته شده از ذرات شن (با فرض کروی بودن آنها) نیز انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق با ساخت ۹ تلماسه مصنوعی به صورت متناوب



شکل ۲. استفاده از قالب چوبی- فلزی و نحوه ثابت کردن ذرات بستر



شکل ۳. انواع تلماسه‌های ساخته شده در آزمایشگاه

و طول موجشان از ۰/۵ متر تا چند هزار متر گزارش شده است (۶، ۷، ۸) ولی ابعاد مورد تحلیل برای ساخت تلماسه‌ها و توسعه آنها در عرض فلوم و توالی آنها در طول فلوم از مطالعات نلسون و همکاران (۱۹۹۳)، آلن (۱۹۸۵) نصیری (۱۳۸۹) و داورپناه (۱۳۹۰) برگرفته شده است (۱ و ۵).

تلماسه‌های تاج تخت دارای طول موج یک متر، ارتفاع ۰/۴ متر، زاویه ایستایی هشت درجه است و تلماسه‌های تاج تیز با ارتفاع شش سانتی متر ساخته شده‌اند (شکل ۳).

عمق جریان (فاصله عمودی گودترین نقطه تا سطح آب) در دو سری آزمایش (h<sub>1</sub>) ۳۲ و (h<sub>2</sub>) ۲۰ سانتی متر و دبی جریان در دو سری آزمایش دیگر ۳۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شدند. در تمامی آزمایش‌ها تعداد ۱۵-۱۳ نیم‌رخ سرعت در راستای طولی تلماسه‌ها با دستگاه ADV و PIV برداشت شدند (۳). سرعت سنج مورد استفاده در این آزمایش ADV با فرکانس ۲۰۰ و از نوع (به سمت پهلو) است. داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزار WinADV غربال گشته و پس از آن مورد تحلیل قرار گرفتند. دستگاه PIV با شناسایی ذرات معلق در سیال،

در طول یک کانال آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۰/۹ متر مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی گراتس در اتریش، چندین سری آزمایش متفاوت بر روی تلماسه‌هایی با ابعاد و شکل‌های هندسی مختلف صورت گرفت (۱۳). با توجه به اینکه هدف از این تحقیق، مدل بستر طبیعی رودخانه‌ها است، لذا از شن به‌عنوان پوشش بستر فلوم استفاده شد. قطر ذرات بایستی به‌گونه‌ای انتخاب شوند که شرایط انتخابی جریان باعث شسته شدن و حرکت دادن ذرات بستر نشود. بدین منظور، شرایط آزمایشگاهی با مدل هیدرولیکی SSIIM مورد تحلیل قرار گرفت و قطر متوسط ذرات بستر، برآورد شد. شن مورد استفاده برای ساختن تلماسه‌ها با قطر متوسط حدود ۱۳ و ۶ میلی‌متر انتخاب شد که جهت حصول اطمینان از عدم حرکت، با چسب بر روی تلماسه‌های چوبی از پیش ساخته شده، ثابت شده (شکل ۲) و در این تحقیق به‌عنوان تلماسه‌های "درشت بافت" و "ریزبافت" معرفی شده‌اند. اگرچه ارتفاع تلماسه‌ها از مقادیر چند سانتی‌متر تا چند متر

سرعت آب که به معنای استفاده از شرایط مرزی با گرادیان صفر برای سرعت‌های سطح آب است، در نظر گرفته می‌شود.

شار (جریان) گذرنده از بستر با دیوار، صفر است، بنابراین هیچ شرایط مرزی خاصی وجود ندارد. از آنجا که، گرادیان سرعت جریان نزدیک به دیوار بسیار تند است، بایستی با افزایش قابل توجه تعداد سلول‌های شبکه در این بخش، گرادیان را تا مقدار قابل قبولی شبیه‌سازی کرد.

روش حل عددی در مدل "SSIM" به صورت تکراری است. بدین منظور ابتدا یک مقدار اولیه حدس زده می‌شود و سپس از طریق تکرار، عملیات محاسبه به سمت یک مقدار دقیق‌تر پیش می‌رود. معیار همگرایی براساس روش محاسبه پسماندها است (۱۶). پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و مدل شده پس از واسنجی مدل (با خطای کمتر از هشت درصد)، در شرایط هیدرولیکی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته و سرعت‌های برشی (به روش لایه مرزی) از هر یک از پروفیل‌های سرعت مستقر در یک طول موج تلماسه برآورد شده‌اند. در نهایت با استفاده از معادله (۳) می‌توان ضرایب پسای اندازه‌گیری شده و مدل شده را برای هر یک از پروفیل‌های مستقر در طول موج تلماسه، استخراج کرد. لذا به تعداد پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده ۲۱ پروفیل به فواصل ۵ الی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر از یک طول موج تلماسه، ضریب پسای برآورد می‌شود.

