

مدل سازی عددی و مشاهده فیزیکی اثر شکل مقاطع پایه پل‌ها بر نیروهای دینامیکی وارد بر آن

سید تقی امید نائینی^{۱*} و محسن فضلی^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۱/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۹/۱، تاریخ تصویب ۸۹/۱۲/۱۰)

چکیده

جریان حول اجسام، موضوعی است که سال‌ها مورد علاقه پژوهشگران مختلف بوده است. شکل مقطع پایه پل‌ها روی جریان حول آن، نحوه تشکیل گردابه‌ها و شکست آنها در منطقه سکون^۱ و به تبع آن بر نیروهای نوسانی وارد به پایه اثرگذار است. در رابطه با دستیابی به شکل مناسب پایه که بتواند وقوع پدیده شکست گردابه^۲ را محدود کند، تحقیقات کمی انجام شده است. در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار FLUENT، در حالت دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده و میزان اثرگذاری شکل پایه روی الگوی شکل‌گیری جریان، بزرگی گردابه‌ها^۳ و پارامترهای شکست گردابه از جمله ضریب درگ^۴ و ضریب لیفت^۵ با در نظر گرفتن عدد رینولدز^۶ 2×10^5 بررسی شده است. جهت نزدیک شدن به شرایط جریان در عمل، اصابت مایل جریان به پایه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تأیید نتایج مدل عددی از یک مدل آزمایشگاهی استفاده شده و به صورت مشاهداتی، شکل جریان با نتایج مدل عددی مقایسه گردید. نتیجه‌ای که از این پژوهش به دست آمده نشان می‌دهد که شکل پایه مستطیلی با یک لبه گرد شده و یک لبه تیز گوشه در حالتی که سمت گردشده پایه مقابل جریان قرار گیرد، در هر دو حالت اصابت مستقیم و مایل جریان، بهترین عملکرد را داشته و کمترین میزان نیروها را به پایه پل وارد می‌کند.

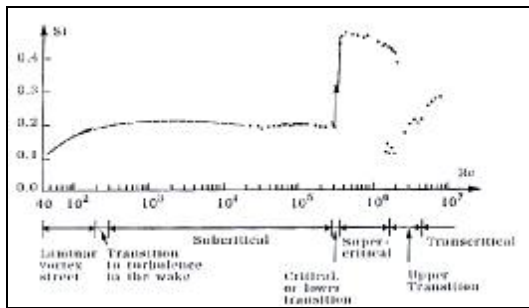
واژه‌های کلیدی: پایه پل، شکست گردابه، نیروی درگ، نیروهای عمود بر جریان (لیفت)

مقدمه

نهایت رسیدن به فرمی مناسب برای مقطع پایه پل است که کمترین میزان نیروهای درگ و لیفت به آن وارد شود و پدیده شکست گردابه با شدت کمتری در آن اتفاق افتاده یا بکلی متوقف شود.

جریان عبوری از اجسام، دارای پیچیدگی‌های خاصی است که شبیه‌سازی ریاضی آن را بسیار مشکل می‌کند. همچنین معادله حاکم بر جریان لزج واقعی، معادله ناویر استوکس است که حل آن به ویژه برای اعداد رینولدز بالا، به سادگی امکان پذیر نیست. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای مدل‌سازی جریان و پیش‌بینی پدیده فیزیکی مربوط به جداشدگی جریان حول اجسام در اعداد رینولدز بالا انجام شده است. اما در رابطه با اثر شکل سازه مقابل جریان روی پدیده شکست گردابه و نیروهای ناشی از آن مطالعات کمی انجام گرفته است. در این پژوهش شکل‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و میزان اثرگذاری شکل پایه روی پارامترهای شکست گردابه از جمله ضریب درگ و ضریب لیفت آنالیز شده است.

اضافه نمودن هر گونه مانع در مسیر جریان رودخانه، باعث به هم زدن خطوط جریان و ایجاد جریان‌های چرخشی می‌شود. این پدیده منجر به وارد شدن نیروی نوسانی در جهت جریان (نیروی درگ) و نیروی نوسانی دیگری در جهت عمود بر جریان (نیروی لیفت) به پایه پل می‌شود. از آنجایی که این نیروها به صورت جانبی به پایه وارد شده و ماهیت نوسانی نیز دارند، در طراحی پایه پل اثرگذار است و طراح پل باید تمهید مناسبی برای کاهش اثر نیروها و اطمینان از صحت طرح خود داشته باشد. یکی از عوامل اثرگذار در میزان نیروهای وارده، شکل مقطع پایه پل است. شکل پایه روی نحوه جداشدگی جریان و به تبع آن روی شدت وقوع پدیده شکست گردابه، اثرگذار است. می‌توان با انتخاب شکل مقطع مناسب برای پایه پل، نیروهای وارد به پایه را کمتر کرد. از طرفی شکل مقطع پایه پل با تأثیرگذاری بر چرخش گردابه‌های تشکیل شده در بستر، بر آبستکی نیز مؤثر خواهد بود. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر شکل مقاطع مختلف پایه پل روی الگوی جریان حول پایه و نیروهای وارد به آن و در



شکل ۱: عدد استروهال برای یک استوانه صاف و مدور. داده‌های آزمایشگاهی، منحنی پر ویلیامسون (۱۹۸۹). منحنی بریده: راشکو (۱۹۶۱). نقاط: اسکویو (۱۹۸۳).

که \bar{F} فشار متوسط وارد به استوانه و ϕ زاویه وارد شدن نیرو و $\bar{\tau}_0$ تنش برشی وارد به جدار استوانه می‌باشد. رابطه اخیر را به فرم زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho DU^2} = \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{\bar{p} - p_0}{\rho U^2} \right) \cos(\phi) + \left(\frac{\bar{\tau}_0}{\rho U^2} \right) \sin(\phi) \right] d\phi \quad (2)$$

در روابط فوق $D=2r_0$ ، قطر استوانه می‌باشد. سمت راست رابطه تابعی از عدد رینولدز می‌باشد، و هم ترم فشار هم ترم تنش برشی جداره برای استوانه صاف تابعی از عدد رینولدز می‌باشد. بنابراین رابطه (۲) ممکن است به شکل زیر ساده شود:

$$\frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho DU^2} = \bar{C}_D \bar{C}_D \quad (3)$$

ضریب درگ میانگین نامیده می‌شود، یا به شکل کوتاهتر، ضریب درگ، و تابعی از عدد رینولدز می‌باشد. نیروی لیفت نیز به همین شکل محاسبه می‌شود. دانشمندی مانند اسکویو (۱۹۸۳)، درسچر (۱۹۵۶) و آخنباخ^{۱۱} (۱۹۶۸) روی نیروی درگ و لیفت وارد به استوانه مدور کار کرده‌اند.

