

به نام خدا

اصول شبیه سازی در آیرودینامیک تجربی

(مجموعه کتاب های آیرودینامیک تجربی، کتاب نخست)

مهندس ارسلان قجر

مهندس رضا شریفی

سرشناسه	:	قجر، ارسلان، ۱۳۵۰-
عنوان و نام پدیدآور	:	اصول شبیه‌سازی در آیرودینامیک تجربی / ارسلان قجر، رضا شریفی.
مشخصات نشر	:	تهران: پژوهشکده سازمان صنایع هوایی، ۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری	:	۱۵۲ ص.: مصور، جدول، نمودار.
فروست	:	مجموعه کتاب‌های آیرودینامیک تجربی؛ کتاب نخست
شابک	:	978-600-93242-3-1 : ۸۵۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی:	:	فیفا
موضوع	:	تونل‌های باد
موضوع	:	آیرودینامیک
شناسه افزوده	:	شریفی، رضا، ۱۳۵۵ -
رده بندی کنگره	:	۵۶۷TL / ت ۹ ق ۳ ۱۳۹۱
رده بندی دیویی	:	۶۲۹/۱۳۴۵۲
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۰۳۹۲۴۱

اصول شبیه‌سازی در آیرودینامیک تجربی
تألیف: مهندس ارسلان قجر، مهندس رضا شریفی

انتشارات پژوهشکده سازمان صنایع هوایی

ویراستار ادبی: کاظم پری‌پیکر

تیراژ: ۱۰۰۰ جلد

قیمت: ۸۵۰۰ تومان

چاپ اول: ۱۳۹۱

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۳۲۴۲-۳-۱

تهران، کیلومتر ۴ جاده مخصوص کرج، بعد از گمرک هوایی مهرآباد

تلفن: ۴۴۶۵۹۸۶۷ ص.پ: ۱۳۴۴۵-۷۶۸

سخن مؤلفین

یکی از مسائل اساسی در آیرودینامیک تجربی، مسئله شبیه‌سازی می‌باشد. در این حوزه معمولاً از یک مدل متشابه با نمونه اصلی که از لحاظ ابعادی در مقیاس کوچکتری ساخته می‌شود، برای انجام تست‌های تونل باد یا مدل پروازی استفاده می‌گردد. تشابه در هندسه امری لازم به شمار می‌آید اما کافی نیست. برای اینکه یک دسته از معادلات حاکم بر یک مسئله فیزیکی برای مسئله دیگر (که همان معادلات بر آن حاکم است) منجر به همان جواب‌ها شود، لازم است که:

(۱) شرایط مرزی بین دو مسئله یکسان باشد که با تشابه هندسی این شرط ارضاء می‌گردد.

(۲) ضرایب ثابت معادلات حاکم در دو مسئله یکی باشد که این ضرایب عبارتند از عدد رینولدز، عدد ماخ، عدد استروهل، عدد فرود و ...

این ضرایب، ضرایب مقیاس‌بندی نامیده می‌شوند. امکان تشابه کامل بین مدل و نمونه اصلی بسیار مشکل می‌باشد، چرا که نیاز به تجهیزات خاص می‌باشد. به عنوان مثال برای دستیابی به اعداد رینولدز بالا در سرعت بالا نیاز به یک تونل باد سرعت بالای چگالی متغیر و یا استفاده از سیالی غیر از هوا و یا سیستم خنک‌کن توان بالا می‌باشد. اما خوشبختانه بسته به هدف تست، بعضی از ضرایب نسبت به ضرایب دیگر از درجه اهمیت کمتری برخوردارند. لذا اگر در شبیه‌سازی دقت کافی صورت نگیرد ممکن است نتایج حاصل از مدل مقیاسی را نتوان به طور صحیحی به نمونه اصلی تعمیم داد و یا حتی ممکن است نتایج غلط گردد.