به منظور محاسبه ضریب پسای میانگین، سرعت برشی به کار گرفته شده در معادلات می‌تواند به صورت میانگین‌گیری دوگانه با روش مکین و اسمیت محاسبه شود. در این روش، میانگین سرعت نقاطی که تا بستر فاصله یکسانی دارند، منجر به پروفیل واحدی می‌شود و سرعت برشی و ضریب پسای متوسط را می‌توان از این پروفیل واحد استخراج کرد (۲). در این روش سطح مبنا تعریف نمی‌شود و سطوح میانگین‌گیری از شکل بستر پیروی می‌کنند. لذا برای مقایسه بهتر در هر سری آزمایش و یا مدل، می‌توان سه ضریب پسای میانگین (دوگانه) برای جوه بالادست، پایین‌دست و تاج تلماسه استخراج کرد.

سرعت جریان عبوری را تعیین می‌کند. با تنظیم فرکانس اندازه‌گیری می‌توان در هر ثانیه چندین هزار اطلاعات مربوط به بردارهای سرعت را برداشت کرد (۱۲ و ۱۳).

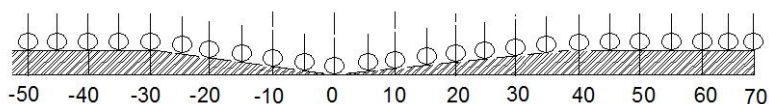
مدل‌سازی عددی انجام شده در این پژوهش در حالت دو بعدی دائمی، توسط مدل SSIM شبیه‌سازی شده است (۱۶). شرایط مرزی مورد استفاده برای جریان غیرقابل تراکم، شرط مرزی سرعت ورودی برای مرز بالادست جریان (ورودی کانال)، جریان خروجی بر پایه معادله بقای جرم و دیواره بدون لغزش  $k-\epsilon$  هستند (۶). مدل SSIM با حل معادله ناویر-استوکس و مدل  $k-\epsilon$  جریان را در سه راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  شبیه‌سازی می‌کند و جریان عبوری از شبکه محاسباتی غیر متعامد، به روش حجم کنترل حل می‌شود. مشخصه اصلی SSIM، نسبت به سایر مدل‌های هیدرولیکی، قابلیت شبیه‌سازی انتقال رسوب در بستر متحرک و هندسه پیچیده است، لذا در اولین گام آزمایش، می‌توان قطر ذرات منتخب را برای ساخت یک بستر آب زلال مدل‌سازی کرد (۱۶).

در این پژوهش، علاوه بر بررسی ساختار جریان عبوری از روی تلماسه‌های ساخته شده در آزمایشگاه، شرایط مشابه برای تلماسه‌های فرضی توسعه یافته در طول کانال نیز شبیه‌سازی شده‌اند. شبکه‌بندی و تعداد سلول‌ها در راستای طولی و عرضی در تلماسه‌های مدل شده، امکان شبیه‌سازی قوی و دقیق‌تری را فراهم می‌سازد. در حل عددی حرکت سیال بر روی تلماسه، بایستی چهار شرایط مرزی شامل؛ شرط مرزی ورودی، شرط مرزی خروجی، شرط مرزی سطح آب و شرط مرزی بستر یا دیوار مشخص شود. برای تعریف شرط مرزی ورودی باید از شرط مرزی درিশله استفاده کرد. این بدان معناست که برای شرط مرزی ورودی از مقادیر سرعت‌ها استفاده می‌شود و با این مقادیر سرعت، می‌توان مقدار تنش برشی را در ورودی فلولم نیز تخمین زد.

