

## بررسی تجربی ریزش گردابه درون لایه برشی جدا شده یک پله وارون

غلامحسین پوریوسفی\*  
دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
مسعود میرزایی  
استاد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
مجید حاجی پور  
کارشناس، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

در مقاله حاضر، پژوهشی تجربی، با هدف بررسی ویژگی‌های الگوی جریان و ناحیه‌ی جدایش پیرامون پله‌ی وارون (BFS) با نسبت انبساط کم (پله‌ی آیرودینامیکی)، در گستره‌ی عدد رینولدز  $18000 < Re_H < 54000$ ، صورت گرفته است. توزیع ضریب فشار متوسط روی سطح مدل پله، که با دستگاه مبدل فشار به دست آمد، نشان داد که الگوی جریان در این گستره از عدد رینولدز حالتی ساختاریافته پیدا کرده است. از طرف دیگر، به منظور بررسی ریزش گردابه‌ها در لایه برشی جدا شده، رفتار لحظه‌ای دنباله‌ی پله نیز به کمک دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج، مشاهده شد که افزایش سرعت جریان آزاد و به طبع آن افزایش آهنگ گردش و غلتش گردابه‌ها در لایه برشی، قدرت و دامنه گردابه‌ها و همچنین فرکانس ریزش آن‌ها را افزایش می‌دهد. به علاوه، با افزایش فاصله از لبه نوک پله و حرکت به طرف پایین‌دست لایه برشی، از تعداد گردابه‌های ریزش شده درون لایه برشی کاسته می‌شود ولی همزمان اندازه و دامنه گردابه‌های پایین‌دست افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پله‌ی وارون، توزیع فشار، حباب جدایش، بازیابی جریان، ریزش گردابه.

## Experimental Investigation of the Vortex Shedding in the Separated Shear Layer of a Backward-facing Step

**Gh. Pouryoussefi** Ph.D., Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
**M. Mirzaei** Professor, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
**M. Hajipour** B.Sc., Associate Professor, Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

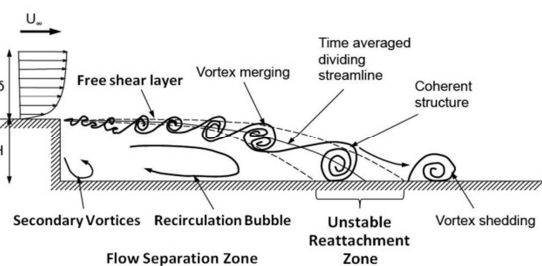
In this paper, an experimental research was carried out for investigating the characteristics of the flow pattern and separation region behind a backward-facing step (BFS) with low expansion ration (aerodynamic step), in the Reynolds number range of  $18000 < Re_H < 54000$ . Mean pressure coefficient distribution on the step surface, measured by pressure transducers, illustrates that the flow pattern in this range of Reynolds number has regular behavior. On the other hand, in order to investigate the vortex shedding phenomenon in separated shear layer, the instantaneous behavior of the wake was studied by the hot-wire anemometer. It was found that increasing the free stream velocity and rate of rotation and rolling of vortices in the shear layer, leads to arise in power and amplitude of the vortices as well as their shedding frequencies. Moreover, by increasing the distance from the step tip edge and downstream moving of the shear layer, then the number of shed vortices in the shear layer is reduced, but at the same time the size and amplitude of the downstream vortices go up.

**Keywords:** Backward-facing step, Pressure distribution, Separation bubble, Flow recovery, Vortex shedding.

## ۱- مقدمه

جدایش جریان سیال، پدیده‌ای است که به وفور در طبیعت و در وسایل ساخته‌ی دست بشر به چشم می‌خورد. جریان در ناحیه‌ی جدایش، رفتاری نوسانی و به شدت ناپایا دارد که این مسأله، موجب پیچیدگی فیزیک جریان می‌گردد. از طرفی به دلیل اهمیت خاص موضوع جدایش جریان در مسایل صنعتی، تحقیقات زیادی به این پدیده پرداخته و ویژگی‌های جریان جدا شده روی هندسه‌های مختلف را بررسی کرده است. این میان، جریان پیرامون پله‌ی وارون (BFS)، به دلیل ویژگی‌های خاص ناحیه‌ی جدایش آن، به دفعات مورد آزمایش قرار گرفته است [۱]. مطالعه‌ی ناحیه‌ی جدایش پله (پله‌ی وارون) می‌تواند مبنای درک رفتار جریان سیال در بسیاری از موارد واقعی باشد. از جمله کاربردهای مهندسی بررسی جریان پله می‌توان به جریان هوای پیرامون پل‌ها و ساختمان‌های بلند، سازه‌های دریایی، جریان سیال عبوری از لوله‌هایی با قطر متغیر، جریان هوای پیرامون سطوح برآفزای هواپیماها و بسیاری موارد دیگر اشاره نمود.

