

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

مطالعه تجربی کاهش نیروی پسا در ساختارهای انعطاف پذیر

در این مقاله به مطالعه و معرفی کاهش نیروی پسا در ساختارهای انعطاف پذیر پرداخته شده است. ابتدا مروری بر نحوه الهام‌گیری این پدیده از طبیعت انجام و در ادامه با استفاده از یک مطالعه تجربی ساده سعی در اندازه‌گیری عددی میزان کاهش نیروی پسای ساختارهای انعطاف‌پذیر شده است. نتایج نشان می‌دهد که این کاهش می‌تواند تا ۵۰ درصد کل نیروی پسا هم باشد. همچنین، عوامل مؤثر بر این پدیده مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: تجهیزات تست ارتفاع، دیفیوزر-اجکتور مافوق صوت، حفاظت حرارتی، سیال اولیه

یاسر جعفری^{۱*}، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

*نویسنده مخاطب، آدرس: تهران، کدپستی: ۸۶۳۹/۱۱۳۶۵

jafariyaser@ae.sharif.ir

Experimental Study of Drag Force Reduction in Flexible Structures

In this paper, we study and introduce the drag force reduction in flexible structures. Firstly, a review of the inspiration of this phenomenon by nature is presented, and then the amount of drag force reduction in the flexible structure is measured experimentally. The obtained results show that this reduction can be up to 50% of the total drag force. In addition, influential factors on this phenomenon have been investigated.

Keywords: Drag Force Reduction, Flexible Structures, Experimental Study, Flutter

Y. Jafari^{1*}, PhD Student, Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology

*Corresponding Author, Postal Code: 8639/11365, Tehran, IRAN

jafariyaser@ae.sharif.ir

مقدمه

می‌شود، به‌طور عمومی در بیشتر گیاهان دیده می‌شود. در واقع وجود این انعطاف‌پذیری و تغییر شکل الاستیک موجودات زنده در مقابل انواع مختلف جریان باعث حفظ حیات آنها می‌شود [۵-۶]. از سوی دیگر، تغییر شکل گیاهان به دلیل تطابق با شرایط محیطی می‌تواند از طرق مختلف مانند تأثیر بر کشاورزی (گرده‌افشانی و نحوه کاشت گیاهان)، خسارات افتادن درختان بزرگ و غیره بر زندگی انسان اثرگذار باشد [۷-۹].

علاوه بر موارد بیان شده، اثر متقابل سازه- مایع^۲ در ساختارهای نازک انعطاف‌پذیر در مقابل یک جریان سیال همراه با انتقال حرارت جابجایی، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. از این مزیت می‌توان برای بهبود عملکرد حرارتی سیستم‌های مهندسی و بیولوژیکی استفاده کرد. برای مثال می‌توان به سیستم‌های مهندسی شامل وسایل برداشت انرژی در میکروسیستم‌ها [۱۰] و خنک‌سازی میکروالکترونیک با استفاده از فن‌های پیزوالکتریک اشاره کرد. نمونه‌هایی از سیستم‌های بیولوژیکی عبارتند از: تنظیم حرارت در بدن فیل‌ها از طریق تکان دادن گوش‌های بزرگشان [۱۱] و افزایش انتقال حرارتی در میکروکانال‌ها با استفاده از به‌کارگیری ساختارهای مویی شکل مصنوعی [۱۲].