شرط مرزی خروجی با گرادیان سرعت صفر را می‌توان برای همه متغیرهای مرزهای خروجی در نظر گرفت. در این تحقیق، شرایط خروجی با توجه به دائمی بودن جریان، برای دبی خروجی برابر با دبی ورودی در نظر گرفته شده است. استفاده از شرایط مرزی سطح آب به صورت متقارن برای

جدول ۱. خلاصه شرایط هیدرولیکی اعمال شده و مدل شده

سری	نوع تلماسه	دبی (lit/s)	عمق آب (cm)	حداکثر سرعت جریان (cm/s)
۱	تلماسه تاج تخت	۳۰	۳۲	۱۹
۲			۲۰	۳۶
۳		۶۰	۳۲	۳۶
۴			۲۰	۶۹
۵	تلماسه تاج تیز	۳۰	۳۲	۱۹
۶			۲۰	۳۶
۷		۶۰	۳۲	۳۶
۸			۲۰	۶۹



شکل ۴. ارائه شکل شماتیک از موقعیت قرارگیری ۲۵ ذره مستقر در طول موج یک تلماسه تاج تخت

در این تحقیق، نمودار ضریب پسا برای تمامی ذرات مستقر بر روی محور مرکزی کانال در طول یک تلماسه رسم شده است. مقایسه ضریب پسا برای ذرات در شرایط هیدرولیکی متفاوت و تلماسه‌ها با ابعاد مختلف به شناخت بهتر سیال عبوری از روی کانال کمک می‌کند.

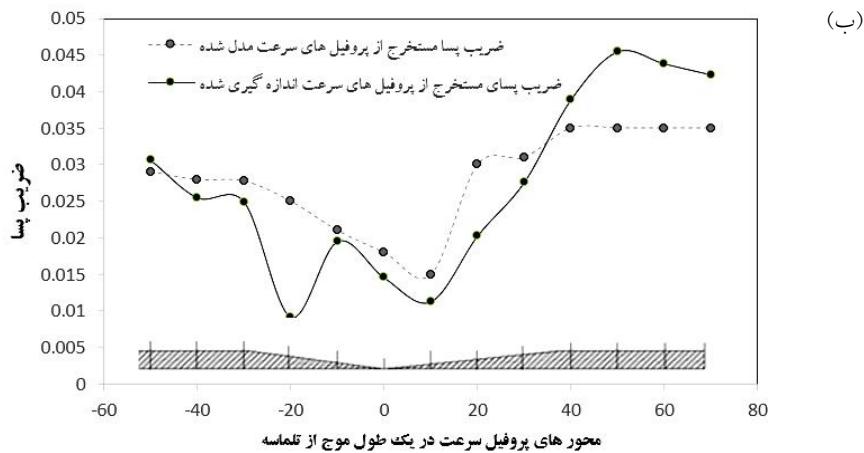
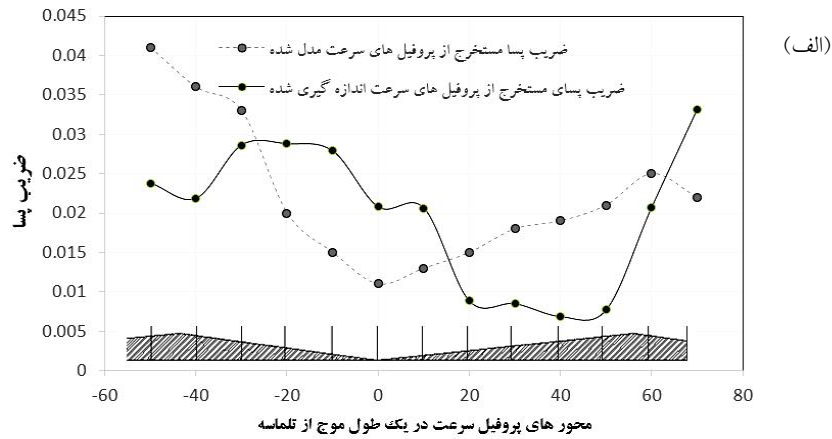
تغییرات ضریب پسا در یک طول موج از تلماسه، برای شرایط هیدرولیکی دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق جریان ۳۲ سانتی‌متر در دو تلماسه تاج تخت و تلماسه تاج تیز در شکل (۵) ارائه شده است و نتایج حاکی از آن است که در یک طول موج از تلماسه و با استخراج ضرایب پسا از هر یک از پروفیل‌ها، نمی‌توان تحلیل مناسبی از تغییرات شرایط هیدرولیکی و یا هندسی تلماسه بر ضریب مورد نظر ارائه کرد. شاید تنها اطلاعات قابل استخراج از شکل (۵)، تأثیر متقابل عمق جریان بر ضریب پسا باشد چنانچه با کاهش عمق جریان عبوری از ناهمواری‌های بستر، ضریب پسا افزایش می‌یابد.