فیزیک جریان پیرامون پله وارون، طی سالیان گذشته توسط پژوهشگران زیادی مطالعه شده و ویژگی‌های کلی این جریان، در گستره‌های عدد رینولدز به خوبی شناخته شده است [۱-۷]. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این جریان را می‌توان به چند ناحیه‌ی مختلف تقسیم نمود. لایه‌ی مرزی در لبه‌ی پله، بدلیل ناپیوستگی هندسی موجود (گرادیان فشار معکوس شدید)، جدا شده و یک لایه‌ی برشی آزاد را تشکیل می‌دهد. درون این لایه‌ی برشی ساختارهای گردابه‌ای تولید شده، و در حالی که به سمت پایین دست حرکت می‌کنند، رول می‌غلتنند، رشد می‌کنند و با هم جفت می‌شوند. بین لایه‌ی برشی و دیواره‌ی پایین دست پله، یک ناحیه‌ی برگشتی شکل می‌گیرد (ناحیه‌ی جدایش جریان) که معمولاً شامل یک حباب بازگردش و یک گردابه‌ی ثانویه می‌باشد. محلی که لایه‌ی برشی به دیواره برخورد می‌کند نیز با نام ناحیه‌ی بازپیوست شناخته می‌شود. مشاهده شده است که خصوصیات این نواحی، به هندسه‌ی پله و شرایط جریان بالادست وابسته می‌باشد [۱].



شکل ۱- مشخصات میدان جریان پایین دست پله وارون [۱]

اولین تحقیقات جامع صورت گرفته در زمینه‌ی جریان عبوری از پله، در سال ۱۹۸۲ توسط آرمالی و همکارانش [۲]، به انجام گرفت. آنها با انجام آزمایش‌های تجربی متعدد روی جریان پله، در اعداد رینولدز مختلف، ویژگی‌های اصلی این جریان را بررسی نمودند. به طور مثال، آنها نشان دادند که طول بازپیوست جریان جداشده، با افزایش عدد رینولدز ابتدا زیاد شده و با رسیدن جریان به حالت گذار بیشترین مقدار خود را می‌یابد. پس از آن، با آشفته شدن جریان، طول بازپیوست رو به کاهش نهاده تا به میزان نسبتاً ثابتی برسد. آدام و جانستون [۳] نیز در تحقیقات خود صحت این موضوع را تایید نمودند. آنها همچنین به صورت جامع، به بررسی اثر ضخامت لایه‌ی مرزی در نقطه جدایش، بر طول بازپیوست و میزان تنش دیواره پرداختند. از جمله مطالعات جدیدتر در زمینه‌ی جریان پیرامون پله، می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط کاستاک و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۲ اشاره نمود. آنها با اندازه‌گیری میدان جریان به وسیله‌ی روش پی‌آی‌وی، چگونگی شکل‌گیری گردابه‌ها در لایه‌ی برشی، و همین‌طور فیزیک نوسانات لایه‌ی برشی را بررسی نمودند. به علاوه، راجاسکاران [۱] در سال ۲۰۱۱، با بررسی عددی و تجربی مشخصات جریان دنباله پله وارون، نشان داد که دنباله ناشی از یک لایه‌ی برشی برخاسته، تابع پارامترهای مختلفی مانند نسبت انبساط، نسبت منطری، شدت اغتشاشات جریان آزاد و همچنین وضعیت و ضخامت لایه مرزی در نقطه جدایش، می‌باشد.

در پژوهش‌های مربوط به جریان پله، معمولاً دو مود نوسانی گزارش می‌شود. مود اول به فرایند جفت شدن و ریزش گردابه‌ها در لایه‌ی برشی نسبت داده شده و آن را به نام "مود ریزش" یا "مود پله" می‌شناسند. دومین مود نوسانی را "مود فلپینگ" یا "مود لایه‌ی برشی" می‌گویند. این مود مربوط به حرکت فرکانس-پایین لایه برشی، معروف به حرکت بال‌زدن، است. مشاهده شده است که فرکانس مود فلپینگ معمولاً یک مرتبه از نظر اندازه، از فرکانس مود ریزش کمتر است [۵]. همچنین، فرکانس ریزش گردابه‌ها (مود پله) در پایین دست پله از مرتبه‌ی  $St_H \approx 2 * 10^{-1}$  می‌باشد. کیتزوفر [۶] در مطالعات تجربی خود، عدد استروهل متناظر با ریزش گردابه‌ها را برابر ۰٫۲۴ گزارش کرده است. در پژوهشی دیگر به روش شبیه‌سازی عددی بی‌واسطه، اسکفر و همکارانش [۷]، فرکانس ریزش گردابه‌های جریان پله را برابر ۰٫۲۶۶ به دست آوردند. حسن نیز در گزارش‌های خود، در حالت جدایش آرام جریان در لبه‌ی پله، فرکانس بی‌بعد مود پله را حدود ۰٫۱۸۵ بیان می‌کند [۸]. همچنین چان و سانگ [۹]، در تحقیقات خود به منظور کنترل طول جدایش جریان پله، فرکانس بی‌بعد ریزش گردابه‌ها را حدود ۰٫۲۷ به دست آورده‌اند.



