



## بررسی اثر شکل و فاصله گروه پایه‌های رودخانه‌ای بر میزان نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر آنها

پریسا آذر تکه<sup>۱</sup>، نازیلا کاردان<sup>۲\*</sup>، محمدرضا امامی آزادی<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

### چکیده

تجربه طولانی مدت احداث پل بر روی رودخانه‌ها، مهندسان را به این نتیجه رسانده است که در طراحی پل‌ها فقط در نظر داشتن مسائل سازه‌ای، زمین‌شناسی، موقعیت راه و پتانسیل ترافیک کافی نمی‌باشد بلکه باید اثر نیروهای هیدرودینامیکی را نیز مورد توجه قرار داد. در این تحقیق نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پایه پل با بررسی تاثیر مقطع هندسی پایه (دایره‌ای، مستطیلی گردگوشه و بیضی با نسبت  $L/B$  طول به عرض مختلف)، و تاثیر نسبت  $G/D$  (فاصله لب به لب دو پایه) در گروه پایه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-سیال در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصله نشان داد در مقطع بیضی به دلیل انطباق بیشتر با الگوی جریان نیروی درگ کمتری ایجاد می‌شود. همچنین در این مقطع افزایش نسبت  $L/B$  نیز موجب بهبود نتایج می‌گردد. در گروه پایه‌های در راستای هم، در مقطع دایره‌ای در فاصله کمتر از  $2/5D$ ، پایه‌ها نظیر یک جسم صلب عمل می‌کنند. در این مقطع فاصله  $3/2D$ ، به عنوان نسبت بحرانی شناخته شده و پس از این فاصله، ضریب درگ در هر سه پایه کاهش و به مقدار ثابتی رسیده است. فاصله بحرانی برای مقطع مستطیلی گردگوشه و بیضی به ترتیب برابر با  $2/6D$  و  $2/3D$  بوده و پس از آن ضریب درگ برای هر سه پایه برابر با ضریب درگ برای پایه منفرد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آباکوس، پایه پل، پایه منفرد، گروه پایه‌ها، نیروی هیدرودینامیکی.

<sup>۱</sup> دانش آموخته‌ی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

شماره تماس و ایمیل: ۰۹۰۱-۳۳۰-۹۶۵۹، [parisa.azar@yahoo.com](mailto:parisa.azar@yahoo.com)

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

شماره تماس و ایمیل نویسنده مسئول: ۰۹۱۴-۴۱۸-۶۵۷۹، [n.kardan@azaruniv.ac.ir](mailto:n.kardan@azaruniv.ac.ir)

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

شماره تماس و ایمیل: ۰۹۱۴-۱۰۸-۸۲۱۵، [dr.emami@azaruniv.ac.ir](mailto:dr.emami@azaruniv.ac.ir)

## مقدمه

علل اصلی خرابی بسیاری از پل‌ها قبل از پایان عمرشان، عدم توجه به معیارهای هیدرولیکی در طراحی، اجرا و نگهداری آنها است. ظرفیت گذر سیلاب از پل، پایداری بازه‌ی رودخانه در محل احداث پل، هدایت جریان، نیروهای هیدرودینامیکی، آبستنگی در اثر تنگ‌شدگی و یا ایجاد مانع، از جمله عواملی می‌باشند که در تعیین جانمایی، طول، ارتفاع، آرایش پایه‌های میانی و تکیه‌گاه‌ها، و نیز مشخصات هندسی پایه‌های پل حائز اهمیت هستند. در اغلب پروژه‌های عملی به این مسائل کمتر توجه شده و علی‌رغم استفاده از مصالح و تکنولوژی پیشرفته، و صرف هزینه‌های هنگفت در طراحی و ساخت پل‌ها، هر ساله شکست و یا تخریب بسیاری برای پل‌ها در دنیا و در کشورمان در اثر وقوع سیلاب رخ می‌دهد (کردان و همکاران، ۱۳۹۴).

Roshko (1961) به صورت تجربی جریان عبوری از اطراف سیلندر دایره‌ای در اعداد رینولدز  $10^6$  تا  $10^7$  را بررسی کرد. وکت و بومل ۱۹۸۵، برای تعیین نیروی درگ و لیفت سیلندره‌ای دایره‌ای در جریان غیریکنواخت، از مدل عددی استفاده نمودند، نتایج این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و تطابق قابل قبول نتایج عددی با نتایج تجربی اعلام گردید.

Debus et al. (2003) از مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای تخمین ضریب درگ و سایر مشخصات جریان برای پایه مربعی و دایره‌ای استفاده کردند. در این مطالعه ضریب درگ در عدد رینولدز مختلف ارائه شده است. در عدد رینولدز  $10^5 \times 1/15$ ، ضریب درگ برای پایه مربعی بین  $1/3$  و  $2/5$  نوسان دارد در حالی که برای پایه دایره‌ای این نوسان بین  $0/6$  و  $1/2$  می‌باشد، همچنین در عدد رینولدز  $10^8 \times 1/15$ ، نتایج برای پایه دایره‌ای بین  $0/6$  و  $0/81$  در نوسان بود.

Wei-Bin et al. (2003) جریان اطراف یک سیلندر مربعی را به صورت دو بعدی و با استفاده از مدل عددی Lattice Bhatnagar- Gross- Krook، در عدد رینولدز بین ۱ تا ۵۰۰، شبیه‌سازی کرده و دریافتند مقدار ضریب درگ در عدد رینولدز ۱۷۰، به کمینه مقدار  $1/3$

می‌رسد و مقدار آن در بقیه اعداد رینولدز افزایش می‌یابد. Suribabu et al. (2011) مقدار ضریب درگ برای اشکال مختلف پایه با مقاطع دایره‌ای، مثلثی، بیضی، عدسی، مستطیلی با ابتدا و انتهای مثلثی و مستطیلی گردگوشه با نرخ انقباض  $0/33$  و  $0/4$  را در اعداد رینولدز  $10^4$  تا  $4 \times 10^4$  و جریان زیربحرانی مورد بررسی قرار دادند. مطابق این تحقیق بیشترین درصد کاهش نیروی درگ در نرخ انقباض  $0/33$ ، مربوط به پایه عدسی شکل و کمترین کاهش مربوط به پایه مربعی است، همچنین در نرخ انقباض  $0/40$ ، بیشترین درصد کاهش نیروی درگ مربوط به پایه با مقطع بیضی و کمترین آن مربوط به پایه مربعی می‌باشد.

Sidebottom et al. (2012) جریان پیرامون سیلندر دایره‌ای را در عدد رینولدز ۳۹۰۰، هم به صورت تجربی و هم عددی بررسی کردند، در شبیه‌سازی آشفتگی‌های جریان، مدل‌های One Equation Eddy و Smagorinsky مطابقت خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. ضریب درگ آزمایشگاهی  $0/99$  و در مدل‌های عددی به ترتیب  $0/89$  و  $0/86$  به دست آمد. Agarwal et al. (2014) ضریب درگ را برای پایه مستطیلی با ابتدا و انتهای مثلثی با نسبت‌های مختلف طول به عرض و برای نرخ انقباض ثابت  $0/4$  بررسی کردند. همچنین تغییرات ضریب درگ در دبی‌های مختلف جریان مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شد نیروی درگ با افزایش دبی، افزایش می‌یابد. Tang et al. (2015) جریان پیرامون دو سیلندر دایره‌ای که پشت سرهم قرار گرفته بودند را در عدد رینولدز ۲۰۰ و برای نسبت‌های بی بعد  $L/D$  و  $G/D$  بررسی کردند. مقدار ضریب درگ برای سیلندر بالادست با افزایش نسبت  $L/D$  تا نسبت ۳ کاهش داشته ولی با افزایش فاصله به ۴، ضریب درگ افزایش یافته است و برای سیلندر پایین‌دست با افزایش فاصله، مقدار ضریب درگ افزایش یافته و از مقادیر منفی به مقادیر مثبت رسیده است. Almasri and Moqbel (2017) یک مطالعه عددی برای بررسی ضریب درگ در اشکال مختلف پایه پل و همچنین پایه مربعی گروهی انجام داده و به این نتیجه رسیدند در اعداد



تفاوت زیاد در مقدار عددی ضریب درگ ارایه شده توسط پژوهشگران مختلف می‌تواند طراحی پایه‌های پل را بطور مشخصی تحت تاثیر قرار دهد. تفاوت بین این مقادیر و مقادیر ضریب درگ AASHTO این سوال را ایجاد می‌کند که کدام مقدار برای طراحی سازه‌های مختلف براساس ضرایب درگ مناسب‌تر است. از این‌رو تعیین ضریب نیروی درگ که صریحاً تنظیم شود و برای استفاده در شرایط مختلف جریان و اشکال مختلف پایه، ایمن و قابل اعتماد باشد، ضروری است. در مطالعه حاضر، ضریب نیروی درگ برای اشکال مختلف پایه استوانه‌ای (دایره‌ای، مستطیل گردگوشه و بیضی) به صورت منفرد و گروهی (پایه‌های مجاور هم و در راستای هم) با فواصل مختلف، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نرم‌افزار ABAQUS انجام یافته و نتایج با مقادیر مینا برای پایه دایره‌ای مقایسه گردیده است.

