



پیش‌بینی نویز آبروآکوستیکی دوردست از مدل ساختمان بلند استاندارد به کمک اندازه‌گیری ناپایای فشار سطحی

علیرضا موحدی^۱، علی اکبر دهقان^{۱*}، مجتبی دهقان منشادی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۱۰

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۰۷

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۱۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۲۰

کلمات کلیدی:

ساختمان بلند استاندارد

نویز آبرودینامیکی

فشار سطحی

معادله فوکس ویلیامز-هاوکینگز

ریزش گردابه

خلاصه: در مطالعه حاضر، نویز آبروآکوستیکی ناشی از جریان حول مدل یک ساختمان استاندارد متصل به کف در زوایای حمله مختلف به روش نیمه‌تحلیلی پیش‌بینی شده است. هدف اصلی این مطالعه، محاسبه فشار آکوستیکی دوردست با استفاده از داده‌های تجربی فشار سطحی روی مدل است. با استفاده از این داده‌های تجربی و معادله فوکس ویلیامز-هاوکینگز که در یک کد پیاده‌سازی شده است فشار آکوستیکی دوردست محاسبه می‌شود. مشخصات آبرودینامیکی و آکوستیکی جریان حول یک سیلندر مربعی دو بعدی (به جهت اعتبارسنجی) و نیز مدل اصلی ارائه گردیده است. مشخص شد در طیف فشار سطحی مربوط به سنسورهای فشار وجوه جانبی، قله مربوط به ریزش گردابه قابل مشاهده است که در هماهنگی با فرکانس ریزش گردابه حاصل از جریان سنج سیم داغ بود. عدد استروهل برای مدل بسته به زاویه حمله در محدوده $0/1-0/8$ به دست آمد. هم‌چنین الگوی انتشار صدای دوقطبی برای هندسه‌های سه بعدی نیز قابل مشاهده بود که مرتبط با منشا ایجاد آن یعنی پدیده ریزش گردابه است. شدت صدای پیش‌بینی شده با افزایش سرعت بالادست افزایش و با افزایش فاصله از سیلندر کاهش می‌یابد. با توجه به عدم تقارن کامل سطح مقطع مدل مورد بررسی، با تغییر زاویه حمله، صدای پیش‌بینی شده بسته به محل شنونده رفتار متفاوتی دارد.

عایق‌بندی صوتی و تنظیم صدا در فضاهای مختلف اشاره شده است. جریان حول اجسام جریان‌بند نظیر سیلندرها با سطح مقطع مختلف توسط پژوهش‌گران زیادی از نظر آبرودینامیکی بررسی شده است. به عنوان نمونه مانینی و همکاران [۱] جریان حول یک سیلندر دوبعدی با مقطع مستطیلی قرار گرفته در معرض جریان با میزان آشفتگی‌های مختلف را از نظر آبرودینامیکی بررسی نمودند. از نتایج جالب توجه مطالعه مذکور می‌توان به وابستگی قابل توجه عدد استروهل به عدد رینولدز (حتی برای زاویه حمله صفر) و ضرایب نیرویی (برای زوایای حمله بزرگتر از ۳ درجه) اشاره نمود.

در سال‌های اخیر، تولید و انتشار نویز آبرودینامیکی از سیلندرها، مورد توجه پژوهش‌گران زیادی قرار گرفته است. با توجه به بالابودن هزینه‌های بالای محاسباتی در مطالعات عددی، پیچیده و طولانی بودن اندازه‌گیری در مطالعات تجربی و نیز پیچیدگی زیاد فیزیک

۱ - مقدمه

صدای آبرودینامیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌های آلودگی صوتی در جوامع امروزی است. این نوع از صدا و نویز توسط عوامل متعددی از قبیل وسایل نقلیه مدرن، مثل هواپیماها، اتومبیل‌ها و قطارها و نیز جریان حول ساختمان‌ها و سازه‌های مختلف ایجاد و منتشر می‌شود. به واسطه کاربردهای گسترده مثل مجموعه چرخ هواپیما، پانتوگراف‌ها، ساختمان‌های بلند، دودکش‌ها و غیره صدای تولیدی توسط اجسام سیلندری شکل که داخل جریان عرضی سیال قرار گرفته‌اند، بخشی مهم از نویز ناشی از جریان را به خود اختصاص می‌دهند. به دلیل کاربرد زیاد در صنعت ساختمان، صدای منتشر شده از سیلندرها با مقطع مستطیلی و مربعی اهمیت زیادی دارد. در کشور ما نیز در مقررات ملی ساختمان، مبحث هیجدهم، به

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: adehghan@yazd.ac.ir



جریان در مورد هندسه های سه بعدی، اغلب مطالعات صورت گرفته در این زمینه، بر روی تولید نوپز از سیلندرهای دوبعدی متمرکز شده اند. ولی در بسیاری از کاربردهای واقعی، مانند ساختمان های با ارتفاع کم، دودکش ها، برج های خنک کن، پانتوگراف قطارها، آینه بغل و سایر ملحقات خارجی اتومبیل و غیره، هندسه های سیلندری شکل ارتفاعی محدود داشته و دارای یک انتهای آزاد و یک انتهای چسبیده به کف هستند. جریان حول سیلندرهای سه بعدی متصل به کف، پیچیدگی های زیادی داشته و شامل پدیده هایی پیچیده و سه بعدی است. ولی امروزه با توجه به پیشرفت های صورت گرفته در بحث مصالح ساختمانی و نیز با توجه به تراکم جمعیت بالا در بسیاری از نقاط، ساختمان های بلند و باریک بیشتر ساخته می شوند. چنین ساختمان هایی قطعاً از جریان باد تاثیرپذیر هستند. لذا ساختمان های بلند در آیرودینامیک سازه های نقش مهمی پیدا نموده اند. بخش عمده ای از مطالعات صورت گرفته روی جریان حول سیلندرهای متصل به کف نیز صرفاً به بررسی آیرودینامیکی جریان حول این هندسه ها اختصاص داده شده است. ضمناً در مطالعات صورت گرفته کم تر به جریان حول سیلندرهای سه بعدی با مقطع مستطیلی پرداخته شده است. در ادامه به تعدادی از مطالعات صورت گرفته روی سیلندرهای سه بعدی به عنوان نمونه اشاره می شود. حسینی و همکاران [۲] ساختار گردابه های ریزش کرده از یک سیلندر مستطیلی متصل به کف را بررسی نمودند. در این مطالعه اثر ضخامت لایه مرزی جریان برخوردی به مدل در محل نصب آن بر ساختار جریان قابل توجه تشخیص داده شد. فتیحی و همکاران [۳] ساختار جریان پشت سیلندر مربعی سه بعدی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. جهت استخراج مشخصات فیزیکی ساختار جریان در عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ از یک کاوشگر پنج حفره استفاده شد. مشخصات ناحیه دنباله سیلندر مذکور بررسی و ارائه شده و در انتها اثر تغییر شکل انتهای آزاد سیلندر مربعی سه بعدی بر ساختار ناحیه دنباله و فیزیک جریان بررسی گردید.

علاوه بر مطالعه فیزیک جریان و پدیده های مربوطه، برای اعتبارسنجی روش های عددی و نیز کالیبراسیون تجهیزات تجربی نیاز به نتایج آزمایش های صورت گرفته روی مدل های ساده و استاندارد است. یکی از مدل های استاندارد که در همین راستا و برای بررسی بهتر آیرودینامیک جریان اطراف ساختمان ها ارائه شده است مدل

ساختمان استاندارد ارائه شده توسط شورای تحقیقات هوانوردی کشورهای مشترک المنافع^۱ (سی.آ.آ.آ.رسی) است که نخستین بار توسط واردلا و ماس [۴] به عنوان مدلی استاندارد از یک ساختمان بلند ارائه شد. ساختمان مذکور، ساختمانی با مقطع مستطیلی در نظر گرفته می شود که ابعاد مقطع ساختمان مورد نظر با مقیاس واقعی $150 \text{ ft} \times 100 \text{ ft}$ و ارتفاع آن نیز 600 ft ($30/5 \text{ m} \times 40/7 \text{ m} \times 112/9 \text{ m}$) است. سقف ساختمان باید مسطح و تخت بدون دیواره باشد و دیوارهای خارجی نیز بایستی مسطح و بدون پنجره و یا سایر زائده ها باشند. پس از معرفی این مدل ظرف چند سال مطالعات زیادی روی این مدل با تجهیزات آزمایشگاهی مختلفی انجام شد. با استفاده از این اطلاعات و نتایج، ملبورن [۵] مقایسه کاملی از نتایج مربوط به مدل استاندارد مذکور شامل اندازه گیری فشار سطحی و پاسخ دینامیکی به دست آمده توسط پژوهشگران مختلف ارائه نمود. از آن پس مطالعات زیادی روی مدل سی.آ.آ.آ.رسی شامل مطالعات نیرویی، آیرودینامیکی و غیره به صورت عددی و تجربی انجام شد. به عنوان نمونه لیگیداکیس و همکاران [۶] توانمندی و دقت مدل های زیرشبکه ای مختلف برای روش شبیه سازی گردابه های بزرگ را با حل جریان آشفته حول مدل سی.آ.آ.آ.رسی آزمودند و مدل های دقیق تر را مشخص نمودند. الشاعر و همکاران [۷] پاسخ آیرودینامیکی ساختمان سی.آ.آ.آ.رسی را با استفاده از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ به صورت عددی بررسی نمودند. در مطالعه مذکور ساختمان به شکل تکی و نیز در حالتی که ساختمان هایی در کنار آن قرار داشتند، بررسی شد. نتایج نشان داد که قرار گرفتن ساختمان بین ساختمان های مجاور می تواند تا ۵۰٪ ضریب فشار متوسط و تا ۴۰٪ ضریب فشار نوسانی را تغییر دهد. داگنو و همکاران [۸] توانمندی روش های دینامیک سیالات محاسباتی را در تخمین نیروهای آیرودینامیکی وارد بر ساختمان سی.آ.آ.آ.رسی با شرایط پیرامونی مختلف بررسی نمودند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که دینامیک سیالات محاسباتی برای بیان جزئیات مشخصات آیرودینامیکی پیچیده جریان مناسب است. ولی برای تحلیل جریان باید از روش های غیردائم مثل روش شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده نمود. منگ و همکاران [۹] جریان حول ساختمان بلند سی.آ.آ.آ.رسی را به روش عددی بررسی نمودند. آن ها اثر عوامل متعددی همچون مدل آشفتگی مورد استفاده،

فلوئنت محاسبه نمودند. هدف از مطالعه مذکور، محاسبه صدا برای طول کوچکی از سیلندر و تخمین میزان افزایش صدا با افزایش طول سیلندر بود. نتایج نشان داد که مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی‌های آکوستیکی است. مریمی و همکاران [۱۶] میدان فشار روی سطح سیلندر دایره‌ای دوبعدی را به عنوان منشا اصلی نویز ثبت شده در دوردست بررسی نمودند. در این مطالعه اثر آشفتگی جریان بالادست بر نوسانات فشار روی سطح استوانه بررسی شد. برای فهم بهتر رفتار نویز جریان حول مدل، کمیت‌های مختلفی مثل تابع همدوسی، همبستگی خودکار و متقابل، طول مشخصه ساختارهای گردابه‌ای، سرعت جابجایی این ساختارها و ... محاسبه شده‌اند. نتایج نشان داد که آشفتگی شدن جریان باعث افزایش سطح انرژی نویز، کاهش فرکانس نویز باریک باند و کاهش اندازه و سرعت جابه‌جایی گردابه‌ها می‌شود. البته لازم به ذکر است که در مرجع [۱۶] هیچ‌گونه اندازه‌گیری یا پیش‌بینی نویز دوردست انجام نشده است. بلکه صرفاً ویژگی‌های فشار ناپایا روی سطح مدل به عنوان یکی از منابع اصلی نویز دوردست به شکلی مناسب بررسی شده‌اند. ملاحظه می‌شود که اطلاعات موجود در مورد نویز آیرودینامیکی منتشر شده از یک سیلندر سه‌بعدی، به ویژه با مقطع مستطیلی که در معرض جریان قرار دارد، بسیار محدود است. نویز منتشر شده از ساختمان‌ها تاثیر زیادی بر آسایش و حتی سلامت ساکنان آن‌ها دارد. در همین راستا مبحث هیجدهم مقررات ملی ساختمان نیز به عایق‌بندی و تنظیم صدا اختصاص داده شده‌است. مطابق اطلاعات نویسندگان تاکنون مطالعات بسیار محدودی روی پیش‌بینی نویز آیرودینامیکی ناشی از جریان حول مدل با ارتفاع محدود با استفاده از داده‌های فشار سطحی انجام شده است. لذا مطالعه حاضر به پیش‌بینی نیمه‌تجربی نویز آیرودینامیکی منتشر شده از یک سیلندر سه‌بعدی با مقطع مستطیلی با استفاده از اندازه‌گیری فشار ناپایای سطحی اختصاص داده شده است. سیلندر مورد بررسی داخل اتاق آزمون بسته یک تونل باد آیرودینامیکی اصلاح شده آکوستیکی قرار گرفته است. تمرکز عمده این مطالعه، پیش‌بینی نویز آیرودینامیکی منتشر شده از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.رسی با استفاده از نتایج به دست آمده برای فشار سطحی است. حسن و مزیت بزرگ این روش این است که این امکان را فراهم می‌آورد که مطالعات آکوستیکی در تونل‌های باد آیرودینامیک و با روشی کم هزینه‌تر صورت پذیرند.