شکل ۲- نمایی از مدل پله ساخته شده در این تحقیق

تا کنون، پژوهش‌های متعددی به بررسی ویژگی‌های پایا و ناپایای ناحیه‌ی جدایش پله‌ی وارون پرداخته‌اند که بیشتر آنها مطالعات عددی بوده‌اند. در این میان، نکته‌ای که به چشم می‌خورد این است که بیشتر پژوهش‌های تجربی، در اعداد رینولدز پایین ( $100 < Re_H < 6000$ ) و نسبت انبساط زیاد (۲:۱)، به پله‌ی درون کانال (جریان داخلی) بوده‌اند. مطالعه حاضر، برای اولین بار، در نسبت انبساط بسیار کم (۱۴:۱۳) یعنی مسأله پله آیرودینامیکی و گستره عدد رینولدز به نسبت بالاتری ( $18000 < Re_H < 54000$ ) صورت گرفته است که این تحقیق را از سایر پژوهش‌های مشابه متمایز می‌کند. در این تحقیق، رفتار جریان پشت یک پله آیرودینامیکی، به صورت تجربی در تونل باد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، توزیع فشار متوسط روی سطح پله و همچنین طیف نوسانات جریان در لایه‌ی برشی جداشده، اندازه‌گیری می‌شود. گفتنی است که، بررسی الگوی جریان پیرامون چنین پله‌ای در گستره اعداد رینولدز اشاره شده، اهمیت و کاربرد فراوانی در مطالعه‌ی اثرات پدیده‌ی یخ‌زدگی روی بال هواپیما دارد. از دهه‌ی شصت میلادی تا به امروز، پژوهش‌های گسترده‌ای پیرامون پدیده‌ی یخ‌زدگی بال انجام شده که بیانگر حساسیت زیاد این موضوع در صنعت هوانوردی است. به دلیل مشابهت‌های میان حباب جدایش پله‌ی وارون با حباب جدایش لبه‌ی حمله‌ی ایرفویل به هنگام وقوع یخ‌زدگی، مطالعه‌ی پله‌ی آیرودینامیکی می‌تواند نقش بسزایی در فهم این پدیده داشته باشد [۱۰].

در حالتی که جریان پله در پایین دست نقطه جدایش (لبه‌ی نوک پله) آشفته باشد، طول حباب جدایش معمولاً در گستره‌ی بین  $5H$  تا  $6H$  جابه‌جا می‌شود که  $H$  همان ارتفاع پله است [۳]. با انتخاب صفحه‌ی پایین دست مدل به طول  $67 \text{ cm}$  ( $12/4H$ ) این اطمینان حاصل می‌گردد که در شرایط مختلف آزمایش، نقطه‌ی بازپیوست در فاصله‌ی مناسبی از انتهای پله قرار گیرد. در بالادست پله نیز، صفحه‌ای به ضخامت  $3 \text{ mm}$  و طول  $22 \text{ cm}$  به کار رفته که لبه‌ی رو به باد آن (لبه‌ی حمله) به شکل بیضی تراش داده شده است. شکل ۴ لبه‌ی حمله‌ی صفحه بالادست مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایی از تونل باد مورد استفاده در این تحقیق

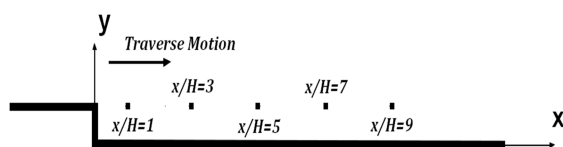
۲- جزئیات آزمایشگاهی

آزمایش‌های تحقیق حاضر، در تونل باد فروصوت آزمایشگاه آیرودینامیک دانشکده‌ی مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی صورت پذیرفته است. این تونل باد، از نوع مدار باز بوده و دارای مقطع آزمونی به طول  $3 \text{ m}$ ، به عرض

جدول ۱- موقعیت تپ‌های فشاری بر روی سطح پله

Tap No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$x/H$	-1.85	-0.93	0.09	0.83	1.57	1.94	2.31	2.68	3.06	3.43	3.8	4.17	4.54	4.91
Tap No.	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$x/H$	5.28	5.65	6.02	6.38	6.76	7.13	7.5	7.87	8.24	8.61	8.98	9.35	9.72	10.09

