



## مطالعه عددی و تجربی اثر نفوذپذیری پارچه بر پسای یک چتر فرود

ایمان لاریبی، فائزه راثی مرزآبادی\*، فخری اعتمادی

پژوهشگاه هوا فضای وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱ تیر ۱۳۹۴  
بازنگری: ۱۶ آذر ۱۳۹۴  
پذیرش: ۴ بهمن ۱۳۹۴  
ارائه آنلاین: ۲۲ آبان ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

چتر  
پسا  
شبیه‌سازی عددی  
تونل باد  
نفوذپذیری

**چکیده:** معیار اصلی طراحی چتر، مقدار نیروی پسا تولیدی است. یکی از فرضیات متداول در مدل‌سازی چترها، ساده‌سازی هندسی چتر پربادشده و فرض نفوذناپذیری برای کانوپی چتر است. در این پژوهش تأثیر این فرض در کاهش صحت مدل‌سازی عددی بررسی شد. با اعمال ضرایب معادله اصلاح‌شده داریسی از نتایج آزمایش انجام‌گرفته بر روی پارچه کانوپی، شبیه‌سازی عددی یک نمونه کانوپی ساده‌سازی شده انجام شد. با در نظر گرفتن نفوذپذیری و اثرات آن بر حوزه جریان، صحت شبیه‌سازی عددی بالاتر رفت. در نظر گرفتن فرض نفوذپذیری موجب کاهش ۲۴ درصدی ضریب پسا نسبت به کانوپی نفوذناپذیر شد. با آزمایش یک کانوپی نیم‌کروی نفوذپذیر و نفوذناپذیر درون تونل باد سرعت‌باین، پسای تجربی چتر اندازه‌گیری شد. با استخراج هندسه کانوپی پربادشده از آزمایش تونل باد، مدل‌سازی عددی با در نظر گرفتن نفوذپذیری کانوپی انجام گرفت و نتایج با آزمایش تجربی صحت‌سنجی شده است. در مقایسه نتایج مدل‌سازی کانوپی نفوذناپذیر و نفوذپذیر، مقدار نیروی پسا، تفاوت توزیع فشار و خطوط جریان پیرامون کانوپی‌ها بیانگر میزان اهمیت در نظر گرفتن نفوذپذیری در شبیه‌سازی عددی کانوپی چتر است.

### ۱- مقدمه

آزمایش چترها در تونل باد، دارای پیچیدگی‌های زیادی است [۳]. ساختار منعطف پارچه و نسبت انسداد بالا [۴] و نوسان بالای چتر از جمله این مشکلات است [۳]. روش‌های متفاوتی جهت مقید کردن کانوپی درون تونل باد پیشنهاد شده است. هاک [۵] با یک بالانس داخلی، نیروی پسا وارد بر چند چتر را در سرعت‌های بالای زیرصوت اندازه‌گیری کرده است. با عبور بالانس از دریچه تنفسی کانوپی، نوسان‌ها نیز کنترل شده‌اند. هنریش [۶] یک میله نگه‌دارنده از دریچه تنفسی کانوپی عبور داده و نیروسنجی به انتهای میله نگه‌دارنده متصل نموده است. اندازه‌گیری‌ها بر دو مدل فلزی و پارچه‌ای، در تونل باد زیرصوت انجام شده است. جهت جلوگیری از لرزش انتهای میله، توسط دو کابل ضربدری مقید شده است. نیک [۷] جهت مقید کردن نوسان چتر در تونل باد عمودی از یک میله عبوری بر کانوپی استفاده کرده است. همچنین لی [۸] نیز جهت مقید کردن حرکت کانوپی، یک میله را از درون دریچه تنفسی عبور داده است.

یکی از اصلی‌ترین ویژگی‌های پارچه چترها، نفوذپذیر بودن پارچه کانوپی است که موجب پایدار شدن کانوپی می‌شود ولی پسا را کاهش می‌دهد [۳]. در شبیه‌سازی‌های عددی جهت ساده‌سازی حل، پارچه کانوپی را در اکثر موارد صلب و نفوذناپذیر در نظر می‌گیرند [۱۰، ۱۱]. بنابراین فرض نفوذپذیری دقت شبیه‌سازی و محاسبه پسا را بهبود می‌بخشد. برای اولین بار وانگ به کمک یک روش نیمه‌تجربی و حلگر المان محدود، نفوذپذیری چتر را مدل کرد [۱۲]. وی ضرایب نفوذپذیری پارچه کانوپی را برای سرعت‌های بالای فرود محاسبه کرد. با نسبت دادن این ضرایب به مدل چتر استفاده‌شده