سرعت جریان بالادست و نوع شبکه‌بندی انتخابی را بر ضرایب فشار ساختمان سی.آ.آ.رسی بررسی نمودند. بیشینه ضریب فشار مثبت در مطالعه مذکور در ارتفاع $H = 0.085 - 0.18$ (ارتفاع مدل مورد بررسی) و منفی‌ترین ضریب فشار در لبه جلویی وجه بالایی مشاهده شد. تاکنون مطالعات محدودی در مورد بررسی آیرودینامیکی جریان حول هندسه‌های سیلندری شکل متصل به کف انجام شده است. کینگ و فیزن‌مایر [۱۰] سیلندرهای سه‌بعدی با سطوح مقطع و نسبت منطقی متفاوت را از نظر تولید صدای آیرودینامیکی بررسی نمودند. مشخص شد که میزان تولید صدا و نیز فرکانسی که یک قله در طیف مربوط به آن رخ می‌دهد وابستگی قابل توجهی به نسبت منطقی دارد. موراو و دولان [۱۱] نویز ناشی از برهم‌کنش جریان و سیلندر متصل به کف با سطوح مقطع دایره‌ای و مربعی و نیز با نسبت‌های منطقی مختلف را به روش تجربی و در یک اتاق آزمون بدون پژواک بررسی نمودند. در این مطالعه نیز اثر نسبت منطقی سیلندر بر میزان نویز تولیدی در اثر جریان حول سیلندرها قابل توجه گزارش شد. موحدی و همکاران [۱۲] مشخصات آیرودینامیکی جریان حول یک سیلندر مربعی متصل به کف با ارتفاع محدود را در زوایای حمله مختلف بررسی نمودند. با توجه به هماهنگی دیده شده در قله مشاهده شده در طیف سرعت اندازه‌گیری شده در ناحیه دنباله و نیز طیف فشار اندازه‌گیری شده در دوردست، عامل مهم در انتشار صدا از چنین هندسه‌هایی پدیده ریزش گردابه تشخیص داده شد. زاویه حمله، در مقایسه با سرعت بالادست اثر کمتری بر سطح کلی نویز منتشر شده داشت. پورتئوس و همکاران [۱۳] ارتباط نویز منتشر شده از یک سیلندر مربعی با ارتفاع محدود با نسبت منطقی‌های مختلف را با ناحیه دنباله آن به صورت تجربی بررسی نمودند. مشخص شد نسبت منطقی تاثیر زیادی روی مشخصات ناحیه دنباله سیلندر و رژیم‌های ریزش گردابه از آن دارد که این موضوع نویز منتشر شده از سیلندر را نیز به طور کامل تحت تاثیر قرار می‌دهد. کارتیک و همکاران [۱۴] آیرودینامیک جریان حول سیلندر دایره‌ای با ارتفاع محدود و با نسبت‌های منطقی مختلف را در یک عدد رینولدز به صورت عددی مطالعه نمودند. نتایج این مطالعه نیز تاثیر نسبت منطقی بر مشخصات نویز منتشر شده از سیلندر را تایید نمود. نجفیان و همکاران [۱۵] صدای تولید شده توسط جریان سرعت بالا روی یک استوانه را با استفاده از آنالوژی لایتهیل^۱ و به کمک نرم‌افزار انسیس

۲- معادلات و منابع انتشار صوت

در دهه ۱۹۵۰، لایتپیل [۱۷] معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی را به شکل دقیق معادله موج ناهمگن تبدیل کرد. یکی از محدودیت‌های تئوری لایتپیل این است که فقط امواج صوتی را در واسط‌های بدون مرز تخمین می‌زند. به همین دلیل تئوری لایتپیل اثرات انعکاس، انکسار (شکست موج)، جذب و پراکندگی امواج را توسط مرزهای جسم جامد در نظر نمی‌گیرد. در سال ۱۹۵۵ کرل [۱۸] تئوری لایتپیل را با در نظر گرفتن حضور مرزهای جامد توسعه بخشید. او میدان صوت منتشر شده از اجسام را با فشار نوسانی روی سطح آن‌ها ارتباط داد. سپس ویلیامز و هاوکنینگز [۱۹] تئوری لایتپیل و کرل را توسعه داده و اثر حرکت اختیاری منبع صوت را در نظر گرفتند. در مطالعه حاضر، از روش فوکس ویلیامز-هاوکنینگز [۱۹] برای محاسبه سطح فشار صوت در دوردست آکوستیکی استفاده شده است. در مطالعه حاضر، نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری فشار ناپایای سطحی روی مدل مورد بررسی، در معادله فوکس ویلیامز-هاوکنینگز جاگذاری می‌شوند. نویز دوردست با حل این معادله پیش‌بینی می‌شود. قبل از بررسی جزئی‌تر این معادله منابع تولید و انتشار نویز آیرودینامیکی تا حدودی معرفی می‌شوند.

در انتشار صدای ناشی از جریان حول اجسام جریان‌بند عوامل مختلفی موثر هستند منابع اصلی صوت عبارتند از: نیروهای نوسانی وارد بر جسم که ناشی از نوسانات فشار سطحی هستند؛ آشفتگی جریان یا برهم‌کنش مقادیر متوسط و نوسانی مولفه‌های مختلف سرعت. چونگ و همکاران [۲۰] منابع انتشار صوت به ویژه دسته آخر را به شکل مناسبی دسته‌بندی نمودند. بر این اساس، دسته آخر خود به دو دسته جزئی‌تر تقسیم می‌شود: برهم‌کنش مقادیر نوسانی مولفه‌های سرعت با یکدیگر و برهم‌کنش مقادیر متوسط و نوسانی مولفه‌های سرعت. با توجه به دائم بودن ماهیت برهم‌کنش مقادیر متوسط مولفه‌های سرعت، این عبارت جزء منابع تولید و انتشار صدا به حساب نمی‌آید.

از نگاهی دیگر، منابع صوت به انواع مختلفی نظیر منابع تک‌قطبی، دوقطبی و چهارقطبی تقسیم می‌شوند. راسل و همکاران [۲۱] به بیانی ساده این دسته‌بندی را شرح داده‌اند. منابع تک‌قطبی صدا، صوت را در همه جهات به یک میزان منتشر می‌کنند. یکی از ساده‌ترین مثال‌ها برای این نوع از منابع صوت، یک کره کوچک است که به تناوب منبسط

و منقبض می‌شود. در عمل، هر منبع صوتی که ابعادش بسیار کوچک‌تر از طول موج صوت منتشر شده باشد، مانند یک منبع صوت تک‌قطبی عمل می‌کند و صدا را تقریباً به یک میزان در همه جهات منتشر می‌کند. دو منبع تک‌قطبی با قدرت یکسان ولی با فازهای مخالف، که به فاصله‌ای اندک از یکدیگر قرار دارند، تشکیل یک دوقطبی آکوستیکی می‌دهند. بر خلاف منبع تک‌قطبی، منابع دوقطبی اثر خالصی روی سیال ندارند. زمانی که یکی از دو قطب در حال انقباض است، دیگری در حال انقباض است و بر عکس. لذا سیال اطراف دو قطب، مشخصاً بین این دو قطب به جلو و عقب کشیده می‌شود. در این حالت نیروی خالص وارد به سیال است که انرژی را به شکل امواج صوتی منتشر می‌کند. منبع صوت دوقطبی در قیاس با منبع تک‌قطبی با همان قدرت شدت صوت کمتری دارد. مطابق آنالوژی آکوستیکی کرل، یکی از مهم‌ترین عوامل انتشار صدای ناشی از جریان حول اجسام جریان‌بند، منابع دوقطبی تولید صدا هستند که به دلیل فشار نوسانی وارد به سطح سیلندر ایجاد می‌شوند. این منابع دوقطبی ناشی از اعمال نیروهای نوسانی به جسم، در واقع عکس‌العمل به نیروی وارد به جسم از سوی سیال است. در این زمینه نوسانات نیروهای برآ و پسا نقش دارند. یک منبع چهارقطبی صدا شامل دو منبع دوقطبی مشابه با فازهای مخالف است که به فاصله ناچیزی از یکدیگر قرار گرفته‌اند. در مورد منابع چهارقطبی صدا، سیال هیچ شار و جریان خالصی ندارد و هیچ نیروی خالصی نیز به آن وارد نمی‌شود. در این مورد تنش نوسانی وارد بر سیال است که امواج صوتی را منتشر می‌کند. لذا با توجه به این که سیالات تنش‌های برشی را تحمل نمی‌کنند، منابع چهارقطبی صدا را به شکل ضعیفی منتشر می‌کنند. عامل مهم دیگر در زمینه تولید نویز آیرودینامیکی ناشی از جریان، مولفه‌های نوسانی سرعت و به عبارت دیگر آشفتگی جریان است که به عنوان منبعی چهارقطبی از تولید نویز آیرودینامیکی شناخته می‌شود. حال می‌توان به بررسی دقیق‌تر معادله فوکس ویلیامز-هاوکنینگز پرداخت. با توجه به این که در هندسه‌های سیلندری شکل، منابع دوقطبی صوت در مقایسه با منابع تک‌قطبی و چهارقطبی غالب‌اند، معادله فوکس ویلیامز-هاوکنینگز نهایتاً پس از قدری عملیات ریاضی به شکل رابطه (۱) ساده می‌شود [۲۲]:

$$p'(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi c_0} \int_S \frac{(x_i - y_i) n_i}{r^2} \frac{\partial p(\vec{y}, \tau)}{\partial \tau} dS(\vec{y}) + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{(x_i - y_i) n_i p(\vec{y}, \tau)}{r^3} dS(\vec{y}) \quad (1)$$

مولفه‌های بردار نرمال بر آن‌ها و مساحت مربوط به ناحیه قرارگیری هر سنسور در هر آزمایش نیز مشخص می‌شود. سپس این موارد به عنوان ورودی برای محاسبه سمت راست رابطه (۱) در نظر گرفته می‌شوند و انتگرال‌های موجود در این معادله با استفاده از این ورودی‌ها و برای هر نقطه دلخواه در دوردست به شکل عددی محاسبه می‌شوند تا فشار دوردست به شکل ناپایا به دست آید. سپس در این مرحله با استفاده از رابطه (۲) مقدار سطح فشار صوت در نقاط مختلف محاسبه می‌شود. این کار بدین صورت انجام می‌شود که ابتدا از داده‌های فشار دوردست پیش‌بینی شده، متوسط‌گیری می‌شود. سپس این مقدار متوسط از مقادیر فشار لحظه‌ای کم می‌شود تا مقدار نوسانی $(P'(t))$ به دست آید. در مرحله بعد از این مقادیر نوسانی، جذر میانگین مربعات آن گرفته می‌شود تا P'_{rms} به دست آمده در فرمول محاسبه سطح فشار صوت (رابطه (۲)) قرار داده شود. در ادامه، در این رابطه در ابتدای بخش ۲-۴ نیز توضیحاتی ارائه خواهد شد.