کتاب حاضر، نخستین کتاب از مجموعه کتب آیرودینامیک تجربی می‌باشد که به تشریح مبانی و اصول تشابه جریان در آزمون‌های تجربی علم آیرودینامیک می‌پردازد. در فصل اول کتاب نخست، تاریخچه تونل باد و نقش اساسی آن در اختراع هواپیما و توسعه آن آورده شده است. در فصل دوم، انواع تونل‌های باد از منظرهای مختلف معرفی شده و کاربردهای آنها توضیح داده شده است. مبانی آیرودینامیک و معادلات حاکم بر جریان سیال در فصل سوم تشریح شده است. در فصل چهارم اصول شبیه‌سازی بین مدل مقیاسی و نمونه اصلی و در فصل آخر، روش‌های تست مدل‌های مقیاسی و ضرایب مقیاس‌بندی آورده شده است.

کتب دیگر این مجموعه که به زودی منتشر خواهد شد، در زمینه‌های اصول طراحی تونل‌های باد سرعت پایین، روش‌های اندازه‌گیری در تونل باد، روش‌های تست در تونل باد سرعت پایین، روش‌های تست دینامیکی در تونل باد سرعت پایین، اصول طراحی تونل‌های

باد سرعت بالا و روش‌های تست در تونل باد سرعت بالا خواهد بود. امید است این مجموعه برای دانشجویان و متخصصین هوافضا مفید واقع شود.

www.ketab.ir

فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
مقدمه	۱.....
فصل اول: تاریخچه تونل باد	۵.....
فصل دوم: معرفی انواع تونل‌های باد	۴۱.....
۱-۲- طبقه‌بندی تونل‌های باد	۴۳.....
۲-۱-۲- طبقه بندی از لحاظ سیکل سیال	۴۳.....
۲-۱-۲- طبقه بندی از لحاظ سیکل گردش جریان	۴۷.....
۲-۱-۲- طبقه بندی از لحاظ ابعاد و شکل هندسی مقطع آزمون	۴۸.....
۲-۱-۲- طبقه بندی از لحاظ محدوده سرعت جریان در مقطع آزمون	۴۸.....
۲-۱-۲- طبقه بندی از لحاظ نحوه نصب بدنه تونل باد	۴۹.....
۲-۱-۲- طبقه‌بندی از لحاظ سطح بهره‌برداری	۴۹.....
۲-۱-۲- طبقه‌بندی از لحاظ مدت زمان کارکرد	۴۹.....
۲-۲- تونل‌های باد هوانوردی	۵۰.....
۲-۲-۱- تونل‌های باد مقیاس کامل	۵۰.....
۲-۲-۲- تونل‌های رینولدز بالا	۵۱.....
۲-۲-۲- تونل‌های باد نشست و برخاست کوتاه / عمودی	۵۲.....
۲-۲-۲- تونل‌های باد پرواز آزاد	۵۳.....
۲-۲-۲- تونل‌های باد عمودی و یا تونل‌های فرچرخ	۵۴.....
۲-۲-۲- تونل‌های پایداری	۵۵.....
۲-۲-۲- تونل‌های ملخ	۵۶.....
۲-۲-۲- تونل‌های پیشراشه	۵۶.....
۲-۲-۲- تونل‌های یخ	۵۷.....
۲-۲-۱۰- تونل‌های باد اغتشاش پائین	۵۸.....
۲-۲-۱۱- تونل‌های باد دو بعدی	۵۸.....
۲-۳- تونل‌های دود	۵۹.....