مطالعات بسیاری در مورد عوامل مؤثر بر نیروی پسای ساختار انعطاف‌پذیر قرار گرفته در مقابل جریان سیال مختلف انجام شده است. آنچه مسلم است، تناسب بین این نیرو با توانی از سرعت سیال برقرار است ($F \propto U^a$). این توان بسته به شرایط جریان و نوع ساختار انعطاف‌پذیر قرار گرفته در مقابل جریان سیال متفاوت خواهد بود. مقدار نیروی پسای ساختارهای انعطاف‌پذیر (به دلیل کاهش سطح مقطع مقابل جریان) نسبت به ساختارهای صلب کمتر است. با توجه به اینکه در ساختارهای صلب نیروی پسا با توان دوم سرعت متناسب است ($F \propto U^2$)، میزان کاهش پسای ساختارهای انعطاف‌پذیر اغلب توسط یک عدد بی‌بعد تحت عنوان توان ووگل^۳ v ، کمی‌سازی شده است. به طوری که این نیرو با توان $2+v$ سرعت جریان متناسب است ($F \propto U^{2+v}$) (شکل ۲). در محدوده سرعت جریان که در آن گیاهان تغییر شکل می‌دهند، توان ووگل -۱ یک مقدار معمول است. علاوه بر این، شکل و نوع تغییر شکل ساختار انعطاف‌پذیر نیز می‌تواند در این عدد تأثیرگذار باشد. در شکل ۳ برخی از ساده‌ترین حالت‌های اتفاق افتاده در ساختارهای انعطاف‌پذیر مقابل جریان به نمایش گذاشته شده است. برای ساختار صفحه‌ای پسا به صورت $F \propto U^{2/3}$ تغییر می‌کند و درحالی که برای تارهای انعطاف‌پذیر پسا به صورت $F \propto U^{4/3}$ خواهد بود [۲-۳].

سازه‌های سفت و سخت معمولی مکانیکی تحت بارگذاری تغییر شکل ندارد. در نقطه مقابل، گیاهان در مواجهه با نیروی جریان سیال و گرانش به شدت انعطاف‌پذیر و دارای تغییر شکل با دامنه بزرگ هستند. تغییر شکل گیاهان تحت بارگذاری سیال می‌تواند بسیار زیاد باشد و منجر به شکست ساختاری می‌شود. این پدیده به‌طور کلی «آسیب باد» نامیده می‌شود که اثرات نامطلوب بر زندگی انسان دارد. علاوه بر این، تنش‌های مکانیکی که توسط بارگذاری سیال اعمال می‌شود، می‌تواند به طور دائمی ساختار گیاهان را تغییر داده و باعث تغییر هندسه و سرعت رشد آنها شود. این پدیده‌ها، انگیزه زیادی برای مطالعه تغییر شکل گیاهان در طبیعت ایجاد کرده‌اند. انواع مختلف گیاهان برای بررسی اندرکنش آنها با جریان سیالات آزمایش شده‌اند. علاوه بر این، درک پایه‌ای از تغییر شکل گیاهان در مقابل جریان سیال توسط مدل‌سازی آنها به عنوان ساختار ساده انعطاف‌پذیر مانند تارها و صفحات قبلاً به دست آمده است. این امر منجر به درک بهتر مکانیزم‌های پایه‌ای تغییر شکل و کاهش نیروی پسای وارد بر گیاهان در طبیعت شده است. شکل ۱ نشان‌دهنده تغییر شکل گیاهان در معرض جریان هوا در طبیعت است.



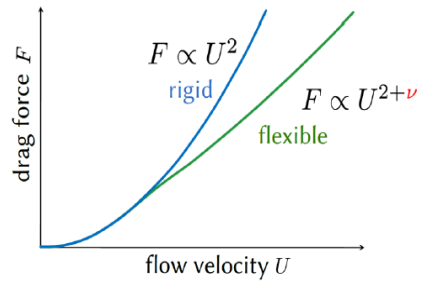
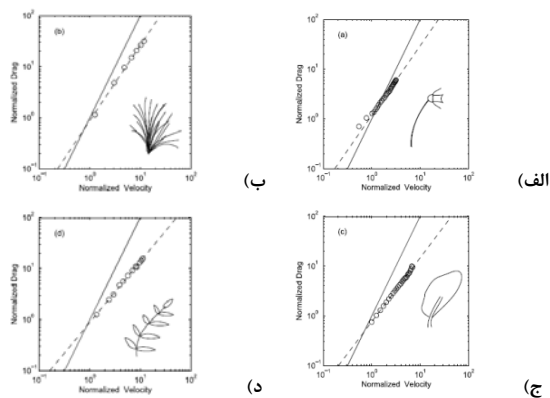
شکل ۱- تغییر شکل گیاهان در معرض جریان هوا در طبیعت [۱].