## مواد و روش‌ها

### نرم افزار آباکوس

آباکوس از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند مهندسی برای شبیه‌سازی محیط‌های پیچیده بوده و دارای محیط مناسب برای طراحی و مدل‌سازی (پیش پردازش) و نمایش گرافیکی نتایج حاصل از تحلیل‌ها است. ABAQUS/CFD یکی دیگر از محصولات این نرم‌افزار می‌باشد که برای تحلیل دینامیک سیالات به این مجموعه نرم‌افزاری اضافه شده است. این بخش امکانات قدرتمند و بی‌نظیری در بخش‌های پیش و پس‌پردازش اجزای محدود در حوزه مکانیک سیالات محاسباتی در اختیار کاربر می‌گذارد. به کمک این ابزار، کاربر قادر خواهد بود تا مسائل سیالاتی جریان آرام و آشسته، غوطه‌وری، مسائل انتقال حرارت درگیر با تعادل انرژی و جریان‌های حالت پایا و گذرا را به خوبی و با دقت بالا شبیه‌سازی نماید (Sato and Kobayashi, 2012). در این تحقیق از نسخه 6.12-3 ABAQUS استفاده گردید

رینولدز بالا، مقدار ضریب درگ  $1/4$  پیشنهادی AASHTO، برای پایه مربعی ایمن نیست، لیکن ضریب درگ پایه‌ی نیم دایره‌ای و پایه گوه‌ای با نتایج AASHTO تطبیق داشت. با این تفاوت که برای پایه های گوه‌ای با نسبت طول به عرض کمتر از سه، مقدار ضریب درگ بیشتر از مقدار پیشنهادی AASHTO به دست آمد. (Sarioglu (2017) جریان اطراف سیلندر مربعی را در عدد رینولدز  $3 \times 10^4$  با وجود صفحه جداکننده بررسی کرد، در این مطالعه اثر همزمان صفحه جداکننده و زاویه توری بررسی شد. با وجود صفحه جداکننده، یک پرش ناگهانی در عدد استروهمال در نزدیکی زاویه  $13^\circ$  درجه رخ می‌دهد که مربوط به ضریب درگ مینیمم است. در زاویه موربی صفر، عدد استروهمال و ضریب درگ حدود  $20\%$  کاهش می‌یابد. (Mikheev et al. (2017) هیدرودینامیک گردابه و انتقال حرارت جریان اطراف سیلندر را به صورت تجربی بررسی و با استفاده از تحلیل نتایج جریان، الگوی جریان اطراف سیلندر را به چهار گروه تقسیم بندی کردند. در نهایت یک عدد بی‌بعد جدیدی که نسبت نیروی اینرسی ناشی از افزایش یا کاهش شتاب جریان ورودی به نیروی اینرسی سانتریفوژال ناشی از خط جریان منحنی وار اطراف سیلندر است، را ارائه نمودند. (Beheshti et al. (2017) یک شبیه‌سازی عددی از آشفتگی جریان اطراف پایه‌های دایره‌ای مجاور هم، با نسبت فاصله کم (نسبت فاصله مرکز به مرکز به قطر پایه) و با عدد رینولدز  $10^5$  در بستر هموار و ثابت انجام دادند. نتایج با استفاده از مدل Flow3D و CFD که معادلات ناویر استوکس را با روش حجم محدود حل می‌کنند، به دست آمد. نائینی و فضل‌ی (۱۳۸۹)، با استفاده از نرم افزار Fluent به صورت دو بعدی میزان اثرگذاری شکل پایه بر الگوی شکل‌گیری جریان، بزرگی گردابه و پارامترهای شکست گردابه از جمله ضریب درگ و لیفت را شبیه‌سازی کرده و به این نتیجه رسیدند پایه مستطیلی دارای لبه‌گرد و لبه تیزگوشه، در حالتی که سمت گردشده پایه مقابل جریان قرار گیرد، در هر دو حالت اصابت مستقیم و مایل جریان، بهترین عملکرد را دارد.

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho V^2 D} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cos \theta d\theta + \frac{1}{\rho V^2} \int_0^{2\pi} \tau_w \sin \theta d\theta \quad (5)$$

$C_p$  ضریب فشار می‌باشد. ترم اول سمت راست در معادله فوق ضریب درگ ناشی از فشار و ترم دوم ضریب درگ ناشی از اصطکاک سطحی است.

### شرایط مرزی

برای پایه منفرد در مرز بالادست و پایین‌دست، به ترتیب سرعت جریان و فشار به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شد. برای دیواره‌ها و پایه، شرط مرزی عدم لغزش تعریف شد. میدان محاسباتی و شرایط مرزی برای گروه پایه نیز دقیقاً مشابه پایه منفرد انتخاب گردید.

### صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی مطالعه Suribabu et al. (2011) بهره گرفته شده است. Suribabu et al. (2011) در کانالی به عرض ۱/۵، طول ۴ متر و با دو نسبت انقباض ۰/۴ و ۰/۳۳، بر روی شکل پایه‌های مختلف مطالعاتی انجام داده و ضریب درگ را به ازای اعداد رینولدز  $10^4 \times 1$  تا  $10^4 \times 2$  و دبی‌های  $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$  الی  $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$  را به دست آوردند. به منظور بررسی اثر تعداد و شکل مش در میدان محاسباتی و نیز تکنیک مش‌بندی، شکل پایه مربعی انتخاب و در اعداد رینولدز مختلف شبیه‌سازی‌ها انجام شده است. برای انتخاب مش‌بندی مناسب در میدان محاسباتی و نیز اطمینان از همگرایی نتایج، شکل‌های مختلف المان، با تکنیک‌ها و سایزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

به عنوان نمونه مش شش‌وجهی<sup>۱</sup> با دو تکنیک Structure و Sweep و مش گوه‌ای<sup>۲</sup> با تکنیک Sweep ارزیابی گردید. نتایج برای انواع مختلف مش و

### معادلات حاکم

معادله حاکم بر حرکت سیالات، معادلات ناویر-استوکس (معادله ۱) برای حرکت سیال با ویسکوزیته غیرقابل تراکم می‌باشد (Almasri and Moqbel, 2017). معادله (۱) نشان می‌دهد نیروی اینرسی با مجموع فشار و نیروی ویسکوزیته سیال در تعادل هستند:

$$\rho \left( \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی آب،  $V$  سرعت جریان،  $p$  فشار، و  $\mu$  ضریب ویسکوزیته دینامیکی سیال می‌باشد (Almasri and Moqbel, 2017). مهم‌ترین معادله حاکم بر جریان، پس از بسط معادله (۱)، بقای جرم است که به فرم زیر بیان می‌شود (Wang et al. 2015):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \quad (2)$$

$S_m$  چاه یا منبع تغذیه است که در تحقیق حاضر مقدار  $S_m$  برابر صفر است. معادله بقا مومنتم نیز به فرم زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad (3)$$

که  $p$  فشار استاتیکی،  $\bar{\tau}$  تانسور تنش،  $\rho \bar{g}$  و  $\bar{F}$  به ترتیب نیروی ثقل و نیروی خارجی می‌باشند. نیروی درگ با انتگرالگیری از عبارت فشار و اصطکاک سطحی محاسبه گردیده است:

$$F_d = \int_0^{2\pi} R P \cos \theta d\theta + \int_0^{2\pi} R \tau_w \sin \theta d\theta \quad (4)$$

$F_d$  نیروی درگ بر روی سطح استوانه،  $R$  شعاع استوانه،  $\tau_w$  تنش برشی موضعی، و  $\theta$  تغییرمکان زاویه‌ای از نقطه‌ی سکون ( $\theta = 0^\circ$ ) است. ضریب درگ ( $C_d$ ) بر حسب معادله‌ی (۵) به دست می‌آید:

<sup>1</sup>Hexagonal

<sup>2</sup> Wedge



بر مبنای مقایسه بیشینه فشار و ضریب درگ ارائه شده است.

مقایسه نتایج دو جدول (۲) و (۳) نشان می‌دهد در هر دو پارامتر فشار و ضریب درگ، نتایج حاصله با تکنیک مش‌بندی Structure بسیار بهتر از نتایج بدست آمده با تکنیک Sweep است. در روش Structure با افزایش تعداد مش‌ها، اختلاف نتایج عددی و تجربی کاهش می‌یابد. در تعداد ۴۶۰۰۰ مقدار ضریب درگ برابر با ۱/۳۸ است. با افزایش تعداد مش‌ها به تعداد ۵۸۰۰۰ ضریب درگ بدون تغییر باقی می‌ماند یعنی استقلال مش در تعداد مش ۴۶۰۰۰ مشاهده می‌گردد. این تعداد مش با تکنیک Structure برای سایر شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، مدل  $RNG k-\epsilon$  به عنوان مدل آشفتگی انتخاب شد.

اندازه‌های متفاوت براساس نوع مش و سائز المان‌ها ارائه شده است.

### اثر شکل و تکنیک مش‌بندی

برای بررسی تاثیر شکل و تکنیک مش‌بندی، کانتور فشار حاصله با مقادیر فشار مطالعه موردی مقایسه گردیده و در جدول (۱) این نتایج ارائه شده است. مطابق نتایج این جدول، درصد اختلاف برای مش گوه‌ای بیشتر از ۲۰ است و لذا این نوع مش‌بندی مورد ارزیابی بیشتر قرار نگرفت. برای بررسی اثر تعداد المان‌های میدان محاسباتی، مقایسه نتایج بر مبنای کانتور فشار و ضریب درگ برای دو تکنیک مش‌بندی Structure و Sweep در مش شش وجهی انجام گرفت.

### اثر اندازه المان‌ها

در جدول (۲) نتایج حاصله با المان شش‌وجهی و تکنیک Structure و در جدول (۳) با تکنیک Sweep،

جدول (۱): مقایسه بیشینه فشار حاصله با مقادیر بیشینه فشار مطالعه موردی.

شکل مش - تکنیک مش	بیشینه فشار حاصله (Pa)	بیشینه فشار مطالعه موردی (Pa)	درصد اختلاف (%)
شش‌وجهی-structure	$6/907 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	۴/۰۶
شش‌وجهی-sweep	$7/088 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	۶/۸
گوه‌ای-sweep	$7/989 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	۲۰/۴

جدول (۲): مقدار بیشینه فشار و متوسط زمانی ضریب درگ با تکنیک Structure.

تعداد	بیشینه فشار حاصله (Pa)	بیشینه فشار مقاله مطالعه موردی (Pa)	درصد اختلاف (%)	ضریب درگ عددی	ضریب درگ مقاله مطالعه موردی	درصد اختلاف (%)
۱۱۵۶۰	$6/368 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	-۴	۱/۱	۱/۴۵	۲۴
۱۶۰۰۰	$6/868 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	+۳	۱/۲	۱/۴۵	۱۷
۲۵۰۰۰	$6/907 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	+۴	۱/۳۲	۱/۴۵	۸/۹۷
۳۱۰۰۰	$7/536 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	+۱۳	۱/۳۷	۱/۴۵	۵/۵
۴۶۰۰۰	$7/709 \times 10^2$	$6/637 \times 10^2$	+۱۶	۱/۳۸	۱/۴۵	۴/۸۲

Structure, مقدار RMSE و  $R^2$  در محاسبه ضریب درگ به ترتیب برابر ۰/۱۷۵ و ۰/۹۸۷ است.

