



بررسی تجربی تاثیر سطح آشفستگی جریان آزاد بر عملکرد یک پهپاد در تونل باد

امیرمهدی صبوریان راد^{۱*}، عبدالعلی حقیری^۲، سجاد درستی^۳

۱- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، مرکز آیرودینامیک قدر

۲- دکتر مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک، استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، مرکز آیرودینامیک قدر

۳- کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک، پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، مرکز آیرودینامیک قدر

*mohamadsadeghghemat@yahoo.com

چکیده

یکی از موضوعات مهم در طراحی، ساخت و بهره برداری از یک جسم پرنده بویژه پهپادها بررسی رفتار آن در شرایط مختلف اعم از مانور، صدمه، جو نامساعد و موارد دیگر می باشد. اینکه رفتار نیروهای آیرودینامیکی و کنترلی وارده بر پرنده در شرایط خارج از نقطه طراحی چگونه بوده و خلبان خودکار می تواند جسم پرنده را به حالت عادی برگرداند. در این تحقیق عملکرد یک پهپاد نسبت به شرایط بد جوی شامل سطوح مختلف آشفستگی جریان آزاد در تونل باد مورد بررسی قرار گرفته است. بطوریکه نیروهای وارد بر مدل نسبت به سطح اغتشاش و زاویه حمله در سرعت های ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه با استفاده از یک بالانس استرین گیجی ۶ مولفه ثبت و ارزیابی گردید. سطح آشفستگی جریان با استفاده از شبکه غیرفعال نصب شده در ابتدای محفظه آزمون در دو سطح ۱۵.۳۸٪ و ۲۴.۵۵٪ تولید شد که مقدار آن با استفاده از سرعت سنج سیم داغ اندازه گیری گردید. نتایج حاکی از تغییرات ضریب برآ و پایداری طولی پرنده در هر دو سرعت با افزایش سطح اغتشاش کاهش یافته است. نکته جالب توجه کاهش نیروی پسا با افزایش سطح اغتشاش بوده که می تواند بدلیل کاهش پسای فشاری سطوح مختلف پرنده باشد.

واژه های کلیدی: پهپاد، ضرایب آیرودینامیکی، سطح آشفستگی، بالانس ۶ مولفه داخلی، سرعت سنج سیم داغ، تونل باد، شبکه تولید آشفستگی

۱- مقدمه

از زمان ظهور هواپیماها، حوادث مختلف هواپیما به طور مداوم رخ می دهد. براساس نتایج آماری می توان دریافت که بخش قابل توجهی از آنها به دلیل شرایط جوی نامناسب بوده است. در دوره ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، مردم از قدرت وحشتناک طبیعت موجود در برابر هواپیماها آگاه شدند و شروع به مطالعه آن کردند [۱-۳]. محققان در آن دوره دریافتند که باد های منتج به حوادث هوایی را می توان به طور عمده به دسته هایی از جمله باد های مداوم، باد های آشفته، باد برشی^۱، باد جانبی^۲، گردابه های ریخته شده توسط ملخ^۳ و انفجار گردابه^۴ تقسیم بندی کرد و برخی اقدامات برای مقابله و کنترل با این محیط های شدید هواشناسی انجام شد [۴].

شروع تحقیق و پژوهش در مورد باد های منتج به حوادث هوایی و تقابل و کنترل آن ها از ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ با شروع پژوهش شبیه سازی آقایان ایوان

و ووفیلد شروع و با پیگیری یک دانشمند ژاپنی، پروفیسور فوجیتا ادامه پیدا کرد [۵،۶]. پس از آن، بسیاری از محققان، کمک های زیادی [۷-۹] کردند تا با تلاش های بی وقفه در دهه گذشت، تقریباً از حوادث هواپیماهای سرنشین دار ناشی از باد جلوگیری شده است.

با پیشرفت فناوری، در سال های اخیر، از هواپیماهای بدون سرنشین (پهپادها) به طور گسترده استفاده شده است. بطور معمول پهپادها نسبت به هواپیماهای سرنشین دار سرعت پایین تر، وزن برخاست سبک تر، ابعاد کوچک تر و بنا به ماموریت ارتفاع پروازی پایین تر و نزدیک سطح زمین دارند، بنابراین این عوامل باعث می شود پهپادها بیشتر در معرض اختلال باد قرار گیرد. وجود شرایط بد جوی موجب دشواری کنترل و سقوط پرنده می شود.

برای کاهش خطرات احتمالی در پرواز پهپاد و افزایش میزان موفقیت در ماموریت آن، بسیار مهم است درک کاملی از چگونگی تاثیر گذاری انواع مختلف بادها بر پهپاد وجود داشته باشد. به طور خلاصه باد مداوم جانبی، می تواند پهپاد را از مسیر مورد نظر خود دور کرده و جریان آشفته ممکن است باعث ایجاد نوسانات و اختلال در وضعیت پهپاد شود که به پایداری پهپاد آسیب برساند. باد برشی خطرناک ترین میدان باد است که می تواند پهپاد را به طور موقت از کنترل خارج نماید. بهترین راه مقابله با باد برشی، اجتناب از آن و لغو ماموریت است [۱۰].

تولید سطح اغتشاش به صورت آزمایشگاهی با روشهای مختلف فعال و غیرفعال انجام می گیرد. در دانشگاه آلبرتا کلنلادا، ۱۹۸۶ چکل^۵ با تولید آشفستگی با استفاده از صفحات سوراخ دار کندی سرعت سوختن احتراق در محفظه یک موتور جرقه ای را بررسی و افزایش داد [۱۱].

روچ^۶ ۱۹۸۶ تولید اغتشاش شبه آیزوتروپیک با استفاده از شبکه را مورد بررسی قرار داد. بطوریکه افت فشار، سطح اغتشاش، سطح انرژی، توابع همبستگی و طول مقیاسها محاسبه و ارزیابی نمود [۱۲]. برمن و مورل^۷ ۱۹۸۳ و سیکوت و همکاران، ۲۰۰۸ با استفاده از شبکه های غیرفعال به صورت تکی و چندتایی با فاصله از هم در امتداد محفظه آزمون و اندازه مش های متفاوت آشفستگی با سطوح مختلف تولید کردند. بطوریکه تاثیر سطح اغتشاش روی یک بدنه چاق و میزان پسا و میدان جریان را مورد مطالعه قرار دادند [۱۳].