محصول شرکت فرانسجش صبا FFS، یک عدد پروب ساده یک بعدی (تک حسگری) مدل WU11-SN، یک دستگاه برد الکترونیکی ۱۲ A/D بیتی ۱۶ کاناله ساخت شرکت National Instruments مدل PCI-6024E و یک دستگاه کامپیوتر شخصی استفاده شد. در طول آزمایشات، شرایط جریان مرجع به وسیله یک میکرولوله استاتیکی پیتوت و یک دستگاه میکرومانومتر دیجیتال مدل Testo 0560-5126 با دقت ۰٫۱ پاسکال (به عنوان کالیبراتور)، اندازه‌گیری می‌شد. به علاوه، فرکانس داده‌برداری ۵۰۰ Hz به همراه فرکانس قطع ۱۵ kHz (به وسیله یک فیلتر پایین‌گذر)، برای نمودارهای تحلیل طیفی سیگنال سیم داغ به کار گرفته شد. شکل‌های ۵ و ۶، موقعیت و وضعیت نصب حسگر پروب سیم داغ را در پایین دست مدل پله نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، یک سیستم انتقال دهنده سه محوره با وضوح ۰٫۱ mm که به وسیله کامپیوتر قابل کنترل است، جهت جابجایی پروب مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۵- موقعیت نقاط داده برداری توسط پروب سیم داغ



شکل ۶- وضعیت نصب پروب سیم داغ را در پایین دست مدل پله

### ۳- تشریح نتایج و بحث

شکل ۷، توزیع ضریب فشار متوسط را روی سطح پله در سه سرعت جریان آزاد ۵ و ۱۰ و ۱۵ m/s نشان می‌دهد. در هر سه منحنی این شکل، ضریب فشار در لبه نوک پله ( $x/H=0$ ) ناگهان با یک افت شدید مواجه می‌شود که بیانگر ورود به ناحیه‌ی حباب



شکل ۴- استفاده از پروبیل بیضوی لبه حمله مدل پله

در این پژوهش به منظور اندازه‌گیری توزیع فشار روی سطح مدل، ۲۸ عدد حفره‌ی فشاری به قطر ۰٫۶ mm، حول محور تقارن جسم (اطراف میانه‌ی دهانه‌ی جسم) ایجاد شده است. چینش حفره‌ها (با فواصل مساوی ۲ cm از یکدیگر) به روش زیگزاگ صورت گرفته که به حذف تأثیر حفره‌ها روی یکدیگر کمک می‌کند. موقعیت تپ‌های فشاری را در جدول ۱ مشاهده می‌نمایید. از آنجایی که لبه نوک پله به عنوان مبدأ مختصات انتخاب شده، مقادیر منفی ( $x/H$ ) متناظر با سطح بالادست پله و مقادیر مثبت، متناظر با سطح پایین دست پله می‌باشد، که در آن،  $x$  موقعیت تپ‌های فشاری می‌باشد.

سیستم اندازه‌گیری فشار مورد استفاده در این تحقیق، شامل دستگاه‌های مبدل فشار مدل DC005NDC4 ساخت شرکت Honeywell به همراه نرم‌افزار PressureField محصول شرکت فرانسجش صبا FFS، یک دستگاه برد الکترونیکی ۱۶ بیتی ۳۲ کاناله ساخت شرکت National Instruments از نوع مدل PCI-6224 و یک دستگاه کامپیوتر شخصی می‌باشد. عملیات داده‌برداری در بازه زمانی ۱۵ ثانیه و در فرکانس ۱۰۰۰ Hz صورت می‌گرفته است. به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج آزمایشات فشار، برای هر سرعت جریان آزاد، حداقل ده مرتبه عملیات داده‌برداری صورت گرفت. همچنین عدم قطعیت اندازه‌گیری برای ضریب فشار توسط سیستم اندازه‌گیری فشار فوق، در بیشترین حالت، حدود  $\pm 0.01$  تخمین زده می‌شود. در این تحقیق، ضریب فشار به صورت

$$C_p = (P - P_{\infty}) / (0.5 \rho V_{\infty}^2)$$

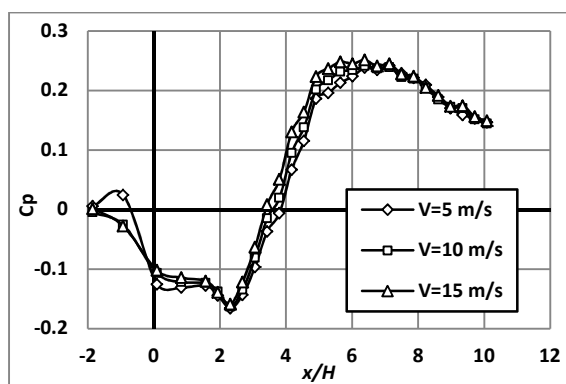
تعریف شده است که در آن  $P$  فشار استاتیکی متوسط روی سطح مدل،  $P_{\infty}$  فشار جریان آزاد،  $V_{\infty}$  سرعت جریان آزاد و  $\rho$  چگالی هوا می‌باشد.