### مشخصات مدل عددی

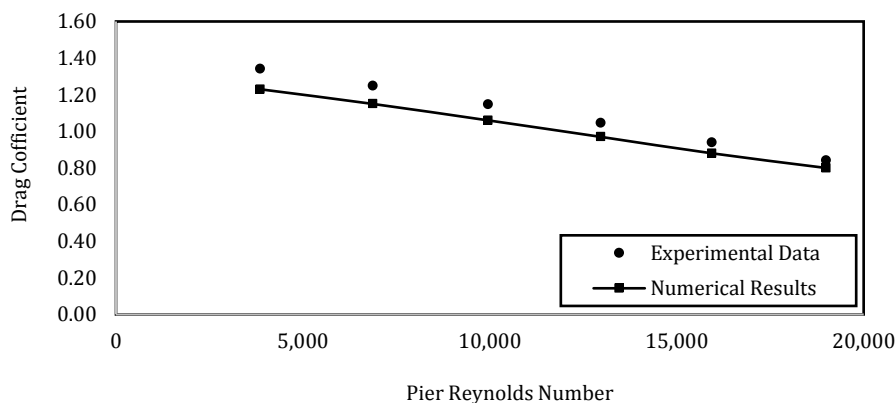
در بررسی حاضر سه پارامتر شکل هندسی مقطع، فاصله پایه‌ها و نیز نحوه‌ی قرار گیری آن‌ها نسبت به هم (مجاور هم یا در امتداد هم)، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای شکل مقطع، سه شکل هندسی دایره به قطر ۱ متر، مستطیل گرد گوشه و بیضی به عرض ۱ متر و با سه نسبت طول به عرض ۲، ۳ و ۴ انتخاب گردیده‌اند. برای پایه‌های دوتایی مجاور هم و در امتداد هم، برای فاصله پایه‌ها (G/D) که G فاصله لب به لب پایه‌ها می‌باشد، نسبت‌های مختلفی بررسی شده است. شکل (۲) حالات مختلف قرارگیری پایه‌ها در مسیر جریان را نشان می‌دهد.

در نهایت برای ارزیابی عملکرد و دقت مدل عددی بر حسب اندازه مش، شکل مش و تکنیک مش‌بندی، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE1) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) در اعداد رینولدز مختلف به کار برده شده است (Kisi, 2010):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (7)$$

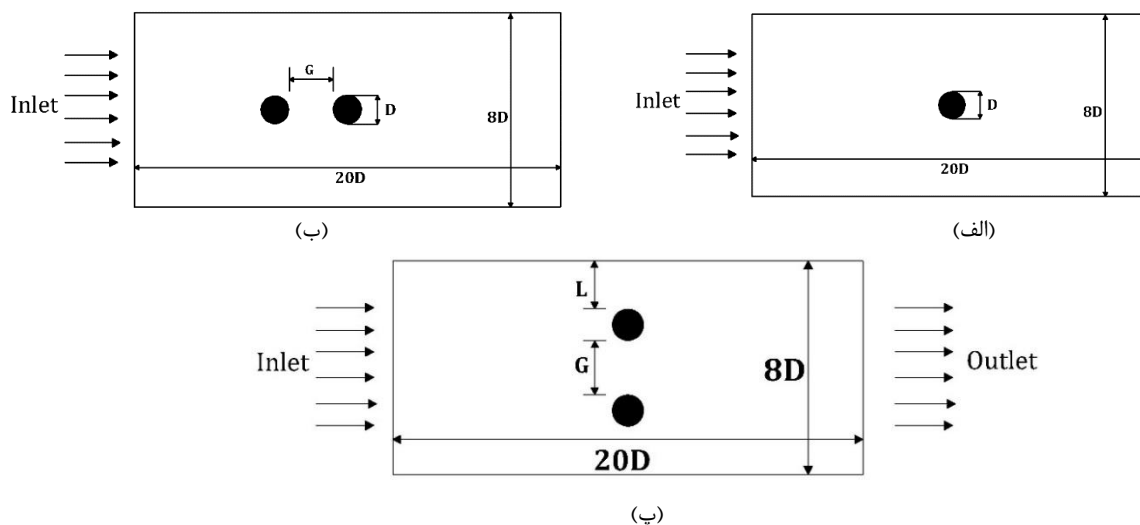
که در آن،  $x_i$  مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل،  $y_i$  مقادیر مشاهداتی،  $n$  تعداد داده‌ها، و  $\bar{y}_i$  میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشد. با توجه به شکل (۱)، بر حسب اندازه المان‌های انتخاب شده، و مش‌بندی شش وجهی از نوع



شکل (۱): مقایسه نتایج عددی و تجربی بر حسب پارامترهای اندازه المان، شکل المان و تکنیک مش‌بندی انتخاب شده.

جدول (۳): مقدار بیشینه فشار و متوسط زمانی ضریب درگ با تکنیک Sweep.

تعداد المان	بیشینه فشار حاصله (Pa)	بیشینه فشار مطالعه موردی (Pa)	درصد اختلاف (%)	ضریب درگ تحلیل عددی	ضریب درگ مقاله مطالعه موردی	درصد اختلاف (%)
۲۵۰۰۰	$۸/۱۴۴ \times ۱۰^۲$	$۶/۶۳۷ \times ۱۰^۲$	۲۲/۷	۱/۲۱	۱/۴۵	۱۶/۵
۳۱۰۰۰	$۷/۰۸۸ \times ۱۰^۲$	$۶/۶۳۷ \times ۱۰^۲$	۶/۸	۱/۲۵	۱/۴۵	۱۳/۷
۴۶۰۰۰	$۸/۲۹۳ \times ۱۰^۲$	$۶/۶۳۷ \times ۱۰^۲$	۲۵	۱/۳۰	۱/۴۵	۱۰



شکل (۲): موقعیت قرارگیری پایه‌ها در حالت مجاور هم و در راستای هم.

### مقطع دایره‌ای

در شکل (۳) تغییرات زمانی ضریب درگ برای مقطع دایره‌ای ارائه شده است. در این مقطع در مقایسه با مقطع مربعی (مطالعه موردی) با سرعت و شرایط یکسان، ضریب درگ کاهش می‌یابد. در مدل مربعی در پشت پایه، یک ناحیه با فشار منفی بالا ایجاد می‌شود که این ناحیه در مقطع دایره‌ای کوچک‌تر است، به عبارتی ناحیه‌ی فشار منفی در پایه با مقطع دایره‌ای، بسیار کوچک بوده و گردابه‌های برخاستگی کوچکی در ناحیه‌ی ویک آن تشکیل می‌گردد. همچنین در مقطع مربعی، گوشه‌های تیز مقطع موجب می‌شود جدایش جریان در این نقاط بسیار شدید بوده و نیروی درگ بزرگی به این مقطع وارد شود.

در پایه دایره‌ای، نمودار ضریب درگ ابتدا به صورت ناگهانی افزایش و سپس با یک تغییر اندک به مقدار حدی  $0.34$  می‌رسد و حول این مقدار ثابت نوسان می‌کند، در حالی که این مقدار برای پایه مربعی برابر  $1/53$  است. کاهش قابل توجه مقدار ضریب درگ به دلیل کاهش جدایش جریان از مرزهای مقطع دایره‌ای و کوچک‌تر شدن ناحیه فشار منفی در ناحیه ویک آن می‌باشد. این کاهش برابر  $77$  درصد است.

در تمامی مدل‌ها، فاصله پایه‌ها از ورودی کانال  $4$  متر، چگالی آب  $1000 \text{ Kg/m}^3$ ، ویسکوزیته دینامیکی  $0.001 \text{ N.s/m}^2$  و آب به عنوان سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح پایه نیز برای همه نمونه‌ها یکسان بوده و چگالی بتن  $2400 \text{ Kg/m}^3$ ، ضریب پواسون  $0.2$  و مدول یانگ  $3 \times 10^{10} \text{ Pa}$  مطابق مقاله Wang et al., 2015، فرض شده است. در هر حالت، مقدار ضریب درگ محاسبه و با مقدار آن در حالت پایه منفرد با مقطع دایره‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است.

### نتایج و بحث

#### بررسی اثر مقطع هندسی پایه در پایه منفرد

برای بررسی اثر مقطع هندسی پایه بر نیروهای هیدرودینامیکی، سه مقطع دایره‌ای، مستطیل گردگوشه و بیضی با سه نسبت طول به عرض مختلف بررسی و نتایج آن‌ها مقایسه گردیده است. همه مقاطع در سرعت جریان  $1$  متر بر ثانیه (برابر با سرعت جریان در مطالعه موردی) تحلیل شده‌اند.

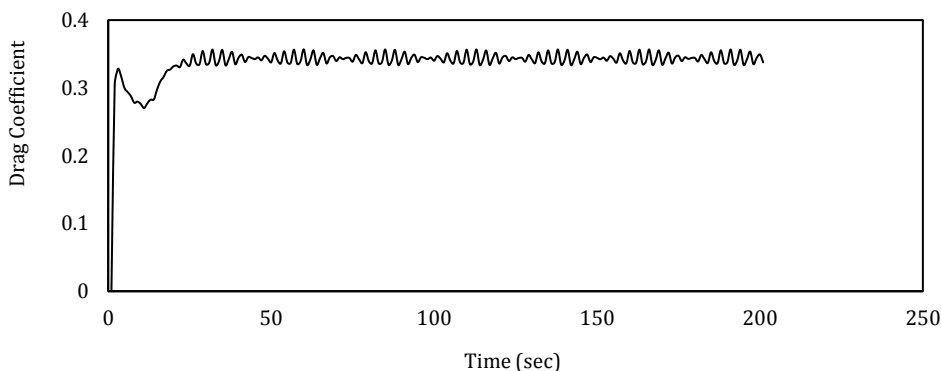
### مقطع مستطیلی گردگوشه

در شکل (۴) تغییرات ضریب درگ برای مقطع مستطیلی گردگوشه ارائه شده است. در این مقطع، با افزایش نسبت  $L/B$ ، مقدار ضریب درگ نیز افزایش می‌یابد که این امر ناشی از افزایش سطح تماس و عرض انسداد در مسیر جریان است.