چترها از اصلی‌ترین کاهنده‌های سرعت در کاربردهای مختلف هوایی و فضایی محسوب می‌شوند. تعیین دقیق ضرایب ایرودینامیکی چترها در روند طراحی مجموعه کاهنده سرعت دارای اهمیت بسزایی است. شکل و جنس کانوپی<sup>۱</sup> چتر از عوامل تعیین‌کننده اصلی در طراحی چتر است که بر ضرایب ایرودینامیکی آن تأثیرگذار است. ضریب پسای یک چتر که در تعیین میزان سرعت فرود، شتاب و نیروهای وارد بر کانوپی چتر در طی فرآیند باز شدن و مشخص کردن ابعاد و اندازه چتر اهمیت دارد، به عوامل مختلفی همچون نوع چتر، میزان نفوذپذیری پارچه، سرعت حرکت و موارد دیگر بستگی دارد. یکی از روش‌های مطالعه چترها انجام آزمایش‌های پرتابی است. در این آزمون‌ها چتر با ابعاد واقعی و یا مقیاس‌شده را به وسیله راکت پرتاب و یا از یک هواگرد در آسمان رها می‌کنند [۱]. در آزمایش‌های پروازی، تمامی پارامترهای موردنیاز، مانند توزیع فشار کانوپی قابل دسترسی نیست. روش دیگر جهت تخمین ضرایب ایرودینامیکی چترها، انجام شبیه‌سازی عددی است که توسعه و افزایش دقت آن، در جهت کاهش هزینه‌های آزمایش‌ها دارای تأثیر بسیار مثبتی است. در شبیه‌سازی‌های عددی چترها، در نظر گرفتن دقیق شرایط برهمکنش سازه-سیال در فرآیند پرباد شدن چتر، دارای پیچیدگی بسیاری است که در این زمینه، تحقیقات متعددی انجام‌گرفته است [۲].

### 1 Canopy

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rasi@ari.ac.ir

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = - \left( \frac{\mu}{\alpha} U + \frac{1}{2} C_2 \rho U^2 \right) \quad (1)$$

در جریان‌های با لزجت بالا، ترم دوم معادله (۱) در نظر گرفته نمی‌شود و معادله بلیک-کوزنی (رابطه (۲))، برای جریان آرام در محیط متخلخل نازک به‌دست می‌آید [۱۲].

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = - \frac{\mu}{\alpha} U \quad (2)$$

با استفاده از دستگاه سنجش نفوذپذیری منسوجات، آزمایش نفوذپذیری بر روی پارچه استاندارد MIL-C-7020 چتر انجام شد و ضریب نفوذپذیری معادله بلیک-کوزنی محاسبه شده است [۱۶].

### ۳- پسای تجربی چتر

تونل باد مادون صوت به کار گرفته شده، در دانشگاه امیرکبیر از نوع مدارباز با ابعاد محفظه آزمایش  $100 \times 100 \times 180$  سانتی متر و سرعت هوا درون تونل از ۵ الی ۱۰۰ متر بر ثانیه قابل تنظیم است.

به منظور بررسی پسای یک کانوپی نفوذپذیر از یک چتر مدل کوچک با کانوپی نیم‌کروی و دریچه تنفسی ده درصد استفاده شده است. دو کانوپی با جنس متفاوت ساخته شد. در کانوپی نفوذپذیر از پارچه استاندارد MIL-C-7020 استفاده شده است و مدل نفوذناپذیر از پارچه‌ای با نفوذپذیری نزدیک به صفر ساخته شده است. اثرگذارترین پارامتر در محاسبه اندازه مدل، محدودیت‌های به‌وجودآمده توسط ابعاد محفظه آزمون تونل باد است. برای شبیه‌سازی کامل جریان آزاد باید اندازه مدل را به نحوی انتخاب کرد که اثر وجود دیواره‌های تونل تا حد امکان کاهش یابد و میزان انسداد<sup>۳</sup> در حد مجاز باقی بماند. از طرفی مدل نباید به‌حدی کوچک باشد که بر رفتار طبیعی پارچه کانوپی و میزان انعطاف‌پذیری و سختی آن اثر گذاشته شود [۳]. قطر پرباد شده کانوپی به‌گونه‌ای ساخته شد که ضریب انسداد زیر ۰.۵٪ است و پارچه رفتار منعطف خود را از دست نداده است. مشخصات چتر در جدول ۱ آورده شده است. در چترها سطح مرجع بی‌بعدسازی، مساحت سطح چتر با احتساب هواکش است [۳].

جهت اندازه‌گیری نیروی پسا، نیروسنج کششی زمیک<sup>۴</sup> با ظرفیت ۱۰ کیلوگرم انتخاب شده است. ابعاد این نیروسنج  $5 \times 7/6 \times 1/2$  سانتی متر است. همچنین جهت قرائت خروجی نیروسنج یک نمایشگر دیجیتالی ۲۴ بیتی با نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ Hz با حساسیت ۱ mv/v الی ۱۶ mv/v استفاده شده است.

حین انجام آزمایش چتر در تونل باد، بخشی از جریان پیرامون چترها امکان عبور از درون کانوپی را پیدا نمی‌کند لذا به اطراف منحرف شده و در لبه جلویی چتر از بدنه جدا شده و گردابه‌های نوسانی تشکیل داده می‌شود، این جدایش سبب نوسان فشار یک‌درمیان در دو سمت چتر می‌شود که این

در بازیابی وایکینگ<sup>۱</sup> روند باز شدن کانوپی در زمان‌های متفاوت بررسی شده است. مدل‌سازی وی با استفاده از روش المان محدود صورت گرفته است. یو [۱۳] نیز با استفاده از ضرایب نفوذپذیری مرتبه دوم استخراج شده توسط وانگ، باز شدن یک چتر C9 را به روش المان محدود مدل‌سازی کرد. سپس مدلی از کانوپی پرباد شده را به کمک نرم‌افزار CFX و استفاده از حجم متخلخل مدل‌سازی کرده است. به‌علت ناتوانی نرم‌افزار CFX در مدل‌سازی سطح متخلخل، کانوپی مدل‌سازیشده دارای ضخامت در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی نفوذپذیری در سرعت پایین و مراحل فرود نهایی نیازمند بررسی در شرایط کاری و فشارهای مرتبط با سرعت‌های پایین خواهد بود. در پژوهش حاضر، به مدل‌سازی عددی یک چتر فرود با در نظر گرفتن اثرات نفوذپذیری برای کانوپی چتر پرداخته شده و نتایج با داده‌های حاصل از تونل باد مقایسه شده است.