در شکل (۵)، پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده در موقعیت (-۲۰) و (+۱۰)، کاهش ناگهانی ضریب پسا در تلماسه‌های با تاج تخت مشاهده می‌شود، درحالی‌که این مقدار از کاهش ضریب مذکور در تلماسه‌های با تاج تیز گزارش نشده است. دلیل این امر را می‌توان با اشاره به تحقیقات پیشین معتمدی و همکاران (۱۴) پیرامون ناحیه جدایی جریان در حضور تلماسه‌ها توجیه کرد. مرور نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد، ناحیه جدایی جریان در تلماسه‌های با تاج تخت

در این تحقیق، نمودار ضریب پسا برای تمامی ذرات مستقر بر روی محور مرکزی کانال در طول یک تلماسه رسم شده است. مقایسه ضریب پسا برای ذرات در شرایط هیدرولیکی متفاوت و تلماسه‌ها با ابعاد مختلف به شناخت بهتر سیال عبوری از روی کانال کمک می‌کند.

## نتایج

شرایط هیدرولیکی جریان عبوری بر روی تلماسه‌های تاج تخت و تاج تیز در دو دبی و دو عمق متفاوت در جدول (۱) خلاصه شده‌اند. هر یک از تلماسه‌ها نیز دارای دو دانه‌بندی متفاوتند. لذا در مجموع ۳۲ سری آزمایش تجربی و عددی مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی ضریب پسای ذرات مستقر بر روی تلماسه‌ها، در طول موج یک تلماسه نشان می‌دهد که ۲۵ ذره به فاصله پنج سانتی‌متر از یکدیگر (شکل ۴) با وجود فرض یکسان بودن قطر و نیز فرض مشابه بودن شکل هندسی کروی، طبق معادله (۳)، ضریب پسای متفاوتی خواهند داشت، زیرا هر یک دارای پروفیل سرعت، سرعت متوسط و سرعت برشی منحصر به فرد خود خواهند بود.



شکل ۵. نمایش ضریب پسا برای ذرات مستقر بر الف) تلماسه تاج تخت و ب) تاج تیز در شرایط هیدرولیکی دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی‌متر

است، زیرا با افزایش عمق تلماسه از سطح مقطع جریان کم می‌شود و در دبی ثابت با افزایش سرعت جریان، نیروی پسا بیشتر می‌شود. در این تحقیق با بررسی پروفیل‌های سرعت حاصل شده از دستگاه‌های سرعت‌سنج ADV و PIV می‌توان با اعتماد بیشتر به داده‌های آزمایشگاهی، عدم کارایی مدل‌های ساده‌ای همچون SSIIM در برآورد ضریب پسا را پیش‌بینی کرد. زیرا این مدل‌ها با فرض یکسان گرفتن شکل و قطر ذرات بستر، در تحلیل جریان عبوری از تلماسه و لایه مرزی نزدیک بستر و تغییرات رینولدز ذره، ناتوان بوده و کارایی لازم را ندارند. اگرچه روند ضریب پسای مدل شده در یک طول موج از تلماسه تقریباً با روند ضریب اندازه‌گیری شده مذکور مشابه است، ولی به نظر می‌رسد مقادیر مدل شده دارای خطا بوده و

بسیار کوچک‌تر از ناحیه جدایی جریان در تلماسه‌های با تاج تیز است (۱۳). تغییر ارتفاع تلماسه که سبب کوچکتر شدن ناحیه جدایی جریان می‌شود، سبب کاهش ناگهانی ضریب پسا شده و آن را تا سقف ۶۰ درصد کاهش می‌دهد. افت فشار در ناحیه جدایی جریان جلو و پشت شکل بستر، سبب عدم تعادل بین نیروهای بالادست و پایین‌دست شکل بستر شده که در نهایت موجب افزایش نیروی پسا می‌شود. زمانی که ارتفاع شکل بستر کم است، گرادیان فشار ضعیف شکل گرفته و نهایتاً منجر به کاهش ناحیه جدایی جریان می‌شود.

نتیجه دیگر مستخرج از شکل (۵)، ارائه عدم تطابق ضریب پسای مدل شده و اندازه‌گیری شده است. به نظر می‌رسد که داده‌های SSIIM در زمینه نیروی پسا به واقعیت بیشتر نزدیک

قابل استناد نیستند.