ویتا^۸ و همکاران ۲۰۱۸ نحوه تولید سطح اغتشاش توسط شبکه های

^۵ Checkel

^۶ Roach

^۷ Bearman, Morel

^۸ Vita

^۱ Wind Shear

^۲ Gust

^۳ Propeller Vortex

^۴ Down Burst

و طراحی هندسی آن بررسی شد. بدین ترتیب که با نصب شبکه در ابتدای محفظه آزمون و نصب سرعت سنج سیم داغ در فاصله ۵۰ سانتی متر، محل نصب مدل پهپاد، میزان اغتشاش محاسبه گردید. سپس با نصب مدل، نیروهای وارده بر مدل در سه سطح اغتشاش ۰.۷، ۱۰ و ۲۰ درصد با استفاده از یک بالانس استرین گیجی در زوایای حمله مختلف اندازه گیری و تاثیر سطح اغتشاش بر عملکرد پرنده ارزیابی گردید. در این مقاله مطالبی در مورد نحوه طراحی شبکه، مجموع آزمایش، مدل پهپاد و نتایج بدست آمده از انجام آزمایشها ارائه می شود.

۲- تئوری مسئله

در سال های اخیر وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپاد) به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. پهپادهای غیرنظامی معمولاً برای سمپاشی حشره کش، رصد جو و غیره استفاده می شوند، در حالی که پهپادهای نظامی برای هدف گیری، ارتباط و غیره استفاده می شوند. توجه گسترده به پهپادهای کوچک به دلیل اندازه کوچک، هزینه کم و انعطاف پذیری افزایش یافته است.

کنترل پهپاد به دلیل اختلال در محیط جوی دشوار بوده و بر ایمنی پرواز نیز تاثیر می گذارد. همه انواع اختلالات باد می تواند پهپاد را در درجات مختلف تحت تاثیر قرار دهد. پهپادهای کوچک به دلیل وزن سبک و سرعت پایین پرواز راحت تر در معرض باد قرار می گیرند. متأسفانه این اختلالات اجتناب ناپذیر هستند زیرا پهپادها همیشه در محیط های پیچیده با ارتفاعات، دما و قلمروهای مختلف کار می کنند.

در دسته بندی کلی از شرایط محیطی می توان به وزش باد ثابت، جریان برشی ناشی از باد، جریان چرخشی یا آشفتگی جریان آزاد و جریان چرخشی تولید شده توسط عملکرد ملخ اشاره نمود. باد ثابت به میانگین سرعت باد در یک محیط معین نسبت داده می شود که همراه با تغییرات زمانی و مکانی متفاوت است. باد ثابت واقعاً در طبیعت وجود ندارد زیرا فقط مقدار مرجع سرعت باد در یک محیط معین است. مقدار باد ثابت در شرایط زمانی مختلف یا شرایط مکانی متفاوت را می توان با آمار بدست آورد.

جریان برشی به باد ثابتی اطلاق می شود که در طول زمان یا در فضا تغییر می کند. شورای تحقیقات ملی آمریکا^{۱۲} درجه باد برشی را به صورت اختلاف بین دو بردار باد در دو نقطه در فضا تقسیم بر فاصله بین آن دو نقطه تعریف می کند. دلایل زیادی برای باد برشی وجود دارد. در پرواز پهپاد، باد برشی مرسوم در ارتفاع پایین شامل برشی باد از جلو، برشی باد جت شیانگهای، برشی باد ناشی از توپوگرافی و طوفانی است. سرعت باد برشی تابعی از موقعیت مکانی بوده و مدل آن نسبتاً ساده است. فرکانس باد برشی به اندازه جریان آشفته نیست، هر چند ثانیه به اندازه حداکثر فرکانس آن تغییر می کند. در آزمایش شبیه سازی، از تغییر ناگهانی سرعت ثابت باد برای نشان دادن وقوع باد برشی استفاده می شود^[۱۹].

برای هواپیماهای سرنشین دار بزرگ، دنباله چرخشی ناشی از بال هواپیما وجود دارد که به طور قابل توجهی بر روی اجزای دیگر هواپیماهای دیگر تأثیر می گذارد. در مورد پهپاد، به دلیل سرعت پروازی کمتر، دنباله

غیرفعال در طول محفظه آزمون مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نوع و تعداد شبکه، جنس و میزان انسداد شبکه بر سطح اغتشاش تولیدی در فواصل مختلف از ابتدای محفظه آزمون ارزیابی شد^[۱۴]. تورس^۹ و همکارا^{۱۰} در مورد تولید و کنترل سطح اغتشاش در تونل باد تحقیقاتی انجام داد. تجزیه و تحلیل آشفتگی، مفهوم تقارن بازتابی به منظور گروه بندی اغتشاش مختلف تولید شده در محفظه آزمایش تونل باد استفاده شد^[۱۵]. امره و همکاران نحوه اندازه و محاسبه سطح اغتشاش جریان عبوری با استفاده از یک سرعت سنج سیم داغ را تشریح کردند^[۱۶].

صدیقی^{۲۰۲۱} پایان نامه کارشناس ارشد خود را در زمینه مطالعه تجربی شرایط جوی نامساعد بر عملکرد پرواز یک سیستم هوایی بدون سرنشین^{۱۱} در شرایط نشت و برخاست انجام داد. یافته های حاصل از مطالعه حاضر، اهمیت توسعه استراتژی های مؤثر برای اطمینان از عملیات ایمن تر و کارآمدتر سیستم هوایی بدون سرنشین را تحت شرایط جوی نامساعد نشان می دهد^[۱۷].

ولنگ^{۲۰۱۸} ویژگی های طولی آیرودینامیکی و پایداری یک پهپاد با نسبت منطری بالا را نسبت به باد جانبی با شبیه سازی عددی بررسی نمود. نتایج محاسباتی نشان می دهد که نیروهای آیرودینامیکی طولی پهپاد نسبت به باد جانبی تغییر کرده اند. البته با افزایش سرعت باد جانبی، حاشیه پایداری استاتیک کاهش یافت^[۱۸]. همچنین وانگ^{۱۱} در ۲۰۲۰ در مورد کنترل کننده یک پهپاد برای مقابله با انواع مختلف باد در محیط زیست بررسی نمود^[۱۹].