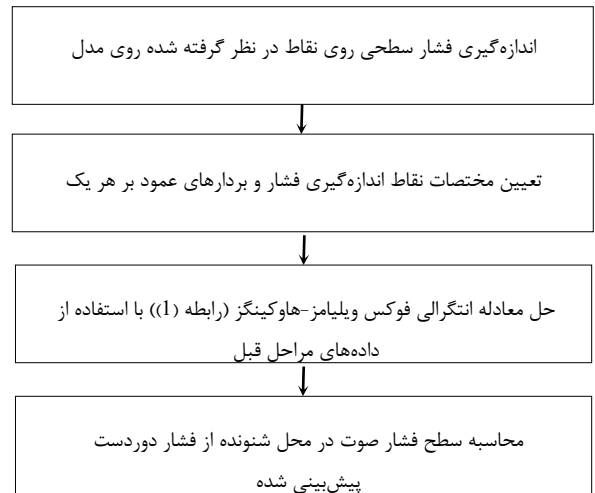
۳- تجهیزات آزمایشگاهی

مهم‌ترین تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه تونل باد، مدل مورد بررسی، جریان‌سنج سیم داغ، سنسورهای فشار سطحی و مبدل فشار هستند که در ادامه به مشخصات آن‌ها اشاره می‌شود. نمایی کلی از تجهیزات آزمایشگاهی اصلی مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است.

۳-۱- تونل باد

تونل باد مادون صوت دانشگاه یزد از نوع مدار باز و دمنده بوده و اتاق آزمون آن از نوع بسته است. قسمت‌های اصلی این تونل باد شامل یک فن سانتریفیوژ یک‌طرفه، دیفیوزر زاویه باز، اتاق آرامش، نازل و اتاق آزمون است. بیشینه سرعت باد در اتاق آزمون، حدوداً برابر با ۳۰ متر بر ثانیه است. جریان داخل اتاق آزمون تقریباً یکنواخت است و شدت آشفتگی برای تونل خالی بسیار کم و در حدود ۰/۳ درصد برای سرعت‌های کمتر از ۲۰ متر بر ثانیه است. تونل باد مذکور دارای دو اتاق آزمون هریک به طول ۱۲۰۰ میلی‌متر بوده و سطح مقطع اتاق آزمون ۴۵۷×۴۵۷ میلی‌متر مربع است.

دیواره‌های اتاق‌های آزمون تونل باد آیرودینامیکی اولیه از چوب



شکل ۱: فلوجارت روش و مراحل پیش‌بینی فشار دوردست
Fig. 1. far-field pressure prediction method flowchart

که در آن، p' نوسانات فشار صوتی در دوردست، p فشار سطحی ثبت شده در محل هر سنسور، \bar{x} مختصات مکانی شنونده، c_0 سرعت صوت در هوا، r فاصله بین منبع صوت و شنونده، n بردار نرمال بر منبع صوت، $\tau = t - r/c_0$ زمان انتشار و \bar{y} مختصات منبع صوت روی سطح جسم صلب است. در مطالعه حاضر بیشتر مباحث آیرودینامیکی به کمک کمیت سطح فشار صوت^۱ بیان می‌شوند. یکی از پارامترهای مهم در مطالعات آکوستیکی سطح (تراز) فشار صوتی است. با محاسبه فشار نوسانی دوردست از رابطه (۱)، مجذور متوسط مربعات نوسانات فشار دوردست و سپس سطح فشار صوت بر حسب دسی‌بل با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شوند:

$$SPL = 20 \log \left(p'_{rms} / P_{ref} \right) \quad (2)$$

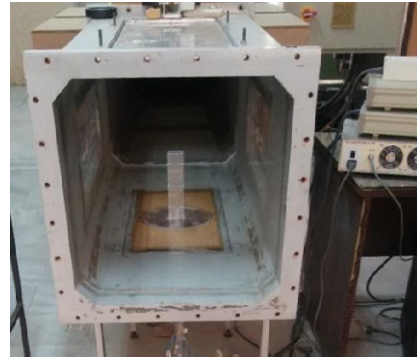
که P'_{rms} مجذور متوسط مربعات نوسانات فشار است. ضمناً P_{ref} فشار مرجع بوده و برای هوا برابر با 2×10^{-5} Pa و برای سایر سیالات 10^{-6} Pa در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. الگوریتم مورد استفاده در مطالعه حاضر برای پیش‌بینی نویز دوردست در شکل ۱ نشان داده شده است. در مطالعه حاضر، در سرعت‌های بالادست و زوایای حمله مختلف، فشار سطحی به‌صورت ناپایا در محل تمامی سنسورها اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. مختصات محل قرارگیری سنسورها،

2 Root Mean Square (RMS)

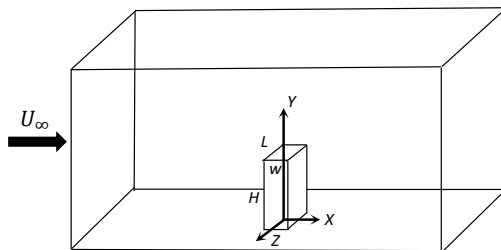
1 Sound Pressure Level (SPL)



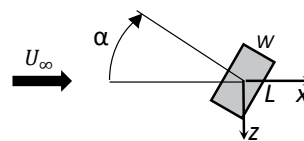
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲: تجهیزات آزمایشگاهی: (الف) نمایی کلی از تجهیزات؛ (ب) نمایی از مدل مورد بررسی؛ (ج) طرح شماتیک از مدل ساختمان سی.آ.آ.سی در اتاق آزمون تونل و سیستم مختصات مورد استفاده؛ (د) تعریف زاویه حمله (نما از بالا)

Fig. 2. Experimental setup: (a) a view of instruments and equipment; (b) a picture on the model under investigation; (c) Schematic drawing of wall mounted CAARC tall building model placed in the test section: (a) coordinate system; (b) definition of angle of attack (top view)

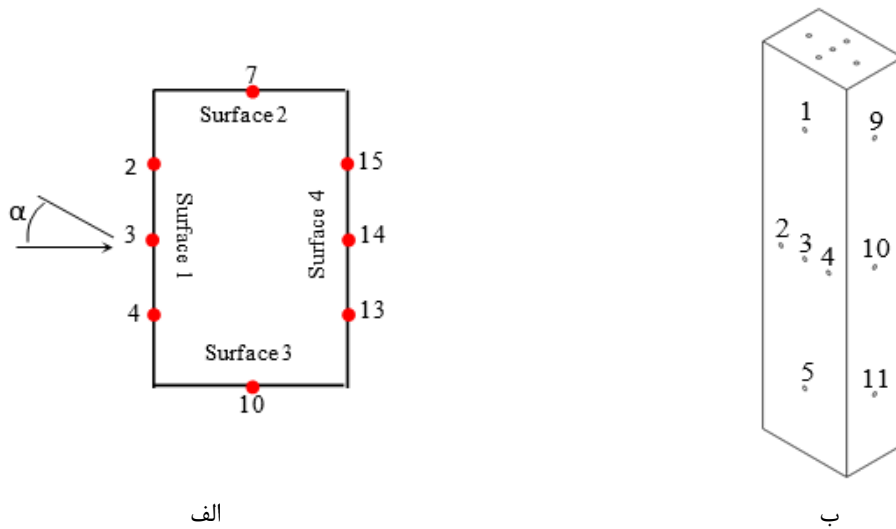
در فاصله تقریبی $1/8$ m از خروجی نازل، روی کف اتاق آزمون نصب گردید. مدل از جنس پلکسی گلاس با سطح بسیار صاف و صیقلی و لبه‌های کاملاً تیز ساخته شده تا نقاط جدایش جریان ثابت گردند. مدل می‌تواند در محل قرارگیری بچرخد تا زاویه حمله جریان تغییر نماید. در این مطالعه دو زاویه حمله صفر و 90° درجه بررسی شده‌اند. شکل ۲ نحوه قرارگیری مدل مذکور در اتاق آزمون دوم تونل باد را نمایش می‌دهد. با توجه به محدودیت کارت میدل آنالوگ به دیجیتال مورد استفاده در مطالعه حاضر از نظر تعداد کانال‌ها و نیز محدودیت فضای عبور لوله‌های اندازه‌گیری فشار از حفره ایجاد شده در پایین مدل، در مجموع ۲۱ سنسور برای اندازه‌گیری فشار سطحی روی وجوه مختلف مدل ایجاد شد.

نام‌گذاری وجوه مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل فقط ۸ سنسور تعبیه شده از ۲۱ سنسور که روی کمر بند میانی قرار گرفته‌اند نشان داده شده‌اند و سنسورهای قرار گرفته روی کمر بندهای دیگر و روی سقف مدل نشان داده نشده‌اند. برای حصول درک بهتر

و پنجره‌های تعبیه شده روی آن‌ها از پلکسی گلاس ساخته شده است. این تونل باد برای اندازه‌گیری‌های آکوستیکی با هدف کاهش نویز پس زمینه آن اصلاح گردیده است. این اصلاحات شامل جایگزینی دیواره‌های صلب اتاق آزمون اول با یک سری جعبه جاذب آکوستیکی است. جدار داخلی این جعبه‌ها با پارچه‌هایی که کاملاً کشیده شده و محکم شده‌اند، پوشانده شده است. این کار باعث کاهش نویز پس‌زمینه تونل باد تا 10 dB در برخی محدوده‌های فرکانس شد. لازم به ذکر است آزمایش‌ها در اتاق آزمون دوم تونل باد با دیواره‌های صلب صورت گرفتند.

۲-۳- مدل مورد بررسی

در این مطالعه، جریان حول یک سیلندر سه‌بعدی متصل به کف تحت دو زاویه حمله مختلف از نقطه نظر آیرودینامیکی و آیروآکوستیکی بررسی شده است. مدل مورد بررسی، مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.سی با مقیاس $1:1000$ است. ابعاد سطح مقطع مدل برابر با $46 \text{ mm} \times 31 \text{ mm}$ و ارتفاع آن 183 mm است که



شکل ۳: (الف) معرفی وجوه مدل و سنسورهای فشار تعبیه شده بر صفحه میانی مدل؛ (ب) نمایی سه بعدی از مدل و معرفی تعدادی از سنسورها
 Fig. 3. (a) surface pressure measuring points on the middle height line; (b) a 3D view of the model with some surface pressure tap locations