حاصل از مدل، نیز تأثیر متقابل دبی و عمق جریان را بر روی ضریب پسا تأیید می‌کند.

نتایج حاصل از مقایسه ردیف اول و دوم جدول (۳) و همچنین ردیف‌های نهم و دهم نشان می‌دهد، اگرچه کاهش قطر ذرات سازنده تلماسه از ۱۳ به ۶ میلی‌متر، سبب افزایش ضریب پسا می‌شود ولی تأثیر این پارامتر در تلماسه‌های تاج تخت و تیز به یک میزان نیست. تأثیر قطر ذرات بستر بر ضریب پسا در تلماسه‌های تخت بیشتر از تلماسه با تاج تیز است و کاهش قطر ذرات بستر سبب افزایش حدود ۴۷ درصدی ضریب پسا در تلماسه‌های تاج تخت شده، درحالی‌که افزایش ضریب پسا در تلماسه‌ها با تاج تیز تنها هفت درصد برآورد شده است.

در این راستا نتایج حاصل از بررسی شکل هندسی تلماسه‌ها، نشان می‌دهد که تغییر شکل تاج تلماسه‌های ریز بافت از تیز به تخت در شرایط هیدرولیکی مشابه، ضریب پسا به‌طور متوسط ۶۵ درصد افزایش داشته و این تأثیر برای تلماسه‌های ساخته شده از ذرات شن درشت کمتر بوده و به‌میزان ۲۱ درصد برآورد شده است.

### نتیجه‌گیری

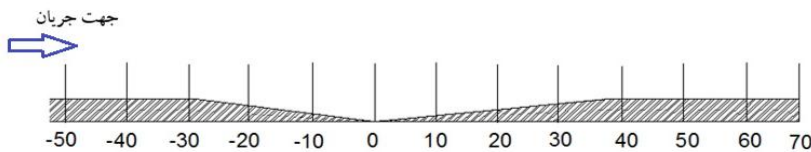
در این تحقیق، تغییرات نوسانی مؤلفه‌های سرعت و همچنین ضریب پسا در جریان سیال عبوری از روی تلماسه‌هایی با شکل هندسی متفاوت، با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده و با محاسبه تغییرات پروفیل سرعت، ضریب پسا با روش استفاده از میانگین حسابی و دوگانه محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان، عمق‌های متفاوت و اندازه قطر ذرات مستقر بر روی شکل بستر، هیچ دو ذره‌ای دارای ضریب پسای یکسان نیستند. همچنین بررسی دو ذره یکسان تحت شرایط هیدرولیکی مشابه، نشان داد که شکل هندسی تلماسه‌ها نیز به علت تغییر شرایط مرزی و تأثیر بر روی سرعت برشی، پروفیل‌های سرعت و نهایتاً

در راستای تحلیل بهتر، میانگین ضریب پسا برای هر یک از سری‌های آزمایش در نظر گرفته شد و پس از استخراج داده‌های سرعت برشی و ضریب پسا از پروفیل‌های سرعت مدل شده، نتایج با برآورد ضریب پسای حاصل از میانگین‌گیری دوگانه و میانگین حسابی مورد مقایسه قرار گرفت. جدول (۲)، نتایج حاصل از سرعت برشی برآورد شده از میانگین دوگانه پروفیل‌های مستقر بر روی تاج تلماسه، شیب وجه بالا و پایین‌دست را ارائه می‌کند و با استفاده از این مقادیر و نیز بهره‌گیری از سرعت‌های متوسط، می‌توان ضریب پسا را در هر یک از شرایط هیدرولیکی محاسبه کرد. لازم به‌ذکر است که (Experimental C Q30-h1) به معنای داده‌های آزمایشگاهی در شرایط دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۳۲ سانتی‌متر هستند. پارامتر (C) معرف درشت بودن ذرات بستر و (F) به مفهوم ریزدانه بودن ذرات بستر است.