در رابطه با ارتباط ضریب درگ با عدد رینولدز ویسلزبرگر^{۱۲} برای $40 < Re < 5 \times 10^5$ ، اسکویو (۱۹۸۳) برای $Re > 10^5$ و اشلیختینگ^{۱۳} (۱۹۷۹) برای سایر محدوده‌های اعداد رینولدز مطالعاتی را انجام داده‌اند. پارکینسون و بروکس (۱۹۶۱) روی اثر شکل سطح مقطع (حالت‌های مستطیل و مربع) بر روی ضریب نیروی لیفت کار کرده‌اند. آخنباخ و هینک^{۱۴} (۱۹۸۱) اثر زبری سطح استوانه را روی عدد استروهال و ضریب درگ بررسی کردند.

نحوه تشکیل پدیده شکست گردابه با بعد جسم (D)، جرم مخصوص سیال (ρ)، سرعت سیال (v) و لزجت دینامیکی (μ) و به بیانی دیگر با عدد رینولدز جریان، $Re = \rho v L / \mu$ ، مرتبط است. در اعداد رینولدز بالا گردابه‌های تشکیل شده در دو طرف پایه ناپایدار شده و یک گردابه، بیشتر از دیگری رشد می‌کند و پدیده شکست گردابه را شکل می‌دهد.

فرکانس شکست گردابه به صورت تابعی از عدد رینولدز بیان می‌شود. فرکانس نرمال شده شکست گردابه، با کمیت بی‌بعدی به نام عدد استروهال ($St = f_v L / V$) بیان می‌شود. f_v فرکانس شکست گردابه، V سرعت سیال و L طول مشخصه است.

جریان در اطراف استوانه با تغییر عدد رینولدز تغییراتی خواهد داشت که به تبع آن رژیم‌های جریان مختلفی را ایجاد می‌کند [۱]. در این رابطه عدد استروهال پارامتر مهمی است که محققین زیادی جهت یافتن ارتباط آن با عدد رینولدز کار کرده‌اند. با توجه به واژگان فنی مرتبط با رژیم‌های جریان و همچنین محدوده‌های اعداد رینولدزی که در آن اتفاق می‌افتد، به نظر می‌رسد که اجماع کلی در بین نویسندگان مختلف وجود ندارد (فارل^{۱۵}، ۱۹۸۱). پدیده شکست گردابه که برای اعداد رینولدز بزرگتر از ۴۰ اتفاق می‌افتد، در سال ۱۹۶۶ توسط جرارد^{۱۶} توصیف شد [۳]. در سال ۱۹۶۱ راشکو^{۱۷} به روش آزمایشگاهی تغییرات عدد استروهال با عدد رینولدز در محدوده ۴۰ تا ۲۰۰ را به دست آورد [۴]. این کار را اسکویو^{۱۸} در سال ۱۹۸۳ برای اعداد رینولدز ۲۰۰ تا 2×10^4 ادامه داد [۵]. ویلیامسون^{۱۹} در سال ۱۹۸۹ نیز تغییرات عدد استروهال را برای محدوده اعداد رینولدز 2×10^4 تا 10^7 انجام داده است [۶]. در شکل (۱) نحوه تغییرات عدد استروهال با عدد رینولدز و رژیم‌های مختلف جریان، که حاصل تحقیقات این دانشمندان است، نشان داده شده است.

نیروهای وارد به استوانه با ضرایب بی‌بعد درگ، $C_D = F_D / (\frac{1}{2}\rho DU^2)$ ، و ضریب لیفت، $C_L = F_L / (\frac{1}{2}\rho DU^2)$ ، که تابعی از عدد رینولدز هستند، مشخص می‌شوند. رابطه کلی برای نیروی درگ عبارت است از:

$$\bar{F}_D = \int_0^{2\pi} (\bar{p} \cos(\phi) + \bar{\tau}_0 \sin(\phi)) r_0 d\phi \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (۵)$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon$$

در روابط فوق G_k نشان دهنده تولید انرژی جنبشی اغتشاش ناشی از گرادیان سرعت متوسط، G_b نشان دهنده تولید انرژی جنبشی اغتشاش ناشی از شناوری و Y_M نشان دهنده سهم انبساط نوسانی در اغتشاش تراکم پذیر به کل نرخ انتشار است. $C_{1\varepsilon}$ ، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ثابتهای معادله هستند. S_k و S_ε ترمهای مرجع تعریف شده توسط کاربر بوده و کمیت‌های α_k و α_ε اعداد پراوتل مؤثر معکوس به ترتیب برای k و ε هستند. R_ε ترم اضافی در معادله ε نسبت به مدل استاندارد k - ε است و باعث می‌شود مدل RNG k - ε اثرات کرنش سریع و انحنای خطوط جریان را بهتر مدل کند. μ_{eff} نیز لزجت مؤثر اغتشاش است.

نتایج و بحث

ملاحظات شبکه‌بندی

از آنجایی که نوع و تراکم شبکه‌بندی، روی دقت نتایج، هزینه و زمان محاسبات تأثیر زیادی دارد، لازم است که شبکه‌بندی مناسبی انتخاب گردد که علاوه بر جوابگو بودن در محاسبات، از نظر زمان انجام محاسبه در حد متعارف باشد. انتخاب یک شبکه بسیار ریز علاوه بر آنکه هزینه و زمان انجام محاسبات را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد، ممکن است روی همگرایی نتایج نیز تأثیر منفی بگذارد. از طرف دیگر در صورتی که ابعاد شبکه به حد کافی کوچک نباشد، دقت محاسبات بخصوص در لایه مرزی کاهش یافته و احتمال خطا در نتایج به دست آمده افزایش می‌یابد. برای انتخاب تراکم مناسب شبکه‌بندی، انواع شبکه‌بندی از جمله مثلثی، مربعی و پیوندی و همچنین الگوهای مختلف شبکه‌بندی شامل الگوی map، submap و pave مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های موجود در روی جریان ساده اطراف یک استوانهٔ مدور صاف، مشخص شد که شبکه‌بندی مربعی با الگوی submap بهترین گزینه است. سه نوع شبکه‌بندی با ابعاد مختلف در لایه مرزی و در کل

بلوینز^{۱۵} (۱۹۷۷) اثر شکل سطح مقطع را بر روی عدد استروهال برای انواع شکل‌های مقطع بررسی کرد. محققین بسیار دیگری در ارتباط با اثر آشفتنگی ورودی بر روی جریان اطراف استوانه، اثر غیریکنواختی سرعت در جریان ورودی، اثر مجاورت استوانه با جدار و همچنین طول همبستگی کار کرده‌اند.