### ۲- نفوذپذیری

هوای عبوری از چتر به دو بخش تخلخل هندسی و گذرایی از درون پارچه تقسیم می‌شود [۳]. تخلخل هندسی ناشی از سوراخ‌ها و منافذ و دریچه تنفسی تعبیه شده در هندسه چتر است و به‌عنوان نسبتی از همه سطوح باز یا رخنه‌ها به سطح کانوپی کامل است. گذرایی ناشی از جنس کانوپی و نفوذ و عبور هوا از درون پارچه آن است. گذرایی در شرایط سرعت و فشاری فرودی متفاوت متغیر است [۱۴].

الیاف پارچه چترها به‌گونه‌ای تنیده می‌شوند که هوا در مقیاس میکروسکوپی امکان عبور از بین آن‌ها را پیدا می‌کند. با علم بر همگنی منافذ ریز پارچه، می‌توان از معادلات حاکم بر محیط‌های متخلخل همگن، برای مدل‌سازی جریان عبوری در مقیاس ماکروسکوپی استفاده کرد.

مشهورترین مدل شبیه‌سازی محیط‌های متخلخل مدل‌داری است، با توجه به کمبودهایی که مدل‌داری در توصیف محیط‌های متخلخل متفاوت داشت، دانشمندان را بر این واداشت که یک سری جملات غیرخطی که اعتبار آن‌ها از آزمایش به‌دست‌آمده بود را به مدل‌داری اضافه کنند. یکی از اصلاحات انجام شده بر روی مدل‌داری، مدل ارگان<sup>۲</sup> است [۱۵].

رابطه ارگان (۱)، اصلاح شده رابطه داری برای محیط‌های متخلخل نازک است. این رابطه، بیانگر افت فشار در محیط‌های متخلخل نازک است.  $(I/\alpha)$  ضریب نفوذپذیری و  $(C_2)$  ضریب افت فشار است. همچنین مقدار  $\mu/\alpha$  در معادله را  $C^{R1}$  یا ضریب مقاومت خطی و جمله  $\frac{1}{2} C_2 \rho U$  را ضریب مقاومت درجه دو یا  $C^{R2}$  می‌نامند. جمله  $C^{R1}$  ناشی از لزجت و جمله  $C^{R2}$  ناشی از نیروهای اینرسی است.

1 Viking  
2 Ergun

3 Blockage  
4 ?

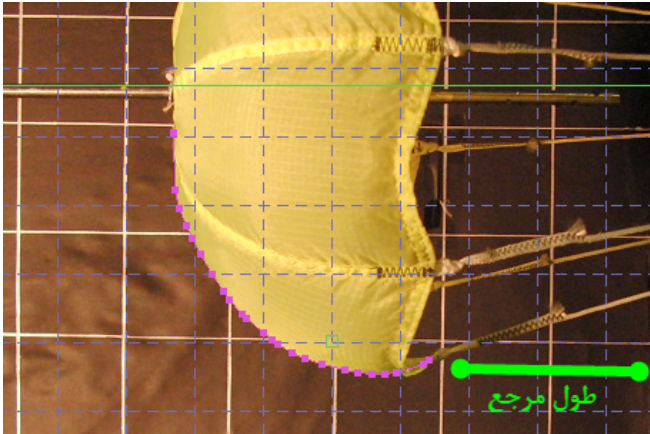


Fig. 2. Profile extraction of inflated canopy  
شکل ۲: استخراج پروفایل کانوپی پربادشده

#### ۴- مدل سازی عددی چتر

جهت شبیه سازی کانوپی یک چتر در حالت پربادشده با در نظر گرفتن تأثیر نفوذپذیری پارچه آن، از نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. کانوپی یک بار با ضرایب نفوذپذیری پارچه متداول MIL-C-7020 و یک بار به صورت نفوذناپذیر شبیه سازی و نتایج آن شامل ساختار جریان و ضرایب ایرودینامیکی با یکدیگر مقایسه شده است.

فرم عمومی معادله مومنتم در نرم افزار فلوئنت به صورت معادله (۳) است [۱۸].

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} + S_i^M \quad (3)$$

جمله چاه  $S_i^M$  در معادله (۲) را می توان به صورت معادله (۴) متناظر با معادله ارگان نوشت [۷].

$$S_i^M = -C^{R1} U_i - C^{R2} |U| U_i \quad (4)$$

مقدار  $U_i$  سرعت سطحی در هر مؤلفه بردار است که در مدل سازی صفحه متخلخل متناظر با پارچه، تنها مؤلفه عمود بر پارچه در نظر گرفته می شود [۷].