برای اندازه‌گیری طیف نوسانات طبیعی جریان در دنباله پله و فرکانس ریزش گردابه‌ها در لایه برشی جداشده، از یک دستگاه جریان‌سنج سیم داغ به همراه نرم‌افزار Rake Flow Ware

ناحیه‌ی خیز منحنی‌ها تا محور عمودی نمودار به میزان بسیار جزئی اما به صورت منظم کم شده (بخصوص از  $3H$  به بعد)، که مؤید این اصل است که با افزایش عدد رینولدز، طول باز پیوست اندکی کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش سرعت جریان آزاد، میزان پدیده یا اختلاط جریان پرسرعت بالایی با جریان کم‌سرعت زیرین لایه‌ی برشی، افزایش یافته و در نتیجه موجب افزایش مقدار مومنوم در لایه‌ی برشی جداشده، و بازیابی سریع‌تر جریان می‌شود. علت جزئی بودن تغییرات منحنی‌های فشار با افزایش عدد رینولدز، آشفته بودن لایه‌ی برشی در پایین دست لبه نوک پله می‌باشد که باعث می‌شود در این گستره از اعداد رینولدز ( $Re_H = 18000 - 54000$ )، الگوی جریان حالت ساختاریافته (قاعدهمند) و تقریباً یکسانی داشته باشد. در حقیقت، هنگامی که لایه‌ی برشی در پایین دست نقطه جدایش تماماً آشفته می‌شود، طول بازپیوست تقریباً مستقل از عدد رینولدز خواهد بود [۳].

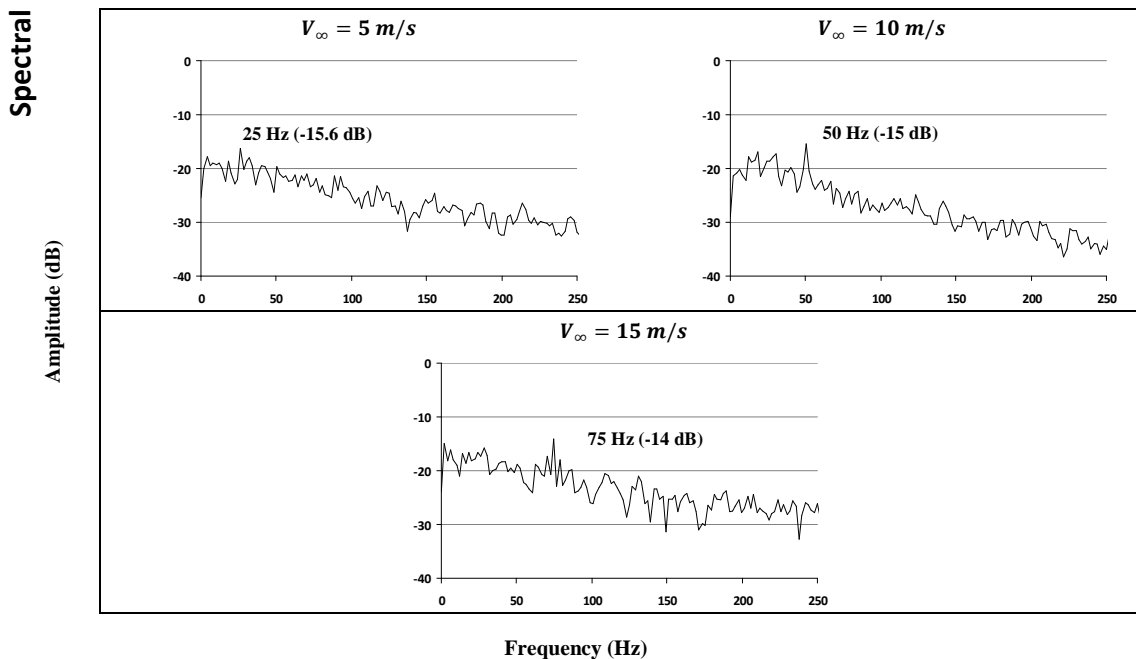
علاوه بر بررسی رفتار متوسط جریان با آزمون توزیع فشار، می‌توان طیف نوسانات جریان و رفتار لحظه‌ای آن را به کمک دستگاه جریان‌سنج سیم داغ، مطالعه نمود. به منظور بررسی تأثیر تغییر سرعت جریان آزاد بر الگوی ریزش گردابه‌ها، نمودارهای تحلیل طیفی نوسانات جریان در موقعیت ( $x/H = 1$ ) و  $y/H = 3$ ، برای سه سرعت جریان آزاد  $5$  m/s،  $10$  m/s و  $15$  m/s، در شکل ۸ نشان داده شده است. علت انتخاب این موقعیت برای اندازه‌گیری فرکانس مود پله، این بود که این نقطه کاملاً در لایه‌ی برشی دنباله‌ی پله قرار گرفته و گردابه‌ها تا این فاصله از لبه‌ی پله، به اندازه‌ی کافی فرصت رشد داشته‌اند. استفان و همکارانش [۱۲] نیز در پژوهش تجربی خود روی دنباله‌ی جریان پله، این موقعیت را برای سنجش فرکانس مود پله به کار برده‌اند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، با افزایش سرعت جریان آزاد، فرکانس ریزش گردابه‌ها و همچنین دامنه‌ی نوسانات جریان، افزایش می‌یابد. این در حالی است که اگر این فرکانس در قالب عدد استروهال محاسبه گردد، متوجه می‌شویم که برای سه سرعت فوق، فرکانس بدون بعد یکسان، و برابر  $St = 0.27$  به دست می‌آید که با نتایج تحقیقات پیشین مطابقت بسیار خوبی دارد [۱۹]. این موضوع بیانگر ساختار یافته (قاعدهمند) بودن و یکسان بودن الگوی متناوب ریزش گردابه‌ها، برای جریان اطراف پله در گستره عدد رینولدز  $(Re_H) 18000$  الی  $54000$  است.