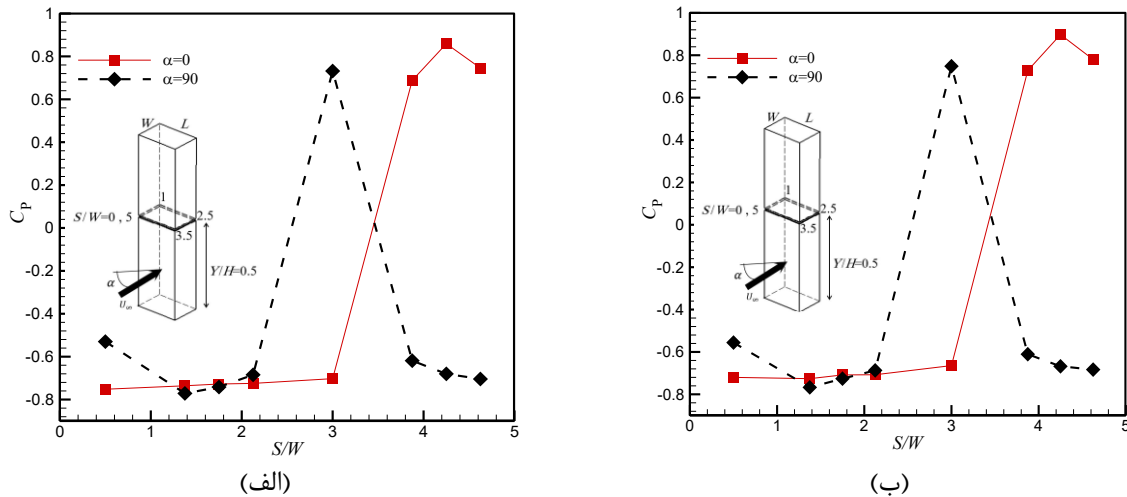
جدول ۱: موقعیت سنسورهای فشار سطحی روی مدل ساختمان سی.آ.آ.آ.سی در زاویه حمله $\alpha=0$
 Table 1. surface pressure tap locations on CAARC building model at $\alpha=0$

| نام وجه | شماره سنسور | موقعیت | | | نام وجه | شماره سنسور | موقعیت | | |
|----------|-------------|---------|--------|--------|-----------|-------------|---------|--------|--------|
| | | X(m) | Y(m) | Z(m) | | | X(m) | Y(m) | Z(m) |
| بالادست | 1 | 0.0155 | 0.1525 | 0 | پایین دست | 12 | 0.0155 | 0.1525 | 0 |
| | 2 | 0.0155 | 0.0915 | -0.013 | | 13 | 0.0155 | 0.0915 | 0.013 |
| | 3 | 0.0155 | 0.0915 | 0 | | 14 | 0.0155 | 0.0915 | 0 |
| | 4 | 0.0155 | 0.0915 | 0.013 | | 15 | 0.0155 | 0.0915 | -0.013 |
| | 5 | 0.0155 | 0.0305 | 0 | | 16 | 0.0155 | 0.0305 | 0 |
| سمت چپ | 6 | -0.0076 | 0.183 | -0.023 | سقف | 17 | -0.0076 | 0.183 | 0 |
| | 7 | 0 | 0.0915 | -0.023 | | 18 | 0 | 0.183 | 0 |
| | 8 | 0 | 0.0305 | -0.023 | | 19 | 0.0076 | 0.183 | 0 |
| سمت راست | 9 | 0 | 0.1525 | 0.023 | | 20 | 0 | 0.183 | 0.013 |
| | 10 | 0 | 0.0915 | 0.023 | | 21 | 0 | 0.183 | -0.013 |
| | 11 | 0 | 0.0305 | 0.023 | | | | | |

۳-۳- دستگاه فشارسنج ۳۲ کاناله و کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال برای اندازه‌گیری فشار لحظه‌ای روی وجوه مدل مورد بررسی از دستگاه مبدل فشار ۳۲ کاناله با دقت % ۰/۱ کل محدوده عملکردی سنسور^۱ استفاده شده است. فشارهای سطحی ثبت شده به صورت لحظه‌ای توسط سنسورهای تعبیه شده در این دستگاه، توسط کارت

نمایی سه بعدی از مدل به همراه موقعیت تعدادی از سنسورها نیز در این شکل نشان داده شده است. موقعیت همه سنسورهای فشار تعبیه شده روی مدل در زاویه حمله صفر درجه نیز در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است عباراتی مثل وجه بالادست و نظیر آن مربوط به زاویه حمله صفر درجه است و طبیعتاً در زاویه حمله ۹۰ درجه وجه ۱، وجه بالادست نخواهد بود.

1 Full Scale



شکل ۴: ضریب فشار متوسط برای کمر بند افقی میانی ($Y/H=0.5$): (الف) $U_\infty = 12.5 \text{ m/s}$; (ب) $U_\infty = 17.5 \text{ m/s}$

Fig. 4. mean C_p distribution over horizontal section of the building ($Y/H=0.5$): (a) $U_\infty = 12.5 \text{ (m/s)}$; (b) $U_\infty = 17.5 \text{ (m/s)}$

بلند سی.آ.آ.رسی ارائه می‌شوند. کوشش می‌شود جریان هم از نظر آیرودینامیکی و هم آکوستیکی مورد مطالعه قرار گیرد. در بخش آکوستیکی این مطالعه، ابتدا به منظور اعتبارسنجی روش پیش‌بینی نویز در دوردست، نویز منتشر شده از یک سیلندر مربعی دوبعدی که در مرجع [۲۴] به صورت عددی بررسی شده بود با نتایج حاصله از برنامه محاسباتی نوشته شده برای حل معادله (۱) مقایسه می‌شود. نتایج به دست آمده از کد با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار تجاری فلونت (ارائه شده در مرجع [۲۴]) و نیز با داده‌های تجربی مطالعه دورینو [۲۵] مقایسه می‌شوند تا صحت روش تایید شود. پس از اعتبارسنجی الگوریتم محاسباتی و روش مورد استفاده، نویز دوردست منتشر شده از جریان حول مدل ساختمان سی.آ.آ.رسی پیش‌بینی می‌شود.

۴-۱- تحلیل آیرودینامیکی جریان حول مدل ساختمان سی.آ.آ.رسی

در این بخش، آیرودینامیک جریان حول مدل ساختمان سی.آ.آ.رسی متصل به کف بررسی می‌گردد. به‌طور کلی، بررسی آیرودینامیکی ناحیه دنباله برای بررسی آیرودینامیکی مهم است. زیرا ناحیه دنباله به عنوان ناحیه‌ای مهم و یکی از منابع اصلی تولید نویز آیرودینامیکی است. مشخصاً هدف اصلی مطالعه حاضر پیش‌بینی نویز آیرودینامیکی با استفاده از داده‌های فشار سطحی است و این، خود بیانگر ارتباط تنگاتنگ آیرودینامیک و آیرودینامیک جریان است.

مبدل آنالوگ به رایانه برای پردازش‌های بعدی انتقال داده می‌شود. آفست‌گیری مقادیر خروجی این دستگاه به صورت نرم‌افزاری انجام می‌شود. کارت A/D مورد استفاده کارت مدل ۶۲۱۰ تولید شرکت ناسیونال اینسترومنت^۱ است. رزولوشن این کارت ۱۶ بیت و نرخ داده‌برداری آن 250 kS/s است.

۴-۳- جریان سنج سیم داغ

یکی از تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه، برای تحلیل فرکانسی جریان، جریان‌سنج سیم داغ، ساخت شرکت فرانسجش صبا است. داده‌های جریان‌سنج سیم داغ با استفاده از کاوش‌گر یک‌بعدی جمع‌آوری شد تا نوسانات مولفه سرعت در جهت جریان در ناحیه دنباله اندازه‌گیری و ثبت شود. جریان‌سنج سیم داغ داخل تونل باد به کمک یک لوله پیتو استاتیکی کالیبره شد. یکی از اهداف این مطالعه بررسی ارتباط بین قله‌های مشاهده شده در طیف فرکانسی سیگنال به دست آمده از اندازه‌گیری با جریان‌سنج سیم داغ و قله‌های متناظر دیده شده در طیف فشار سطحی است.

۴- نتایج و تحلیل و بررسی

در این بخش، نتایج بررسی‌های صورت گرفته روی نویز آیرودینامیکی منتشر شده ناشی از جریان حول مدل ساختمان

1 National Instruments (NI)

دست آمده برای این سنسورها نویز آیروداکوستیکی پیش‌بینی خواهد شد و هر یک از این سنسورها نماینده‌ای از بخشی از مساحت سطح خارجی مدل هستند. در این مورد در بخش‌های بعدی بیشتر توضیح داده خواهد شد.

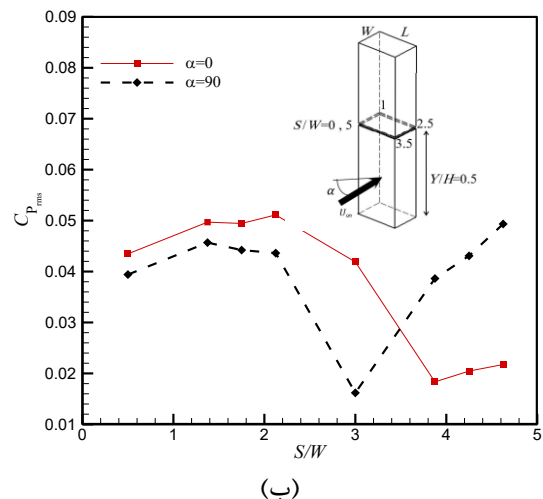
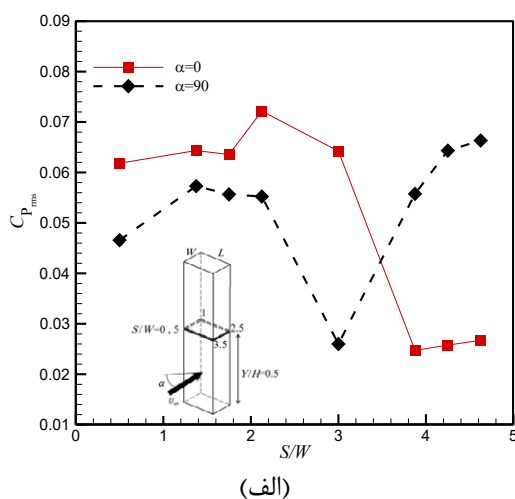
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در هر دو زاویه حمله ضریب فشار به جز برای سنسور یا سنسورهای قرار گرفته در وجه بالادستی منفی است. همچنین عدد رینولدز یا تغییر سرعت بالادست اثر بسیار ناچیزی روی الگوی تغییرات ضریب فشار گذاشته‌است. نکته جالب توجه دیگر این که ضریب فشار حتی روی وجه رو به جریان در هیچ یک از زوایا برابر با یک نشده است. این موضوع در مطالعات پیشین از جمله مراجع [۵]، [۹، ۲۶، ۲۷] نیز گزارش شده‌است. در مرجع [۵] نتایج اندازه‌گیری فشار سطحی در شش مرکز پژوهشی و دانشگاه ارائه شده‌است و در هیچ یک از این اندازه‌گیری‌ها ضریب فشار حتی در وجه رو به جریان نیز برابر با یک گزارش نشده‌است. شاید این موضوع با جدایش جریان از سه سمت سیلندر با ارتفاع محدود در ارتباط باشد. یعنی جریان رو به بالا و حتی رو به پایین و نیز جریان رو به دو سمت جانبی سیلندر باعث می‌شود ضریب فشار در وجه بالادستی به یک نرسد.

پس از بررسی ضریب متوسط فشار سطحی، نوسانات فشار سطحی بررسی می‌شوند. ضریب فشار سطحی نوسانی با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید که $C_{p_{rms}}$ و P'_{rms} به ترتیب جذر میانگین مربعات فشار و ضریب فشار نوسانی هستند.