اندرکنش بین ساختارهای نازک و انعطاف‌پذیر با جریان سیال کاربرد فراوانی در زیست‌شناسی و سیستم‌های مهندسی دارد. برخی از این کاربردها شامل تغییر شکل گیاه انعطاف‌پذیر توسط جریان یا گیاهان آبی برای کاهش پسا، به‌کارگیری خم‌شدن صفحه‌های قابل انعطاف جهت برداشت انرژی باد و قایقرانی و خم شدن الیاف الاستیک در میکرو سیالات می‌شود [۲-۴]. داشتن ساختار انعطاف‌پذیر در گیاهان در معرض جریان سیال باعث کاهش نیروی پسای وارده بر آنها شده و از ریشه‌کن شدن و شکستن گیاهان جلوگیری می‌کند. افزون بر این، کاهش نیروی پسای وارده بر این گیاهان موجب کاهش تنش وارده بر سطوح مختلف گیاه می‌شود که از شکستگی‌های موضعی گیاه در مقابل جریان سیال جلوگیری می‌کند. مکانیزم اصولی فعال که شامل تغییر شکل‌های الاستیک گیاهان در مقابل جریان سیال

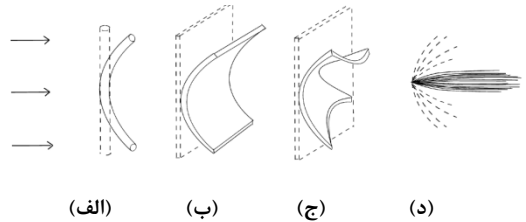
2. Fluid-structure Interaction (FSI)
3. Vogel

1. Wind Damage

مطالعه تجربی کاهش نیروی پسا در ساختارهای انعطاف پذیر



شکل ۲- کاهش پسای ساختارهای انعطاف پذیر در مقایسه با ساختارهای صلب [۱].

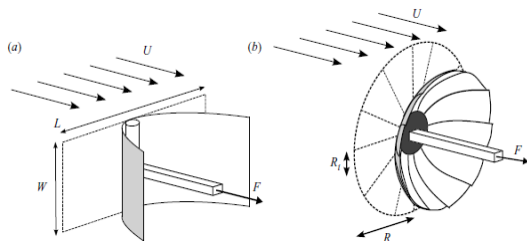


شکل ۴- نتایج آزمایشگاهی نسبت نیروی پسا به سرعت جریان برای ساختارهای انعطاف پذیر تحت جریان با توان ووگل، الف) $\nu = -0.60$ ، ب) $\nu = -0.52$ ، ج) $\nu = -0.71$ و د) $\nu = -0.80$ [۳].

به طور معمول برای شبیه سازی این نوع ساختارها در آزمایشگاه از مدل های ساده استفاده می شود. در شکل ۵ دو نوع از ساده ترین مدل ها نشان داده شده است. این مدل ها معمولاً در تونل باد در سرعت های مختلف مورد آزمایش قرار می گیرند. شکل ۶ نشان دهنده تغییر شکل این مدل ها در سرعت های مختلف تونل باد است. این نوع مدل های ساده پایه مطالعه رفتار ساختارهای انعطاف پذیر واقعی موجود در طبیعت است. به طور مثال، در شکل ۷ نحوه مدل سازی رفتار تغییر شکل یک برگ با دیسک انعطاف پذیر نشان داده شده است.

شکل ۳- تغییر شکل های ساده ساختارهای انعطاف پذیر تحت جریان، الف) یک تار خم شده توسط جریان عبوری، ب) یک صفحه با خم ساده، ج) یک صفحه با خم شدگی دوگانه بدون انحنای گاوس و د) یک دسته از تارها تغییر شکل داده شده توسط جریان محوری [۳].