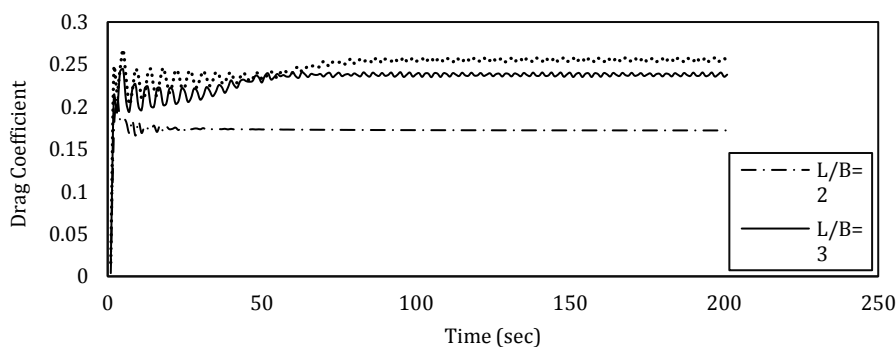
در این مقاطع، افزایش نسبت طول به عرض تا یک مقدار مشخصی بر تغییرات ضریب درگ موثر بوده و پس از یک مقدار معلوم که در اینجا مقدار آن برابر ۴ است، تاثیر نسبت  $L/B$  بر نتایج بسیار کم می‌گردد. جدول (۴) نتایج حاصله را به صورت کمی ارائه می‌دهد. در نسبت طول به عرض برابر ۲، ضریب درگ ۵۰ درصد نسبت به مقطع دایره‌ای، در نسبت ۳، ۳۲ درصد و در نسبت ۴، برابر ۲۹ درصد کاهش می‌یابد.

جدول (۴): متوسط ضریب درگ مقطع مستطیلی گردگوشه با نسبت  $L/B$  مختلف و مقایسه با مقطع دایره‌ای.

پایه	متوسط ضریب درگ	درصد اختلاف (%)
دایره‌ای	۰/۳۴	---
مقطع مستطیلی	۰/۱۷	۵۰
گردگوشه با $L/B$	۰/۲۳	۳۲
مختلف	۰/۲۴	۲۹



شکل (۳): ضریب درگ پایه با مقطع دایره‌ای.



شکل (۴): ضریب درگ پایه با مقطع مستطیلی گردگوشه با نسبت‌های مختلف  $L/B$ .





### مقطع بیضی

در شکل (۵) تغییرات ضریب درگ برای مقطع بیضی ارائه شده است. جدول (۵) نیز مقادیر کمی ضریب درگ برای سه نسبت طول به عرض، ۲، ۳ و ۴ را نمایش می‌دهد.

در مقطع مستطیل گردگوشه، شکل هندسی مقطع، تطابق خوبی با الگوی جریان داشته و گردابه‌های برخاستگی کوچکتری در ناحیه‌ی ویک پایه تشکیل می‌گردد؛ لذا مقدار ضریب درگ در مقایسه با مقطع دایره‌ای به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ یعنی در نسبت  $L/B$  برابر ۲، ضریب درگ به مقدار ۵۰ درصد کاهش داشته است.

جدول (۵): متوسط زمانی ضریب درگ مقطع بیضی با نسبت‌های مختلف  $L/B$ .

پایه	متوسط ضریب درگ	درصد تغییر ضریب درگ نسبت به مقطع دایره‌ای (%)
دایره‌ای	۰/۳۴	---
۲	۰/۳۱	۸/۸
۳	۰/۲۲	۳۵
۴	۰/۱۱	۶۷

### بررسی اثر فاصله بین پایه‌ها در گروه پایه‌های مجاور هم

در بررسی تاثیر فاصله بین پایه‌ها در گروه پایه، پارامترهای الگوی جریان و ضریب درگ بر حسب تغییر در نسبت فاصله لب به لب دو پایه  $G$  به قطر پایه  $D$  مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا نسبت‌های مختلف  $G/D$  از مقدار ۱ تا مقدار ۱۵ بررسی و ضرایب درگ حاصله مقایسه گردیده‌اند. انتخاب نسبت‌های مختلف برای  $G/D$  به این دلیل است که برخی از پژوهشگران نشان داده‌اند که بر حسب فاصله بین پایه‌ها و سرعت جریان، الگوی جریان منحصر به فردی می‌تواند در اطراف پایه‌ها شکل بگیرد (Zdravkovich, Zhou and Yiu, Lijungkrona et al. 1991, 1987). (2006)

### مقطع دایره‌ای

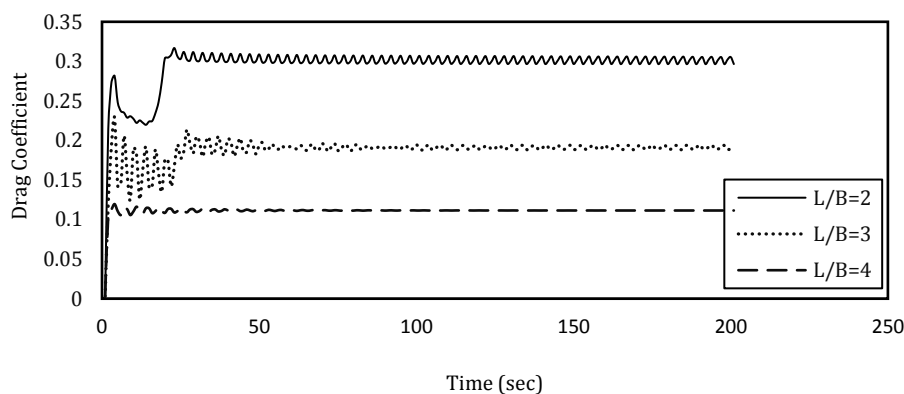
برای بررسی ضریب درگ، ضریب درگ پایه بالا با  $C_{d1}$  و ضریب درگ پایه پایین با  $C_{d2}$ ، و ضریب درگ پایه منفرد با  $C_{d0}$  نشان داده می‌شود. ضریب درگ متوسط دو پایه

آنچه در شکل و داده‌های جدول مشهود است ضریب درگ برای مقطع بیضی، نسبت به مقطع دایره‌ای کاهش چشمگیری داشته و در مقایسه با مقطع مستطیل گردگوشه نیز تاثیر شکل هندسی مقطع محسوس است. در نسبت  $L/B$  برابر ۲، ضریب درگ نسبت به مقطع دایره‌ای به اندازه ۵۰ درصد، در نسبت ۳، به اندازه ۵۶ درصد و در نسبت ۴، به اندازه ۷۳ درصد است که بسیار نتیجه خوبی می‌باشد. در مقایسه با مقطع مستطیل گردگوشه نیز بهبود نتایج در نسبت ۲، برابر ۴۱ درصد، در نسبت ۳، برابر ۲۱ درصد و در نسبت ۴، برابر ۲۵ درصد است. در مقطع بیضی، انطباق مقطع با الگوی جریان بسیار زیاد بوده و گردابه‌ی برخاستگی بسیار کوچکی در پشت پایه تشکیل می‌گردد. این امر موجب می‌گردد در مقایسه با دو مقطع دیگر نیروی هیدرودینامیکی کمتری به مقطع بیضی وارد گردد. بر خلاف مقطع مستطیلی گردگوشه، افزایش نسبت طول به عرض مقطع، موجب بهبود نتایج شده و موجب شده است ضریب درگ از مقدار ۰/۳۱ به ۰/۱۱ کاهش یابد.

در شکل (۶) تغییرات زمانی ضریب درگ پایه بالا و پایین تنها برای سه نسبت فاصله ۲، ۳ و ۴ ارائه شده است. جدول (۶) مقدار ضریب درگ به ازای فواصل مختلف پایه‌ها را نشان می‌دهد.

بالا و پایین ( $C_{ds}$ ) در اینجا مورد توجه قرار گرفته است، یعنی:

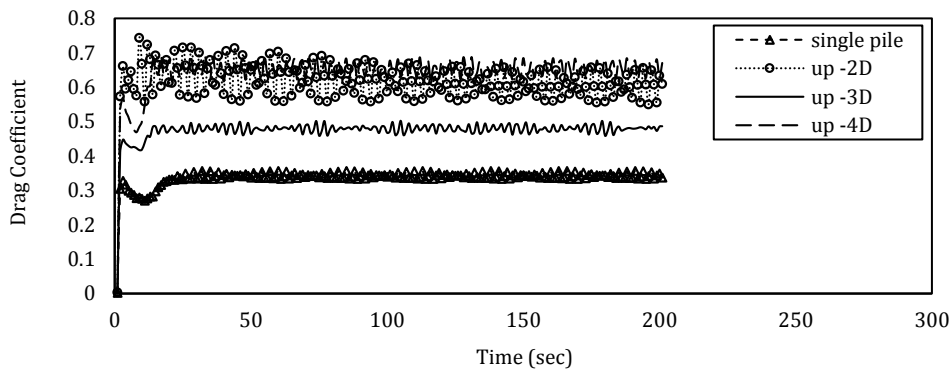
$$C_{ds} = \frac{(C_{d1} + C_{d2})}{2} \quad (۸)$$



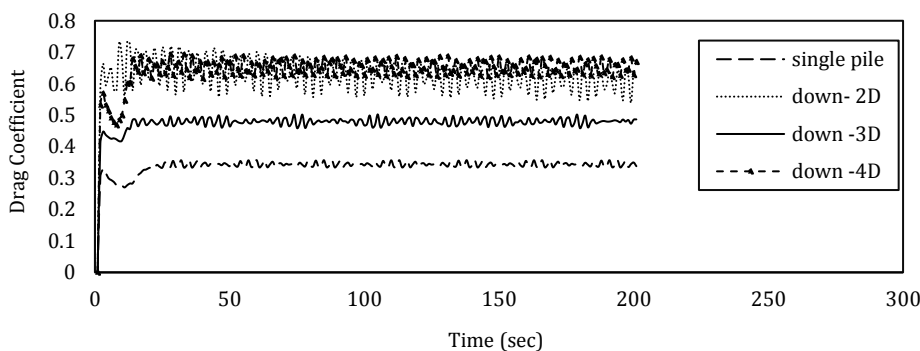
شکل (۵): ضریب درگ پایه با مقطع بیضی با نسبت‌های مختلف  $L/B$ .

جدول (۶): مقایسه متوسط ضریب درگ گروه پایه با مقطع دایره‌ای با پایه منفرد.

پایه	$G/D$	$L/D$	متوسط ضریب درگ $C_{ds}$	درصد افزایش ضریب درگ نسبت به پایه منفرد
دایره‌ای منفرد	---	---	۰/۳۴	---
گروه پایه با مقطع دایره‌ای بansبت $G/D$ مختلف	۲	۲	۰/۶۲	۸۲
	۲/۵	۱/۷۵	۰/۶۰	۷۶
	۳	۱/۵	۰/۵۹	۷۳
	۳/۳	۱/۳۵	۰/۵۵	۶۲
	۳/۵	۱/۲۵	۰/۵۰	۴۷
	۳/۶	۱/۲	۰/۵۳	۵۶
	۳/۸	۱/۱	۰/۵۴	۵۸
	۴	۱	۰/۵۷	۶۷
۵	۰/۵	۰/۵۹	۷۳	



(الف)



(ب)

شکل (۶): ضریب درگ گروه پایه با مقطع دایره‌ای (الف) پایه بالا (ب) پایه پایین.