ابتدا ضریب فشار متوسط بررسی می‌شود. لازم به ذکر است داده‌برداری فشار سطحی به صورت ناپایا به مدت ۱۰ s و با فرکانس ۱۰۰۰ Hz انجام گردید. مقادیر ضریب فشار متوسط، که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود برای سنسورهای فشار قرار گرفته روی کمر بند افقی میانی جسم که در وسط ارتفاع مدل ($Y/H=0.5$) قرار گرفته است در شکل ۴ ارائه شده است.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، P فشار سطحی ثبت شده، P_0 فشار استاتیک جریان بالادست، ρ چگالی هوا و U_∞ سرعت جریان بالادست هستند. در شکل ۴ نتایج مربوط به دو زاویه حمله صفر درجه (وجه بزرگتر رو به جریان است) و ۹۰ درجه (وجه کوچکتر رو به جریان است) ارائه شده‌است. همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است، S ، مختصات انتخابی روی سطح مدل (مشخصاً روی کمر بند میانی مدل) است که در شکل با پهنای W بی‌بعد شده است. کمیت S/W بین صفر تا ۵ تغییر می‌کند و نقطه صفر آن در شکل مشخص است. لازم به توضیح است که در مطالعه حاضر سنسورهای فشار روی کمر بند میانی در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی که در مطالعات قبلی سنسورها روی کمر بند افقی دیگری مثل $Y/H=0.67$ انتخاب می‌شده‌اند. دلیل انتخاب چنین کمر بندی در مطالعه حاضر این است که از داده‌های به



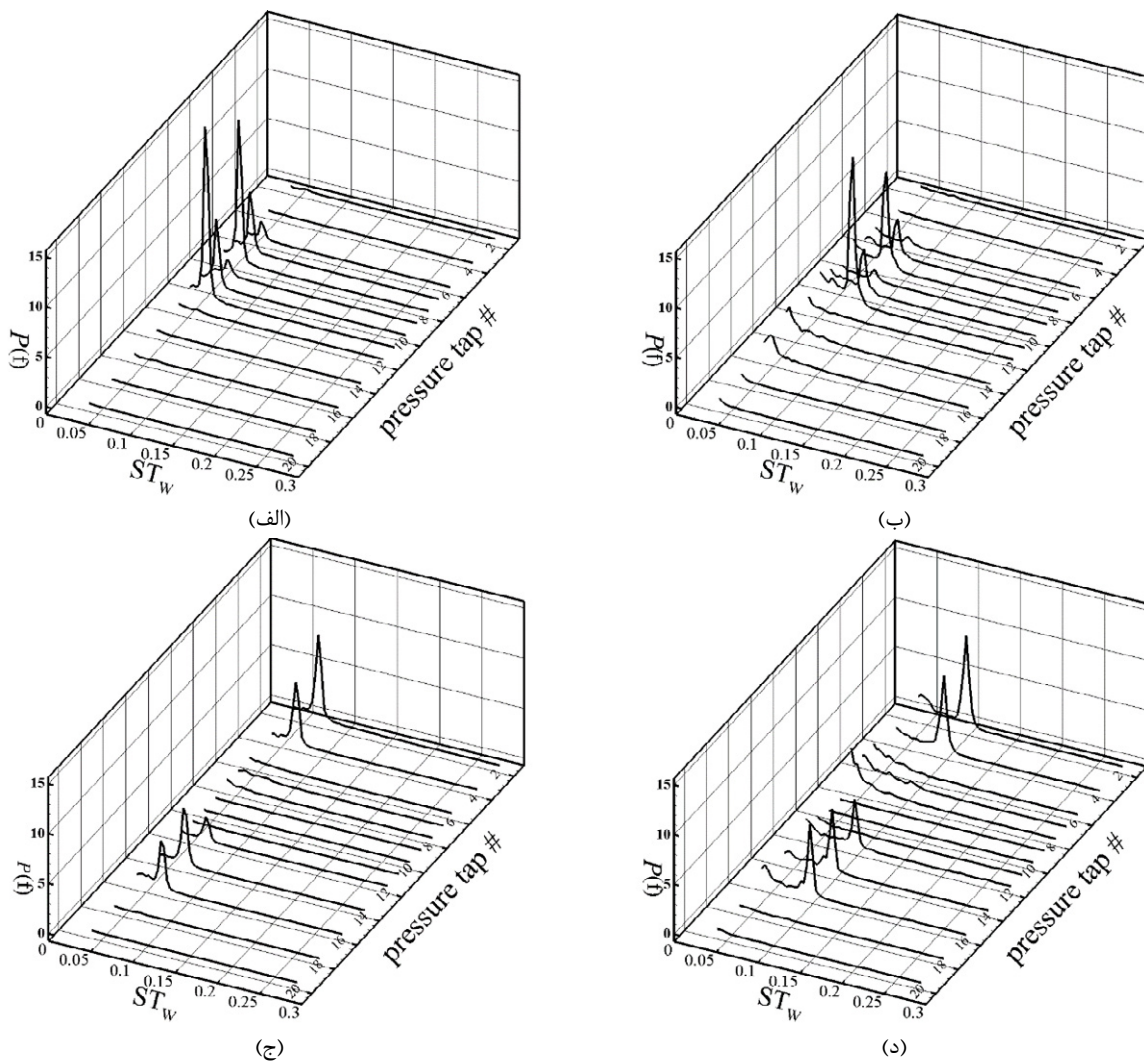
شکل ۵: ضریب فشار نوسانی برای کمر بند افقی میانی ($Y/H=0.5$): (الف) $U_\infty = 12.5 \text{ m/s}$; (ب) $U_\infty = 17.5 \text{ m/s}$

Fig. 5. rms C_p distribution over horizontal section of the building ($Y/H=0.5$): (a) $U_\infty = 12.5 \text{ (m/s)}$; (b) $U_\infty = 17.5 \text{ (m/s)}$

قرار دارند، افزایش می‌یابد. دلیل این امر جدایش جریان از گوشه‌های بالادستی سیلندر است. با جدایش جریان و تشکیل و ریزش گردابه‌ها در نزدیکی سطوح جانبی و پشتی مدل، ضریب فشار نوسانی افزایش می‌یابد. ضمناً بر خلاف ضریب فشار متوسط که تقریباً مستقل از عدد رینولدز است، ضریب فشار به عدد رینولدز بستگی دارد. ضریب فشار نوسانی برای سرعت بالادست ۱۲/۵ متر بر ثانی بیشتر از مقادیر متناظر برای سرعت بالادست ۱۷/۵ متر بر ثانیه است. در انتهای این بخش، تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مورد بررسی انجام شد. در مورد ضریب فشار سطحی مطابق روش مورد استفاده

$$C_{p_{rms}} = \frac{P'_{rms}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2} \quad (4)$$

در شکل ۵ ضریب فشار نوسانی برای سنسورهای فشار قرار گرفته روی کمر بند افقی میانی جسم ارائه شده‌است. ملاحظه می‌شود که روند تغییرات ضریب فشار نوسانی تقریباً عکس روند تغییرات ضریب فشار متوسط است. یعنی روی وجه بالادستی جریان که ضریب فشار متوسط افزایش یافته و مثبت می‌شود، ضریب فشار نوسانی کاهش می‌یابد. ولی ضریب فشار نوسانی برای سنسورهای قرار گرفته در ناحیه جدایش جریان و دنباله که در معرض نوسانات فشار بیشتری



شکل ۶: طیف توانی فشار سطحی روی سطح مدل سی.آ.آ.سی (الف) $U_{\infty} = 12.5 \text{ m/s}$ و $\alpha = 0$ ؛ (ب) $U_{\infty} = 17.5 \text{ m/s}$ و $\alpha = 0$ ؛ (ج) $U_{\infty} = 12.5 \text{ m/s}$ و $\alpha = 90$ ؛ (د) $U_{\infty} = 17.5 \text{ m/s}$ و $\alpha = 90$

Fig. 6. power spectral density of the surface pressure along the surface of the CAARC building model (Y/H=0.5): (a) $U_{\infty} = 12.5(\text{m/s}), \alpha = 0$; (b) $U_{\infty} = 17.5(\text{m/s}), \alpha = 0$; (c) $U_{\infty} = 12.5(\text{m/s}), \alpha = 90$; (d) $U_{\infty} = 17.5(\text{m/s}), \alpha = 90$

صادق است. در این ارتباط سیگنال مربوط به سنسورهای ۸ و ۱۱ در شکل‌های ۶ (الف) و (ب) و سنسورهای ۵ و ۱۶ در شکل‌های ۶ (ج) و (د) را ببینید. شاید دلیل این موضوع کاهش قدرت گردابه‌های عرضی جدا شده از مدل در نزدیکی سقف به دلیل جریان رو به پایین در نزدیکی سقف باشد. با بررسی بیشتر این موضوع مشخص شد که قله ریزش گردابه در طیف فشار سطحی سنسورهای واقع در سقف (وجه بالایی مدل) به چشم نمی‌خورد.

برای بررسی دقیق‌تر، فرکانس ریزش گردابه از سیلندر در اعداد رینولدز مختلف، در جدول ۲ ارائه شده‌اند. فرکانس ریزش گردابه، به دو طریق اندازه‌گیری شده است. این دو روش شامل تحلیل سیگنال‌های حاصل از اندازه‌گیری فشار ناپایای سطحی و نیز سیگنال‌های به دست آمده از اندازه‌گیری سرعت با جریان سنج سیم داغ است.

به عنوان نمونه، طیف به دست آمده از جریان سنج سیم داغ و سنسور فشار سطحی شماره ۱۱ در حالت زاویه حمله صفر و سرعت بالادست $U_{\infty} = 12/5 \text{ m/s}$ در شکل ۷ نشان داده شده است. در مورد سیگنال فشار سطحی، فرکانس ریزش گردابه از سنسورهایی که قله مربوطه در طیف فشار سطحی آن‌ها قابل مشاهده بود، استخراج شده و در جدول ۲ نمایش داده شده‌است. در مورد جریان سنج سیم داغ

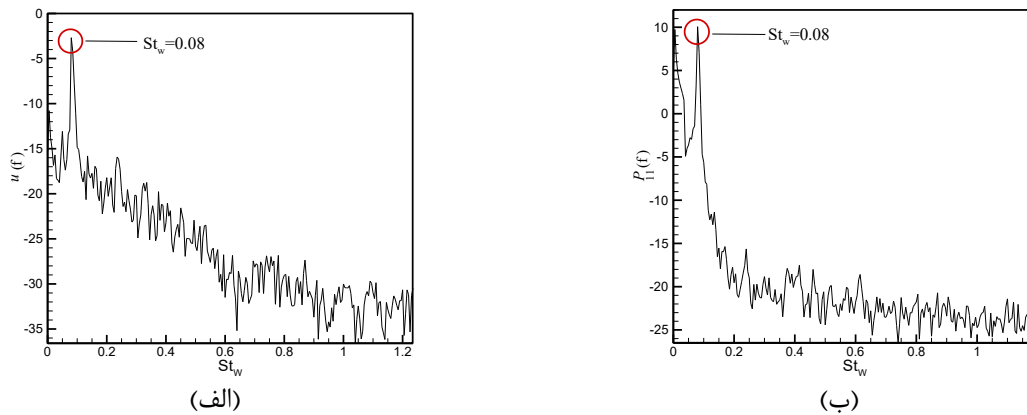
در مطالعه گوینگ [۲۸] میزان عدم قطعیت نتایج محاسبه شد. با در نظر گرفتن تمامی موارد، عدم قطعیت ضریب فشار متوسط در حدود ۴ درصد و عدم قطعیت ضریب فشار نوسانی تقریباً ۷ درصد به دست می‌آیند.