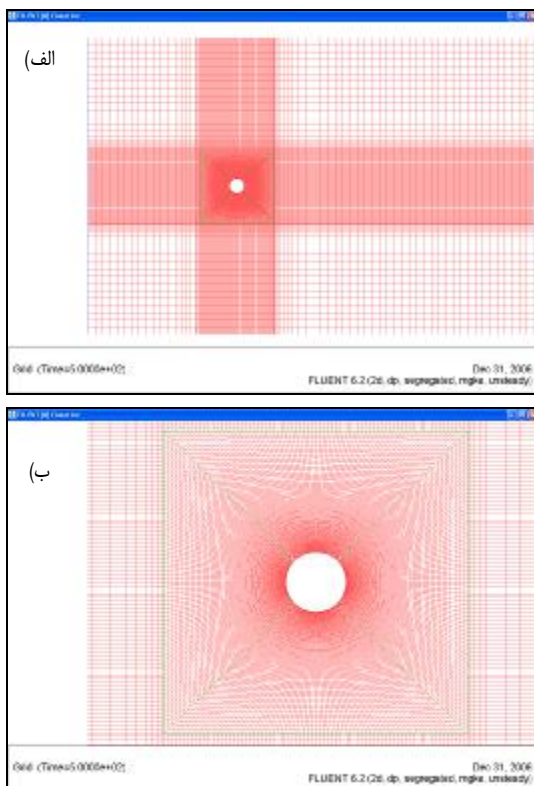
مدل عددی

مدل اغتشاش

در مدل عددی به‌کار رفته در این تحقیق، از تکنیک‌های مبتنی بر حجم کنترل برای حل معادلات پیوستگی و ممنتوم استفاده شده است. مدل اغتشاش استفاده شده در این پژوهش، مدل k - ε RNG است. انتخاب مدل اغتشاش به ملاحظاتی از قبیل محیط فیزیکی جریان، تجربه خاص برای یک طبقه مشخص از مسائل، میزان دقت مورد نیاز و منابع محاسباتی در دسترس برای شبیه‌سازی بستگی دارد. در مدل اغتشاش k - ε RNG از روش متوسط رینولدزی^{۱۶} برای حل معادلات ناویر استوکس استفاده می‌شود.

ساده‌ترین مدل‌های کامل اغتشاش، مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آنها حل دو معادله انتقالی جدا از هم باعث می‌شود که سرعت اغتشاش و طول مشخصه مستقلاً تعیین شود. مدل k - ε استاندارد در این دسته از مدل‌های اغتشاش قرار می‌گیرد، و از زمانی که توسط لاوند^{۱۷} و اسپالدینگ^{۱۸} [۷]، پیشنهاد شد بار اصلی محاسبات جریان مهندسی عملی را به دوش می‌کشد. توانایی بالا، اقتصادی بودن، و دقت قابل قبول برای محدوده وسیعی از جریان‌های متلاطم، از مزایای این مدل در جریان‌های صنعتی و شبیه سازی انتقال حرارت می‌باشد. از وقتی قدرت و ضعف مدل k - ε استاندارد شناخته شد، برای بهبود عملکرد آن اصلاحاتی در مدل ارائه شده است. یکی از این اصلاحات، منجر به ایجاد مدل جدیدتری به نام k - ε RNG شده است. این مدل با استفاده از یک تکنیک آماری^{۱۹} [۸] به دست آمده است. تغییرات ایجاد شده در مدل k - ε RNG نسبت به مدل استاندارد k - ε ، آن را برای طبقه وسیع‌تری از جریانات، دقیق‌تر و قابل اعتمادتر می‌کند. در مدل k - ε RNG انرژی جنبشی اغتشاش، k ، و نرخ انتشار آن، ε ، از معادلات انتقال زیر به دست می‌آید:

می‌شود. به طور نمونه شبکه‌بندی پایه مدور در نرم‌افزار GAMBIT در شکل (۳) نمایش داده شده است.



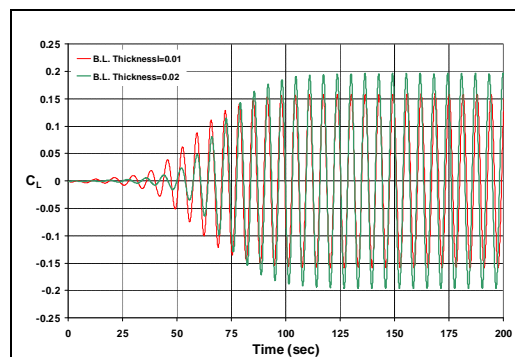
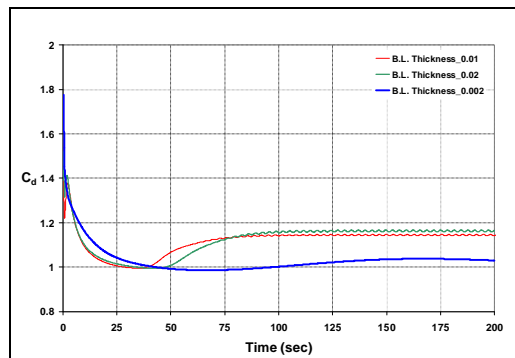
شکل ۳: شبکه‌بندی پایه مدور
الف) در کل محدود. ب) مجاور پایه.

صحت‌سنجی مدل عددی

برای بررسی صحت نتایج به دست آمده از مدل عددی، آنالیز جریان برای پایه دایره‌ای شکل و در اعداد رینولدز مختلف انجام شده و نتایج به دست آمده از آن با کارهای سایر محققین مقایسه شده است. در جدول (۱) ضریب درگ و عدد استروهمال به دست آمده از مدل عددی در این تحقیق، با مقادیر مشابه آزمایشگاهی که حاصل کار ویسلزبرگر [۹]، اسکویو، اشلیختینگ [۱۰]، ویلیامسون، راشکو، بیشاپ^{۲۰} و حسن^{۲۱} [۱۱]، لین‌هارد^{۲۲} [۱۲] (۱۹۶۶) و زدراکوویچ^{۲۳} [۱۳] (۱۹۹۷) می‌باشد، نشان داده شده است.

نتایج جدول (۱) تطابق نسبی نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی سایر محققین را نشان می‌دهد. مقادیر محاسباتی به دست آمده از نرم‌افزار در محدوده بازه‌های داده شده برای مقادیر آزمایشگاهی که حاصل کار سایر محققین است، می‌باشد که این امر صحت نتایج به دست آمده از مدل عددی استفاده شده را تأیید

محدوده جریان برای حالت استوانه مدور در نظر گرفته شده و آنالیز جریان در نرم‌افزار FLUENT انجام شده است. در مدل اول اندازه شبکه در اولین لایه حول استوانه برابر با $0.02d$ انتخاب گردید. d قطر سیلندر است. در مدل‌های دوم و سوم ضخامت اولین لایه به ترتیب برابر $0.01d$ و $0.02d$ در نظر گرفته شده است. با توجه به این‌که آنالیز جریان در لایه مرزی پیچیده است، شبکه‌بندی در لایه‌های مجاور جدار استوانه بسیار ریزتر از کل دامنه در نظر گرفته شده است. ضرایب درگ و لیفت برای سه آنالیز با شبکه‌بندی‌های مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. ضریب درگ برای ضخامت اولین لایه $0.01d$ و $0.02d$ خیلی به هم نزدیک است. ولی برای $0.02d$ اختلاف نسبتاً زیادی مشاهده می‌شود. در مورد ضریب لیفت برای $0.02d$ نتایج به کلی دچار انحراف شده است که در شکل نمایش داده نشده است. شاید یک علت این موضوع، بیش از حد ریزکردن مش باشد که موجب واگرا شدن نتایج و خطای محاسباتی شده است.