۶۰.....	۴-۲- تونل‌های باد خودرو
۶۱.....	۵-۲- تونل‌های باد آیرودینامیک
۶۱.....	۶-۲- تونل‌های باد زیست محیطی
۶۴.....	۷-۲- تونل‌های آب
۶۴.....	۸-۲- تونل‌های باد برای اهداف عمومی
۶۷.....	فصل سوم: مبانی آیرودینامیک
۶۹.....	۱-۳- معادلات اصلی آیرودینامیک
۶۹.....	۳-۱-۱- پیوستگی جرم
۷۰.....	۳-۱-۲- معادلات اندازه حرکت
۷۱.....	۳-۱-۳- معادله انرژی
۷۳.....	۳-۲- خواص آب و هوا
۷۳.....	۳-۲-۱- خواص هوا
۷۴.....	۳-۲-۲- خواص آب
۷۷.....	فصل چهارم: تشابه جریان
۷۹.....	۴-۱- تشابه جریان
۸۲.....	۴-۲- نیازمندیهای شبیه سازی برای نیروها و گشتاورها
۸۸.....	۴-۳- عدد رینولدز
۹۱.....	۴-۴- عدد ماخ
۹۴.....	۴-۵- سرعت زوایه‌ای کاهش یافته و عدد استروهمال
۱۰۰.....	۴-۶- عدد فرود
۱۰۲.....	۴-۷- ضریب چگالی نسبی و گشتاور اینرسی جرمی نسبی
۱۰۳.....	۴-۸- پارامترهای خمش و پیچش الاستیک
۱۰۵.....	فصل پنجم: روش های تست مدل و ضرایب مقیاس بندی
۱۱۴.....	۵-۱- مدل های تونل باد ثابت
۱۱۴.....	۵-۱-۱- مدل های صلب
۱۱۷.....	۵-۱-۲- مدل های آیروالاستیک
۱۱۸.....	۵-۲- مدل های پرواز آزاد

- ۱۱۹..... ۵-۲-۱- مدل های تونل فرچرخ
- ۱۲۱..... ۵-۲-۲- مدل های پرواز آزاد تونل باد
- ۱۲۳..... ۵-۲-۳- مدل های رهایش مقیاس کوچک
- ۱۲۶..... ۵-۲-۴- مدل های مقیاس بزرگ
- ۱۲۶..... ۵-۳- قوانین مقیاس بندی برای تست مدل
- ۱۲۷..... ۵-۳-۱- مقیاس بندی فرود
- ۱۳۲..... ۵-۳-۲- مقیاس بندی ماخ

امروزه پس از گذشت بیش از ۱۰۰ سال از پرواز موفقیت‌آمیز اولین هواپیما، انواع مختلفی از هواپیماها با شکل‌های متفاوت وجود دارد. شکل هواپیماها با توجه به ملاحظات از قبیل آیرودینامیک، عملکرد، چابکی، اختفاءپذیری، هزینه ساخت، هزینه بهره‌برداری و زمان تحویل و دیگر ملاحظات مأموریتی تعیین می‌گردد. عملکرد آیرودینامیکی و کنترل پرواز یک هواپیما به شدت به شکل ظاهری آن بستگی دارد. به همین خاطر دقت در به دست آوردن ضرائب آیرودینامیکی از اهمیت بسیار ویژه‌ای در طراحی برخوردار است. اتومبیل‌های بسیار متنوعی وجود دارند که تأثیرات آیرودینامیک خارجی آنها یکی از مسائل مهم در تصمیم‌گیری طراحان می‌باشد. کمپانی‌های سازنده اتومبیل به دنبال این مسئله هستند که چگونه با انتخاب جزئیات شکل خارجی، نیروی پسا و سروصدای داخلی و خارجی اتومبیل را کاهش دهند. شکل زیردریایی و جزئیات سیستم پیشرانده آن برای دستیابی به حداکثر سرعت و حداقل ساختن انرژای مصرفی مورد نیاز برای طراحان بسیار حائز اهمیت می‌باشد. آیرودینامیک در طراحی ساختمان‌ها و پل‌های بزرگ نیز تأثیر به سزایی دارد.

به طور کلی سه روش عمده برای برای دست‌یابی به مشخصه‌های آیرودینامیکی و مکانیک پرواز وجود دارد که شامل روش‌های حل نیمه دقیق، حل عددی و روش تجربی می‌باشد. روش‌های تئوری - محاسباتی (دو روش اول) غالباً ارزانتر بوده در حالی‌که روش‌های تجربی از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است. با به کارگیری روش‌های تئوری و محاسباتی می‌توان هزینه‌های مربوط به روش‌های تجربی را کاهش داد. نتایج تجربی قابل اعتمادترین اطلاعات برای حل مسائل آیرودینامیک می‌باشد. راهکارهای متعددی برای دست‌یابی به این اطلاعات وجود دارد که مهم‌ترین آنها شامل تست‌های پروازی، تست‌های سقوط آزاد، تونل‌های آب، لوله‌های شاک^۱، میزهای آب^۲، پروازهای راکت، پرواز مدل‌ها، دامنه بالستیک^۳ و همچنین تونل‌های باد زیر صوت، نزدیک صوت، گذر صوت و مافوق صوت می‌باشند. هر کدام از این تست‌ها از قابلیت‌ها و توانایی‌های مخصوصی برخوردار بوده ولی هیچکدام از این روش‌ها کامل‌ترین و بهترین نیست.