با نسبت دادن شرط پرش-متخلخل<sup>۱</sup> به کانوپی، نفوذپذیری بر آن شبیه سازی شده است. با صفر قرار دادن جمله  $C^{R2}$  و نسبت دادن ضریب به دست آمده از آزمایش نفوذپذیری مرجع [۱۶] به  $C^{R1}$ ، معادله بلیک-کوزنی برای شبیه سازی عبور هوا از کانوپی استفاده شد. سپس معادلات پیوستگی و مومنتم با الگوریتم کوپله سرعت و فشار و گسسته سازی پرستو<sup>۲</sup> فشار و مرتبه دوم ممان تا همگرایی باقیمانده ها و ثابت ماندن ضریب پسا حل شده اند. جریان پیرامون چتر به علت هندسه چتر از ابتدا جدا شده و نواحی پشت کانوپی کاملاً در دنباله<sup>۳</sup> قرار دارند. از این رو مفهوم لایه مرزی اهمیت کمتری دارد و پسای شکل اصلی ترین عامل پسا است. مدل توربولانسی همانند

جدول ۱: چتر نصب شده در تونل باد

Table 1. Canopy in wind tunnel

ردیف	عنوان	مقدار
۱	نوع چتر	نیم کروی
۲	تعداد تقسیمات چتر	۸
۳	قطر اسمی	۰/۴۲ متر
۴	قطر کانوپی پربادشده	۰/۲۸ متر
۵	قطر کانوپی ساخته شده	۰/۳۰ متر
۶	سطح مؤثر درگ	۰/۱۰۷ مترمربع
۷	قطر ونت	۴/۲ سانتیمتر

نوسان موجب ارتعاش و نوسان چتر می شود [۳]. به منظور جلوگیری از نوسان چتر در آزمایش تونل باد، کانوپی را می توان به روش های مختلفی درون تونل مقید کرد. یک میله نگه دارنده از پشت دریچه تنفسی، دامنه نوسانات جانبی کانوپی را مقید کرده است. چیدمان و نصب نیروسنج و میله نگه دارنده چتر در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش ها در دو سرعت ۱۲ و ۱۷ متربرثانیه انجام شد. در این محدوده سرعت، رینولدز بین  $2/2 \times 10^5 - 1/6 \times 10^5$  قرار دارد.

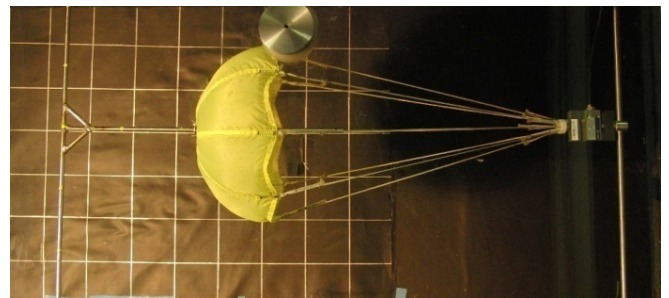


Fig. 1. Inflated canopy in test section

شکل ۱: چتر نصب شده در تونل باد

کانوپی پربادشده هندسه کاملاً نیم کروی ندارد، برای استخراج این پروفایل با قرار دادن طول های مرجع مناسب در کنار کانوپی اقدام به عکسبرداری از زاویه مناسب شد. سپس این عکس ها در نرم افزارهای مناسب جهت تخمین پروفایل کانوپی پربادشده مورد استفاده قرار گرفت. نمونه ای از استخراج پروفایل کانوپی از آزمایش تجربی در شکل ۲ نشان داده شده است. از این پروفایل در مدل سازی عددی استفاده شده است. این کار برای هر دو کانوپی نفوذپذیر و نفوذناپذیر انجام شده است.

جهت آشکارسازی جریان پیرامون کانوپی در تونل باد از روش آشکارسازی به کمک دود استفاده شد. دود تولیدشده به کمک دستگاه برای اپراتور و تجهیزات آزمایشگاه بی خطر بوده و دود سفیدی جهت آشکارسازی الگوی جریان فراهم می کند [۱۷].

1 Porous jump

2 Presto

3 Wake

همان گونه که در شکل ۴ نشان داده شده، پس از بررسی شبکه بندی های متفاوت بی سازمان در حل با شبکه دوم، در مجموع دو میلیون و ششصد هزار المان بی سازمان همراه با شبکه بندی لایه مرزی در دیواره های تونل و اتصالات، مناسب تشخیص داده شده است.

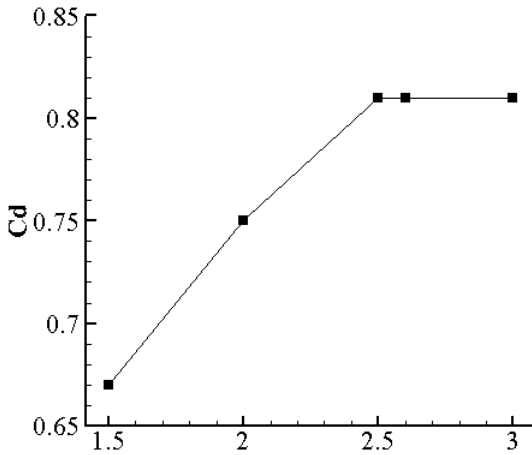


Fig. 4. Mesh independency

شکل ۴: بررسی استقلال از تعداد شبکه در شبکه بندی بی سازمان

### ۵- نتایج

بردار سرعت و خطوط جریان در شکل ۵ عبور هوا از کانوپی نفوذپذیر را نشان می دهد. جریان پشت کانوپی نفوذپذیر پیچیده و از ترکیب چند الگو شکل می گیرد. در ناحیه یک، جدایش جریان که از لبه ی دامنه کانوپی شروع می شود الگوی کلی را شکل می دهد که گردابه های دیگر درون آن قرار می گیرند.