شکل ۲: ضرایب درگ و لیفت، برای سه نوع شبکه‌بندی.

مقایسه نتایج به دست آمده برای ضریب درگ و لیفت نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده برای ضخامت لایه اول $0.01d$ دقیق‌تر است. لذا برای مدل‌سازی سایر مدل‌ها از ضخامت $0.01d$ برای اولین لایه مجاور جدار استفاده

می‌توان در مورد نیروی وارد به پایه اظهار نظر کرد. ضرایب درگ و لیفت برای چند حالت مختلف پایه در شکل (۴) نمایش داده شده است. بیشترین مقدار ضریب درگ برای پایه مربعی و کمترین مقدار آن برای پایه مستطیلی تیز گوشه با زاویه دماغه ۳۰ درجه، به دست آمده است. دقت در ضرایب لیفت نیز نشان می‌دهد که برای پایه‌های مستطیلی تیز گوشه با زاویه دماغه ۳۰ و ۴۵ درجه ضریب لیفت به سمت صفر میل می‌کند. این حالت برای پایه مستطیلی با یک دماغه تیز گوشه و یک دماغه گرد شده در حالتی که دماغه گرد شده مقابل جریان قرار می‌گیرد، نیز اتفاق می‌افتد. این امر توقف نسبی پدیده شکست گردابه را برای این پایه‌ها نشان می‌دهد. در مورد سایر پایه‌ها حالت نوسانی ضریب لیفت کاملاً مشخص است که نشان دهنده وارد شدن نیروی لیفت نوسانی به پایه است. مقایسه عدد استروهمال به دست آمده برای پایه‌ها نیز این موضوع را تأیید می‌کند (جدول (۳)). همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر عدد استروهمال برای پایه‌های مستطیلی با لبه‌های تیز گوشه با زاویه رأس ۳۰ و ۴۵ درجه و پایه مستطیلی با یک لبه گرد گوشه که مقابل جریان قرار گرفته و یک لبه تیز گوشه که در امتداد جریان است، تقریباً صفر است که نشان دهنده توقف وقوع پدیده شکست گردابه در این پایه‌ها می‌باشد.

پدیده شکست گردابه

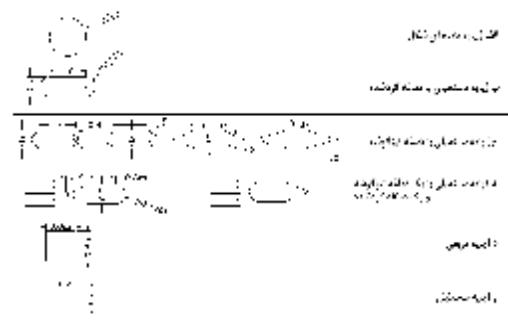
یکی از ابزارهای مقایسه عملکرد پایه‌ها، بررسی شدت وقوع پدیده شکست گردابه یا بزرگی گردابه می‌باشد. نحوه تشکیل پدیده شکست گردابه تا حد زیادی به چگونگی جداسدن جریان از سطح در منطقه سکون بستگی دارد. در شکل (۵) وقوع پدیده شکست گردابه برای چند شکل مختلف پایه پل در حالت اصابت مستقیم جریان نشان داده شده است. دقت در این شکل‌ها نشان می‌دهد که در حالت‌هایی که دماغه تیز گوشه در منطقه سکون قرار دارد، جریان به نحو بهتری از سطح جدا می‌شود. در مقابل وقتی که دماغه گرد شده در منطقه سکون قرار دارد، گردابه‌های جدا شده از سطح، پدیده شکست گردابه را شکل می‌دهد. در مورد پایه مربعی نیز مشاهده می‌شود که شدت وقوع پدیده شکست گردابه بسیار زیاد است. این موضوع نشان دهنده وارد شدن نیروهای زیاد نوسانی به این پایه می‌باشد.

می‌کند. اختلاف‌های احتمالی در اعداد رینولدز بالاتر رخ می‌دهد که عمدتاً به علت اثرات دوبعدی در نظر گرفتن جریان و محدودیت‌های مدل استفاده شده می‌باشد. با توجه به تطابق بیشتر نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی برای عدد رینولدز 2×10^5 ، سرعت‌های متوسط جریان رودخانه‌ها و ابعاد متعارف پایه پل‌ها، برای انجام آنالیزهای بعدی عدد رینولدز 2×10^5 انتخاب شده است.

جدول ۱: مقایسه ضریب درگ و عدد استروهمال محاسباتی (پژوهش حاضر) و آزمایشگاهی (دانشمندان مختلف) برای اعداد رینولدز مختلف.

عدد رینولدز	ضریب درگ (C_D)		عدد استروهمال (St)	
	(پژوهش حاضر)	(دانشمندان مختلف)	(پژوهش حاضر)	(دانشمندان مختلف)
۱۵۰	۱/۱۴	۱/۳-۱/۲	۰/۱۶	۰/۱۷-۰/۱۹
2×10^5	۰/۷۴	۱/۱۲-۰/۵۵	۰/۲۵	۰/۱۷-۰/۲۴
10^6	۰/۴۸	۰/۷-۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۱۹-۰/۴۵
5×10^6	۰/۲۹	۰/۷-۰/۵۳	۰/۳۳	۰/۲۲-۰/۲۴

جدول ۲: مقاطع مختلف پایه پل که مورد آنالیز قرار گرفته است.

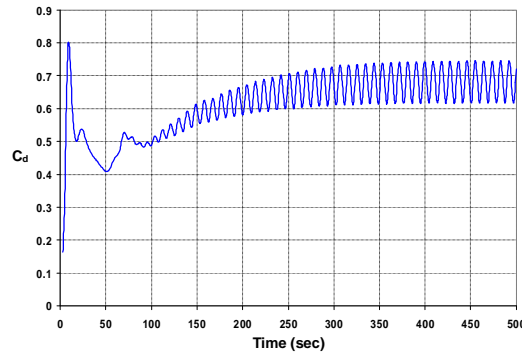
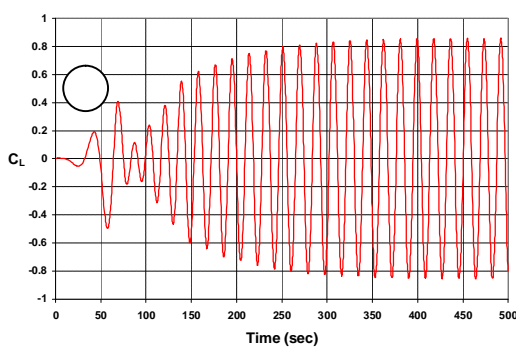