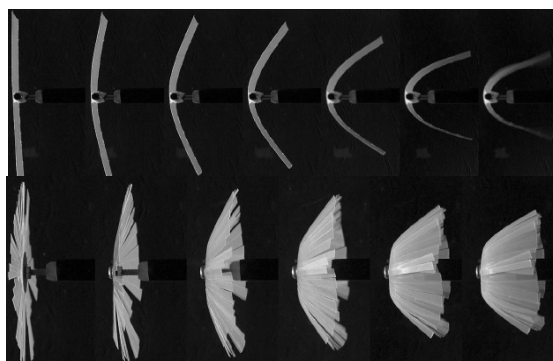
ساختارهای انعطاف پذیر موجود در طبیعت مانند گیاهان معمولاً ساختارهای پیچیده تری دارند. توان ووگل برای این ساختارها معمولاً به طور تئوریک و آزمایشگاهی تخمین زده می شوند. در جدول ۱ برخی از مهمترین این نتایج آورده شده است. همچنین، در شکل ۴ نتایج آزمایشگاهی نمودار نیروی پسا بر حسب سرعت جریان برای برخی ساختارهای متداول گیاهان به نمایش گذاشته شده است.



جدول ۱- مقادیر تئوریک و تجربی توان ووگل [۳].

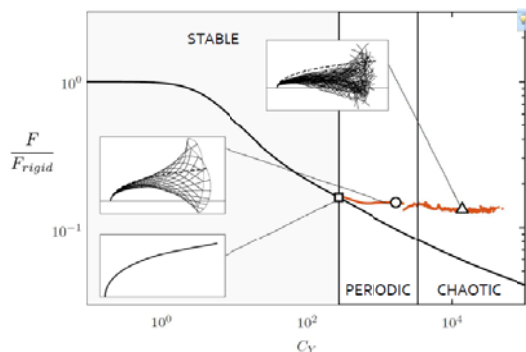
شکل ۵- مدل های ساده استفاده شده برای آزمایش ساختارهای انعطاف پذیر در آزمایشگاه، (a) صفحه مستطیلی انعطاف پذیر و (b) دیسک انعطاف پذیر [۴].

	Structure	Vogel exponent ν
Theory	Beams and plates (linear)	-0.667
	Beams and plates (non-linear) Present	[-0.5 -1.]
Experiments	Daffodil (Narcissus pseudonarcissus)	-0.60
	Fountain Grass (Pennisetum setaceum)	-0.52
	Poplar (Populus nigra) with leaves	-0.71
	Water parsnip (Berula erecta)	-0.80
	Irish moss (Chondrus crispus)	-0.60
	Aquatic leaves (mean value)	-0.60
	Aquatic species (41 different, mean value)	-0.57
	Terrestrial species (12 different, mean value)	-0.80



شکل ۶- نحوه تغییر مدل های ساده استفاده شده برای آزمایش ساختارهای انعطاف پذیر در جریان هوا [۴].

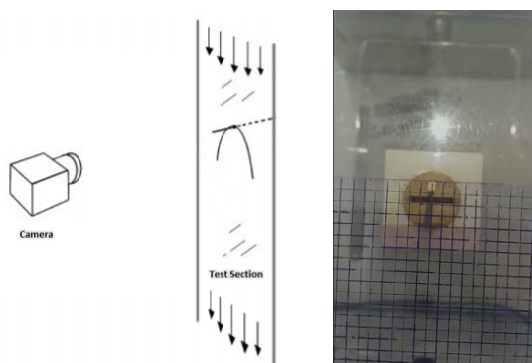
پیش‌بینی اختلاف چندانی ندارد. اما با رفتن به سمت ناپایداری آشوبناک این اختلاف شدیدتر می‌شود.



شکل ۸- تغییرات کاهش پسی مربوط به ساختارهای انعطاف‌پذیر صفحه مستطیلی در مقابل جریان سیال [۱۴].