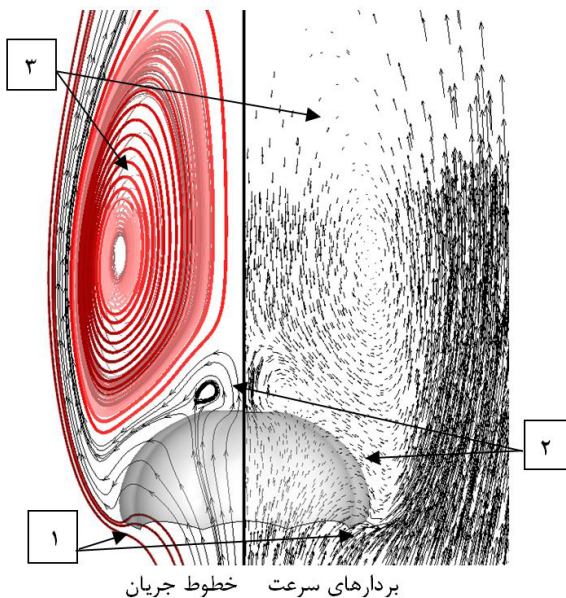
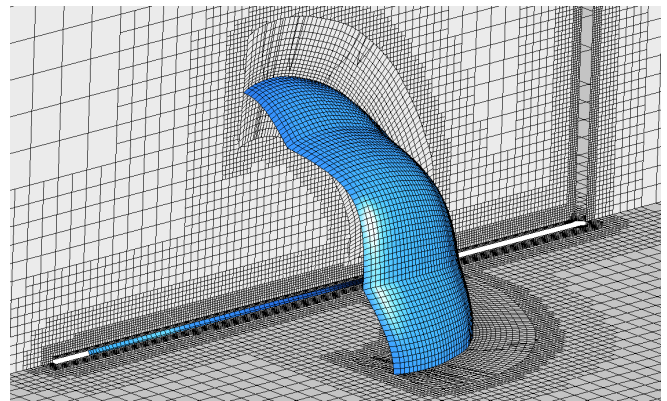


Fig. 5. Flow field around the canopy, 1-Separation region, 2: Flow through canopy and vent, 3: Wake vortex region

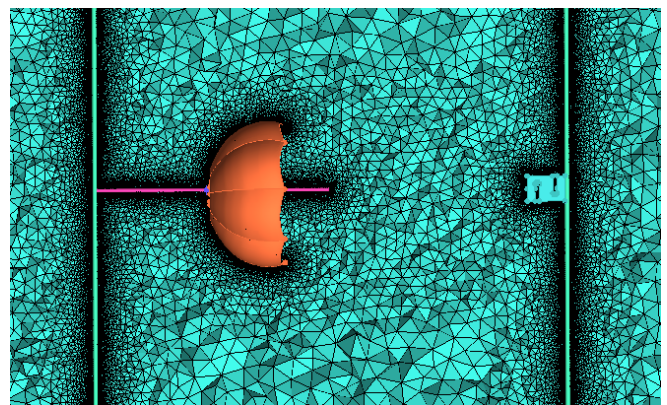
شکل ۵: جریان پیرامون کانوپی نفوذپذیر، ۱: ناحیه جدایش، ۲: ناحیه جریان عبوری از کانوپی و دریچه تنفسی، ۳: ناحیه گردابه ی بزرگ

مراجع [۱۲، ۱۳] K-ε STD جهت مدل سازی آشفتگی انتخاب شده است. شرط مرزی ورودی سرعت<sup>۱</sup> در ابتدای محفظه آزمون و شرط فشار خروجی<sup>۲</sup> در انتها در نظر گرفته شده است.

جهت بررسی اثر نیروسنج و نگهدارنده چتر بر پسای کانوپی، تجهیزات درون محفظه آزمون تست تجربی همراه با کانوپی به صورت سه بعدی مدل سازی شده است. در ابتدای حل از شبکه بندی هیبرید با سازمان-کات سل منطبق بر سطح<sup>۳</sup> استفاده شده است. در این شبکه بندی در نزدیکی کانوپی شبکه بندی با سازمان کیفیت بالا و در فاصله های دورتر شبکه کارترین کات-سل استفاده شده است. این نوع شبکه بندی تعداد شبکه و هزینه محاسباتی را به شدت کاهش می دهد. تنها ضعف این شبکه بندی عدم امکان اعمال شبکه لایه مرزی برای دیواره های تونل و میله ها است. پس از همگرایی، نتایج بر روی یک شبکه بی سازمان با لایه مرزی میان یابی می شود. با ادامه حل بر روی شبکه بی سازمان با تعداد شبکه بالا، دقت جواب افزایش پیدا می کند. نمایی از صفحه میانی شبکه بندی محفظه آزمون و کانوپی در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف- شبکه بندی هیبرید، با سازمان و کات-سل منطبق بر سطح