حالت اصابت مستقیم جریان

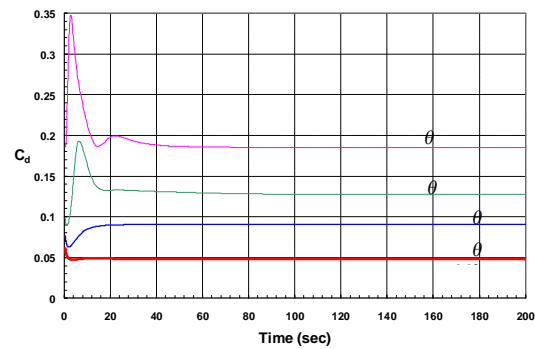
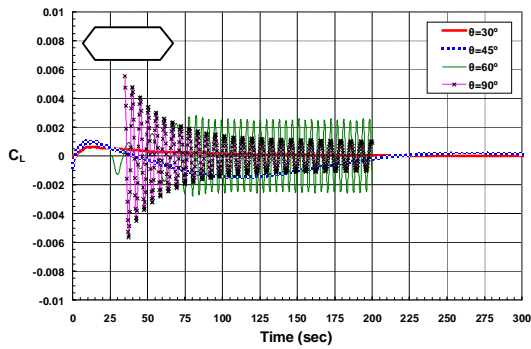
آنالیز جریان در حالت اصابت مستقیم جریان و برای کلیه شکل‌های مختلف مقطع پایه پل که در جدول (۲) نشان داده شده، انجام گرفته است. در مقاله حاضر جهت اختصار فقط نتایج به دست آمده برای چند شکل پایه به عنوان نمونه ارائه می‌شود.

ضرایب درگ و لیفت

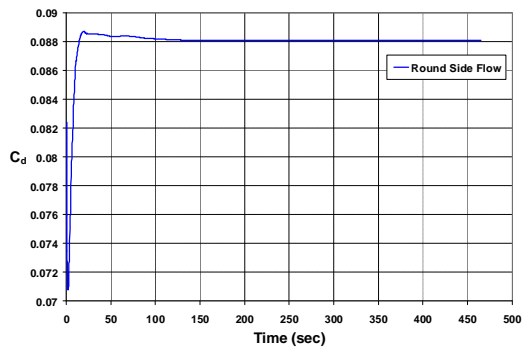
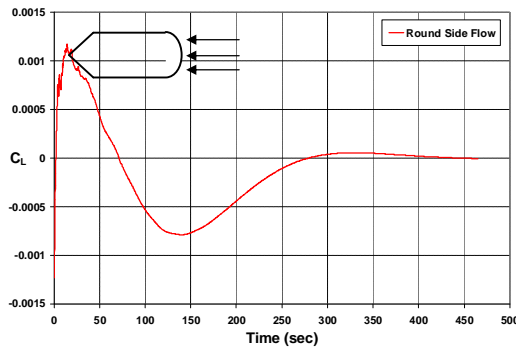
از آنجایی که نیروی وارد به پایه پل به طور مستقیم با ضرایب درگ و لیفت ارتباط دارد، با داشتن ضرایب نیرو



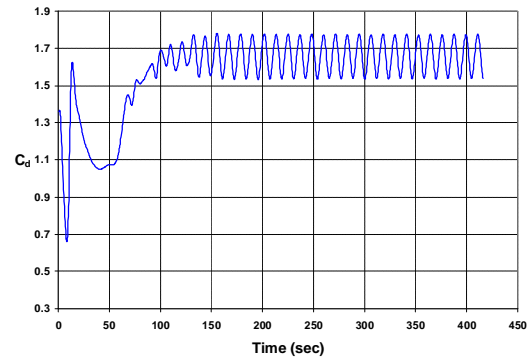
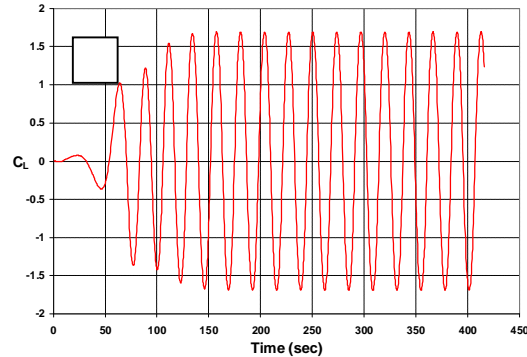
الف) پایه دایره‌ای شکل.



ب) پایه مستطیلی با دماغه تیز گوشه.



ج) پایه مستطیلی با یک دماغه تیز گوشه و یک دماغه گرد شده در حالت قرار گیری دماغه گرد شده مقابل جریان.

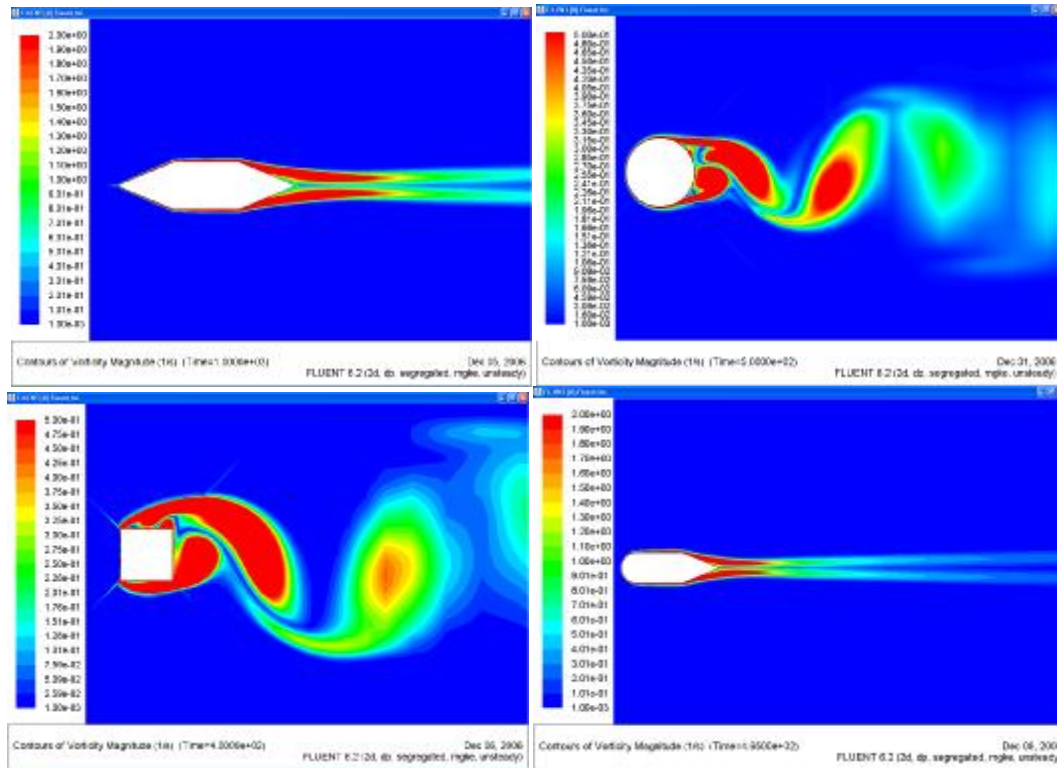


د) پایه مربعی.

۲) ضریب لیفت.

۱) ضریب درگ.