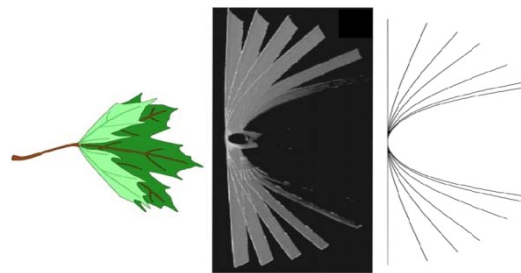
بیان و نحوه انجام آزمایش

جهت مشاهده آنچه در مورد کاهش نیروی پسای ساختارهای انعطاف‌پذیر توضیح داده شد، آزمایشی طراحی و انجام شد. این آزمایش با استفاده از تونل باد دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. این تونل با مقطع تست مربعی شکل با ضلع ۰/۴ متر و با حداکثر سرعت ۳۳ متر بر ثانیه قابلیت انجام انواع تست‌ها را دارد. یک تعلق پلمیری صحافی به ابعاد ۶×۱۲ سانتیمتر به عنوان ساختار انعطاف‌پذیر مقابل جریان استفاده می‌شود. پایه نگه‌دارنده تعلق مطابق با شماتیک شکل ۸a استفاده شده است. شکل ۹ نشان‌دهنده نحوه قرارگیری تعلق در مقطع تست تونل باد و شماتیکی از نحوه قرارگیری دوربین ثبت تغییر شکل ساختار را نشان می‌دهد.



شکل ۹- نحوه قرارگیری ساختار انعطاف‌پذیر و دوربین ثبت تغییر شکل در مقطع تست تونل باد.

آزمایش با زیاد کردن فرکانس تونل باد (متناسب با سرعت جریان ایجاد شده) و ثبت تغییر شکل تعلق در مقابل جریان هوا با استفاده از دوربین عکس‌برداری انجام شده است. به خاطر افزایش فرکانس تونل باد به صورت پیوسته در فرکانس‌های خاص اندکی صبر کرده تا محاسبه سرعت مربوط به آن فرکانس و تغییر شکل



شکل ۷- نحوه مدل‌سازی رفتار تغییر شکل یک برگ را با دیسک انعطاف‌پذیر [۱۳].

یکی از پیچیدگی‌های ساختارهای انعطاف‌پذیر قرار گیرنده در مقابل جریان، رخ دادن پدیده‌ای به نام فلاتر^۴ است. در صورتی که بخواهیم یک تعریف از پدیده فلاتر ارائه دهیم، داریم: نوعی ناپایداری دینامیکی ساختار منعطف در مقابل جریان سیال که از برهم‌کنش نیروهای اینرسی، الاستیکی و آیرودینامیکی به وجود می‌آید. این پدیده مختص ساختارهای انعطاف‌پذیر نیست و در وسایل پرنده مانند هواپیماها هنگامی که نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی به اندازه‌ای شدت می‌یابند که ساختارهای صلب وسیله حالت خود را از دست داده و به صورت یک ساختار منعطف عمل می‌کند، نیز ظاهر می‌شود. با رخ دادن ناپایداری فلاتر، دیگر مدل کاهش نیروی پسا برحسب افزایش سرعت به صورت یک تابع نمایی ($F \propto U^{2+v}$) اعتبار خود را از دست می‌دهد. زیرا با شروع شدن پدیده فلاتر یک ناپایداری نوسانی در ساختار مقابل جریان اتفاق می‌افتد. این نوسان در ابتدا به شکل خطی است و در ادامه به صورت کاملاً غیر خطی و در اصطلاح پدیده به یک پدیده آشوبناک تبدیل می‌شود. جهت بررسی نحوه کاهش نیروی پسا بر حسب افزایش سرعت جریان در ساختارهای انعطاف‌پذیر از یک عدد بی‌بعد به نام عدد کوشی^۵ استفاده می‌شود. عدد کوشی به صورت نسبت نیروی اینرسی به نیروی الاستیک تعریف می‌شود [۳]:

$$C_Y = \frac{\rho C_D W L^3 U^2}{2EI} \quad (1)$$

که در آن، U سرعت جریان، L و W طول و عرض ساختار انعطاف‌پذیر است. همچنین، E و I به ترتیب نشان‌دهنده مدول الاستیسته و ممان اینرسی ساختار انعطاف‌پذیر است. حال با تعریف این عدد بی‌بعد می‌توان تقسیم‌بندی برای حالت پایدار و ناپایدار انجام داد. در شکل ۸ این تقسیم‌بندی به نمایش گذاشته شده است. ناحیه کاهش نیروی پسا به دو بخش پایدار و ناپایدار تقسیم می‌شود. در بخش پایدار رابطه توانی ووگل برای کاهش درگ برقرار است. بخش ناپایدار به دو قسمت پررودیک و آشوبناک تقسیم می‌شود. در ناحیه پررودیک کاهش پسا با