^۱ - Shock Tubes

^۲ - Water Tables

^۳ - Ballistics Ranges

از ابزارهای اولیه آیرودینامیک تجربی می توان تونل های باد را نام برد. می توان به جرأت گفت بدون استفاده از تونل های باد حتی در آینده نزدیک نیز نمی توان به دامنه وسیعی از جواب هایی که جهت تصمیم گیری طراحی جزئیات برای مسائل عملی آیرودینامیک مورد نیاز است دست یافت. تونل های باد، ابزارهایی سریع، اقتصادی و دقیق در تحقیقات آیرودینامیکی بشمار می رود. هرچند با توجه به توسعه و پیشرفت روز افزون سخت افزار و نرم افزارهای رایانه ای، استفاده از روش های دینامیک سیالات محاسباتی^۱ به مراتب سریع تر و کم هزینه تر نسبت به تونل باد می باشد، اما همچنان از قابلیت اطمینان و اعتماد کمتری نسبت به آن برخوردار است. امروزه تونل های باد به عنوان مهمترین ابزار تعیین خصوصیات و اندازه گیری پارامترهای جریان بوده و استفاده از آن در صنایع هوافضا امری کاملاً الزامیست.

اولین بار برادران رایت برای توسعه کلایدرهایشان و نخستین هواپیمای کنترل پذیر، به طور عملی از تست های تونل باد استفاده کردند. بهمین خاطر آزمایش های آیرودینامیکی از پیشینه تاریخی طولانی مدتی در طراحی و توسعه وسایل پرنده برخوردار است. گسترده گی رژیم های جریان و همچنین مأموریت های مختلف پروازی موجب شده که تونل های باد متعددی طراحی و ساخته شود. تونل های باد نقش انکار ناپذیری در توسعه صنایع هوافضا دارد به همین خاطر است که کشورهای پیشرفته در صنایع هوافضا از تونل های باد بیشتر و با قابلیت های بهتر استفاده می کنند.

به منظور تعیین مشخصه های آیرودینامیکی هواپیماهای با اندازه واقعی و یا تایید این مشخصه ها که توسط روش های تحلیلی، تئوری یا عددی محاسبه گردیده، از داده های تجربی حاصل از آزمون مدل مقیاس بندی شده استفاده می شود. برای استفاده از این داده ها با حداکثر اطمینان از صحت آنها، شرایط شبیه سازی ویژه ای باید رعایت شود. تشابه هندسی یکی از شرایط اساسی می باشد. همچنین رعایت کردن تشابه در مورد زاویه حمله و زاویه سرش جانبی مهم می باشد. اعداد رینولدز، فرود و همچنین عدد ماخ در مورد جریان تراکم پذیر، از پارامترهای مهم برای تست جریان حالت پایا (استاتیکی) و دینامیکی می باشد. تعداد دیگری از پارامترهای شبیه سازی نیز، بسته به اهداف تست و الاستیسیته هواپیما، می تواند مهم باشد.

به طور کلی، هیچ روش تجربی وجود ندارد که تمام نیازمندی های مربوط به پیوستگی داده های بدست آمده از تست تونل باد با داده های پرواز آزاد و یا پیوستگی اطلاعات بدست

^۱ - Computational Fluids Dynamic (CFD)