هشت سری از ۱۶ آزمایش صورت گرفته به‌صورت منتخب در جدول (۳) ارائه شده است و نهایتاً ضریب پسای اندازه‌گیری شده با مقادیر حاصل از مدل‌سازی در شرایط هیدرولیکی مشابه مورد مقایسه قرار گرفت و در جدول (۳) خلاصه شده است. نتایج حاصل از بررسی ضریب پسای حاصل از میانگین‌گیری دوگانه از پروفیل‌های جریان عبوری از تلماسه‌ها که در جدول (۳) خلاصه شده‌اند، نشان می‌دهد که در تلماسه‌های تاج تخت و تیز در شرایط هیدرولیکی مشابه، افزایش دبی تا میزان ۱۰۰ درصد، تأثیر چندانی بر ضریب پسا نداشته و به‌میزان حداکثر (۱۵ درصد) سبب کاهش آن می‌شود. این رقم را می‌توان با مقایسه ردیف دوم و سوم جدول (۳) (مقایسه ضریب پسای ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۲ برای تلماسه‌های تاج تخت و یا مقایسه ردیف دهم و یازدهم، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۳ برای تلماسه‌های تاج تیز) به‌دست آورد. همچنین در هر دو تلماسه در شرایط هیدرولیکی مشابه، کاهش عمق (ردیف سوم و چهارم و همچنین ردیف یازدهم و دوازدهم جدول ۳) سبب افزایش ناگهانی ضریب پسا تا سقف ۶۶ درصد می‌شود. نتایج مشابه



جدول ۲. سرعت‌های برشی (cm/s)، استخراج شده از پروفیل‌های واحد سرعت جریان عبوری از روی قسمت‌های مختلف تلماسه با تاج تخت



-50	-40	-30	-20	-10	0	0	10	20	30	40	50	60	70	(-50, 70)	
تاج ۱			زاویه وجه پایین دست			زاویه وجه بالادست			تاج ۲			میانگین روی تلماسه		شرایط هیدرولیکی	
۱/۴۰۹۴			۲/۰۴۰۴			۱/۵۵۰۹			۱/۴۶۰۹			۱/۶۷۴۸		Numerical C Q30-h1	
۱/۸۷۸۳			۱/۴۴۷۷			۱/۵۶۳۳			۱/۸۰۹۸			۱/۶۷۴۶		Numerical F Q30-h1	
۳/۴۴۱۵			۳/۶۳۱۴			۳/۱۱۸۶			۳/۴۹۶۵			۳/۳۴۸۵		Q60-h1 Numerical F	
۱/۳۵۱			۱/۷۰۲۵			۱/۳۲۷۸			۱/۵۶۱۳			۱/۵۳۳۱		Experimental C Q30-h1	
۲/۱۶۱۸			۱/۳۵۳۲			۱/۴۴۹۵			۲/۴۸۹۵			۱/۷۸۰۳		Q30-h1 Experimental F	
۳/۵۷۷۳			۳/۵۳۹۵			۳/۰۹۳۳			۳/۸۸۲۰			۳/۴۲۶۴		Experimental F Q60-h1	
۲/۵۳۹۳			۳/۱۱۹۸			۳/۲۳۵۵			۲/۶۴۵۲			۲/۹۹۳۳		Q30-h2 Experimental F	

جدول ۳. دامنه و مقدار متوسط ضریب پسا (میانگین دوگانه و حسابی) در شرایط هیدرولیکی متفاوت

تلماسه تاج تخت					
سری	شرایط هیدرولیکی	دامنه ضریب پسا	میانگین حسابی ضریب پسا	میانگین دوگانه ضریب پسا	
۱	Experimental Coarse Q30-h1	۰/۰۰۸-۰/۰۳۴	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	
۲	Experimental Fine Q30-h1	۰/۰۰۹-۰/۰۴۵	۰/۰۲۷	۰/۰۲۵	
۳	Experimental Fine Q60-h1	۰/۰۱۱-۰/۰۳۸	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲	
۴	Experimental Fine Q30-h2	۰/۰۰۷-۰/۰۶۸	۰/۰۴۵	۰/۰۴۱	
۵	Numerical Coarse Q30-h1	۰/۰۲۸-۰/۰۷۰	۰/۰۲۵	۰/۰۲۳	
۶	Numerical Fine Q30-h1	۰/۰۱۵-۰/۰۳۵	۰/۰۲۹	۰/۰۲۸	
۷	Numerical Fine Q60-h1	۰/۰۱۵-۰/۰۳۵	۰/۰۲۹	۰/۰۲۸	
۸	Numerical Fine Q30-h2	۰/۰۳۴-۰/۰۶۱	۰/۰۴۱	۰/۰۳۸	
تلماسه تاج تیز					
۹	Experimental Coarse Q30-h1	۰/۰۰۲-۰/۰۲۲	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴	
۱۰	Experimental Fine Q30-h1	۰/۰۰۶-۰/۰۳۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۵	
۱۱	Experimental Fine Q60-h1	۰/۰۰۴-۰/۰۲۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	
۱۲	Experimental Fine Q60-h2	۰/۰۱۰-۰/۰۶۷	۰/۰۳۱	۰/۰۲۹	
۱۳	Numerical Coarse Q30-h1	۰/۰۲۳-۰/۰۶۰	۰/۰۱۹	۰/۰۱۷	
۱۴	Numerical Fine Q30-h1	۰/۰۱۱-۰/۰۴۱	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰	
۱۵	Numerical Fine Q60-h1	۰/۰۱۱-۰/۰۴۱	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰	
۱۶	Numerical Fine Q60-h2	۰/۰۲۸-۰/۰۵۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۱	