ب- فضای پیرامون چتر درون محفظه آزمون و میله ها

Fig. 3. Mesh around canopy in test section

شکل ۳: شبکه بندی درون محفظه آزمون و پیرامون کانوپی

- 1 Velocity inlet
- 2 Pressure outlet
- 3 Cut cell Body fit

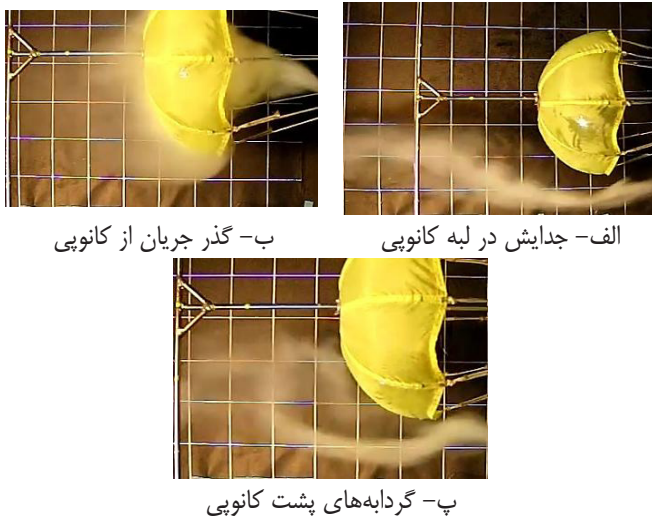


Fig. 7. Smoke Flow visualization around the canopy  
شکل ۷: آشکارسازی جریان پیرامون چتر به کمک دود

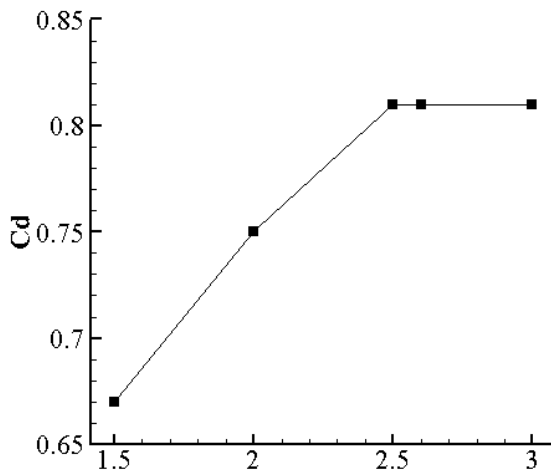


Fig. 8. Experimental and Numerical  $C_d$

شکل ۸: پسای تجربی و عددی

تأثیرگذارند و خود نیز مقداری پسا دارند. تخمین مشخصه‌های توربولانسی، تخمین در ترسیم پروفایل کانوپی پربادشده، غیریکنواختی توزیع سرعت و فشار در محفظه‌آزمون تونل باد و خطاهای مدل‌سازی عددی از علت‌های دیگر این اختلاف می‌باشند. در شکل ۹ مقایسه نتایج آشکارسازی جریان هم‌خوانی خطوط جریان را نشان می‌دهد. خط جریان نمایش داده‌شده بخشی از ناحیه ۱ است و جدایش جریان در ابتدای کانوپی را نشان می‌دهد. بزرگی و قدرت این ناحیه تعیین‌کننده اصلی میزان پسای شکل چتر است.

کاهش پسای چتر نفوذپذیر نسبت به نفوذناپذیر در آزمایش تجربی ۲۱٪ و در مدل‌سازی عددی ۲۴٪ گزارش می‌شود. درون کانوپی یک ناحیه فشار مثبت وجود دارد و در پشت کانوپی ناحیه فشار منفی قرار دارد. این اختلاف فشار موجب شکل‌گیری پروفایل کانوپی و همچنین پسا تولید می‌شود. چتر نفوذپذیر با گذردهی هوا مقداری از افت فشار می‌کاهد و اختلاف فشار بالا

ناحیه دوم شامل جریان پشت کانوپی و دریچه تنفسی می‌شود. در پشت دریچه تنفسی جریانی برگشتی کوچک شکل می‌گیرد که همراه با هوای عبوری از کانوپی بر قدرت و ساختار گردابه ناحیه سوم اثر می‌گذارد. سرعت جریان عبوری از کانوپی بسیار پایین‌تر از سرعت جریان اطراف است. گردابه ناحیه دوم بین مرز درونی ناحیه اول و مرز بیرونی ناحیه سوم قرار دارد. در ناحیه سوم گردابه جریان برگشتی بزرگی شکل می‌گیرد. ساختار گردابه شکل گرفته در ناحیه دوم تحت تأثیر ابعاد دریچه تنفسی و نفوذپذیری کانوپی است، هرچه دریچه تنفسی بزرگ‌تر باشد قدرت این ناحیه بیشتر است و تأثیر بیشتری بر ساختار گردابه ناحیه سوم می‌گذارد. همچنین هرچه سرعت بیشتر باشد، سرعت جریان عبوری از درون کانوپی نیز بیشتر می‌شود و گردابه‌های ناحیه سوم را به بالا حرکت می‌دهد.