شکل ۴: ضرایب درگ و لیفت برای چند شکل مختلف مقاطع پایه پل در حالت اصابت مستقیم جریان.



شکل ۵: بزرگی گردابه (1/s) حول چند شکل مختلف مقاطع پایه پل در حالت اصابت مستقیم جریان.

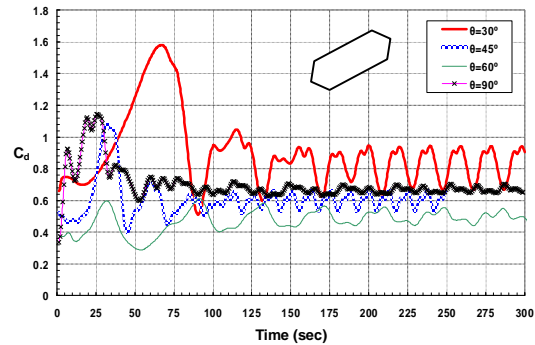
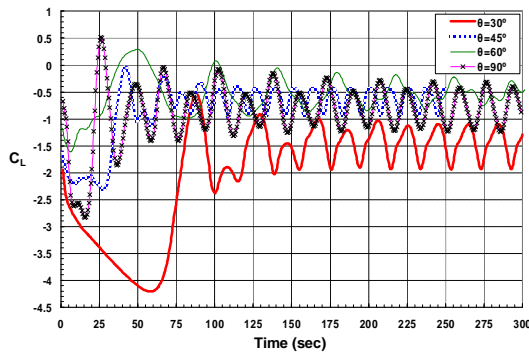
گردابه تا حد زیادی متوقف می‌شود.

مدلسازی فیزیکی

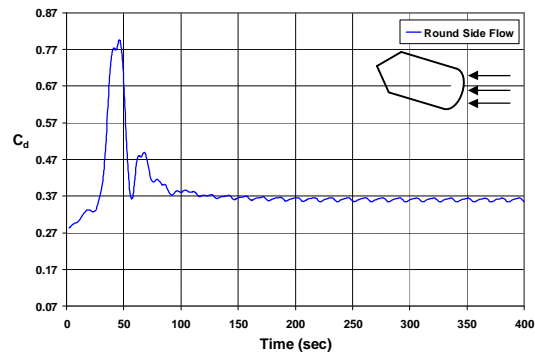
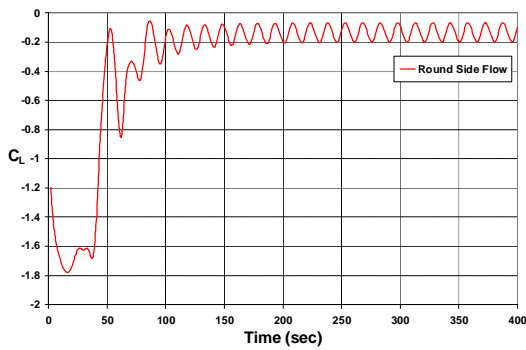
برای مشاهده اثر شکل پایه بر روی الگوی جریان حول آن و مقایسه آن با الگوهای جریان به دست آمده در مدل عددی، یک مدل آزمایشگاهی ساخته شد. در این مدل از یک فلوم به عرض ۲۰ cm و طول تقریبی ۳ متر استفاده شد. سپس کلیه مقاطع پایه پل که آنالیز عددی روی آنها انجام شده بود، از جنس چوب و با مقیاس تقریبی ۱:۱۵ ساخته شده و در داخل فلوم قرار گرفت. جریان آب برقرار شده و برای مشاهده جریان از یک ماده آشکارساز به نام «استنارات منیزیم» استفاده شد. آزمایش، هم در حالت اصابت مستقیم جریان و هم در حالت اصابت مایل انجام گرفت و در هر حالت عکس‌هایی از الگوی جریان حول پایه تهیه شده و با نتایج به دست آمده از مدل عددی مقایسه شد. در شکل (۸) به طور نمونه مقایسه عکس‌های تهیه شده از پایه‌های مربعی و مستطیلی تیزگوشه در حالت اصابت مایل جریان در مدل فیزیکی، با گردابه‌های تشکیل شده حول این پایه‌ها در مدل عددی نشان داده شده است.

حالت اصابت مایل جریان

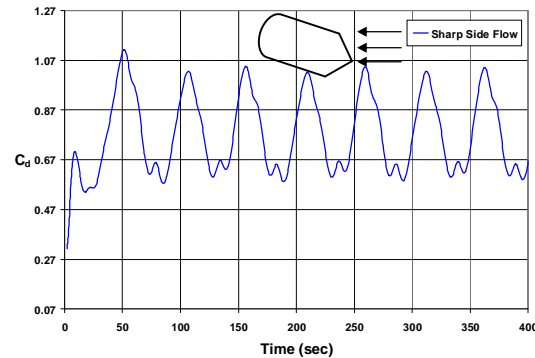
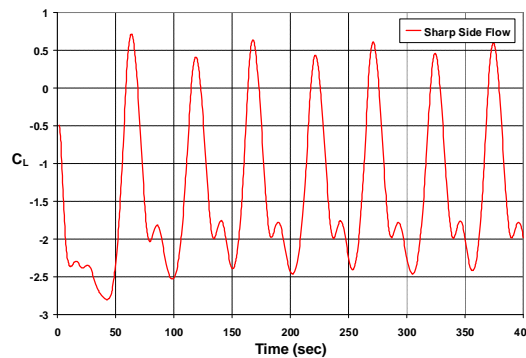
جریان آب همواره به صورت مستقیم به پایه پل برخورد نمی‌کند، بلکه بسته به زاویه‌ای که محور پل با مسیر رودخانه دارد، ممکن است جریان با زوایای مختلفی به پایه پل اصابت کند. این مسأله در رودخانه‌های عریض بیشتر اتفاق می‌افتد. هدف این بخش مقایسه عملکرد شکل‌های مختلف مقطع پایه پل در هنگام برخورد زاویه‌دار جریان به پایه می‌باشد. زاویه اصابت جریان برابر ۲۰ درجه در نظر گرفته شده است. شکل (۷) بزرگی گردابه‌های تشکیل شده حول پایه‌های مختلف در حالت اصابت مایل جریان را نشان می‌دهد. در این حالت کمترین مقدار ضریب درگ و لیفت برای پایه مستطیلی با یک دماغه گردشده و یک دماغه تیزگوشه در حالتی که دماغه گردشده مقابل جریان قرار داده می‌شود، به دست آمده است (شکل (۶)). بنابراین در منطقه سکون لبه تیزگوشه با زاویه تندتر و در منطقه پشت پایه لبه گردشده عملکرد بهتری دارند. علت این امر این است که با قرارگیری دماغه تیزگوشه در منطقه سکون، خطوط جریان تقریباً تا انتهای پایه از سطح جدا نمی‌شوند و این مسأله باعث می‌شود که گردابه‌ها در پشت پایه تشکیل نشده و پدیده شکست