4. Flutter
5. Cauchy Number

پسا تا ۵۰ درصد نیز می‌رسد اما پس از آن پدیده فلاتر شروع می‌شود. به دلیل این‌که پدیده فلاتر، یک پدیده ناپایاست. بنابراین، نمی‌توان تخمین خوبی از میزان کاهش پسا پس از شروع این مرحله را با استفاده از تخمین کاهش مساحت و روابط تجربی و هندسی به‌دست آورد. دلیل این امر مشخص نبودن محل دقیق نوک ساختار انعطاف‌پذیر در پدیده فلاتر و نوسانی بودن حرکت آن است. داده‌های ثبت شده در مرحله کاهش میزان سرعت نیز کاهش پسا را نشان می‌دهد. اختلاف اندکی در کاهش پسا در سرعت‌های مشابه هنگام افزایش و کاهش سرعت وجود دارد. دلیل این امر آن است که در مرحله برگشت به دلیل مدت زمان قرارگیری تلق در جریان، اندکی شکل خود را از دست داده و بنابراین میزان تغییر شکل آن اندکی بیشتر است.

در شکل ۱۰، کاهش پسای ساختارهای انعطاف‌پذیر آزمایش شده در مقایسه با ساختارهای صلب به نمایش گذاشته شده است. این نمودار نشان می‌دهد که نتایج آزمایش حاضر کاملاً رفتار مورد انتظار برای کاهش پسا را به خوبی دنبال می‌کند. این تطابق خوب با مقایسه شکل ۲ که از مراجع است و شکل ۱۰ قابل اثبات است.

تلق در مرحله پس‌پردازش داده‌ها به‌راحتی امکان‌پذیر باشد. افزایش فرکانس تا آنجا ادامه می‌یابد که پدیده فلاتر شروع و رشد کند تا به حالت فلاتر آشوبناک برسد. در این حالت فرکانس تونل باد را کاهش می‌دهیم و دوباره داده‌ها را مشابه با آنچه در مرحله افزایش فرکانس ثبت کردیم، ثبت می‌کنیم.

در مرحله پس‌پردازش با استفاده از نمودارهای کالیبره تونل باد، فرکانس توقف در هر مرحله را به سرعت بر حسب متر بر ثانیه تبدیل می‌کنیم. سپس، با استفاده از عکس‌های ثبت شده میزان تغییر مکان نوک‌های تلق را محاسبه می‌کنیم. حال با روابط هندسی می‌توان مقدار تغییر مساحت ساختار مقابل جریان را محاسبه کرد. همچنین، با روابط موجود در مراجع $(C_D = 1.15 + 7.6 \frac{A}{A_{XS}})$ میزان ضریب پسا جدید تلق تغییر شکل داده قابل محاسبه است [۴]. در نهایت نیروی پسای جدید و میزان کاهش پسا به‌دست خواهد آمد.

نتایج

در جدول ۲ نتایج به‌دست آمده از پس‌پردازش داده‌های ثبت شده، بیان شده است. از داده‌های این جدول می‌توان دریافت که با افزایش سرعت، میزان کاهش پسا افزایش می‌یابد. کاهش

جدول ۲- مقادیر پارامترهای حاصل از تلق صحافی قرار گرفته در جریان تونل باد.