جریان و گردابه‌های ناحیه دوم و سوم به شدت بر یکدیگر اثرگذارند. بزرگ شدن جریان برگشتی در پشت دریچه تنفسی یا افزایش نفوذپذیری پارچه کانوپی موجب بزرگ‌تر شدن ناحیه دو می‌شود و گردابه‌های ناحیه سه کوچک‌تر می‌شوند و میزان پسا کاهش پیدا کند. در ناحیه دو کانوپی نفوذناپذیر، جریان از کانوپی عبور نمی‌کند و این ناحیه انرژی کمتری دارد. این امر موجب بزرگ‌تر شدن ناحیه سه و افزایش پسا می‌شود. بنابراین در نظر نگرفتن نفوذپذیری موجب خطا در مدل‌سازی می‌شود. همچنین این امر سبب تفاوت توزیع فشار پیرامون کانوپی نفوذپذیر و نفوذناپذیر می‌شود. توزیع فشار بیرون و درون کانوپی موجب شکل‌گیری پارچه کانوپی می‌گردد. بنابراین شکل پربادشده کانوپی نفوذپذیر و نفوذناپذیر متفاوت است و همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده‌شده، کانوپی نفوذناپذیر گنبدی شکل می‌شود.

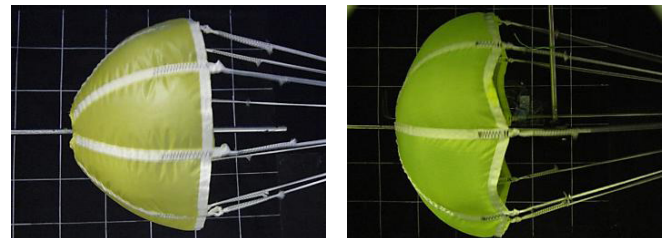


Fig. 6. Effect of permeability on the inflated canopy

شکل ۶: اثر نفوذپذیری بر شکل پربادشده

نتایج آشکارسازی به کمک دود در آزمون تونل باد در شکل ۷ نشان داده‌شده است. سه ناحیه کلی جریان عبوری از درون پارچه کانوپی، گردابه‌های برگشتی پشت کانوپی و جریان جداشده در لبه ابتدای کانوپی نشان داده‌شده است.

نیروی پسای هر دو کانوپی نفوذپذیر و نفوذناپذیر حاصل از نتایج تجربی و مدل‌سازی عددی در شکل ۸ نشان داده‌شده است.

خطای میانگین مدل‌سازی عددی در چتر نفوذناپذیر ۱۱٪ و در چتر نفوذپذیر ۱۶٪ است. این اختلاف علت‌های متفاوتی دارد؛ در نظر نگرفتن بندها در مدل‌سازی عددی یکی از این موارد است، بندهای چترها بر جریان

تجربی، مدل‌سازی کانوپی با فرض نفوذپذیری و نفوذناپذیری انجام شد. کاهش پسای چتر نفوذپذیر نسبت به نفوذناپذیر در آزمایش تجربی ۲۱٪ و در مدل‌سازی عددی ۲۴٪ گزارش شده است. این اختلاف بیانگر میزان اهمیت در نظر گرفتن نفوذپذیری در بررسی پسای چتر است. در نظر گرفتن نفوذپذیری موجب نزدیکی نتایج تجربی و عددی شده است و دقت شبیه‌سازی عددی را بالا برده است.

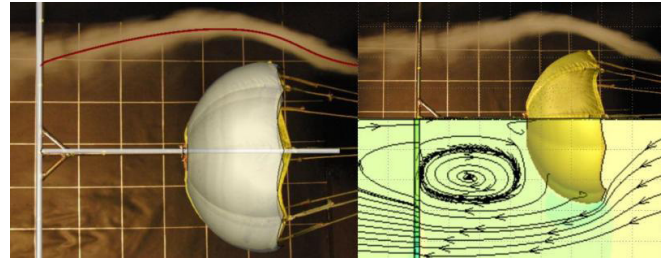


Fig. 9. Experimental flow visualization and CFD results

### شکل ۹: مقایسه نتایج آشکارسازی تجربی و عددی

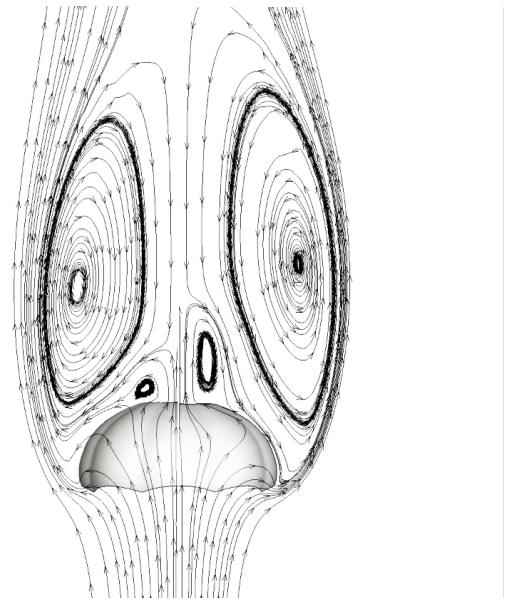
و پایین کانوپی کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه محدوده کم‌فشار تشکیل شده پشت چتر در کانوپی نفوذپذیر، کمتر از کانوپی نفوذناپذیر است و این موجب می‌شود اختلاف فشار کمتر و در نتیجه نیروی پسا کمتری ایجاد کند. با فرض شکل پربادشده یکسان کانوپی نفوذپذیر و نفوذناپذیر؛ همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، در کانوپی نفوذناپذیر، به دلیل اختلاف فشار بین سطوح کناری کانوپی و محدوده پشت آن، هوا از اطراف کانوپی دور می‌زند و گردابه‌های بزرگی را ایجاد می‌کند. همین گردابه‌ها در کانوپی نفوذپذیر هم ایجاد می‌شوند؛ اما نفوذپذیری و گذر هوا، اختلاف فشار بین جریان اطراف و پشت کانوپی را کمتر کرده و گردابه‌ها را ضعیف و کوچک‌تر می‌کند همچنین گردابه‌ها با کانوپی فاصله دارند بنابراین نیروی کمتری را ایجاد می‌کند.