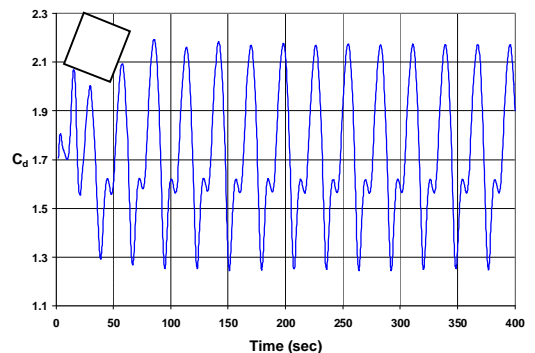
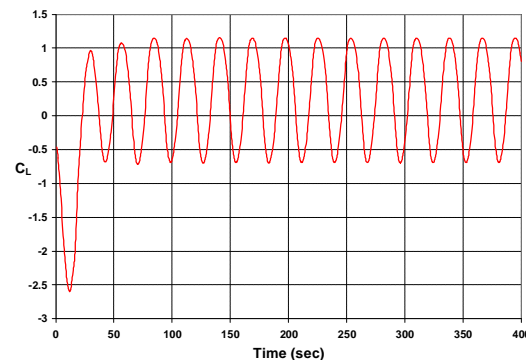
الف) پایه مستطیلی با دماغه‌های تیز گوشه.



ب) پایه مستطیلی با یک دماغه تیز گوشه و یک دماغه گرد شده در حالت قرار گیری دماغه گرد شده مقابل جریان.



ج) مستطیلی با یک دماغه تیز گوشه و یک دماغه گرد شده در حالت قرار گیری دماغه تیز گوشه مقابل جریان.

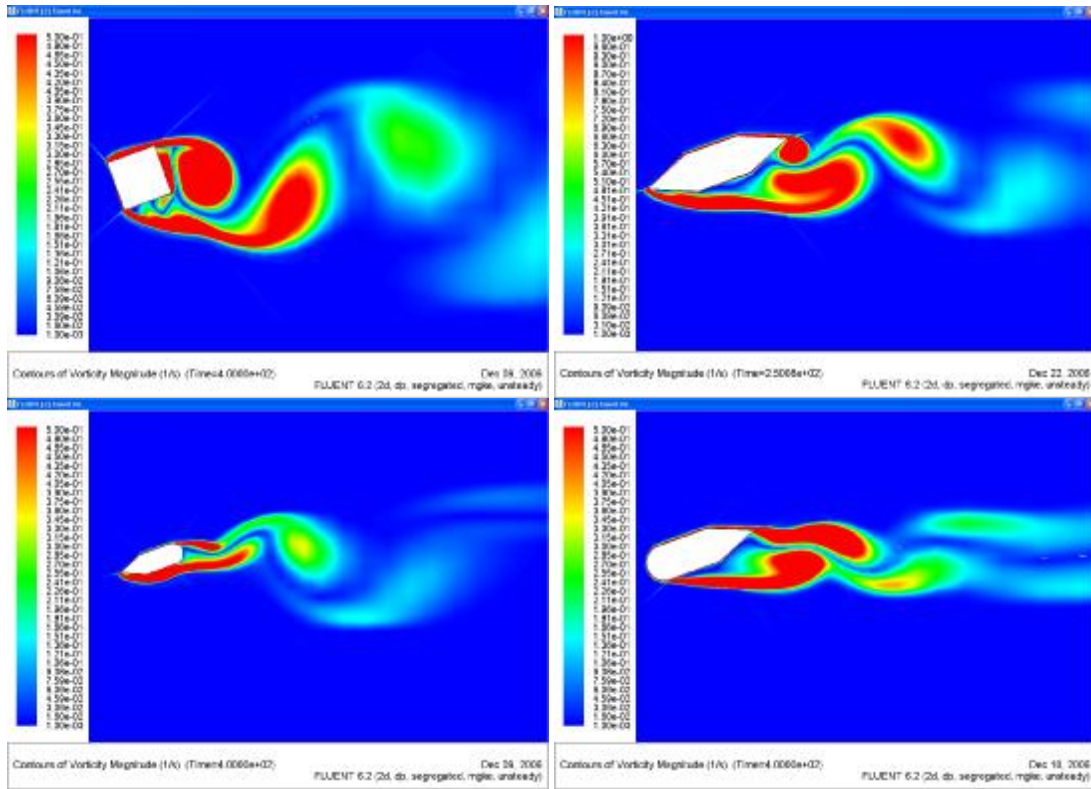


د) پایه مربعی.

(۲) ضریب لیفت.

(۱) ضریب درگ.

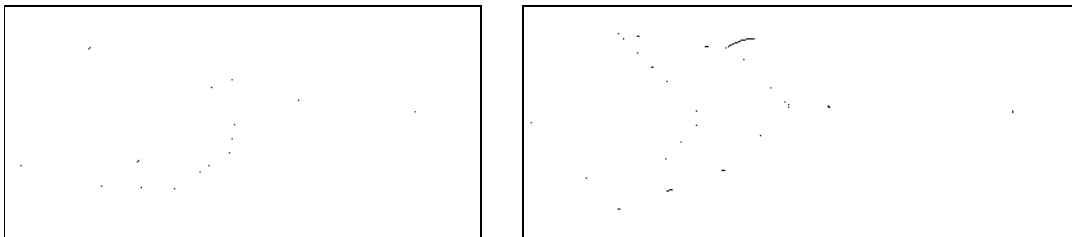
شکل ۶: ضرایب درگ و لیفت برای چند شکل مختلف مقاطع پایه پل در حالت اصابت مایل جریان.



شکل ۷: بزرگی گردابه (1/s) حول چند شکل مختلف مقاطع پایه پل در حالت اصابت مایل جریان.

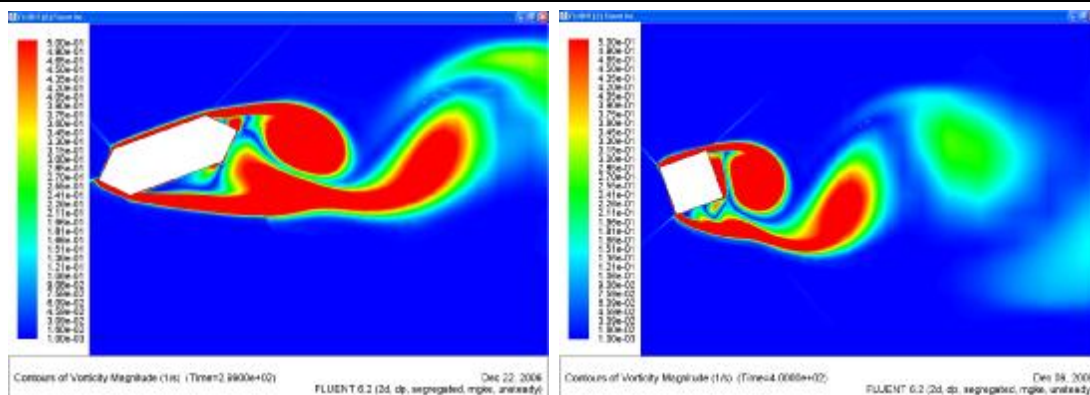


الف) الگوی جریان در مدل آزمایشگاهی.