گاوریلویچ^{۱۲} ۲۰۱۷ بهبود عملکرد یک وسیله نقلیه هوایی کوچک بدون سرنشین از طریق برداشت انرژی باد جانبی را بررسی نمود. اذعان داشته که نقش نیروی برآ متناظر زاویه حمله و الیتر بعنوان هدف اصلی در طراحی پهپاد مینیاتوری در چنین شرایطی در نظر گرفته شود. ^[۲۰].

مارتینز^{۱۳} ۲۰۱۵ ارزیابی تجربی اثر وزش باد جانبی بر یک وسیله نقلیه هوایی با نشت و برخاست عمودی را با استفاده از تونل باد انجام داد. نتایج نشان می دهد که اثر وزش باد قابل توجه، بسیار غیر خطی است و به یک نوع منبع اغتشاش محدود نمی شود. بنابراین، در مرحله طراحی این وسایل نقلیه نباید از تأثیر آن غافل شد^[۲۱].

ولنگ و همکاران^{۲۰۱۹} مروری بر اثرات انواع بادها بر روی هواپیمای بدون سرنشین را ارائه دادند. شرایط، سرعت و موقعیت هواپیماهای بدون سرنشین مستعد اختلال باد هستند. انواع، ویژگی ها و مدل های ریاضی باد که تأثیر زیادی بر هواپیمای بدون سرنشین در محیط کم ارتفاع دارند، شامل باد ثابت، جریان آشفته، بسیاری از انواع جریانهای برشی و گردابه های ملخ می باشد. پیشنهاداتی ارائه داده که در چه شرایطی، کدام مدل باد باید به شبیه سازی اضافه شده و چگونه می توان پایداری هواپیمای بدون سرنشین را برای انواع مختلف میدان های باد افزایش داد^[۲۲].

در این پژوهش نحوه تولید اغتشاش همگن توسط یک شبکه غیرفعال

^{۱۱} Gavrilovic

^{۱۲} Martinez

^{۱۳} National Research Council

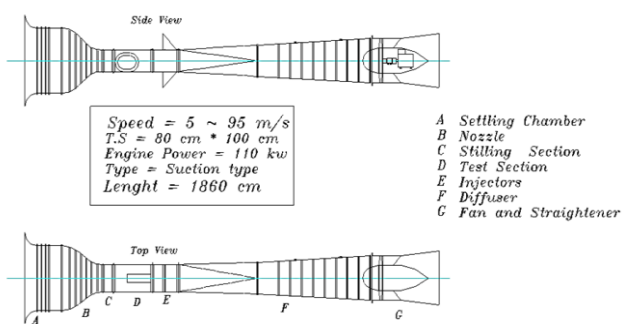
^۹ Torres

^{۱۰} Unmanned-Aerial-System (UAS)

^{۱۱} Wang

تمامی آزمایشها در تونل باد مادون صوت مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر دانشگاه جامع امام حسین(ع) انجام شده است. این تونل از نوع مدار باز مکشی بوده است که با استفاده از فن که در انتهای مدار نصب شده جریان برقرار می گردد. مقطع آزمایش دارای ابعاد با طول ۱۶۰ و عرض ۱۰۰ و ارتفاع ۸۰ سانتی متر می باشد. محدوده سرعت از ۷ تا ۹۰ متر بر ثانیه بوده که با کمک اینورتر می توان سرعت را بطور پیوسته فراهم نمود. تونل باد دارای یک مرحله لانه زنبوری، سه لایه توری و سطح اغتشاش تقریبی حدود ۰.۵٪، میزان غیریکنواختی جریان کمتر از ۲٪ می باشد. سیستم آلفا مکانیزم امکان تنظیم بصورت کنترل از راه دور زاویه پیچ در محدوده ۴۵- تا ۴۵ درجه می تواند فراهم نماید. در شکل ۱ شماتیک مدار تونل باد مادون صوت و مشخصات آن ارائه شده است.

Subsonic Wind Tunnel



شکل ۱- شماتیک تونل باد مادون صوت موجود در مرکز آیرودینامیک قدر

۲-۳- آنومتر سیم داغ^{۱۷}

جهت اندازه گیری نوسانات سریع سرعت یا مولفه های اغتشاشی را با پاسخ فرکانسی بالا از سرعت سنج سیم داغ استفاده می شود. سیم داغ این ابزار یک نوع سرعت سنج است که نحوه عملکرد آن به میزان انتقال حرارت و ثابت بودن دمای سیم بستگی دارد.

زمان پاسخ گویی آنومتر سیم داغ بسیار کوتاه بوده که امکان دریافت نوسانات سریع سرعت را به دستگاه فراهم می کند. دستگاه شامل پرابی است که در بین آن سیم نازکی قرار داده شده است. سیم از جنس تنگستن یا پلاتین نازک می باشد. (قطر ۰.۰۰۰۲ اینچ، طول ۰.۲۵ اینچ) که عبور سیال به راحتی می تواند آن را خنک کند و مقاومت آن را تغییر دهد. به طور کلی سیم داغ به دو گونه شدت جریان ثابت و مقاومت ثابت عمل می کند.

در این تحقیق از سه سیم داغ تک مولفه برای اندازه گیری سرعت لحظه و محاسبه سطح اغتشاش استفاده شده است. جهت ارزیابی چگونگی سطح آشفتگی در محدوده نصب مدل و همگن بودن آن سه سیم داغ تک مولفه به همراه لوله پیتواستاتیک در مرکز محفظه آزمون نصب شده است، شکل ۲.