جدایش است و در ادامه تا قبل از شروع بازیابی جریان (حوالی ناحیه  $x/H=2$ )، تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع، ویژگی هر ناحیه‌ی حباب جدایش این است که در طول آن تا قبل از شروع بازیابی جریان، فشار به صورت یکنواخت توزیع می‌گردد [۱۰] (یعنی یک ناحیه فشار ثابت داریم). با پیشروی به طرف پایین دست جریان، ضریب فشار پس از اینکه به مقدار کمینه‌ی خود رسید، با یک خیز (رشد) نسبتاً سریع مواجه می‌شود که بیانگر شروع فرآیند بازیابی فشار و در نهایت بازپیوست لایه‌ی برشی است. مشاهده‌ی چنین رفتاری برای توزیع فشار روی سطح پله، تنها محدود به این پژوهش نیست. تانی و همکارانش [۱۱] نیز، در آزمایش‌های خود روی پله‌ی آیرودینامیکی، رفتاری مشابه را برای توزیع فشار به دست آوردند.

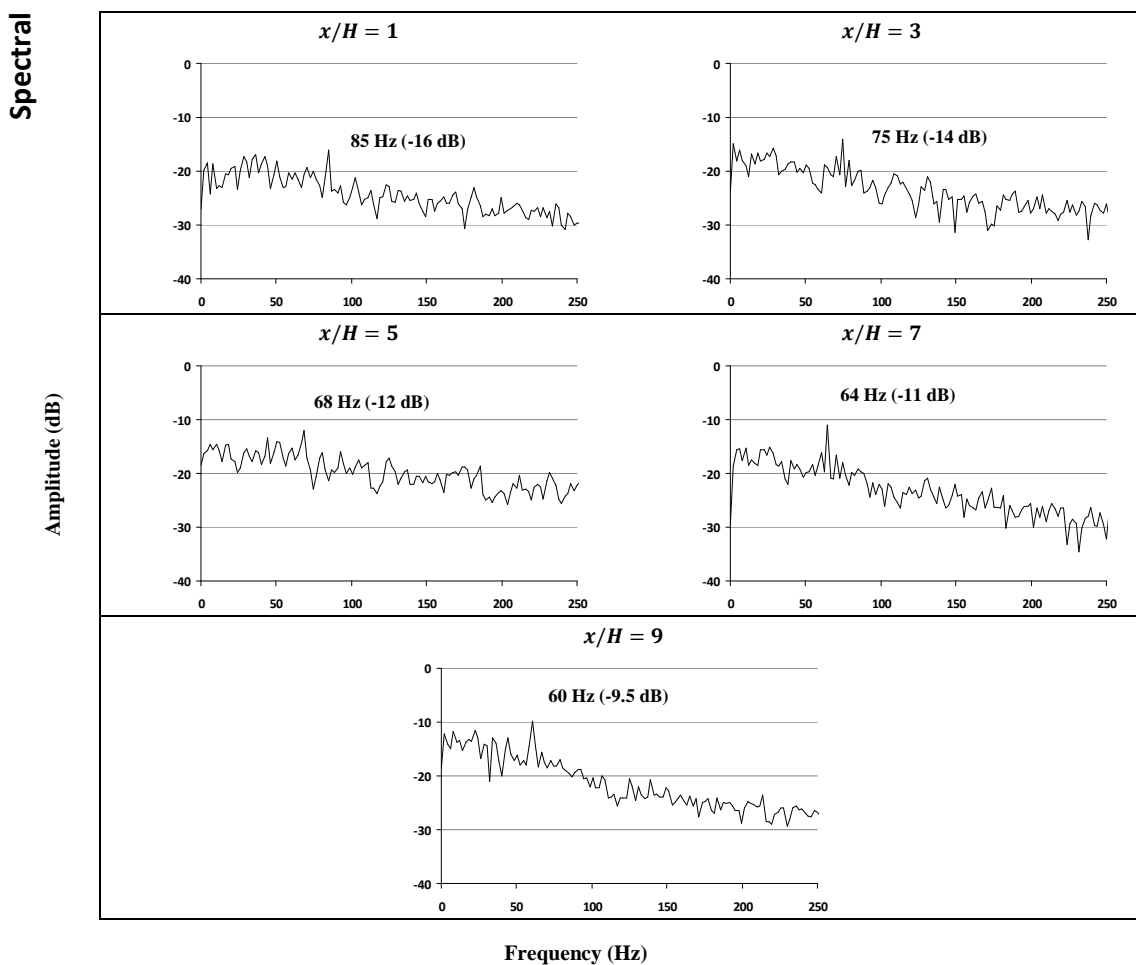


شکل ۷- توزیع فشار روی سطح پله در سرعت‌های مختلف

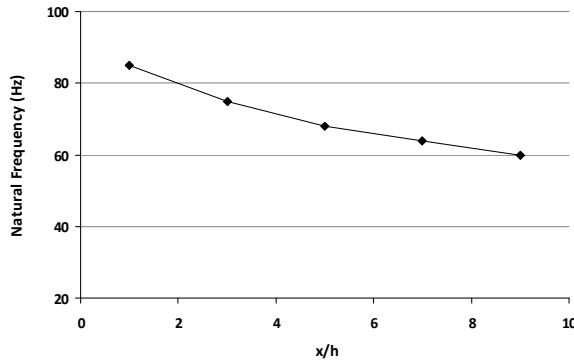
از نمودارهای توزیع فشار روی سطح پله (شکل ۷) می‌توان نتایج مختلفی را برداشت نمود. به عنوان مثال می‌توان گفت که به صورت کیفی، فاصله‌ی ناحیه بازیابی منحنی ضریب فشار تا لبه نوک پله ( $x=0$ )، بیان‌کننده‌ی حدود ابعاد ناحیه‌ی جدایش می‌باشد. بنابراین هرچه که قسمت خیز منحنی به سمت عقب (بالادست) جابجا شود، بازیابی فشار در موقعیت جلوتری رخ می‌دهد که کوچک‌تر شدن ابعاد حباب جدایش را به دنبال خواهد داشت. همچنین، نکته‌ی قابل توجه دیگری که در تمامی منحنی‌ها به چشم می‌خورد، وقوع افت فشار ثانویه، درست پیش از شروع فرآیند بازیابی، و رسیدن ضریب فشار به کمترین میزان خود است. اینگونه به نظر می‌آید که نقطه‌ی کمینه‌ی این منحنی‌ها (موقعیت  $x/H \approx 2.3$ )، در واقع بیانگر ناحیه‌ی زیر هسته‌ی (مرکز) حباب بازگردش است. در این ناحیه، فاصله خطوط جریان حباب کم می‌شوند و سرعت جریان بازگشتی بر روی سطح پله، به مقدار بیشینه خود می‌رسد. بنابراین، ضریب فشار در ناحیه زیر هسته‌ی حباب به کمترین مقدار خود می‌رسد. از طرف دیگر، با نگاهی دقیق‌تر به منحنی‌های توزیع فشار در شکل ۷ مشخص می‌گردد که با افزایش عدد رینولدز، فاصله‌ی



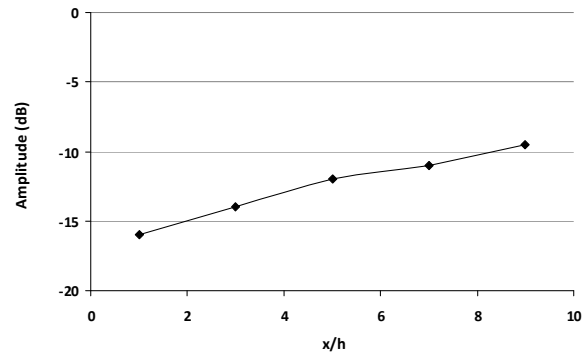
شکل ۸- طیف نوسانی جریان در موقعیت  $(x/H = 3, y/H = 1)$  برای سه سرعت جریان آزاد



شکل ۹- تحلیل طیفی نوسانات جریان در موقعیت‌های مختلف در پایین دست مدل پله، برای سرعت جریان آزاد ۱۵ m/s



(ب)



(الف)

شکل ۱۰- تغییرات (الف) دامنه و (ب) فرکانس طبیعی ریزش گردابه‌ها در لایه برشی، برحسب فاصله از لبه‌ی نوک پله

زیرین لایه‌ی برشی، افزایش یافته و در نتیجه موجب افزایش مقدار مومنوم در لایه‌ی برشی جداسده، و بازیابی سریع‌تر جریان می‌شود. در این حالت، طول بازیوست به میزان جزئی اما به صورت منظم کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، تحلیل طیفی نوسانات جریان در موقعیت‌های مختلف در پایین‌دست دنباله پله، برای سرعت‌های مختلف، نشان داد که افزایش سرعت جریان آزاد و به طبع آن افزایش آهنگ گردش و غلتش گردابه‌ها در لایه برشی، قدرت و دامنه گردابه‌ها و همچنین فرکانس ریزش آن‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین، با دور شدن از لبه نوک پله و حرکت به طرف پایین‌دست، به دلیل جفت‌شدن و ادغام گردابه‌ها، تعداد گردابه‌های ریزش شده در لایه برشی کاهش می‌یابد ولی اندازه گردابه‌های پایین‌دست زیاد می‌شود.