در ادامه، سیگنال‌های ثبت شده توسط سنسورهای فشار سطحی از نظر فرکانسی تحلیل می‌شوند. برای خلاصه‌تر شدن نمایش نتایج، تحلیل فرکانسی روی فشارهای سطحی ثبت شده انجام شده و نتیجه کار برای دو زاویه حمله صفر و ۹۰ درجه در شکل ۶ ارائه شده است. نکته جالب توجه این که برای هر دو زاویه حمله مورد بررسی، سنسورهای قرار گرفته در وجوه بالادستی و پایین دستی قله مربوط به ریزش گردابه را در طیف فشار سطحی خود به وضوح نمایش نمی‌دهند. ولی در طیف فشار سطحی سنسورهای واقع در وجوه کناری یک قله دقیقاً در فرکانس ریزش دیده می‌شود. از بین سنسورهای واقع در وجوه کناری، دامنه قله مشاهده شده در سیگنال ثبت شده برای سنسورهای نزدیک به کف (پایینی) بیشتر بوده و به عبارتی این قله‌ها برای این سنسورها واضح‌تر هستند. دلیل این امر قوی‌تر بودن نوسانات فشار در محل سنسورهای پایینی که داخل لایه مرزی کف قرار دارند است. این موضوع در هر دو زاویه حمله مورد بررسی نیز

جدول ۲: فرکانس ریزش گردابه ثبت شده توسط سنسورهای فشار سطحی برای مدل ساختمان سی.آ.آ.آ.رسی

Table 2. Observed peak frequencies in the signal of surface pressure measurements for CAARC building model

| $\alpha=90$ | | | | $\alpha=0$ | | | | سرعت بالادست (m/s) |
|--------------------------------------|----------------|--|----------------|--------------------------------------|----------------|--|----------------|-----------------------|
| اندازه‌گیری با سنسور فشار سطحی | | اندازه‌گیری با جریان سنج سیم داغ | | اندازه‌گیری با سنسور فشار سطحی | | اندازه‌گیری با جریان سنج سیم داغ | | |
| St_w | فرکانس (Hz) | St_w | فرکانس (Hz) | St_w | فرکانس (Hz) | St_w | فرکانس (Hz) | |
| 0.100 | 16.13 | 0.113 | 18.16 | 0.087 | 14.11 | 0.087 | 14.11 | 5 |
| 0.100 | 24.19 | 0.100 | 24.19 | 0.083 | 20.16 | 0.083 | 20.16 | 7.5 |
| 0.094 | 30.24 | 0.100 | 32.26 | 0.081 | 26.21 | 0.081 | 26.21 | 10 |
| 0.095 | 38.31 | 0.100 | 40.32 | 0.080 | 32.26 | 0.080 | 32.26 | 12.5 |
| 0.096 | 46.37 | 0.100 | 48.39 | 0.079 | 38.31 | 0.079 | 38.31 | 15 |
| 0.096 | 54.44 | 0.100 | 56.45 | 0.079 | 44.35 | 0.079 | 44.35 | 17.5 |



شکل ۷: نمونه‌ای از تحلیل طیفی صورت گرفته برای جریان حول سیلندر مربعی برای $U_\infty = 12.5 \text{ m/s}$ و $\alpha = 0$: (الف) نوسانات مولفه سرعت در جهت جریان؛ (ب) نوسانات فشار سطحی.

Fig. 7. a sample spectra for CAARC model for $U_\infty = 12.5 \text{ m/s}$ and $\alpha = 0$: (a) Fluctuations of streamwise velocity component; (b) Fluctuations of surface pressure

شده توسط دو تجهیز نیز می‌تواند عواملی مثل تغییرات جزئی سرعت بالادست در زمان انجام دو آزمایش باشد. همچنین عدد استروهل به دست آمده در مطالعه حاضر تطابق خوبی با مطالعات پیشین مثل مراجع [۲۹] و [۳۰] دارد. البته لازم به یادآوری است که در مطالعات مختلف عدد استروهل تعاریف متفاوتی دارد. مثلاً در مرجع [۳۰] عدد استروهل برای زاویه حمله صفر درجه 0.09 ارائه شده است که هماهنگی خوبی با مطالعه حاضر دارد.

۲-۴- تحلیل آیرودینامیکی جریان حول مدل ساختمان سی.آ.آ.رسی در این بخش، نویز ناشی از جریان حول مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.رسی بررسی می‌شود. برای پیش‌بینی نویز دوردست از داده‌های فشار سطحی ناپایا استفاده می‌شود. هر سنسور فشار روی سطح نمایندگی بخشی از مساحت سطح مدل را دارد. به همین دلیل سنسورهای فشار روی کمربند میانی مدل با تعداد بیشتری در نظر گرفته شده‌اند تا نمایندگی بهتری از سطح مدل داشته باشند. ضمناً طبق رابطه (۱) هر سنسور یا به عبارتی هر بخش از سطح مدل نیز یک بردار عمود بر سطح، n_i ، دارد که بسته به زاویه حمله مشخص می‌شود. این موارد به همراه فشار سطحی ناپایای اندازه‌گیری شده برای سنسورهای فشار مختلف ورودی‌های برنامه نوشته شده محسوب می‌شوند. برنامه مذکور در محیط متلب نوشته شده است. سپس با استفاده از رابطه (۱) نویز دوردست به شکل ناپایا محاسبه شده و مورد پردازش‌های بعدی قرار می‌گیرد. در این راستا، ابتدا فرآیند پیش‌بینی نویز با استفاده از داده‌های

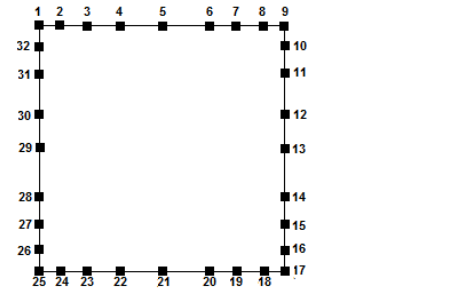
نیز سنسور در نقطه‌ای مناسب در ناحیه دنباله قرار داده شد و سیگنال سرعت ثبت و پردازش شد.

لازم به ذکر است که تمامی قله‌های مشاهده شده برای تمامی سنسورهای فشار سطحی که قله در سیگنال آنها مشهود بود در همه حالات دقیقاً در یک فرکانس مشاهده شدند. مقادیر بدون بعد شده فرکانس ریزش گردابه در قالب عدد استروهل St_w نیز در جدول ۲ ارائه شده‌اند. عدد بدون بعد St_w به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$St_w = \frac{fW}{U_\infty} \quad (5)$$

که در رابطه بالا، f فرکانس ریزش گردابه و W پهنای سطح مقطع مدل هستند. همان‌گونه که از جدول ۲ مشخص است، با افزایش سرعت جریان بالادست، گردابه‌ها با فرکانس بیشتری از مدل ریزش می‌کنند، ولی در محدوده سرعت بالادست مورد بررسی، عدد استروهل تابعی قوی از عدد رینولدز نیست. همچنین با تغییر زاویه حمله از صفر به 90° درجه، پهنای ناحیه دنباله پشت مدل کاهش می‌یابد. این موضوع باعث می‌شود فرکانس ریزش گردابه افزایش یابد. ملاحظه می‌شود که فرکانس ریزش گردابه به دست آمده از هر دو شیوه اندازه‌گیری تقریباً برابر به دست آمده است. این موضوع موید این مطلب است که قله‌های مشاهده شده در سیگنال فشار سطحی به پدیده ریزش گردابه مربوط هستند. همچنین این موضوع درستی شیوه‌های اندازه‌گیری و عملکرد تجهیزات مورد استفاده را نشان می‌دهد. علت اختلاف جزئی در فرکانس ریزش گردابه ثبت

نتایج حل عددی صورت گرفته در مرجع [۲۴] فشار سطحی ناپایا در ۳۲ نقطه روی سطح سیلندر مربعی استخراج شد. موقعیت این نقاط در شکل ۸ نشان داده شده است.

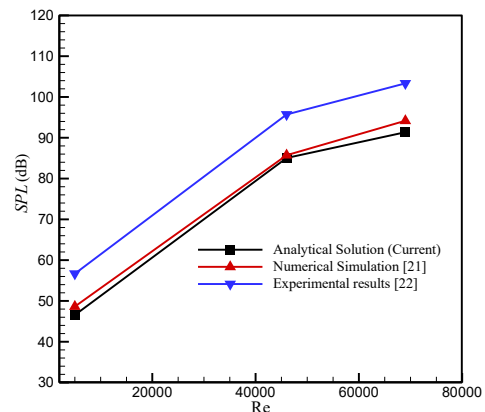


شکل ۸: موقعیت نقاطی که فشار سطحی ناپایا در آنها ثبت و برداشت شده است [۲۱].

Fig. 8. surface pressure measuring points [21]

از فشار سطحی ناپایا در ۳۲ نقطه نشان داده شده در شکل ۸ برای محاسبه نویز دوردست با استفاده از معادله انتشار صوت فوکس ویلیامز-هاوکینگز استفاده می‌شود. نتیجه به دست آمده از نرم‌افزار فلونتت برای تعداد زیادی نقطه در دوردست آکوستیکی و نیز نتایج ارائه شده برای چند نقطه در مطالعه تجربی دورنینو [۲۵] برای مقایسه مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج به دست آمده از کد نوشته شده در مطالعه حاضر، نتایج نرم‌افزار تجاری فلونتت و نیز نتایج تجربی مرجع [۲۵] در شکل ۹ برای سه عدد رینولدز ۵۰۰۰، ۴۶۰۰۰ و ۶۹۰۰۰ ارائه شده است. در این نمودار نویز آیرودینامیکی ثبت شده در نقطه گیرنده به مختصات (۰، ۰/۵۵، ۰/۲۱) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که برای هر سه عدد رینولدز مورد بررسی، اختلاف نتایج به دست آمده از مدل‌سازی حاضر و پیش‌بینی نرم‌افزار فلونتت کمتر از ۳٪ و با نتایج تجربی در حدود ۱۱٪ است. دلیل اختلاف نتایج مطالعه حاضر و حل عددی با نتایج تجربی این است که در اندازه‌گیری تجربی نویز توسط میکروفون، همه عوامل موثر بر تولید نویز از جمله آشفتگی جریان سهیم هستند. به علاوه، نویز پس‌زمینه تجهیزات اندازه‌گیری و تونل باد و غیره نیز قدری نویز اندازه‌گیری شده را بالاتر می‌برند. نویز پس‌زمینه تونل باد و سایر نویزهای محیطی قاعداً در روش نیمه‌تحلیلی مورد استفاده در مطالعه حاضر لحاظ نمی‌شوند. همچنین یکی از منابع مهم تولید صدا محل برخورد مدل با دیواره‌های خروجی از نازل تونل باد است که مدل به آن‌ها وصل می‌شود. این نویز در اندازه‌گیری توسط میکروفون ثبت می‌شود، ولی در مدل‌سازی حاضر و حل عددی این موضوع لحاظ نمی‌گردد. عدم قطعیت و خطاهای اندازه‌گیری تجربی نویز نیز به این موارد اضافه می‌شوند. لذا نویز به دست آمده در مطالعه حاضر طبیعتاً از مقادیر تجربی کمتر است.

در ادامه، الگوی جهتی به دست آمده در مطالعه حاضر و نیز نرم‌افزار فلونتت با یکدیگر مقایسه می‌شوند. لازم به ذکر است که نتایج مربوط به الگوی جهتی در مطالعه دورنینو [۲۵] ارائه نشده است. در شکل ۱۰ نتیجه این کار برای عدد رینولدز $Re = 46000$ و فاصله $r = 0.5$ m بین سیلندر و شنونده (دریافت کننده نویز) ارائه



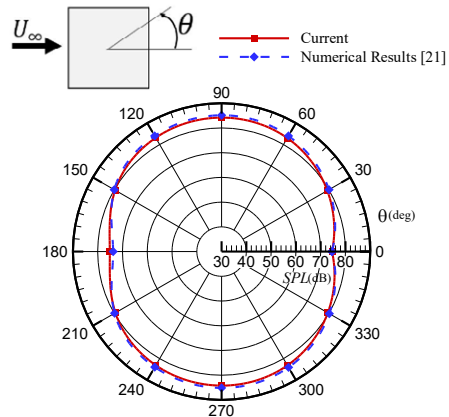
شکل ۹: وابستگی سطح فشار صوت به عدد رینولدز برای نویز دوردست ناشی از جریان حول سیلندر مربعی دوبعدی

Fig. 9. Dependency of SPL on the Re number for noise radiation from a 2D square cylinder

فشار سطحی و نیز معادله انتشار صوت فوکس ویلیامز-هاوکینگز اعتبارسنجی می‌شود. بدین منظور جریان حول یک سیلندر مربعی دوبعدی و نویز ناشی از آن به شکل عددی و به کمک نرم‌افزار فلونتت بررسی می‌شود. همچنین از نتایج فشار سطحی حل عددی مذکور به عنوان ورودی کد نوشته شده برای مطالعه حاضر استفاده می‌شود. این کد با استفاده از معادله فوکس ویلیامز-هاوکینگز نویز منتشر شده از هندسه‌های مختلف را با استفاده از داده‌های فشار سطحی پیش‌بینی می‌کند. نتایج به دست آمده از الگوریتم تهیه شده در مطالعه حاضر با نتایج محاسبه نویز دوردست خروجی از نرم‌افزار تجاری فلونتت و نیز با نتایج اندازه‌گیری نویز دوردست به صورت تجربی توسط دورنینو [۲۵] برای همین هندسه، مقایسه می‌شود تا صحت و اعتبار الگوریتم مذکور تایید گردد. لازم به ذکر است جزئیات و نتایج حل عددی مذکور در مطالعه محمدرضایی و همکاران [۲۴] ارائه شده است. از