چرخشی نقش مهمی را ایفا نکرده و گرداب دیگری که توسط ملخ ها ایجاد می شود دارای اهمیت می باشد. هنگامی که ملخ می چرخد، هوای فشرده از فاصله پره های دوار عبور می کند و میدان چرخشی را تشکیل می دهد. این میدان بر عملکرد اجزای پایین دست و شرایط پرواز پهنادهای دیگر نزدیک تأثیر می گذارد [۱۹]

جریان آشفته یک نوسان تصادفی پیوسته است که همیشه با باد ثابت همراه است. تولید جریان آشفته به عوامل زیادی مانند باد برشی، تبادل حرارت، عوامل توپوگرافی و گردابه های سایر هواپیماها مربوط می شود. سطح اغتشاش جریان آزاد متناسب با سطح بی نظمی، نوسان سه بعدی سرعت در هر جریان سیال می باشد. مشخصات آن شامل شدت اغتشاش، سطح انرژی، وابسته به چگونگی آشفته جریان آزاد و تاریخچه جریان می باشد. آشفتگی تولید شده در دنباله ها و هر بدنه پایین دست ممکن است در معرض سطح بالایی از آشفتگی جریان آزاد قرار گیرد [۱۳].

وسایط نقلیه زمینی می تواند از آشفتگی جریان آزاد یا تولید شده توسط دیگر وسایط نقلیه متأثر بشوند. همچنین ساختمانها از با چشه های متعدد آشفتگی مواجه شوند. در توربو ماشینها جریان نزدیک شونده به پره ها می تواند سطح بالایی از آشفتگی را بدلیل اثرات پره های بالادست داشته باشد. هر تونل باد تحقیقاتی به گونه ای دقیق طراحی می شود که دارای جریانی آرام، یکنواخت و حداقل آشفتگی باشد [۱۳].

جریان آشفته با استفاده از سطح آشفتگی^{۱۵} طبقه بندی می گردد. سطح آشفتگی نسبت میانگین حداقل مربعات سرعت^{۱۶} بر متوسط سرعت می باشد. عموماً به سطح آشفتگی بالاتر از ۱۰٪ سطح آشفتگی بالا، حدود ۰.۵٪ سطح پایین و کمتر از ۰.۱٪ را سطح خیلی پایین در نظر می گیرند [۱۳].

هدف از این تحقیق بررسی عملکرد یک پهناده در سطح آشفتگی مختلف در تونل باد نسبت به زاویه حمله در سرعتهای ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه می باشد. در این راستا از مجموعه آزمایش شامل تونل باد، مدل، ابزار اندازه گیری، آلفا مکانیزم و شبکه های تولید آشفتگی مطالبی آورده شده و در نهایت نتایج بدست آمده از آزمایشها و میزان تأثیر سطح آشفتگی بر ضرایب نیرویی و گشتاور بحث و بررسی خواهد شد.

۳- مجموعه آزمایش

جهت انجام این پژوهش و انجام آزمایشهای های تعیین سطح اغتشاش شبکه ها و همچنین دستبازی به توزیع نیرو ها و گشتاور ها و ضرایب آیرودینامیکی طولی و عرضی مدل پهنادهی مد نظر به مجموعه آزمایش اعم از تونل باد مادون صوت، پراب سیم داغ تک مولفه، سیستم دما ثابت، پراب پیتواستاتیک، آلفا مکانیزم، بالانس شش مولفه داخلی، سنسور فشار و مدل پهنادهی و شبکه های تولید اغتشاش نیازمند بوده است. از سرعت سنج لحظه ای سیم داغ برای اندازه گیری سطح اغتشاش تولید شده توسط شبکه ها و بالانس الکتریکی شش مولفه برای اندازه گیری نیروهای وارده بر مدل استفاده شده است.

۱-۳- تونل باد مادون صوت مرکز تحقیقات آیرودینامیک قدر

^{۱۷} Hotwire

^{۱۵} turbulence intensity

^{۱۶} Root mean square

مدل با استفاده از قابلیت پرینتر سه بعد ساخته شده و با ایجاد آدابتور بالانس در بدنه امکان نصب روی بالانس و آلفا مکانیزم در محفظه آزمون فراهم شد. در شکل ۵ مدل پهپاد نصب شده روی بالانی و آلفا مکانیزم نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل پهپاد نصب شده در محفظه آزمون

۴-۳- آلفا مکانیزم و بالانس ۶ مولفه داخلی^{۱۸}

آلفا مکانیزم وسیله ای است که مدل و بالانس روی آن نصب شده و امکان تغییر زاویه مدل در هنگام آزمایش فراهم می گردد. محدوده زاویه حمله آلفامکانیزم ۱۰- تا ۳۰ درجه و با دقت ۰.۱ درجه می باشد. جهت اندازه گیری بار های وارده بر مدل از یک بالانس استرین گیجی داخلی مشابه یک تیر یکسرگردار استفاده شده است. بالانس مورد استفاده از نوع استرین گیجی داخلی ۶ مولفه بوده و در مجموع سه گشتاور و سه نیرو را می توان با کمک آن محاسبه کرد حداکثر خطای بالانس مورد استفاده در اندازه گیری نیروها و گشتاوره کمتر از ۰.۵٪ بوده است.