افزایش در بستر شنی ریز ۶۵ درصد و در بستر شنی درشت ۲۱ درصد برآورد شده است.

مدل SSIIM، اگرچه روند مناسبی از تغییرات ضریب پسا در طول موج تلماسه ارائه می‌کند ولی به سبب یکسان فرض کردن قطر و شکل ذرات بستر، در تحلیل ضریب پسا دارای خطا بوده و به نظر می‌رسد مدل چندان مناسبی نیست. با توجه به نوین بودن موضوع تحقیق، پیشنهاد می‌شود، ضریب پسا بر روی تلماسه‌های متحرک و در حضور پوشش گیاهی نیز بررسی شود تا بتوان تأثیر مورفولوژی را بر روی ضریب پسا بهتر بررسی کرد.

### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که بدین وسیله از حمایت‌های بی‌دریغ جناب آقای پروفیسور زنتس، ریاست محترم دانشکده هیدرولیک و مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی گراتس - اتریش به دلیل فراهم کردن امکان استفاده از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات اندازه‌گیری سرعت، قدردانی و تشکر کنند. همچنین نویسنده اول از همکاری علمی جناب آقای دکتر افضل‌مهر، استاد دانشگاه صنعتی اصفهان، بسیار تشکر می‌کند.

سرعت برشی میانگین (به روش میانگین حسابی و دوگانه) در محاسبه ضریب پسا بسیار مؤثر است.

در این تحقیق به جای بررسی ضرایب پسای متعددی در یک طول موج از تلماسه، به بررسی ضریب پسای حاصل شده از میانگین حسابی و یا میانگین دوگانه پرداخته و نتایج نشان می‌دهد که ضریب پسای متوسط حاصل شده از روش میانگین حسابی و یا میانگین دوگانه بسیار به هم نزدیک بوده و به جز در یک مورد، کمتر از ۸ درصد اختلاف دارند.

نتایج حاصل از تغییر شرایط هیدرولیکی جریان نزدیک بستر و ضریب پسا به صورت زیر جمع‌بندی می‌شود: افزایش دبی در تلماسه‌های تاج تخت و تیز، تأثیر چندان زیادی بر ضریب پسا نداشته و با افزایش ۱۰۰ درصد دبی، میزان ضریب پسا حداکثر (۱۵ درصد) کاهش می‌یابد.

با کاهش ۴۰ درصدی عمق جریان، ضریب پسا به شدت افزایش یافته و تا سقف ۶۶ درصد زیاد می‌شود.

کاهش قطر ذرات بستر سبب افزایش ضریب پسا شده و این تغییر در تلماسه‌های تاج تخت حدود ۴۷+ درصد و در تلماسه‌ها با تاج تیز ۷+ درصد برآورد می‌شود.

تغییر شکل تاج تلماسه‌ها از تیز به تخت در شرایط هیدرولیکی مشابه، سبب افزایش ضریب پسا می‌شود. این میزان

### منابع مورد استفاده

۱. داورپناه، ش. ۱۳۹۰. بررسی برهمکنش شکل‌های بستر شنی با تاج مسطح و پوشش گیاهی دیوار بر مولفه‌های جریان آشفته. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.
۲. فضل‌اللهی، ع. ۱۳۹۱. تأثیر پوشش گیاهی دیواره و شکل بستر مقعر بر ساختار جریان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.
۳. معتمدی، الف. و ح. افضل‌مهر. ۱۳۹۲. بررسی برهمکنش هندسه تلماسه بر ساختار جریان و طول ناحیه جدایی با استفاده از دستگاه‌های سرعت سنج PIV و ADV. نشریه آب و خاک ۲۷(۲): ۳۲۸-۳۴۱.
4. Afzalimehr, H., V. P. Singh and E. Fazel Najafabadi. 2010. Determination of form friction factor. *Journal of Hydraulic Engineering* 15: 3: 237-243.
5. Alonso, G. and J. Meseguer. 2006. A Parametric Study of the Galloping Stability of Two-dimensional Triangular Cross-section Bodies *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94(4): 241-253.
6. Best, J. and R. Kostaschuk. 2002. An experimental study of turbulent flow over a low angle dune. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 107(C9).