### تشکر و قدردانی

از مساعدتهای جناب دکتر محمود مانی جهت فراهم آمدن امکان استفاده از تونل باد دانشکده هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر صمیمانه تشکر و قدردانی می‌گردد.

### منابع

- [1] Rasi Marzabadi, F., R. Meshkani, H. Pouryavi, M.A. Farsi and M. Ebrahimi, "Study of Recovery System Performance of a Sounding Rocket Using Launching Tests," *Journal of Space Science and Technology*, 7.2 (2014). (In Persian)
- [2] Takizawa, K. and T. E. Tezduyar, "Computational Methods for Parachute Fluid-Structure Interactions", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 19.1 (2012): 125-169.
- [3] Knacke, T. W., "Parachute Recovery Systems Design Manual", Nava Weapons Center, 1991.
- [4] Rezai, M. Dastjerdi, A. and Shirvani, H. "Experimental investigation of a cross type parachute" *11th Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, 2012.
- [5] Haak, E. and R. Hubert, "Drag and Stability of Guide Surface, Ribbon, and Ringslot Parachutes at High Subsonic Speeds", *DTIC Document*, 1965.
- [6] Heinrich, H. G. and E. L. Haak, "Stability and Drag Of Parachutes With Varying Effective Porosity", *AFFDL-TR-71-58*, University of Minnesota, 1971.
- [7] Knacke, T. W., "Model Parachutes, Comparison Tests of Various Types", 1949.
- [8] Li, Y., M. Xiao and L.-j. CHENG, "Experimental investigation on the flow-field of different vent canopy [J]", *Acta Aerodynamica Sinica*, 1 (2008): 003. (in Chinese)
- [9] Cruz, J. R., R. E. Mineck, D. F. Keller and M. V. Bobskill, "Wind tunnel testing of various disk-gap-band parachutes", *AIAA paper*, 2129 (2003).
- [10] Sahu, J., H. L. Edge, K. R. Heavey, K. R. Stein, R. J. Benney and S. R. Chakravarthy, "Comparison of Numerical Flow Field Predictions for Army Airdrop



الف- کانوپی نفوذناپذیر      ب- کانوپی نفوذپذیر

Fig. 10. Streamlines in mid-plane

### شکل ۱۰: مقایسه خطوط جریان در صفحه میانی

### ۶- نتیجه‌گیری

پسای یک چتر نیم کرووی با دریچه تنفسی ده درصد یک بار از جنس پارچه نفوذپذیر متداول MIL-C-7020 و یک بار با پارچه نفوذناپذیر درون تونل باد مورد آزمایش قرار گرفت. با استخراج پروفایل پربادشده در آزمایش

- con., 2010.
- [15] K. Vafai, "Handbook of porous media": Crc Press, 2009.
- [16] Laraibi, I. and F. Rasi Marzabadi, "Numerical investigation of drag coefficients in 2D parachute-like bodies with permeability assumption", *Modares Mechanical Engineering*, 15.4 (2015): 188-194. (In Persian)
- [17] Laraibi, I. and Saket, M. "Smoke generator for flow visualization in low speed wind tunnel", *HAC2012*, Tehran, 2012.
- [18] "Fluent User's Guide Version 6.2", Fluent Inc., Centerra Resource Park, Lebanon, NH, 2005.
- [11] Izadi, M. J. and M. Dawoodian, "CFD Analysis Of Drag Coefficient Of a Parachute in a Steady and Turbulent Condition in Various Reynolds Numbers", *ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, 2009.
- [12] Aquelet, N. and J. Wang, "Porous Parachute Modelling with an Euler-Lagrange Coupling", *European Journal of Computational Mechanics*, 16.3-4 (2007): 385-399.
- [13] Cheng, H., L. Yu, W. Rong and H. Jia, "A numerical study of parachute inflation based on a mixed method", *Aviation*, 16.4 (2012): 115-123.
- [14] Tutt, B. and R. Charles, "Development of Parachute simulation Techniques in LS-DYNA", *11th LS-DYNA*

Please cite this article using:

I. Laraibi, F. Rasi Marz-Abadi, F. Eatemadi, "Experimental and Numerical Investigation of Fabric Permeability on Drag of Conventional Parachute", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 43-50.  
DOI: 10.22060/mej.2016.848

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