### مراجع

- [1] Rajasekaran J., "On the flow characteristics behind a backward-facing step and the design of a new axisymmetric model for their study", Master of Applied Science Thesis, Department of Aerospace Engineering, University of Toronto, 2011.
- [2] Armaly B.F., Durst F., Pereira J.C.F., Schonung B., "Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow", J. Fluid Mech, vol. 127, pp. 473-496, 2001.
- [3] Adams E.W., Johnston J.P., "Effects of the separating shear layer on the reattachment length and wall shear stress", Exp. Fluids, vol. 6, Issue 7, pp. 493-499, 1988.
- [4] Kostas J., Soria J., Chong M.S., "Particle image velocimetry measurements of a backward-facing step flow", Exp. Fluids, vol. 33, Issue 6, pp. 838-853, 2002.
- [5] Spazzini P.G., Iuso G., Omorato M., Zurlo N., Di Cicca G.M., "Unsteady behavior of backward-facing step flow", Exp. Fluids, vol. 30, Issue 5, pp. 551-561, 2001.
- [6] Kitzhofer J., "Volumetric Measurements of the Transitional Backward Facing Step Flow", Ph.D. DISSERTATION, T.U. Bergakademie Freiberg, 1981.

در مقابل شکل ۸، که طیف نوسانی جریان را برای موقعیت ثابتی از میدان در سرعت‌های مختلف جریان آزاد نشان می‌دهد، شکل ۹، نمودارهای تحلیل طیفی نوسانات جریان را در موقعیت‌های مختلف در پایین‌دست مدل پله، برای سرعت جریان آزاد ثابت (۱۵m/s) ارائه می‌کند. به این ترتیب، می‌توان تغییرات الگوی ریزش گردابه‌ها را در موقعیت‌های مختلف از دنباله‌ی پله مورد مطالعه قرار داد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود با دور شدن از لبه نوک پله به طرف پایین‌دست جریان، فرکانس ریزش گردابه‌ها کاهش و همزمان دامنه‌ی نوسانات جریان درون لایه برشی افزایش می‌یابد. در نهایت، با مقایسه‌ی شکل‌های ۸ و ۹، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سرعت جریان آزاد و به طبع آن افزایش آهنگ گردش و غلتش گردابه‌ها در لایه برشی، قدرت و دامنه گردابه‌ها و همچنین فرکانس ریزش آن‌ها را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، با افزایش فاصله از لبه نوک پله و حرکت به طرف پایین‌دست لایه برشی، به دلیل جفت‌شدن و ادغام گردابه‌ها در هنگام پدیده رولینگ (در راستای تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تر)، از تعداد گردابه‌های ریزش شده درون لایه برشی کاسته می‌شود ولی همزمان سایز و دامنه گردابه‌های پایین‌دست افزایش می‌یابد (شکل ۱۰).

### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با آزمون‌های توزیع فشار و اندازه‌گیری با جریان‌سنج سیم داغ، رفتار جریان در ناحیه‌ی حباب جدایش پله‌ی وارون با نسبت انبساط کم (پله‌ی آیرودینامیکی) در تونل باد مطالعه شد. توزیع فشار روی سطح مدل پله نشان داد که در گستره‌ی عدد رینولدز ( $54000 < Re_H < 180000$ )، الگوی جریان در ناحیه‌ی جدایش پله، حالتی ساختار یافته پیدا کرده است و جریان رفتار مشخص و تقریباً یکسانی از خود نشان می‌دهد. علت این موضوع در واقع آشفتگی شدن سریع لایه برشی در پایین‌دست نقطه جدایش، یعنی در فاصله اندکی از لبه نوک پله، است. همچنین مشاهده شد که با افزایش عدد رینولدز، میزان پدیده یا اختلاط جریان پرسرعت بالایی با جریان کم سرعت

- [7] Schafer F., Breuer M., Durst F., "The dynamics of the transitional flow over a backward-facing step", *J. Fluid Mech.*, Vol. 623, pp. 85-119, 2009.
- [8] Marrot F., Gajan P., Pautin S., Simon F., "Experimental Application of an Active Control Loop on Backward-Facing Step Flow", *AIAA J.*, vol. 43, Issue 6, pp. 1176-1186, 2005.
- [9] Chun K. B., Sung H. J., "Control of turbulent separated flow over a backward-facing step by local forcing", *Exp. Fluids*, vol. 21, Issue 6, pp. 417-426, 1996.
- [10] Bragg M.B., Broeren A. P., Blumenthal L. A., "Iced-Airfoil and Wing Aerodynamics", College of Aerospace Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign, pp. 1-48, 2003.
- [11] Tani I., Luchi M., Komoda H., "Experimental investigation of flow separation associated with a step or a groove", Aeronautical Research Institute, University of Tokyo, Report no. 364, pp. 119-137, 1961.
- [12] Stephen E., Carter N., Leung C., "Flow over a backward-facing step under controlled-plasma actuator-induced perturbations", 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, AIAAPaper, no. 2010-4591, 2010.