این مساله را اینگونه می‌توان توجیه نمود که در نسبت فاصله ۲، با توجه به پروفیل سرعت، در وسط کانال جریان با سرعت بالا به پایه‌ها برخورد کرده و انسداد مقطع از یک سو و سرعت زیاد جریان از سویی دیگر موجب می‌گردد ضریب درگ در این فاصله بیشترین مقدار را داشته باشد. در نسبت فاصله ۵، با وجود افزایش فاصله بین دو پایه، اثر دیواره بر پایه‌ها وجود داشته، لیکن سرعت جریان در نزدیکی مرزها کم بوده و از شدت برخورد جریان به پایه‌ها کاسته شده است. از این رو با وجود کم بودن فاصله بین پایه‌ها و دیواره، ضریب درگ نسبت به نسبت فاصله ۲، کاهش نشان می‌دهد.

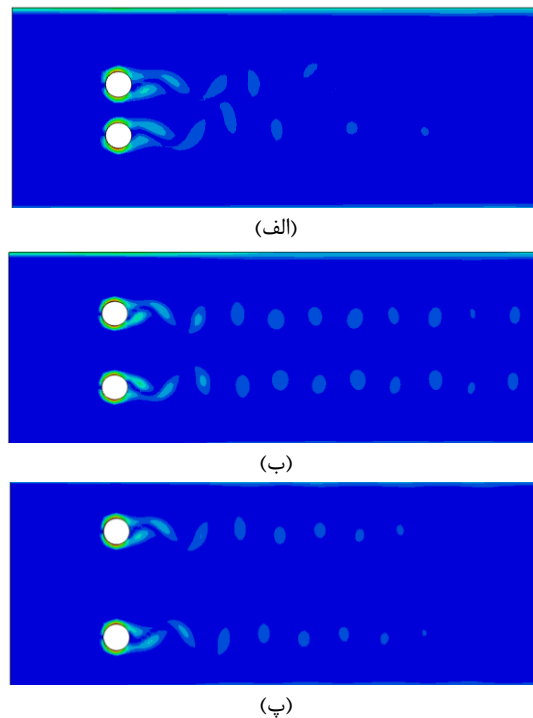
بر حسب تعریف (Sumner et al. (1999) و Zdravkovich (1987)، در حالت قرارگیری پایه‌ها در کنار هم سه نوع الگوی جریان قابل تعریف است. حالت اول الگوی جسم یکسان (SB)<sup>۱</sup>، حالت دوم الگوی جریان

در تمام حالات قرارگیری پایه‌های مجاور در مسیر جریان، ضریب درگ نسبت به شرایط پایه منفرد افزایش داشته است. این امر به دلیل افزایش عرض انسداد و کاهش مقطع عبوری جریان است. با افزایش فاصله بین دو پایه، این ضریب کاهش می‌یابد و نهایتاً در نسبت فاصله برابر ۳/۵، مقدار آن به کمترین مقدار می‌رسد. در فواصل ۲، ۴ و ۵ نیز بیشترین مقدار ضریب درگ حاصل شده است. با افزایش فاصله بین دو پایه به بیشتر از ۳/۵، اگرچه مقطع عبوری جریان بین دو پایه افزایش می‌یابد لیکن دیواره‌ها بر جریان عبوری اثر گذاشته و موجب تشدید نیروی برخوردی از طرف جریان به پایه‌ها می‌گردد. همچنین مشخص است که مقدار ضریب درگ در نسبت فاصله ۵، اندکی بیشتر از مقدار آن در نسبت فاصله ۲ است.

<sup>1</sup> Single body

دو پایه متاثر از گردابه‌ی هر دو پایه خواهد بود. در حالت سوم پایه‌ها به قدری از هم دور می‌باشند که تأثیری بر میدان جریان یکدیگر نداشته و تأثیر گردابه‌ها بر هم از بین می‌رود. در این حالت، تا نسبت فاصله ۴، دیواره‌ها تأثیری بر میدان جریان پایه‌ها نداشته ولی در نسبت فاصله‌ی ۵ که فاصله‌ی پایه‌ها از دیواره به حداقل می‌رسد، دیواره‌ها بر گردابه‌های پایه‌ها تأثیر خواهند گذاشت. شکل (۷) نوسان گردابه‌ها در سه نسبت فاصله‌ی ۲، ۳ و ۴ را نمایش می‌دهد.

متاثر (BF<sup>1</sup>) و حالت سوم الگوی جریان هماهنگ (SV<sup>2</sup>) نامیده می‌شود. حالت اول در فواصل کم در حدود  $G/D$  برابر ۱ رخ می‌دهد که در اینجا مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. حالت دوم مشابه حالتی است که در نسبت فاصله ۲ و ۲/۵ رخ می‌دهد و حالت سوم در نسبت فواصل ۳ و بالاتر رخ خواهد داد. در حالت دوم گردابه‌های تشکیل شده در اطراف هر پایه، بر گردابه‌ی پایه مجاور تأثیر گذاشته و موجب کشیده شدن گردابه پایه مجاور به سمت دیواره‌ها می‌شود. در این حالت جریان عبوری از میان



شکل (۷): الگوی جریان پیرامون پایه‌های مجاور در سه نسبت فاصله  
(الف) ۲ (ب) ۳ (پ) ۴.

گرفته است. در جدول (۷) ضریب درگ متوسط برای فواصل مختلف  $G/D$  و پایه منفرد مقایسه شده است. در تمامی فواصل قرارگیری پایه‌ها، ضریب درگ نسبت به پایه منفرد افزایش داشته است که این امر به دلیل کاهش مقطع عبوری جریان و افزایش سرعت جریان

#### مقطع مستطیلی گردگوشه

برای ارزیابی تأثیر توام فواصل بین پایه‌ها و شکل هندسی مقطع، مقطع مستطیلی گردگوشه با نسبت  $L/B=3$  در نسبت‌های مختلف  $G/D$  مورد بررسی قرار

<sup>2</sup> Synchronized vortex shedding

<sup>1</sup> Biased flow pattern



تغییرات الگوی جریان برحسب نسبت فاصله، نیز مشابه مقطع دایره‌ای است. با این تفاوت که به دلیل انطباق شکل مقطع با الگوی جریان، گردابه‌های کوچکی در پشت پایه تشکیل شده و گردابه‌های برخاستگی ناحیه ویک سریع‌تر مستهلک می‌شوند.

است. مشابه مقطع دایره‌ای، با افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها، ضریب درگ کاهش می‌یابد. این سیر نزولی تا نسبت فاصله ۳/۵ مشاهده شده و سپس به دلیل اثر دیواره بر پایه‌ها، دوباره روند صعودی ادامه یافته است. در نسبت فاصله برابر ۳/۵، ضریب درگ حدود ۲ برابر ضریب درگ پایه منفرد است. کمترین مقدار ضریب درگ نیز در این فاصله بر پایه‌ها وارد می‌گردد.

جدول (۷): متوسط ضریب درگ در پایه‌های مجاور با مقطع مستطیلی گردگوشه و مقایسه با پایه منفرد.

پایه	متوسط ضریب درگ	درصد تغییرات ضریب درگ نسبت به پایه منفرد
مستطیلی گردگوشه منفرد	۰/۲۲	--
۲	۰/۵۹	۱۶۸
۳	۰/۵۶	۱۵۴
گروه پایه با مقطع مستطیلی گردگوشه	۰/۵۲	۱۳۶
۳/۵	۰/۴۶	۱۰۹
با نسبت G/D مختلف	۰/۵۰	۱۲۷
۴	۰/۵۴	۱۴۵
۵	۰/۵۵	۱۵۰

مشابه پایه مقطع دایره‌ای و مستطیل گردگوشه، افزایش نسبت فاصله بین دو پایه تنها تا حدودی می‌تواند موجب بهبود نتایج شده و ضریب درگ را کاهش دهد. در تمامی مقاطع مورد بررسی، در نسبت فاصله ۳/۵، پایه‌ی مجاور و دیواره‌های کانال حداقل تاثیر را بر جریان داشته و کمترین ضریب درگ در این نسبت فاصله مشاهده شده است. در نسبت فاصله ی کمتر، اثر انسداد پایه‌ها زیاد بوده و عرض عبوری جریان در وسط کانال کم است، در نسبت فاصله زیاد نیز اثر دیواره‌ها قابل توجه می‌باشد.

### مقطع بیضی

در جدول (۸) مقدار ضریب درگ برای نسبت فواصل مختلف برای مقطع بیضی ارائه شده است، وقتی فاصله دو پایه از نسبت فاصله‌ی ۲ به ۳/۵ می‌رسد، ضریب درگ طولی کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار این فاصله به ۴، ضریب درگ دوباره روند صعودی داشته و به بیشتر از مقدار آن در نسبت فاصله ۲ می‌رسد. این امر به دلیل اثر دیواره جانبی کانال بر پایه‌ها می‌باشد. مقدار ضریب درگ در تمامی فواصل، از مقدار آن برای مقطع بیضی منفرد، بیشتر است.

جدول (۸): متوسط ضریب درگ در پایه‌های مجاور با مقطع بیضی در نسبت فواصل مختلف.

پایه	متوسط ضریب درگ $C_{ds}$	درصد تغییرات ضریب درگ مقطع بیضی نسبت به پایه منفرد (%)
بیضی منفرد	۰/۱۷۱	---
۲	۰/۳۲۴	۸۹
۳	۰/۲۷۲	۵۹
گروه پایه با مقطع بیضی	۰/۱۵۴	۱۰
۳/۳	۰/۱۵۱	۱۱
۳/۵	۰/۱۵۴	۱۰
مختلف $G/D$	۰/۳۲	۸۷
۳/۸	۰/۳۳	۹۳
۴		
۵		

منفرد باشد. قرارگیری پایه‌ی دوم در پایین دست پایه-یاول باعث افزایش فشار استاتیکی در پشت پایه اول (نسبت به پایه منفرد) شده و در نتیجه ضریب درگ نسبت به ضریب درگ پایه منفرد بیشتر می‌گردد. با افزایش فاصله‌ی بین پایه‌ها، ضریب درگ کاهش می‌یابد تا اینکه فاصله‌ی پایه‌ی دوم از پایه اول به اندازه‌ای می‌رسد که پایه‌ی اول به طور کامل از ناحیه‌ی گردابه‌ی برخاستگی پایه اول خارج می‌شود. در این فاصله، ضریب درگ به طور ناگهانی افزایش یافته و این نسبت فاصله به عنوان نسبت فاصله بحرانی شناخته می‌گردد  $((G/D)_c)$ .