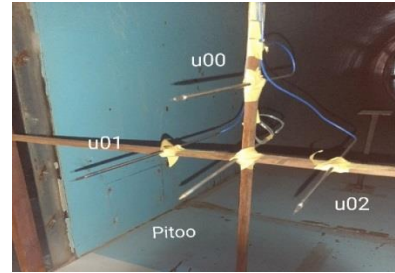


شکل ۶- شکل شماتیک بالانس و مدل به همراه نیروها و گشتاور

های اعمالی

۴- طراحی و ساخت شبکه های غیر فعال مولد اغتشاش

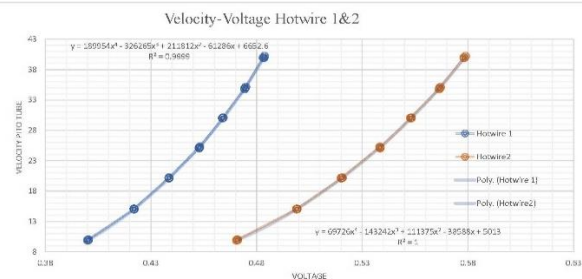
روشهای مختلفی اعم از فعال، غیرفعال و حرارتی در تولید آشفتگی در تونل باد استفاده می شود. یکی از روشهای مرسوم غیرفعال استفاده از شبکه های تولید آشفتگی نصب شده در ورودی تونل باد یا محفظه آزمون می باشد. بطوریکه با انتخاب ابعاد مناسب شبکه و انسداد می توان سطوح مختلف آشفتگی را تولید کرد. ویتا، روچ، دکارمن و هاوارث، سیمونز و سالتر و تیلور تحقیقات زیادی در مورد چگونگی تولید آشفتگی با استفاده از شبکه غیرفعال ارائه دادند که اطلاعات مناسبی از نحوه طراحی ابعاد سلول شبکه و میزان انسداد و ارتباط آنها با میزان تولید آشفتگی مطرح نمودند. در واقع آشفتگی شبکه بدلیل ریزش گردابه ها در پایین دست میله ها ایجاد می شود. آشفتگی ایجاد شده در محدوده پشت شبکه به تاسی از میدان جریان توربها بصورت همگن بوده و با دور شدن از شبکه سطح آشفتگی



شکل ۲- لوله پیتو استاتیک و سه پراب سیم داغ تک مولفه در

محفظه آزمون

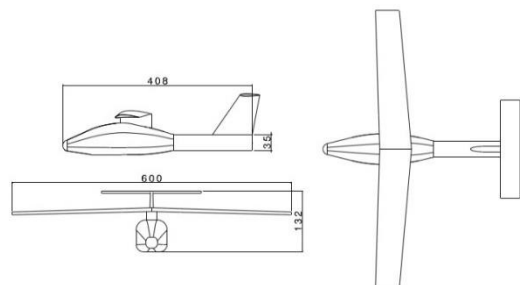
جهت استفاده از یک سرعت سنج داغ لازم است ابتدا در محدوده سرعت سیم داغ کالیبره شود. کالیبراسیون سیم داغ یعنی بدست آوردن رابطه ای بین ولتاژ خروجی و سرعت متوسط جریان آزاد که در شکل ۳ منحنی کالیبراسیون پراپهای دو سیم داغ در محدوده سرعت ۷ تا ۴۰ متربرثانیه ارائه شده که از معادله رگرسیون آنها برای تبدیل ولتاژ خروجی به سرعت در آزمایشها استفاده شده است. از لوله پیتو استاتیک با استفاده از فشار استاتیک و سکون محلی و معادله برنولی میزان سرعت در محفظه آزمون محاسبه شده است.



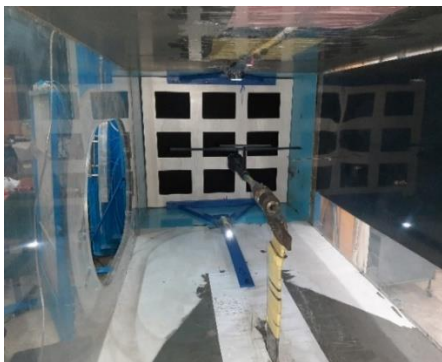
شکل ۳- نمودار کالیبراسیون دو سیم داغ تک مولفه

۳-۳- مدل پهپاد مورد آزمایش

با توجه به محبوبیت و کاربرد پیکر بندی های بال بالا در پهپادهایی مانند خانواده مهاجر(پهپادهای عملیاتی نزاجا) و بررسی امکان استفاده از یک پیکره بندی جدید، یک مدل تونل بادی پهپاد بال بالا در نظر گرفته شده است. ابعاد و مشخصات مدل مورد نظر در مقیاس ۱ به ۲.۵ نسبت به مدل پروازی اصلی با واحد اندازه گیری میلی متر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نقشه ابعادی مدل پهپادی مورد آزمایش



شکل ۸- شبکه غیر فعال نصب شده در ابتدای محفظه آزمون تونل باد

۵- اندازه گیری میزان سطح آشفتگی جریان عبوری

جهت ارزیابی چگونگی سطح آشفتگی خالی از شبکه و همراه با شبکه در محدوده نصب مدل و همگن بودن آن از دو پراب سیم داغ تک مولفه به همراه لوله پیتو استاتیک در مرکز محفظه آزمون نصب شده است. از طریق پراب های سیم داغ قرار داده شده در سرعت ۱۰ تا ۴۰ متر بر ثانیه را با فاصله تغییرات ۵ متر بر ثانیه و از طریق پراب پیتو استاتیک سرعت تونل باد قرائت شد.

با ولتاژهای خروجی به دست آمده و معادله کالبریا سیون هر پراب در سرعت های ۱۰ متر بر ثانیه تا ۴۰ متر بر ثانیه در هر دو حالت تونل خالی از شبکه و همراه با شبکه مقدار سرعت لحظه ای توسط پراب سیم داغ مشخص شد. سپس پارامترهای آماری اعم از میانگین سرعت متوسط^{۲۰}، مقدار انحراف از معیار سرعت^{۲۱} و شدت آشفتگی^{۲۲} محاسب گردید. سطح آشفتگی بدست آمده در دو حالت مذکور نسبت به محدوده سرعت در جدول آمده است.

$$TI = \frac{U_{RMS}}{U_{mean}} \quad (3)$$

مطابق با نتایج بدست آمده میزان سطح آشفتگی در حالت بدون شبکه دو سرعت ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه به ترتیب ۰.۷۵ و ۰.۶۴۵٪ بوده و با شبکه ۱۵/۳۸٪ و ۲۴/۵۵٪ بدست آمد.

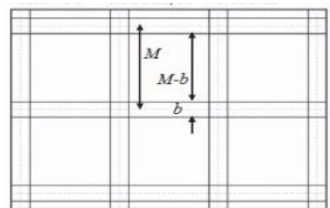
۶- تحلیل نتایج ضرایب نیرو و گشتاور مدل پهباد

پس از انجام آزمایشهای بدون مدل جهت اندازه گیری سطح آشفتگی در دو حالت با و بدون شبکه، مدل پهباد آماده و در تونل باد بر روی آلفامکانیزم و بالانس نصب گردید. بارهای وارده برمدل با کمک بالانس ۶ مولفه درغالب سه نیرو و ۳ گشتاور در شرایط مختلف زاویه حمله و سرعت اندازه گیری شد. میزان خطا حاصل مجموع خطاها شامل کیفیت جریان، خطای آلفا مکانیزم، خطای ابزار اندازه گیری و ساخت مدل کمتر از ۳٪ می باشد.