	Frequency	Flow Velocity (m/s)	Reduction_Y1 (cm)	Reduction_Y2 (cm)	Total Length Reduction (m)	Area Reduction	Cd	Drag-ref	Drag-new	Dag-reduction	Dag-reduction (%)	
Increase	0	0	0	0	0	0.0072	1.492	0	0	0	0	
	2	0.3	0.178	0.112	0.0029	0.007026	1.484	0.000580 ¹	0.000562935	1.71E-05	2.96	
	4	0.4	0.802	0.723	0.01525	0.006285	1.449	0.001031 ³	0.00087399	0.00015728	15.25	
	6	0.51	1.689	1.612	0.03301	0.0052194	1.398	0.001676 ⁶	0.001138662	0.00053779	32.08	
	8	1.59	2.232	2.302	0.04534	0.0044796	1.363	0.0162947	0.009259996	0.00703472	43.17	
	10	2.41	2.768	2.724	0.05492	0.0039048	1.336	0.0374358	0.018172759	0.01926300	51.46	
	12	5.02	flutter									
	13	6.87	flutter+									
	14	8.44	flutter-chaos									
	Decrease	13	6.87	flutter+								
12		5.02	flutter									
10		2.41	2.792	2.803	0.05595	0.003843	1.333	0.0374358	0.017845832	0.01958992	52.33	
8		1.59	2.302	2.288	0.0459	0.004446	1.361	0.0162947	0.009179777	0.00711494	43.66	
6		0.51	1.688	1.791	0.03479	0.0051126	1.393	0.0016765	0.001111315	0.00056514	33.71	
4		0.4	1.004	1.062	0.02066	0.0059604	1.433	0.0010313	0.000820028	0.00021124	20.48	
2		0.3	0.388	0.286	0.00674	0.0067956	1.473	0.0005801	0.000540459	3.96E-05	6.83	
0		0	0.012	0.01	0.00022	0.0071868	1.491	0	0	0	0	

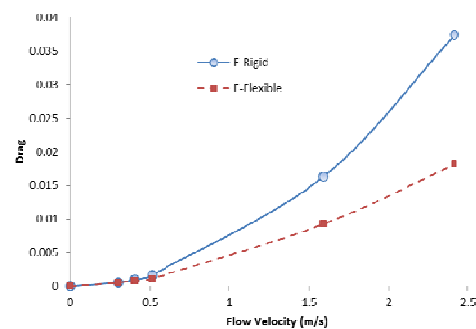
جمع بندی و نتیجه گیری

در این پروژه سعی شده که زیرموضوع کاهش پسا در ساختارهای انعطاف پذیر از مباحث مطرح شده در شاخه کنترل جریان سیال به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. ابتدا مروری بر کارهای انجام شده در این زمینه مطرح شد. آزمایش مورد نظر در تونل باد و تلق صحافی به عنوان ساختار انعطاف پذیر انجام شد. نتایج حاصل کاملاً منطبق بر یافته های پیشین محققان است. به طوری که آزمایش طراحی شده تا ۵۰ درصد کاهش نیروی پسای ساختار انعطاف پذیر با افزایش سرعت جریان را نشان می دهد. این موضوع به دلیل تازگی، امکانات موجود و با توجه به نتایج به دست آمده در پروژه حاضر، قابلیت بررسی و مطالعه گسترده بر روی آن را دارد. بررسی دقیق و روشن ساختن جنبه های مختلف این موضوع می تواند در به کارگیری این قابلیت الهام گرفته شده از طبیعت در صنعت های گوناگون ساخته دست بشر بسیار مفید واقع شود.