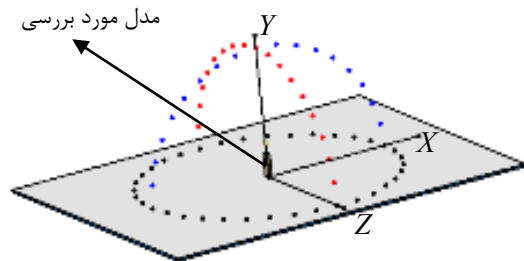
دست می‌دهد. با توجه به کل مباحث مطرح شده در این بخش، به نظر می‌رسد الگوریتم تهیه شده به خوبی معادله انتشار صوت فوکس ویلیامز-هاوکینگ را با استفاده از نوسانات فشار سطحی ناپایا با دقت خوبی حل می‌کند. پس از اعتبارسنجی الگوریتم نوشته شده، نتایج مربوط به انتشار صوت از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.آ.سی بررسی می‌شود. به طور کلی، الگوهای جهتی، توزیع زاویه‌ای میدان صوت منتشر شده از منابع تک‌قطبی، دوقطبی و چهارقطبی را نشان می‌دهند و در مطالعات پیشین کمتر به آن‌ها پرداخته شده‌است. الگوی جهتی ارائه شده برای یک منبع صوت، روند تغییرات فشار صوتی اندازه‌گیری یا پیش‌بینی شده در یک فاصله ثابت r از منبع صوت با تغییرات موقعیت زاویه‌ای θ را نشان می‌دهد. با توجه به این که ارائه الگوی جهتی اطلاعات زیادی در مورد الگوی انتشار نویز به شکلی فشرده به دست می‌دهد، این الگو در صفحات مختلف و برای شعاع‌های متفاوت رسم می‌شود. نقاط مورد بررسی در این بخش که نویز ناشی از جریان در این نقاط پیش‌بینی می‌شوند در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است.

ابتدا الگوی جهتی به دست آمده برای مدل مذکور در صفحه YZ به ازای $X=0$ رسم شده‌است. حاصل این کار برای دو زاویه حمله صفر و 90° در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. دوقطبی بودن الگوی انتشار صوت از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.آ.سی در این صفحه به خوبی مشخص است. یعنی کمترین صدا دقیقاً در بالای مدل و بیشترین صدا در دو سمت مدل حس می‌شوند. مشابه چنین نتایجی قبلاً در مراجعی مثل مطالعه بکر و همکاران [۳۱] ارائه شده بود. تقارن بسیار خوبی در نتایج دیده می‌شود که با توجه به تقارن هندسه



شکل ۱۰: الگوی جهتی برای انتشار صوت از یک سیلندر مربعی دو بعدی در شعاع $r=1.0$ متر ($Re=46000$)

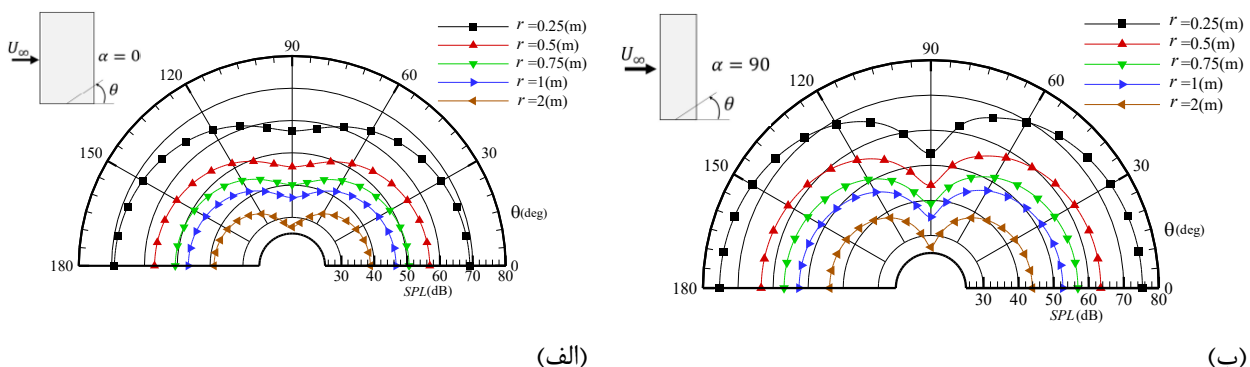
Fig. 10. Directivity patterns for 2D square cylinder at radii $r = 1.0$ m on the XY plane ($Re=46000$)



شکل ۱۱: نمای شماتیک از ناحیه آکوستیکی مورد بررسی

Fig. 11. Schematic drawing of the acoustic domain

شده است. با توجه به تشابه نمودارها برای اعداد رینولدز مختلف، در این جا به ارائه نمودار مربوط به عدد رینولدز 46000 بسنده می‌شود. ملاحظه می‌شود که کد تهیه شده برای مطالعه حاضر نتایجی کاملاً هماهنگ با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار فلونتت به

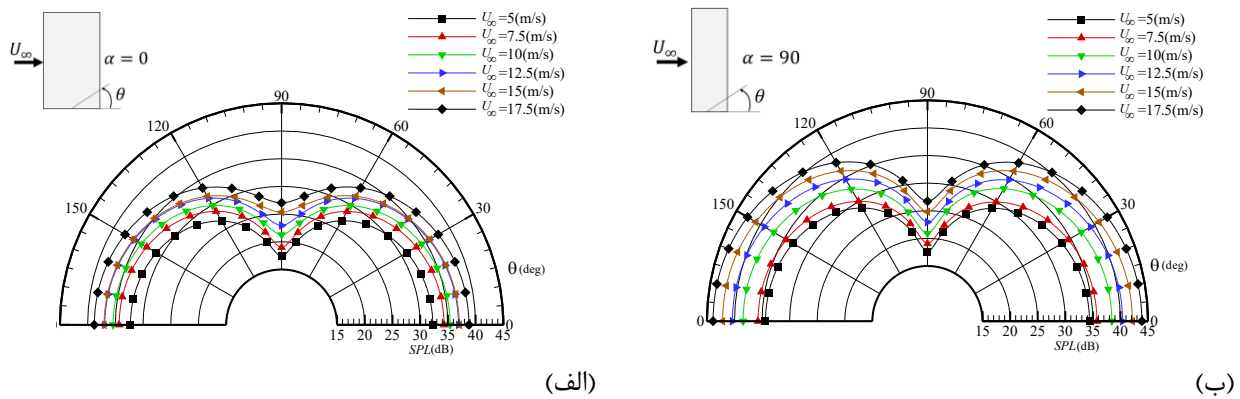


(الف)

(ب)

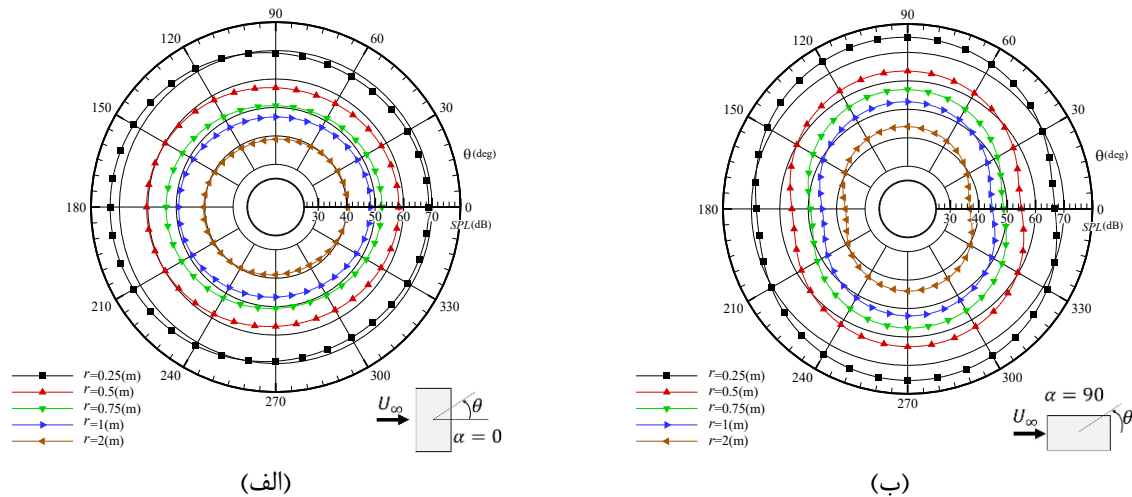
شکل ۱۲: الگوی جهتی برای انتشار صوت از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.آ.سی در فواصل مختلف در صفحه YZ ($X=0$) ($U_\infty = 17.5$ m/s): (الف) $\alpha = 0^\circ$; (ب) $\alpha = 90^\circ$.

Fig. 12. Directivity patterns for CAARC model at different distances on the YZ ($X=0$) plane ($U_\infty = 17.5$ m/s): (a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 90^\circ$.



شکل ۱۳: الگوی جهت‌ی برای انتشار صوت از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.رسی در سرعت‌های بالادست مختلف در صفحه YZ ($X=0$) و $r=2m$: الف) $\alpha=90^\circ$ ، ب) $\alpha=0^\circ$.

Fig. 13. Directivity patterns for CAARC model at different upstream velocities on the YZ ($X=0$) plane ($r=2m$): (a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 90^\circ$

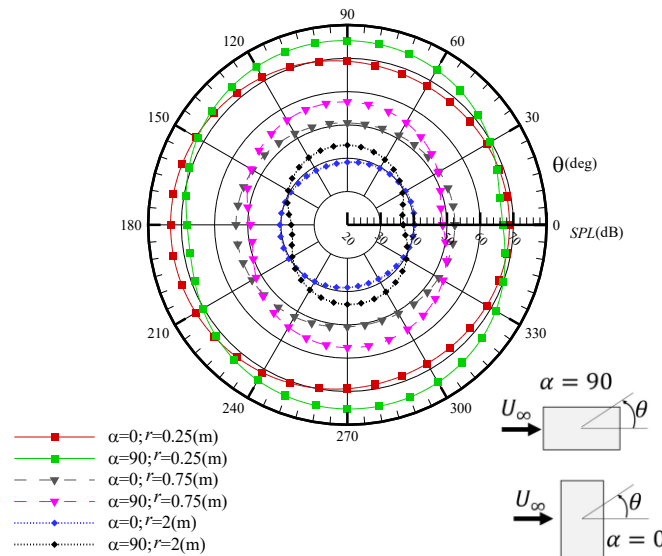


شکل ۱۴: الگوی جهت‌ی برای انتشار صوت از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.رسی در سرعت بالادست $U_\infty = 17.5 \text{ m/s}$ و $r=0.5m$ در صفحه XZ ($Y=0$): الف) $\alpha=90^\circ$ ، ب) $\alpha=0^\circ$.

Fig. 14. Directivity patterns for CAARC model at $U_\infty = 17.5 \text{ m/s}$ and $r=0.5m$ on the XZ plane ($Y=0$): (a) $\alpha = 0^\circ$; (b) $\alpha = 90^\circ$

نویز پیش‌بینی شده در این صفحه دارند. برای زاویه حمله 90° درجه این صفحات جانبی صفحات بزرگتری هستند و فشار نوسانی ثبت شده روی آنها با توجه به مساحت بیشتر این صفحات، نویز ثبت شده در این صفحه را افزایش می‌دهد. در ادامه، اثر تغییر سرعت جریان بالادست بررسی گردید. در شکل ۱۳ اثر تغییر سرعت بالادست بر نویز منتشر شده از مدل ساختمان سی.آ.آ.رسی در همان صفحه $X=0$ و شعاع $r=2m$ برای دو زاویه حمله مورد بررسی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش سرعت

طبیعی است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که الگوی انتشار برای تمامی شعاع‌ها یکسان است. فقط با فاصله گرفتن از جسم، به دلیل دور شدن از منبع صوت صدای محاسبه شده تضعیف می‌شود. از مقایسه نمودار به دست آمده برای دو زاویه حمله مورد بررسی مشخص می‌شود در صفحه $X=0$ صدای منتشر شده برای زاویه حمله 90° درجه نسبت به حالت زاویه حمله صفر درجه بیشتر است. دلیل این امر این است که صفحه مذکور در واقع از وسط صفحات جانبی مدل عبور می‌کند. نوسانات فشار ثبت شده روی این وجوه طبیعتاً تأثیر بیشتری روی



شکل ۱۵: الگوی جهتی برای انتشار صوت از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.رسی در سرعت بالادست $U_\infty = 17/5 \text{ m/s}$ و $r=0.5\text{m}$ در صفحه XZ ($Y=0$).