پس از انجام آزمایشها و پردازش نتایج آنها، منحنی تغییرات نیروهای آیرودینامیکی مدل پهبادی مورد نظر بر حسب تغییرات زاویه حمله در سرعت های معین ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه بدست آمده که در ادامه در حالات

کاهش می یابد. لذا اندازه گیری سطح آشفتگی در محدوده نصب مدل لازم و ضروری است.

با توجه به پژوهش تولید آشفتگی اتمسفریک با استفاده از شبکه های غیر فعال در بخش انبساطی محفظه آزمون تونل باد توسط آقایان جیولیو ویتا و حسن همیدا و توماس آندریان [۱۴]. با توجه به پژوهش آقای ویتا، طراحی یک شبکه غیر فعال مستلزم انتخاب دقیق حداقل سه پارامتر است: عرض b میله ها، اندازه مش M (فاصله بین خط مرکزی میله ها) و فاصله پایین دست x تا شبکه، شکل ۷، که در آن اندازه گیری ها انجام می شود.



شکل ۷- شبکه های طراحی شده توسط ویتا با مشخصات

ویکری [۲۸] نشانه ای برای اندازه مش بهینه $M = L/8$ ارائه می دهد، که در آن L طول بخش آزمون است. نسبت b/M را می توان بر اساس تعریف نیروی پسای شبکه برای محاسبه نیروی وارده بر شبکه و میزان انسداد است که بیرمن و مورل حدود ۵۰٪ پیشنهاد دادند.

$$C_D = \frac{b}{M} \left(\gamma - \frac{b}{M} \right) \quad (1)$$

$$\beta = (1 - b/M)^2 \quad (2)$$

با توجه به امکانات موجود در مرکز آیرودینامیک قدر شبکه غیر فعال با استفاده ورق چوب های با جنس ام دی اف^{۱۹} با ضخامت ۱۶ میلی متری ساخته شد. با توجه ابعاد ۱۰۰ در ۸۰ سانتی متری محفظه آزمون تونل باد مادون صوت، ابعاد قاب شبکه های همگن مستطیل شکل خود را ۹۹ در ۷۹ سانتی متر انتخاب شد که امکان جابجایی و وارد کردن با توجه به پارامترهای انتخابی با توجه ابعاد محفظه آزمون، انتخاب مقدار ۸ و ۳۳ سانتی متر به ترتیب برای پارامترهای عرض b میله و اندازه مش M برای شبکه انتخاب شد.

جدول ۲- مقادیر معیار طراحی شبکه طراحی شده

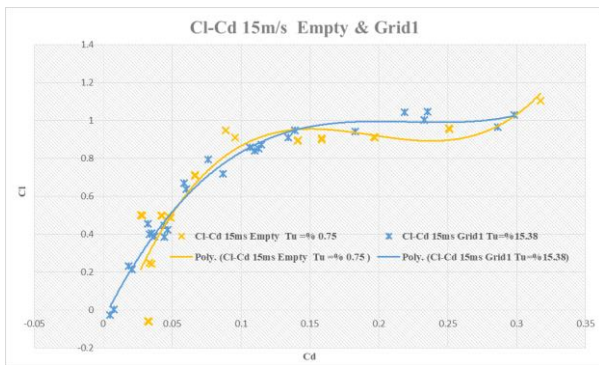
شبکه ۱	پارامتر طراحی
عرض b میله	۸ سانتی متر
اندازه مش M	۳۳ سانتی متر
b/M	۰.۲۴۲۴۲
$M-b$	۲۲.۳۳ در ۱۵.۶۶ سانتی متر
β	۵۷.۳۹ درصد
C_D	۱.۲۹۳۵۶
D	۵۴۰ N

^{۲۱} RMS Of Velocity

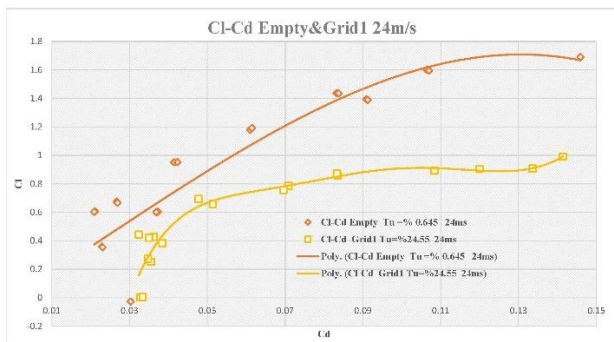
^{۲۲} Turbulence intensity (Tu)

^{۱۹} MDF Wooden

^{۲۰} Mean Velocity

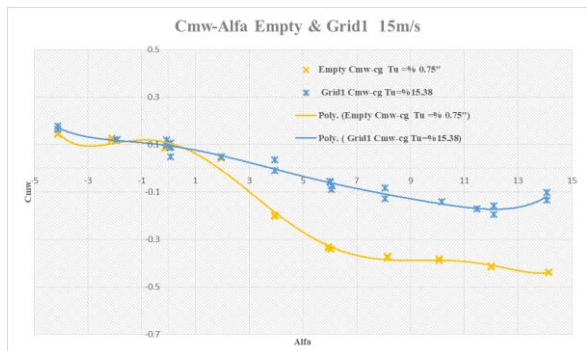


شکل ۱۱- تغییرات ضریب نیروی پسا نسبت به ضریب نیروی برآ مدل در سطوح اغتشاش مختلف ناشی از شبکه و همراه با شبکه غیر فعال ۱ در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه



شکل ۱۲- تغییرات ضریب نیروی پسا نسبت به ضریب نیروی برآ مدل در سطوح اغتشاش مختلف در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه

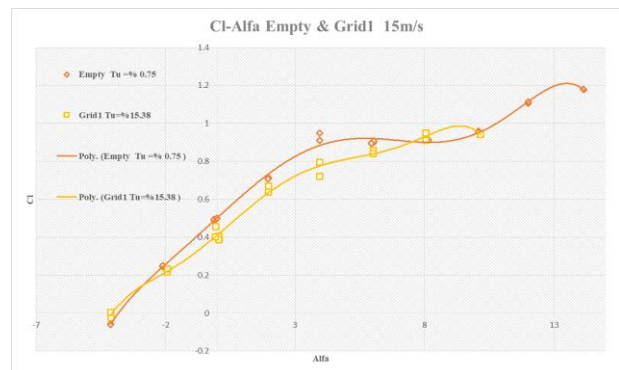
در اشکال ۱۳ و ۱۴ تغییرات ضریب گشتاور پیچ در سرعت‌های ۱۵ و ۲۴ متربرثانیه و سطح اغتشاش مختلف ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود در هر دو سرعت علاوه بر اینکه در تمامی حالات، پرنده در جهت طولی پایدار است لیکن با افزایش سطح اغتشاش شیب ضریب گشتاور پیچ نسبت به زاویه حمله کمتر شده و حاکی از آن است که پایداری سیستم کمتر شده است.



شکل ۱۳- تغییرات ضریب گشتاور پیچشی نسبت به زاویه حمله مدل در سطوح اغتشاش مختلف در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

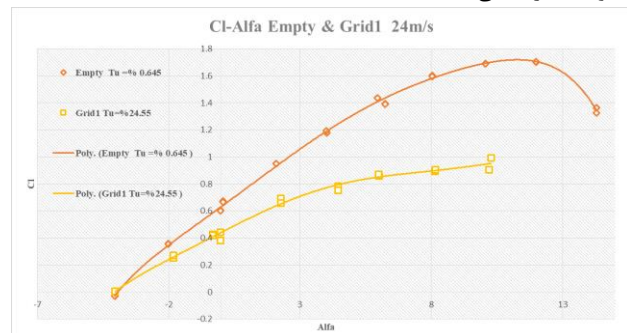
مختلف متاثر از تغییر سطح آشفتهگی ایجاد شده ناشی از شبکه ها و متاثر از تغییر سرعت یا عدد رینولدز ارائه می گردد.

در شکل ۹ تغییرات ضریب برآ در سرعت ۱۱۵ متربرثانیه و دو سطح آشفتهگی ۰.۷۵٪ و ۱۵.۳۸٪ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش سطح اغتشاش میزان ضریب برآ و شیب آن در ناحیه خطی کاهش یافته است که می تولد به نوع لایه مرزی و کیفین جریان روی جسم پرنده مرتبط با شد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با توجه به نامتقارنی مقطع بال در زاویه حمله صفر درجه ضریب برآ در حدود ۰.۵ بوده و زاویه حمله برآی صفر آن در حدود ۴- درجه می باشد.



شکل ۹- تغییرات ضریب نیروی برآ نسبت به زاویه حمله مدل در سطوح اغتشاش مختلف در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه

همچنین در شکل ۱۰ تغییرات ضریب برآ در دو سطح اغتشاش ۰.۷۵٪ و سطح آشفتهگی ۲۴٪ در سرعت ۲۴ متربرثانیه ارائه شده که همانند نتایج سرعت ۱۵ متربرثانیه و با توجه به سطح آشفتهگی بیشتر در این سرعت کاهش ضریب برآ بیشتر شده است که روند مورد انتظار یعنی کاهش ضریب برآ با افزایش سطح اغتشاش را در این پرنده تایید می کناین سرعت مقدار ضری برآ در زاویه حمله صفر درجه ضریب برآ در حدود ۰.۶ بوده و زاویه حمله برآی صفر آن در حدود ۴- درجه می باشد.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب نیروی برآ نسبت به زاویه حمله مدل در سطوح اغتشاش مختلف در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه

در اشکال ۱۱ و ۱۲ منحنی درگ پلار پرنده در دو سرعت ۱۵ و ۲۵ و سطح اغتشاش مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده با توجه به کاهش ضریب برآ با افزایش سطح اغتشاش انتظار می رود که نسبت برآ به پسای پرنده در دو حالت با و بدون شبکه متفاوت باشد. نتایج حاکی از آن است که اختلاف نسبت برآ به پسا در دو سرعت وجود داشته لیکن در سرعت ۲۴ متربرثانیه بدلیل اختلاف فاحش ضریب برآ در دو سطح اغتشاش بیشتر بوده و با افزایش سطح آشفتهگی نسبت برآ به پسا تا ۶۰٪ کاهش می یابد.