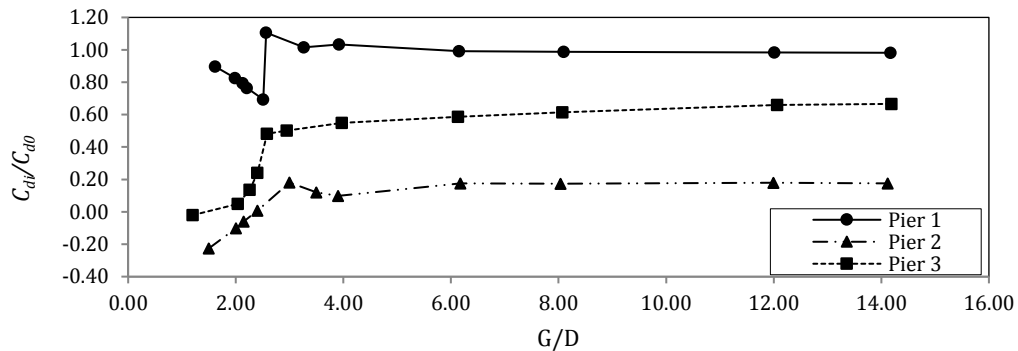
### اثر فاصله بین پایه‌ها در پایه‌های در راستای هم مقطع دایره

مقدار ضریب درگ پایه اول  $A1$   $(C_{d1}/C_{d0})$ ، پایه دوم  $A2$   $(C_{d2}/C_{d0})$ ، و پایه سوم  $A3$   $(C_{d3}/C_{d0})$  برای نسبت فواصل مختلف در جدول (۹) و شکل (۸) ارائه شده است.  $C_{d0}$  ضریب درگ برای پایه‌ی منفرد است. نتایج نشان می‌دهد زمانی که نسبت فاصله‌ی بین پایه‌ها، از مقدار  $2/5$  کمتر است، سه پایه نظیر یک جسم واحد عمل می‌کنند.

در این حالت پایه پایین دست بر ناحیه‌ی گردابه‌ی برخاستگی پایه‌ی بالادست تاثیر گذاشته و موجب می‌گردد ضریب درگ پایه اول بیشتر از ضریب درگ پایه

جدول (۹): مقدار متوسط نسبت ضریب درگ  $C_{di}/C_{d0}$  در فواصل و پایه‌های مختلف برای مقطع دایره‌ای.

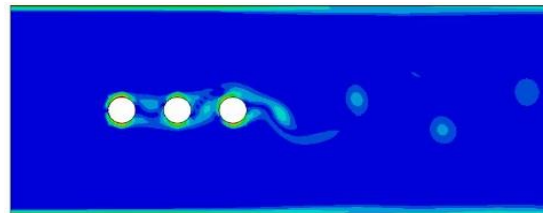
پایه	متوسط زمانی ضریب درگ $C_{di}/C_{d0}$									
	15D	10D	8D	6D	4D	3.6D	3.2D	3D	2.5D	2D
A1	۱	۱	۱/۰۲	۱/۰۵	۱/۲۰	۱/۲۵	۱/۳۰	۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۹۲
A2	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۰۱۲	۰/۱۸۷	۰/۱۸۹	-۰/۰۰۸	-۰/۲۲۵
A3	۰/۶۱	۰/۶۰	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۳	-۰/۰۰۰۸



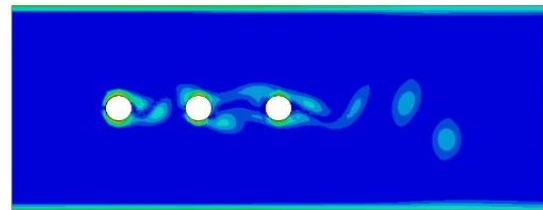
شکل (۸): تغییرات نسبت ضریب درگ  $C_{d1}/C_{d0}$  در مقابل  $G/D$  برای پایه اول، دوم و سوم.

فاصله‌ی بین دو پایه‌ی اول و دوم به ۸ برابر قطر پایه‌ها برسد، پایه دوم کاملاً بر پایه اول بی اثر بوده و پایه اول نظیر پایه‌ی منفرد عمل می‌کند. شکل (۹) الگوی جریان پیرامون پایه‌ها را در سه نسبت فاصله نشان می‌دهد.

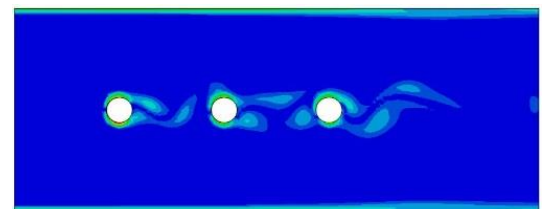
پس از این افزایش ناگهانی، مقدار  $C_{d1}/C_{d0}$  تا نسبت فاصله ۸ اندکی بیشتر از ۱ است که نشان می‌دهد مقدار ضریب درگ پایه اول بزرگ‌تر از مقدار آن پایه منفرد خواهد بود. از نسبت فاصله ۸ به بعد، مقدار ضریب درگ تقریباً ثابت مانده و مقدار آن برابر ۱ می‌گردد. یعنی اگر



(الف)



(ب)



(پ)

شکل (۹): الگوی جریان پیرامون گروه پایه با مقطع دایره‌ای در نسبت فواصل (الف) کمتر از ۲، (ب) ۳ و (پ) ۳/۲.

نسبت فواصل مختلف در شکل (۱۰) ارائه شده است.  $C_{dr0}$  ضریب درگ برای پایه منفرد با مقطع مستطیل گردگوشه است. تغییرات نسبت ضریب درگ برای مقطع مستطیل گردگوشه مشابه مقطع دایره‌ای رخ می‌دهد با این تفاوت که مقدار آن به دلیل شکل مقطع و تغییرات کم الگوی جریان، کمتر از مقدار آن برای مقطع دایره‌ای است. در این مقطع ضریب درگ پایه اول در فواصل کم پایه‌ها از مقدار ضریب درگ پایه منفرد کمتر بوده و سپس با افزایش نسبت فاصله و تشکیل گردابه‌های برخاستگی، مقدار آن به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. نسبت فاصله بحرانی در این مقطع کمتر از مقدار آن در مقطع دایره‌ای بوده و برابر  $2/6$  است. کاهش این نسبت فاصله به این دلیل است که در این شکل مقطع، الگوی جریان انطباق بیشتری با الگوی جریان داشته و گردابه‌های برخاستگی به مراتب کوچکتری تشکیل می‌شود. در مقطع بحرانی، نسبت ضریب درگ برابر  $1/14$  بوده که ۱۶ درصد از مقدار پیشینه آن در مقطع دایره‌ای کمتر است.

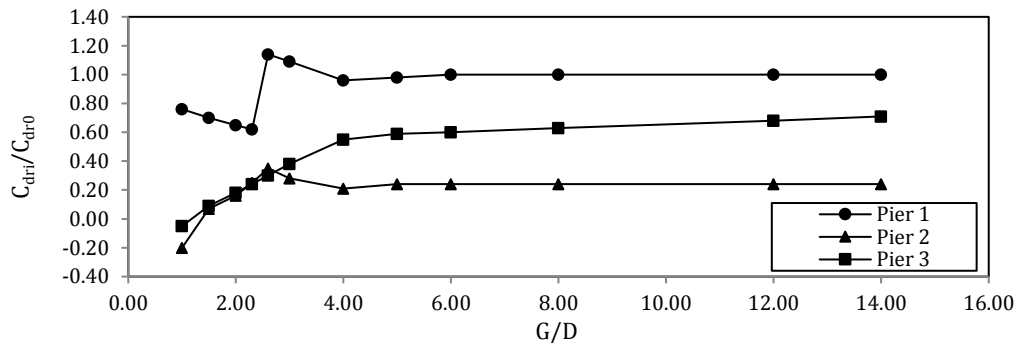
پس از افزایش ناگهانی نسبت  $C_{dr1}/C_{dr0}$ ، مقدار آن تا فاصله  $6D$  بیشتر از ۱ باقی می‌ماند که نشان می‌دهد ضریب درگ پایه اول بزرگ‌تر از مقدار آن برای پایه منفرد است. از نسبت فاصله ۶ به بعد، ضریب درگ تقریباً برابر ۱ می‌گردد. یعنی در نسبت فاصله ۶، پایه دوم بر پایه اول کاملاً بی‌اثر بوده و پایه اول نظیر پایه‌ی منفرد عمل می‌کند. برای پایه‌ی دوم تا نسبت  $G/D$  برابر  $2/2$ ، نسبت  $C_{dr2}/C_{dr0}$  روند افزایشی داشته و به مقدار پیشینه  $0/28$  می‌رسد؛ سپس مقدار آن کاهش یافته و از نسبت فاصله حدود ۴، تغییرات آن صفر شده و به مقدار ثابت  $0/19$  می‌رسد. به بیانی دیگر می‌توان نتیجه گرفت شکل مقطع هندسی پایه موجب گردیده مقدار نیروی درگ وارده بر پایه دوم به ازای تمامی فواصل بین پایه‌ها، کوچکتر از مقدار نیروی درگ پایه منفرد باشد. شکل (۱۱) الگوی جریان پیرامون پایه‌ها را در سه نسبت فاصله مختلف نشان می‌دهد.