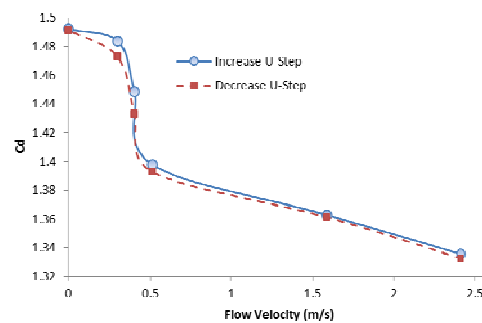
مراجع

- [1] Hassani, M., Elastic Reconfiguration of Bending and Twisting Rods in Air Flow, (PhD Thesis) Ecole Polytechnique de Montréal, Montreal, Quebec, Canada, 2016.
- [2] Bhatiy, A., Sawanniy, R., Kulkarni, K. and Bhardwaj, R., "Role of Skin Friction Drag during Flow-Induced Reconfiguration of a Flexible Thin Plate", *Accepted for publication in Journal of Fluids and Structures*, Dec 2017.
- [3] Langre, E., Gutierrez, A. and Cossé, J., "On the Scaling of Drag Reduction by Reconfiguration in plants", *Comptes Rendus Mecanique*, Vol. 340, 2012, pp. 35-40.
- [4] Gosselin, F., De Langre, E. and Machado-Almeida, B., "Drag Reduction of Flexible Plates by Reconfiguration", *Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press (CUP)*, Vol. 650, 2010, pp. 319-341.
- [5] Denny, M. and Gaylord, B., "The Mechanics of Wave-swept Algae", *Journal of Experimental Biology*, Vol. 205, No. 10, 2002, pp. 1355-1362.
- [6] Harder, D.L., Speck, O., Hurd, C.L. and Speck, T., "Reconfiguration as a Prerequisite for Survival in Highly Unstable Flow-dominated Habitats", *Journal of Plant Growth Regulation*, Vol. 23, No. 2, 2004, pp. 98-107.
- [7] de Langre, E., "Effects of wind on plants", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 40, 2008, pp. 141-168.
- [8] Koizumi, A., Motoyama, J., Sawata, K., Sasaki, Y. and Hirai, T., "Evaluation of Drag Coefficients of Poplar-tree Crowns by a Field Test Method", *Journal of Wood Science*, Vol. 56, No. 3, 2010, pp. 189-193.
- [9] Gosselin, F. and de Langre, E., "Drag Reduction by Reconfiguration of a Poroelastic System", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 27, 2011, pp. 1111-1123.

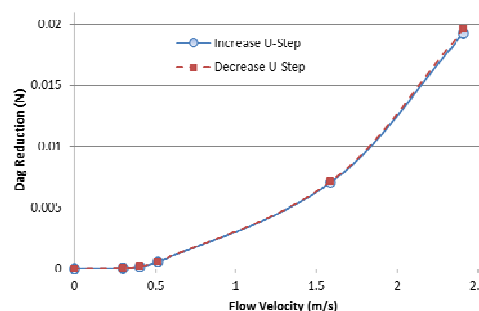
در شکل ۱۱، نحوه تغییر کاهش ضریب پسا با افزایش سرعت نشان داده شده است. نکته جالب، نحوه تغییر این ضریب است که در سرعت های پایین، کمتر به تغییر سرعت واکنش نشان نمی دهد ولی با زیاد شدن سرعت ناگهان افزایش می یابد. با نزدیک شدن به محدوده فلاتر این روند دوباره کاهش می یابد. در واقع با نزدیک شدن به محدوده فلاتر دیگر کاهش مساحت در مقابل جریان چشمگیر نیست و انتهای تلق شروع به نوسان می کند. بنابراین، این رفتار کاهش مساحت بر روی رفتار ضریب پسا تأثیر می گذارد. شکل ۱۲، کاهش نیروی پسا را در هر دو مرحله کاهش و افزایش سرعت را به نمایش گذاشته است. همان طور که در توضیح جدول ۲ گفته شده تفاوت رفتار این دو نمودار کاملاً قابل توجیح است و رفتار صحیح کاهش پسا با افزایش سرعت را نشان می دهد.



شکل ۱۰- کاهش پسای ساختارهای انعطاف پذیر آزمایش شده در مقایسه با ساختارهای صلب.



شکل ۱۱- کاهش پسای ساختارهای انعطاف پذیر آزمایش شده در مقایسه با ساختارهای صلب.



شکل ۱۲- کاهش نیروی پسا در دو مرحله کاهش و افزایش سرعت برای ساختارهای انعطاف پذیر آزمایش شده.

- [13] De-langre, E., "Methodological Advances in Predicting Flow-induced Dynamics of Plants Using Mechanical-engineering Theory," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 215, No. 6, 2013, pp. 914-921.
- [14] Leclercq, T., Peake, N. and de Langre, E. "Does Flutter Prevent Drag Reduction by Reconfiguration?", *Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 474 (2209): 20170678, January 2018.
- [10] Beeby, S.P., Tudor, M.J. and White, N.M., "Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, 2006, pp. 175-195.
- [11] Weissenbock, N.M., Weiss, C.M., Schwammer, H.M. and Kratochvil, H. "Thermal Windows on the Body Surface of African Elephants (*Loxodonta africana*) Studied by Infrared Thermography", *J. Therm. Biol.*, Vol. 35, No. 4, 2010, pp. 182-188.
- [12] Mills, Z.G., Aziz, B. and Alexeev, A., "Beating Synthetic Cilia Enhance Heat Transport in Microfluidic Channels", *Soft Matter*, Vol. 8, No. 45, 2012, pp. 11508-11513.