- [۹] Milers T. Comparison of geostrophic and nonlinear balanced winds from LIMS data and implications for derived dynamical quantities. *Pure Appl Geophys* ۱۹۸۹;۱۳۰: ۳۱۹-۳۴۲.
- [۱۰] Bo hang Wang, Zain Anwar Ali, and Daobo Wang, "Controller for UAV to Oppose Different Kinds of Wind in the Environment" ۱ April ۲۰۲۰.
- [۱۱] M. D. Checkel Department of Mechanical Engineering, The University of Alberta, Edmonton, Canada T۶G ۲G۸, "Turbulence Generation in Wind Tunnel" March ۱۹۸۶, *Journal of Fluids Engineering*
- [۱۲] Roach, P.E., ۱۹۸۷. The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. *Int. J. Heat Fluid Flow* ۸, ۸۲-۹۲.
- [۱۳] Bearman, P.W., Morel, T., ۱۹۸۳. Effect of free stream turbulence on the flow around bluff bodies. *Prog. Aero. Sci.* ۲۰, ۹۷-۱۲۳.
- [۱۴] Giulio Vita, Hassan Hemida, Thomas Andrianne, Charalampos C. Baniotopoulos, "Turbulence Generation in Wind Tunnel, ۱۵ February ۲۰۱۸, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*
- [۱۵] América Torres, Roberto Tapia, Antonio Ramos, *Open Journal of Fluid Dynamics*, "Generation and Control of Turbulences in a Wind Tunnel", December ۲۹, ۲۰۱۶.
- [۱۶] Emrah And Others. Simple methods for low speed calibration of hot-wire anemometers, ۲۰۱۰.
- [۱۷] Siddique, An experimental study on the effects of adverse weathers on the flight performance of an Unmanned-Aerial-System, thesis, Iowa State University, ۲۰۲۱.
- [۱۸] Junli Wang, Longitudinal Aerodynamic and Stability Characteristics of High-Aspect-Ratio Unmanned Aerial Vehicles in Gust Response, *jatm*. ۷۱۱, ۱۰۵۲, ۲۰۱۸.
- [۱۹] Wang, Controller for UAV to Oppose Different Kinds of Wind in the Environment, *Journal of Control Science and Engineering* Volume ۲۰۲۰.
- [۲۰] Gavrilovic, Performance improvement of small Unmanned Aerial Vehicles through gust energy harvesting, *oatao*, ۲۰۱۷.
- [۲۱] Martinez, Experimental assessment of wind gust effect on PVTOL aerial vehicles using a wind tunnel, *ROPEC* ۲۰۱۵.
- [۲۲] Wang, An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle, *Measurement and Control*, sage, Vol. ۵۲(۷-۸) ۷۳۱-۷۳۹, ۲۰۱۹.
- [۲۳] Nakamura, The effects of turbulence on bluff-body mean flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* ۲۸, ۲۵۱-۲۵۹, ۱۹۸۸.
- [۲۴] Comte-Bellot, G., Corrsin, S., ۱۹۶۶. The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *J. Fluid Mech.* ۲۵, ۶۵۷.
- [۲۵] Kim, J.W., Haeri, S., Joseph, P.F., ۲۰۱۶. On the reduction of aerofoil-turbulence interaction noise associated with wavy leading edges. *J. Fluid Mech.* ۷۹۲, ۵۲۶-۵۵۲.
- [۲۶] de Karman, T., Howarth, L., ۱۹۳۸. On the statistical theory of isotropic turbulence. *Proc. R. Soc. London A Math.Phys.Eng.Sci.* ۱۶۴ <https://doi.org/10.1098/rspa.1938.013>.
- [۲۷] Giulio Vita, Hassan Hemida, Thomas Andrianne,



شکل ۱۴- تغییرات ضریب گشتاور پیچشی نسبت به زاویه حمله مدل در سطوح اغتشاش مختلف در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه

۷- نتیجه گیری

با توجه به فعالیت انجام شده در این تحقیق در تولید اغتشاش با استفاده از شبکه غیر فعال و اثر آن بر عملکرد یک پهپاد در تونل باد می توان نتیجه گرفت که می توان با طراحی و انتخاب ابعاد مناسب شبکه غیرفعال، سطح اغتشاش مختلف را در محفظه آزمون ایجاد نمود. پارامتر مهم در میزان تولید اغتشاش میزان از سداد و ابعاد شبکه می باشد. بطوریکه با شبکه موجود سطح اغتشاش ۱۵.۳۸ و ۲۴.۵۵٪ در دو سرعت ۱۵ و ۲۴ متر بر ثانیه ایجاد شد.

از نتایج ثبت شده روی مدل می توان نتیجه گرفت که در هر دو سرعت افزایش سطح اغتشاش موجب کاهش ضریب برآ و نسبت برآ به پسا و پایداری طولی سیستم می گردد. البته تغییرات به گونه ای نیست که سیستم در جریان آشفته مذکور منجر به ناپایداری طولی گردد. اگرچه اختلاف در دو سطح اغتشاش در سرعت ۲۴ متر بر ثانیه خیلی بیشتر رخ داده است.

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله صمیمانه از مرکز آیرودینامیک قدر دانشگاه جامع امام حسین (ع) برای تأمین مالی و امکاناتی شرایط انجام آزمایشها در این پژوهش در تولید اغتشاش حول یک پهپاد و بررسی عملکرد آن تشکر می نمایند.

۹- مراجع

- [۱] Pahl JF. Flight recorders in accident and incident investigation. AIAA paper no. ۶۴-۳۵۱, ۱۹۶۴. New York: AIAA.
- [۲] Lester A. Global air transport accident statistics. AIAA J ۲۰۱۳.
- [۳] Sand W and Biter C. Meteorology surrounding the Roselawn accident. In: Proceedings of the aerospace sciences meeting & exhibit, ۲۰۱۳.
- [۴] Bo Hang Wang, Dao Bo Wang, Zain Anwar Ali, Bai Ting Ting and Hao Wang "An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle", ۵ April ۲۰۱۹
- [۵] Ivan MA. Ring-vortex downburst model for flight simulation. *J Aircraft* ۱۹۸۴; ۲۳(۳): ۲۲۲-۲۲۳.
- [۶] Woodfield AA and Woods JF. Worldwide experience of wind shear during ۱۹۸۱-۱۹۸۲, ۱۹۸۳.
- [۷] Luers J. A model of wind shear and turbulence in the surface boundary layer, Vol. ۲۲۸۸. Washington, DC: NASA CR and University of Dayton Research Institute, ۱۹۷۳.
- [۸] Fleming EL, Chandra S and Barnet J. Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as function of latitude. *Adv Space Res* ۱۹۹۰; ۱۰(۱۲): ۱۱-۵۹.

Charalampos, Baniotopoulos., " Generating atmospheric turbulence using passive grids in an expansion test section of a wind tunnel", *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* ۱۷۸ (۲۰۱۸) ۹۱-۱۰۴

- [۲۸] Vickery, Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream. *J. Fluid Mech.* ۲۵, ۴۸۱, ۱۹۶۶.
- [۲۹] Laneville, Effects of Turbulence on Wind-induced Vibrations of Bluff Cylinders. University of British Columbia, Vancouver, Canada, ۱۹۷۳.
- [۳۰] Baines, W.D., Peterson, E.G., ۱۹۵۱. An investigation of flow through screens. *Trans. ASME* ۷۳, ۴۶۷-۴۸۰.
- [۳۱] Nakamura, Y., Ohya, Y., Ozono, S., ۱۹۸۸. The effects of turbulence on bluff-body mean flow. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* ۲۸, ۲۵۱-۲۵۹.
- [۳۲] Roach, P.E., ۱۹۸۷. The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids. *Int. J. Heat Fluid Flow* ۸, ۸۲-۹۲.