برای پایه‌ی دوم، زمانی که فاصله‌ی بین دو پایه کم است، نسبت  $C_{d2}/C_{d0}$  به طور تدریجی افزایش می‌یابد و حتی مقدار آن در فواصل کم بین دو پایه ( $G/L < 3$ ) منفی است. منفی بودن ضریب درگ در این فاصله به این دلیل است که پایه‌ی دوم در ناحیه‌ی کم فشاری که توسط پایه‌ی اول ایجاد می‌گردد قرار گرفته و نیروی درگ در خلاف جهت جریان بر پایه وارد می‌شود. (Sumner et al. (1999 بیان نمودند در فواصل کم دو پایه، پایه‌ی دوم به طور کامل در لایه‌ی برشی که توسط پایه‌ی اول ایجاد شده، محصور می‌گردد و یک نیروی محرک، پایه دوم را به سمت ناحیه برخاستگی پایه اول و خود پایه هل می‌دهد. همچنین مشابه آنچه در پایه‌ی اول رخ داد، یک افزایش ناگهانی در مقدار  $C_{d2}/C_{d0}$  در نسبت فاصله  $3/2$  رخ می‌دهد. در نسبت فاصله‌ی بحرانی  $(G/D)_c$ ، افزایش در مقدار  $C_{d2}/C_{d0}$  برای پایه‌ی دوم بسیار بیشتر از مقدار افزایش آن برای پایه اول است. در نسبت فاصله  $3/2$  تا ۸، تغییرات ضریب درگ یک حالت مقعر دارد یعنی از مقدار پیشینه در نسبت فاصله  $3/2$  به مقدار کمینه در نسبت فاصله حدوداً ۵ رسیده و سپس مقدار آن دوباره افزایش می‌یابد. این امر به دلیل اثر گردابه‌های برخاستگی در فاصله بین دو پایه است. در نسبت فاصله بین  $3/2$  تا ۵، گردابه برخاستگی پایه اول بلافاصله در بالادست پایه دوم مشاهده شده و یک جریان برگشتی بسیار قوی در بالادست پایه دوم ایجاد می‌کند. این امر موجب کاهش نسبت  $C_{d2}/C_{d0}$  در این فاصله می‌گردد. زمانی که فاصله بین دو پایه به بزرگتر از مقدار ۵ افزایش می‌یابد، گردابه‌های برخاستگی قبل از رسیدن به پایه دوم بسیار تضعیف شده و قدرت کافی برای کاهش مقدار  $C_{d2}/C_{d0}$  را ندارند.

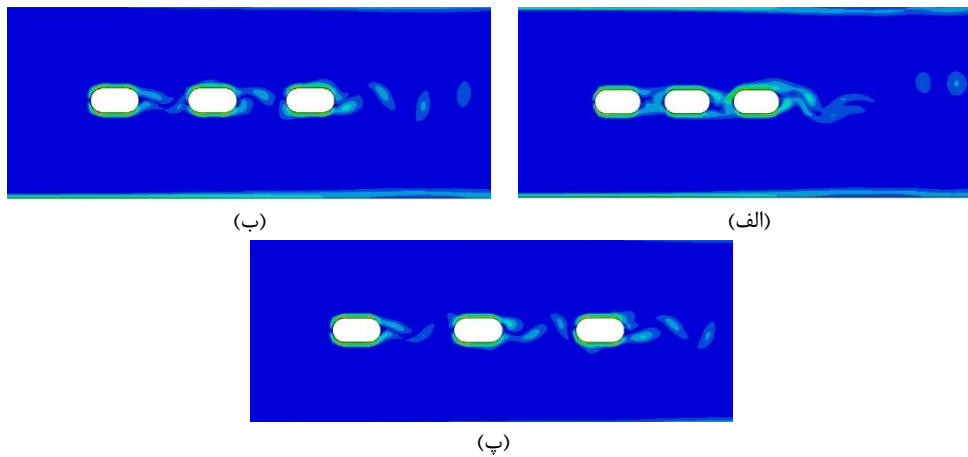
### مقطع مستطیل گردگوشه

مقدار ضریب درگ پایه اول A1 ( $C_{dr1}/C_{dr0}$ )، پایه دوم A2 ( $C_{dr2}/C_{dr0}$ )، و پایه سوم A3 ( $C_{dr3}/C_{dr0}$ ) برای





شکل (۱۰): تغییرات نسبت ضریب درگ در مقابل مقادیر  $G/D$  برای پایه اول، دوم و سوم.



شکل (۱۱): الگوی جریان پیرامون گروه پایه با مقطع مستطیل گرد گوشه در نسبت فواصل (الف) ۱، (ب) ۲ و (پ) ۲/۶.

افزایش ضریب درگ در مقطع دایره‌ای و ۰/۷۵ افزایش آن در مستطیل گرد گوشه است.

همچنین نسبت فاصله بحرانی در این مقطع کوچکتر از مقطع دایره‌ای بوده و مقدار آن برابر ۲/۳ است. نسبت ضریب درگ  $C_{de1}/C_{de0}$  در نسبت فاصله ۱ برابر ۰/۳۸، و در نسبت فاصله ۲ برابر ۰/۲۷ است. در نسبت فاصله بحرانی، مقدار آن به طور ناگهانی به عدد ۱/۰۵ رسیده و سپس سیر نزولی در مقدار آن مشاهده می‌گردد. در نسبت فاصله ۴/۸، مقدار این نسبت به ۰/۴۲ رسیده و بعد از آن ثابت باقی می‌ماند، به عبارتی دیگر، پس از این فاصله، پایه دوم بر پایه اول کاملاً بی‌اثر شده و پایه اول مانند پایه منفرد عمل می‌کند. کاهش ضریب درگ و کاهش فاصله اثر پایه‌ی پایین‌دست، به دلیل شکل مقطع و کاهش شدت گردابه‌های برخاستگی در ناحیه‌ی ویک پایه‌ی اول است. شکل (۱۲) الگوی جریان پیرامون پایه‌ها را در سه نسبت فاصله نشان می‌دهد. در جدول (۱۰)

### مقطع بیضی

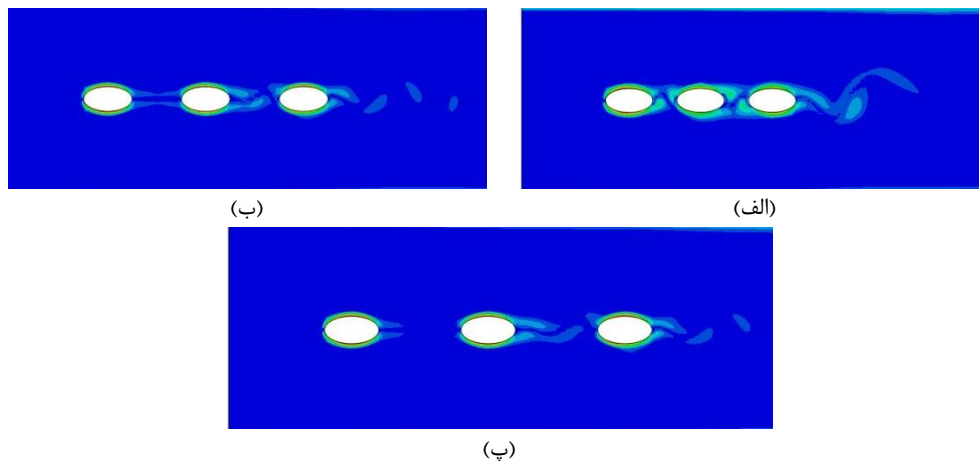
مقدار ضریب درگ پایه با مقطع بیضی و نسبت فواصل مختلفا اول با  $A1$  ( $C_{de1}/C_{de0}$ )، پایه دوم  $A2$  ( $C_{de2}/C_{de0}$ )، و پایه سوم  $A3$  ( $C_{de3}/C_{de0}$ ) نشان داده شده است.  $C_{de0}$  ضریب درگ برای پایه‌ی منفرد با مقطع بیضی است. تغییرات نسبت ضریب درگ برای مقطع بیضی مشابه مقطع دایره‌ای و مستطیل گرد گوشه بوده با این تفاوت که در این مقطع به دلیل انطباق بسیار بالای مقطع با الگوی جریان، ضریب درگ بسیار کمتر از مقدار آن برای مقطع دایره‌ای و مستطیل گرد گوشه است. مشابه دو مقطع قبل، در این مقطع نیز ضریب درگ پایه اول در فواصل کم، از مقدار ضریب درگ پایه منفرد کمتر بوده ولی با افزایش نسبت فاصله و تشکیل گردابه‌های برخاستگی در پشت پایه اول و دوم، مقدار آن به طور ناگهانی افزایش می‌یابد؛ لیکن این افزایش حدود ۰/۶

نیرو به سمت بالادست در ناحیه برخاستگی پایه اول می-گردد. با کاهش ضریب درگ در پایه اول تا نسبت فاصله ۲/۳، نسبت ضریب درگ در پایه دوم افزایش یافته و به مقدار بیشینه ۰/۲۴ می‌رسد؛ سپس مقدار آن دوباره کاهش و به مقدار کمینه ۰/۲۱ در نسبت فاصله ۳/۷ می‌رسد.

مقادیر عددی این تغییرات ارائه شده است. برای پایه‌ی دوم، زمانی که فاصله‌ی بین دو پایه کم است، نسبت  $C_{de2}/C_{de0}$  به طور تدریجی افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار آن در فواصل کم بین دو پایه ( $G/L < 2$ ) منفی است که دلیل آن اثر ناحیه‌ی کم فشاری است که توسط پایه‌ی اول در بالادست پایه‌ی دوم ایجاد شده و موجب اعمال

جدول (۱۰): مقایسه متوسط نسبت ضریب درگ  $C_{dei}/C_{de0}$  در فواصل و پایه‌های مختلف برای مقطع بیضی.

پایه	متوسط زمانی ضریب درگ $C_{dei}/C_{de0}$						
	15D	10D	8D	6D	4.8D	2.3D	2D
A1	۱	۱	۱	۱	۱	۱/۰۵	۰/۲۷
A2	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۳
A3	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۳



شکل (۱۲): الگوی جریان پیرامون گروه پایه با مقطع مستطیل گرد گوشه در نسبت فواصل (الف) ۱، (ب) ۲/۲ و (پ) ۴/۸.

نیروی هیدرودینامیکی در شرایط عادی جریان بدون اعمال اثر سیلاب انجام یافته است. با توجه به اینکه نیروهای هیدرودینامیکی رابطه‌ی مستقیمی با مربع سرعت جریان دارند لذا بدیهی است افزایش یا کاهش سرعت به ترتیب موجب افزایش یا کاهش نیروی هیدرودینامیکی می‌گردد و از این رو اثر عدد رینولدز مورد بررسی بیشتر قرار نگرفته است.