آمده از تست‌های پرواز آزاد مدل‌های مقیاسی با داده‌های پرواز آزاد نمونه مقیاس کامل را برآورده کند. اغلب تست‌ها طوری طراحی می‌شوند که شرایط ویژه‌ای از شبیه‌سازی لحاظ شده و بقیه شرایط در درجه پایین‌تر اهمیت قرار دارند. به عنوان مثال یک مدل تونل‌باد الاستیک صلب ثابت که در یک محدوده‌ای از زوایای حمله در عدد ماخ و فشار دینامیکی مقیاس کامل تست شده، تأثیرات جرم روی تغییر شکل‌های الاستیک به جز در یک زاویه حمله مربوطه به شرایط پرواز یک‌نواخت افقی پایا، بدرستی نشان نخواهد داد. تأثیرات آیرودالاستیسیته ایرسیایی که در حالت پرواز مانوری اتفاق می‌افتد باید از طریق روابط تئوری در نظر گرفته شود. در یک عدد ماخ در صورتی که الزامات مربوط به تشابه عدد فرود رعایت نشود مقایسه بین مشخصه‌های آیرودینامیکی یک مدل پرواز آزاد با مقادیر مربوطه به مدل‌هایی با مقیاس‌های مختلف و یا مدل مقیاس کامل، مناسب نخواهد بود. تفاوت در عدد فرود می‌تواند به زوایای حمله غیر یکسان منتهی بشود.

هر چند که در میان متون علمی مراجع زیادی در زمینه‌های مشخص و محدود در مورد شبیه‌سازی وجود دارد، یک منبع جامعی مورد نیاز است تا روش‌های متنوع تست‌های مدل تونل‌باد و پرواز آزاد را با در نظر گرفتن نیازمندی‌های شبیه‌سازی، اهداف تست و مقایسه نتایج تست مدل با نتایج تست‌های مقیاس کامل معرفی و خلاصه نماید. در حال حاضر برای انجام تحقیقات در زمینه پایداری، کنترل و کیفیت خوش‌دستی در شرایط پرواز عادی و شرایط پرواز پر خطر، از مدل‌های یک هواپیمای به‌شرفته به صورت کنترل از راه دور، مدل‌های مقیاسی با موتور و یا بدون موتور استفاده می‌شود. یکی از فاکتورهای اولیه مورد نیاز برای مشخص کردن محدودیت داده‌های بدست آمده از مدل، درجه و مرتبه‌ای است که در آن نیازمندی‌های شبیه‌سازی رعایت شده است.

در این کتاب یک بازنگری کامل در مورد نیازمندی‌های شبیه‌سازی برای معمولی‌ترین شرایط تست، از شرایط جریان تراکم‌ناپذیر سرعت پایین تا شرایط مافوق صوت سرعت بالا صورت گرفته است. سیال به صورت محیط پیوسته‌ای فرض شده است که از قوانین گازهای کامل با ثابت گازی آدیاباتیک نامتغیر پیروی می‌کند. نیازمندی‌های شبیه‌سازی با توجه به نیازمندی‌های مقیاس‌بندی، روش‌های تست، شرایط تست و اهداف تست در نظر گرفته شده است. محدودیت‌ها در روش‌های تست نیز با تأکید بیشتر روی مدل پرواز آزاد مشخص شده است.

فرآیند مقیاس‌بندی برای مدل‌های پرواز آزاد در جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر توضیح داده شده است. برای جریان تراکم‌ناپذیر، خصوصیات سینماتیکی با استفاده از

سرعت‌های مقیاس شده از طریق الزامات شبیه سازی عدد فرود (مقیاس بندی فرود)، حفظ شده است. برای جریان تراکم‌پذیر، تأثیرات تراکم‌پذیری با استفاده از سرعت‌های مقیاس شده از طریق الزامات شبیه‌سازی عدد ماخ (مقیاس بندی ماخ) حفظ شده است. به علاوه، جداولی ارائه شده تا امکان دسترسی سریع به نیازمندی‌های مقیاس‌بندی برای مدل‌های پرواز آزاد فراهم گردد و به گونه‌ای بسط داده شده تا نیازمندی‌های عدد فرود و عدد ماخ به طور هم‌زمان فراهم شود.

گرچه این کتاب پارامترهای مربوط به تست مدل‌های دینامیکی را نیز تحت پوشش قرار می‌دهد اما مباحث مربوط به سایر اثرات شبیه‌سازی که ممکن است در موارد خاصی حائز اهمیت باشد، مانند مقیاس‌بندی میرایی لزج در سیستم کنترل مدل با سطوح کنترل آزاد و مقیاس‌بندی پارامترهای فیزیکی در یک تست یخ‌زدگی آورده نشده است.