7. Darby, S. E. 1999. Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential. *Journal of Hydraulic Engineering* 125: 443-454.
8. Dinehart, R. L. 1992. Evolution of coarse gravel bedforms: field measurements at flood stage. *Water Resources Research* 28: 2667-2689.
9. Hygelund, B. and M. Manga. 2003. Field measurements of drag coefficients for model large woody debris. *Geomorphology* 51(1): 175-185.
10. Jellesma, M. 2013. Form drag of subaqueous dune configurations. MSc. Thesis. University of Twente, Enschede.
11. Morinaga, T., N. Tanaka, J. Yagisawa, S. Karunaratne and W. M. S. B. Weerakoon. 2013. Estimation of drag coefficient of trees considering the tree bending or overturning situations. *In: Proceeding of the International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development (ACEPS)*, University of Ruhuna, Sri Lanka. PP: 142-149.
12. Motamedi A., H. Afzalimehr, G. Zenz and M. Galoie. 2012. RANS simulations of flow over dune with low lee and sharp lee angles. *In: Proceeding of the International SimHydro Conference*, France.
13. Motamedi, A., H. Afzalimehr, V. Singh and L. Dufresne. 2012. Experimental study on the influence of dune dimensions on flow separation. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(1): 78-86.
14. Motamedi, A., H. Afzalimehr, J. Gallichand and E. Fazel. 2012. Lee angle effects in near bed turbulence: An experimental study on low and sharp angle dunes. *International Journal of Hydraulic Engineering* 1(6): 68-74.
15. Ojha S. P. and B. S. Mazumder. 2008. Turbulence characteristics of flow region over a series of 2-D dune shaped structures. *Advances in Water Resources* 31: 561-576.
16. Olsen, N. R. B. 2011. A Three-Dimensional Numerical Model for Simulate of Sediment Movements in Water Intakes with Multiblock Option. Users's Manual, by Nils Reidar B. Olsen, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway.
17. Sadraey, M. 2009. Aircraft Performance: Analysis. VDM Publishing. chapter 3. Drag Force and Drag Coefficient. Saarbrucken VDM Verlag Dr. Muller Publishing. Germany.
18. Tanaka, N., H. Takenaka, J. Yagisawa and T. Morinaga. 2011. Estimation of drag coefficient of a real tree considering the vertical stand structure of trunk, branches, and leaves, *International Journal of River Basin Management* 9(3-4): 221-230.
19. Van-Dam, C. P. 1999. Recent experience with different methods of drag prediction. *Aerospace* 35(8): 751-798.

## Experimental Measurement and Numerical Model of Dunes Drag Coefficients

A. Motamedi\* and M. Galoie<sup>1</sup>

(Received: October 5-2016; Accepted: May 27-2017)

### Abstract

In order to investigate the flow formation on dunes, the experimental data from a flume 12 meters long, located in Hydraulic Lab at Technical University of Graz (Austria), were collected. In this study, dunes (particle sizes of 13 and 6 mm) in a 2-D plan were developed with the wavelength of 1 meter, the lee angle of 8 degree, and the crest heights of 4 and 6 cm; these were uniformly installed across the width of flume. The analysis of the experimental flow velocity profiles measured by ADV and PIV technology and the numerical profiles modeled by SSIMM showed that in the same hydraulic conditions, there was no significant relation between drag coefficients of particles on dunes and flow discharge variation, while the water depth reduction caused a sudden increase in the drag coefficient up to 66%. Also, reducing particle size of the dune increased the drag coefficient and there was a significant relation between particle size (diameter) and dune formation, so that in smooth crested conditions, as compared with the sharp crested dune, the drag coefficient was increased up to 32%.

**Keywords:** Dune dimensions, Drag Coefficient, Shear Velocity, Double-Averaging

---

1. Civil Engineering, Architecture and Urban Planning Department, Technical University of Buein Zahra, Qazvin, Iran.  
\*: Corresponding Author, Email: Artemis.mot@bzte.ac.ir