سپس با افزایش مقدار  $C_{de2}/C_{de0}$ ، تا انتها ثابت باقی می‌ماند. می‌توان نتیجه گرفت به لحاظ اعمال نیروی هیدرودینامیکی در زمان طراحی پایه‌های پل رودخانه‌ای، مقطع بیضی منفرد بهترین مقطع برای پایه‌های در برابر جریان بوده و در صورت لزوم به استفاده از گروه پایه، نسبت فاصله لب به لب ۴/۸ را می‌توان بهترین موقعیت قرارگیری پایه‌ها نسبت به هم، با لحاظ نیروی وارده به هر سه پایه معرفی نمود. قابل ذکر است بررسی



## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، سه مقطع دایره‌ای، مستطیلی گردگوشه و بیضی به صورت منفرد و در دو موقعیت قرارگیری مجاور هم و در راستای هم در نسبت فواصل مختلف، به لحاظ بررسی نیروی هیدرودینامیکی وارد بر آن‌ها در شرایط عادی جریان ارزیابی گردیدند. نتایج حاصله به طور خلاصه ارائه می‌گردد.

۱- در مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مربعی، مقدار متوسط ضریب درگ به دلیل کاهش اثر انسداد و انطباق بهتر مقطع دایره‌ای با الگوی جریان، حدود ۷۷ درصد کاهش یافته است.

۲- در مقطع مستطیلی گردگوشه، با افزایش نسبت  $L/B$ ، به دلیل افزایش سطح انسداد، ضریب درگ افزایش یافته است.

۳- در مقطع بیضی، برخلاف مقطع مستطیلی، با افزایش نسبت  $L/B$ ، ضریب درگ کاهش یافته است. در این مقطع، شکل مقطع انطباق بسیار بالایی با الگوی جریان داشته لذا جریان با کمترین ممانعت در مسیر خود، از اطراف پایه عبور کرده و به پایین دست ادامه می‌یابد لذا در نسبت  $L/B$  بالا، نیروی بسیار کمتری به پایه وارد می‌شود.

## منابع

- آذرتکله، پ. ۱۳۹۷. ارزیابی اثر نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پایه‌های پل رودخانه‌ای منفرد و گروهی، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز.
- سروش‌نیا، س.، بهشتیان، ن. ۱۳۹۲. کامل‌ترین مرجع کاربردی ABAQUS، انتشارات نگارنده دانش.
- کاردان، ن.، حکیم‌زاده، ح. و حسن‌زاده، ی. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی مدل‌های ترکیبی سکو، شیب جانبی و شکاف در کاهش فرسایش بستر پیرامون پایه‌های پل رودخانه‌ای، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، جلد ۱۵، شماره ۲، ص ۱۰۳-۱۱۶.
- نائینی، ت. و فضلی، م. ۲۰۱۱. مدل‌سازی عددی و مشاهده فیزیکی اثر شکل مقاطع پایه پل‌ها بر نیروهای دینامیکی وارد بر آن، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، جلد ۴۴، شماره ۵، ص ۷۴۱-۵۱.
- Agarwal, N., Ram, S.S. and Suribabu, C. 2014. Determination of shape co-efficient and drag co-efficient of triangular piers under sub-critical flow conditions. Asian Journal of Applied Sciences, 7: 441-447.
- Almasri, A. and Moqbel, S. 2017. Numerical evaluation of AASHTO drag force coefficients of water flow around bridge piers. Journal of Engineering Materials and Technology, 139(2): 1-21.

۴- پایه‌های در راستای هم با مقطع دایره‌ای در فاصله کمتر از  $2/5D$ ، پایه‌ها نظیر یک جسم صلب عمل می‌کنند. در این مقطع در فاصله  $3/2D$ ، نسبت  $C_{di}/C_{d0}$  به طور ناگهانی افزایش یافته و به مقدار بیشینه  $1/30$  می‌رسد و این فاصله، فاصله بحرانی می‌باشد. بعد از فاصله بحرانی، ضریب درگ در هر سه پایه کاهش یافته و به مقدار ثابتی رسیده است.

۵- در مقطع مستطیلی گردگوشه نیز همانند مقطع دایره‌ای، در فواصل کم، پایه‌ها مانند یک جسم صلب عمل می‌کنند. فاصله بحرانی در این مقطع  $2/6D$  می‌باشد که مقدار آن کمتر از فاصله بحرانی برای مقطع دایره‌ای است. این امر به دلیل انطباق الگوی جریان با شکل مقطع است.

۶- برای مقطع بیضی نیز در فواصل کم، هر سه پایه همانند یک جسم صلب عمل می‌کنند. در این مقطع به دلیل انطباق مقطع با الگوی جریان، مقدار ضریب درگ کمتر از مقدار آن برای مقطع دایره‌ای و مستطیلی گردگوشه است. فاصله بحرانی برای این مقطع  $2/3D$  است، در این فاصله مقدار نسبت  $C_{di}/C_{d0}$  برابر  $1/05$  شده و بعد از این فاصله، ضریب درگ در هر سه پایه به مقادیر ثابتی رسیده‌اند.



- Beheshti, A.A., Ataie-Ashtiani, B. and Dashtpeyma, H. 2017. Numerical simulations of turbulent flow around side-by-side circular piles with different spacing ratios. *International Journal of River Basin Management*, 15(2): 227-238.
- Debus, K., Berkoe, J., Rosendall, B. and Shakib, F. 2003. Computational fluid dynamics model for Tacoma narrows bridge upgrade project. In ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference: 179-184. American Society of Mechanical Engineers.
- Kisi, O., Haktanir, T., Ardiclioglu, M., Ozturk, O., Yalcin, E. and Uludag, S. 2009. Adaptive neuro-fuzzy computing technique for suspended sediment estimation. *Advances in Engineering Software*, 40: 438-444.
- Lijungrona, L., Norberg, C. and Sunden, B. 1991. Free-stream turbulence and tube spacing effects on surface pressure fluctuations for two tubes in an in-line arrangement. *Journal of Fluids and Structure*, 5(6): 701-727.
- Mikheev, N., Molochnikov, V., Mikheev, A. and Dushina, O. 2017. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109: 254-265.
- Roshko, A. 1961. Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, 10(3): 345-356.
- Sarioglu, M. 2017. Control of flow around a square cylinder at incidence by using a splitter plate. *Flow Measurement and Instrumentation*, 53: 221-229.
- Sato, M. and Kobayashi, T. 2012. A fundamental study of the flow past a circular cylinder using Abaqus/CFD. In 2012 SIMULIA Community Conference.
- Sidebottom, A., Ooi, A. and Jones, D. 2012. Large eddy simulation of flow past a circular cylinder at Reynolds number 3900. In Proceedings of the 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, December: 3-7.
- Sumner, D., Wong, S.S.T., Price, S.J. and Paidoussis, M.P. 1999. Fluid behavior of side-by-side circular cylinders in steady crossflow. *Journal of Fluids and Structures*, 13(3): 309-338
- Sumer, B.M. and Fredsøe, J. 2006. Hydrodynamics around cylindrical structures. *World Scientific*, 26: PP. 548.
- Suribabu, C.R., Sabarish, R.M., Narasimhan, R. and Chandhru, A.R. 2011. Backwater rise and drag characteristics of bridge piers under sub-critical flow conditions. *European Water*. 36: 27-35.
- Tang, G.Q., Chen, C.Q., Zhao, M. and Lu, L. 2015. Numerical simulation of flow past twin near-wall circular cylinders in tandem arrangement at low Reynolds number. *Water Science and Engineering*, 8(4): 315-325.
- Van Der Vegt, J.J.W. and De Boom, W.C. 1985. Numerical simulation of flow around circular cylinders at high Reynolds numbers, In Proc. Behavior of Offshore Structures, Delft 1985, pp. 227-238. Elsevier.
- Wang Y.H., Zou, Y.S., Xu, L.Q. and Luo, Z. 2015. Analysis of water flow pressure on bridge piers considering the impact effect, *Mathematical Problems in Engineering*, 2: 91-99.
- Wei-Bin, G., Neng-Chao, W., Bao-Chang, S. and Zhao-Li, G. 2003. Lattice-BGK simulation of a two-dimensional channel flow around a square cylinder. *Chinese Physics*, 12(1): 67-79.
- Zdravkovich, M.M. 1987. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of Fluids and structures*, 1(2): 239-261.
- Zhou, Y. and Yiu, M.W. 2006. Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake. *Journal of Fluid Mechanics*, 548: 17-48.



## Investigation of the Cross-Section and Spacing Effects in River Group Piers on Hydrodynamics Forces Exerted on them

Parisa Azar Tekleh<sup>1</sup>, Nazila Kardan<sup>2\*</sup>, Mohammadreza Emami Azadi<sup>3</sup>

### Abstract

The long-term experience of bridge constructing on rivers has led to conclude that in designing of bridges, only consideration of structural issues such as, geology, road conditions and traffic potential are not enough, and also, the effect of the hydrodynamic forces must be considered in designing of river bridges. In this research, the hydrodynamic forces that entered on bridge piers has been simulated with ABAQUS software to investigate the effect of different shapes of cross-section such as circular, semi-circular rectangular and elliptical with different L/B ratios, Reynolds number in both single piers and group piers with different G/D ratios (G shows the side by side distance of two piers) with respect to the fluid-structure interaction. It was concluded that the drag and lift forces considerably decrease because the cross-section shape has high adaption with the flow patten. So, the minimum drag force is shown in elliptical cross-section. In this cross-section, with increasing the L/B ratio, the drag coefficient also was decreased. In the group piers with tandem arrangement and circular cross-section, the two cylinders behave like a single body when L/D ratio is less than 2.5. In this cross-section, the L/D ratio of 3.2 is known as the critical spacing (L/D)<sub>c</sub>, and then after this spacing, the drag coefficient is decreased in three piers. The critical spacing is 2.6 and 2.3 for semi-circular rectangular and elliptical cross-sections respectively. After this spacing, the drag coefficient of each three piers in tandem arrangement is equal to the single pier one.

**Keywords:** ABAQUS, Bridge pier, Single pier, Group piers, Hydrodynamic forces.

<sup>1</sup> Graduated M.SC Student-Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran. 0901-330-9659, [parisa.azar@yahoo.com](mailto:parisa.azar@yahoo.com)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran. Corresponding Author: 0914-418-6579, [n.kardan@azaruniv.ac.ir](mailto:n.kardan@azaruniv.ac.ir)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran. 0914-108-8215, [dr.emami@azaruniv.ac.ir](mailto:dr.emami@azaruniv.ac.ir)