ب) الگوی شماتیک جریان بر اساس مدل آزمایشگاهی.

شکل ۸: مقایسه الگوی جریان حول پایه در مدل عددی و مدل فیزیکی.



ج) الگوی جریان در مدل عددی.

ادامه شکل ۸: مقایسه الگوی جریان حول پایه در مدل عددی و مدل فیزیکی.

مستطیلی با یک دماغه گردشده و یک دماغه تیزگوشه در حالتی که لبه گردشده مقابل جریان قرار دارد با داشتن کمترین مقدار عدد استروهال، بهترین عملکرد را داشته و کمترین میران نیروهای درگ و لیفت در این حالت به پایه وارد می‌شود.

با مقایسه شکل‌های مختلف گردابه در مشاهدات فیزیکی جریان و شکل‌های گردابه به دست آمده از مدل عددی مشخص می‌شود که انطباق مناسبی بین شکل گردابه‌های به دست آمده در هر دو مدل وجود دارد و در مشاهدات آزمایشگاهی عملکرد پایه‌هایی که لبه گرد شده پایه مقابل جریان و لبه تیزگوشه در امتداد جریان قرار داده شده است، عملکرد بهتری داشته و پدیده شکست گردابه در آنها با شدت کمتری اتفاق می‌افتد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی جریان، حول پایه‌های پل با شکل مقاطع مختلف، در نرم‌افزار FLUENT، با استفاده از مدل RNG k-ε انجام شده و ضرایب نیرو برای هر حالت به دست آمد. در جدول (۳) ضرایب لیفت و درگ و عدد استروهال به دست آمده برای حالت‌های مختلف نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که پایه‌هایی که در آنها لبه تیزگوشه در منطقه سکون قرار دارند، عدد استروهال کمتری داشته و لذا عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. همچنین قرارگیری لبه گردشده در منطقه پشت پایه نیز در کمتر شدن نیروهای وارد به پایه، مخصوصاً در حالت اصابت مایل جریان، اثرگذار است. با توجه به نتایج جدول می‌توان نتیجه گرفت که پایه

جدول ۳: خلاصه ضرایب به دست آمده برای شکل‌های مختلف مقاطع پایه پل در حالت اصابت مستقیم و مایل جریان.

حالت اصابت مایل جریان			حالت اصابت مستقیم جریان			نحوه اصابت جریان حالت‌های مختلف آنالیز جریان
St	$C_{L(rms)}$	$\overline{C_D}$	St	$C_{L(rms)}$	$\overline{C_D}$	
۰/۱۷	۰/۷۹	۱/۲	۰/۱۳	۰/۰۶۲	۰/۶۴۵	پایه مستطیلی
۰/۱۸	۰/۷۴	۱/۷۱	۰/۱۴	۱/۲۲	۱/۶۶	پایه مربعی
۰/۲۰	۰/۷۸	۰/۵۵	۰/۳۳	۰/۰۰۱۱	۰/۱۰۷	پایه مستطیلی با لبه‌های گرد شده
						پایه مستطیلی با لبه‌های تیز گوشه:
۰/۱۵	۱/۴۸	۰/۸۱	۰	۰	۰/۰۴۸	۱- زاویه رأس : ۳۰ درجه
۰/۱۹	۰/۶۵	۰/۶۰	۰	۰	۰/۰۹	۲- زاویه رأس : ۴۵ درجه
۰/۲۳	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۲۹	۰/۰۰۱۸	۰/۱۲۷	۳- زاویه رأس : ۶۰ درجه
۰/۱۸	۰/۸۲	۰/۶۸	۰/۱۹	۰/۰۰۰۸	۰/۱۸۵	۴- زاویه رأس : ۹۰ درجه
						پایه مستطیلی یا یک لبه گردشده و یک لبه تیزگوشه:
۰/۳۳	۰/۱۴۵	۰/۳۵	۰	۰	۰/۰۸۸	۱- لبه گردشده مقابل جریان
۰/۰۹۶	۱/۶۲۴	۰/۸۱	۰/۳۶	۰/۰۰۱۲	۰/۰۹۹	۲- لبه تیزگوشه مقابل جریان

مراجع

- 1 - Sumer, B. M. and Fredsøe, J. (1997). "Hydrodynamics around cylindrical structures." *World scientific publication*.
- 2 - Farell, C. (1981). "Flow around fixed circular cylinders: Fluctuating loads." Proc. of ASCE, *Engineering Mech. Division*, 107:EM3:565-588. Also see the closure of the paper. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 109, PP. 1153-1156, 1983.
- 3 - Gerrard, J. H. (1966). "The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies." *J. Fluid mech.*, Vol. 25, PP. 401-413.
- 4 - Roshko, A. (1961). "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number." *J. Fluid Mech.* Vol. 10, PP. 345-356.
- 5 - Skewe, G. (1983). "On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross flow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers." *J. Fluid Mech.*, Vol. 133, PP. 265-285.
- 6 - Williamson, C. H. K. (1989). "Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds number." *J. Fluid Mech.*, Vol. 206, PP. 579-627.
- 7 - Launder, B. E. and Spalding, D. B. (1972). "Lectures in Mathematical Models of Turbulence." Academic Press, London, England.
- 8 - Choudhury, D. (1993). "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling." Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107.
- 9 - Wieselsberger, C. (1923). "Versüchüber Widerstand gerundeter und kantiger Körper." Ergebnisse AVA Göttingen II Lieferung.
- 10 - Schlichting, G. (1979). "Boundary Layer Theory." 7.ed. McGraw-Hill Book Company.
- 11 - Bishop, R. E. D. and Hassan, A. Y. (1964). "The Lift and Drag Forces on a Circular Cylinder in a Flowing Fluid." Proceedings of Royal Society, Ser. A, Vol. 277, PP. 32-50.
- 12 - Lienhard, J. H. (1966). "Synopsis of Lift, Drag and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders." Published by The *Technical Extension Service*, Washington State University, Bulletin 300.
- 13 - Zdravkovich M. M. (1997). "Flow around Circular Cylinder." (A Comprehensive Guide through Flow Phenomena, Experiments, Applications, Mathematical, Modes and Computer Simulations), Book, Oxford University Press.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 - Wake Region | 13 - Schlichting |
| 2 - Vortex Shedding | 14 - Heinecke |
| 3 - Vorticity Magnitude | 15 - Blevins |
| 4 - Drag | 16 - Reynolds Averaging |
| 5 - Lift | 17 - Launder |
| 6 - Farell | 18 - Spalding |
| 7 - Gerrard | 19 - Renormalization Group Theory |
| 8 - Roshko | 20 - Bishop |
| 9 - Skewe | 21 - Hassan |
| 10 - Williamson | 22 - Lienhard |
| 11 - Achenbach | 23 - Zdravkovich |
| 12 - Wieselsberger | |