Fig. 15. Directivity patterns for CAARC model at $U_\infty = 17.5 \text{ m/s}$ and $r=0.5\text{m}$ on the XZ plane ($Y=0$)

فراهم گردد. لازم به ذکر است میزان صدای حس شده برای صفحات افقی دیگر مثل صفحات گذرا از وسط و یا سقف مدل تفاوت چندانی با صفحه گذرا از کف نداشت و لذا نتایج مربوط به صفحات فوق ارائه نشده است. مشاهده می شود که در بالا و پایین دست مدل صدای پیش بینی شده برای مدل با زاویه حمله صفر درجه بیشتر است؛ در حالی که در دو طرف مدل صدای پیش بینی شده برای زاویه حمله 90° درجه بیشتر است. در هر دو حالت برای قسمت هایی که به سمت وجوه بزرگ تر قرار گرفته اند صدای بیشتری نیز پیش بینی شده است. در انتهای این بخش نمودار جهتی مربوط به صفحه $Z=0$ ارائه می شود. در بین صفحات مورد بررسی، الگوی انتشار دوقطبی صدا در این صفحه قابل مشاهده نیست که این موضوع نیز با مرجع [۳۱] تطابق دارد. این صفحه بر خلاف دو صفحه دیگر که پیش تر بررسی شدند، دارای تقارن از نظر الگوی انتشار صدا نیست (شکل ۱۶).

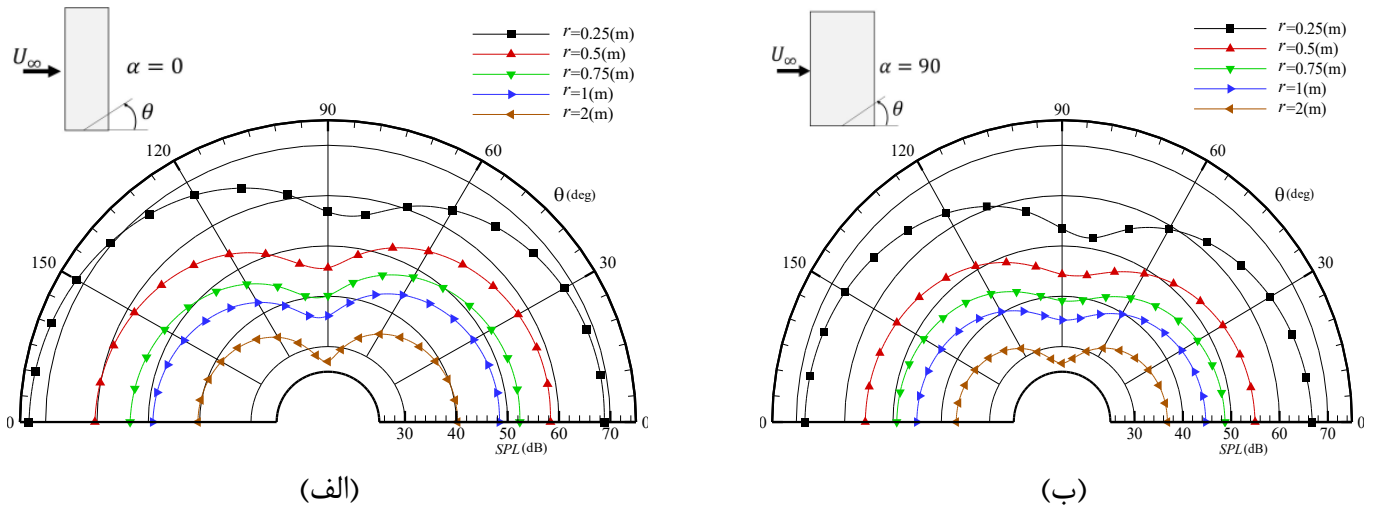
۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در مطالعه حاضر، نویز دوردست ناشی از جریان حول مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.رسی به روشی نیمه تحلیلی پیش بینی گردید. برای این کار داده های فشار سطحی روی مدل مذکور در یک تونل باد آیرودینامیکی اصلاح شده آکوستیکی اندازه گیری شده و

جریان بالادست باعث افزایش نویز در دوردست می شود. زیرا با افزایش سرعت بالادست، نوسانات فشار سطحی شدیدتر شده و با تقویت منبع صوت نویز ثبت شده افزایش می یابد. در این جا نیز نویز ثبت شده برای زاویه حمله 90° درجه بیشتر از نویز مربوط به زاویه حمله صفر درجه است. همچنین تاثیر سرعت بالادست بر نویز منتشر شده در قیاس با فاصله قدری کمتر به نظر می رسد.

پس از بررسی الگوی انتشار در صفحه YZ ، الگوی انتشار در صفحه XZ با $Y=0$ (صفحه کف) بررسی می شود. به عنوان نمونه، الگوی مذکور برای سرعت بالادست $U_\infty = 17/5 \text{ m/s}$ در شکل ۱۴ ارائه شده است. در این شکل و این صفحه نیز الگوی دوقطبی انتشار صدا قابل مشاهده است. به نحوی که برای زاویه حمله 90° درجه کمترین صدا در بالادست و پایین دست مدل روی خط مرکزی $Z=0$ و برای زاویه صفر درجه در دو سمت مدل پیش بینی می شود. ذکر این نکته لازم است که در صورت افزایش تعداد سنسورهای فشار تعبیه شده روی مدل الگوها بهتر و با تغییرات بیشتر مشاهده خواهند شد.

طبیعتاً اثر تغییر زاویه حمله بایستی در این صفحه بیشتر واضح باشد و در این مطالعه نیز چنین اتفاقی مشاهده شده است. در شکل ۱۵ به عنوان نمونه نتایج به دست آمده برای صفحه $Y=0$ در فواصل مختلف و به ازای دو زاویه حمله ارائه شده است تا امکان مقایسه بهتر



شکل ۱۶: الگوی جهت‌ی برای انتشار صوت از مدل ساختمان استاندارد سی.آ.آ.رسی در سرعت بالادست $U_\infty = 17/5 \text{ m/s}$ و $r = 0/5 \text{ m}$ در صفحه XY ($Z=0$): (الف) $\alpha=0$ (ب) $\alpha=90$.

Fig. 16. Directivity patterns for CAARC model at $U_\infty = 17.5 \text{ m/s}$ and $r = 0.5 \text{ m}$ on the XY plane ($Z=0$)

فهرست علائم

علائم انگلیسی

| | |
|----------------------|-----------|
| سرعت صوت، m/s | C_0 |
| فرکانس، Hz | f |
| فشار، N/m^2 | P |
| سطح فشار صوت، dB | SPL |
| عدد استروهل | St |
| موقعیت مکانی، m | X, Y, Z |

علائم یونانی

| | |
|------------------------|----------|
| زاویه حمله، ° | α |
| زمان انتشار، s | τ |
| چگالی، kg/m^3 | ρ |

زیرنویس

| | |
|--------------------|-------|
| مرجع | ref |
| مجذور متوسط مربعات | rms |
| پهنای سطح مقطع مدل | W |

منابع

- [1] C. Mannini, A.M. Marra, L. Pigolotti, G. Bartoli, The effects of free-stream turbulence and angle of attack on the aerodynamics of a cylinder with rectangular 5:

سپس با استفاده از این داده‌ها نویز دوردست به کمک معادله فوکس ویلیامز-هاوکینگز پیش‌بینی شد. آزمایش‌ها در دو زاویه حمله صفر و ۹۰ درجه و برای سرعت‌های بالادست مختلف انجام گرفتند. نتایج کار نشان داد در طیف فشار سطحی به دست آمده برای سنسورهای واقع در وجوه جانبی یک قله در فرکانسی برابر با فرکانس ریزش گردابه به چشم می‌خورد که در سیگنال‌های مربوط به سایر سنسورها دیده نمی‌شود. البته فرکانس به دست آمده برای پدیده ریزش گردابه از فشار سطحی و جریان‌سنج سیم داغ تقریباً یکسان بود. عدد استروهل به دست آمده برای هر دو تجهیز برای جریان حول مدل مورد بررسی با زاویه حمله صفر درجه تقریباً برابر با ۰/۰۸ و برای زاویه حمله ۹۰ درجه برابر با ۰/۱ به دست آمد که با مطالعات قبلی سازگاری داشت. همچنین توانمندی الگوریتم عددی مورد استفاده در مطالعه حاضر در پیش‌بینی نویز منتشر شده از یک سیلندر مربعی دوبعدی تایید شد. برای مدل سه‌بعدی مورد بررسی، نیز الگوی دوقطبی انتشار صدا مشاهده شد. همچنین شدت صدای پیش‌بینی شده با افزایش سرعت بالادست افزایش و با افزایش فاصله از سیلندر کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر، با توجه به عدم تقارن سطح مقطع مدل، زاویه حمله تاثیر پیچیده‌ای بر نویز منتشر شده دارد. یا به عبارت دیگر، با تغییر زاویه حمله بسته به موقعیت شنونده صدای پیش‌بینی شده می‌تواند کاهش یا افزایش یابد.

- cross-section, *Journal of Sound and Vibration*, 328(3) (2009) 318-337.
- [11] D. Moreau, C.J. Doolan, The flow-induced sound of a wall-mounted finite length cylinder with circular and square cross-section, in: 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Berlin, Germany 2013.
- [12] A. Movahedi, A.A. Dehghan, M.D. Manshadi, Experimental Investigation of aero acoustic noise generation process from a wall mounted square cylinder at incidence, *Modares Mechanical Engineering*, 17(9) (2017) 327-338.
- [13] R. Porteous, D.J. Moreau, C.J. Doolan, The aeroacoustics of finite wall-mounted square cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, 832 (2017) 287-328.
- [14] K. Karthik, S. Vengadesan, S. Bhattacharyya, Prediction of flow induced sound generated by cross flow past finite length circular cylinders, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(1) (2018) 260-270.
- [15] A. Najafian, H. Parhizkar, S. Ghasemlooy, A. Tarabi, Numerical calculation of the sound produced by the wind flow around the cylinder and correction of the sound amplitude by increasing the length, *Modares Mechanical Engineering*, 18(03) (2018) 440-450.
- [16] R. Maryami, A.A. Dehghan, a. afshari, Experimental investigation of the turbulence effect of incoming flow on the unsteady pressure field and the flow noise around circular cylinder, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(4) (2018) 111-120.
- [17] M.J. Lighthill, On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 222(1148) (1954) 1-32.
- [18] N. Curle, The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 231(1187) (1955) 505-514.
- [19] J.F. Williams, D.L. Hawkings, Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 264(1151) (1969) 321-342.
- 1 cross section, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 161 (2017) 42-58.
- [2] Z. Hosseini, J. Bourgeois, R. Martinuzzi, Large-scale structures in dipole and quadrupole wakes of a wall-mounted finite rectangular cylinder, *Experiments in fluids*, 54(9) (2013) 1595.
- [3] S. Fathi, A.A. Dehghan, M. Dehghan Manshadi, A. Movahedi, Experimental Investigation of Flow Around a 3D Square Cylinder Using Five-hole Probe and Neural Networks Method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(1) (2017) 67-82.
- [4] R. Wardlaw, G. Moss, A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels, Report CC-662 tech, Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council, 1970.
- [5] W. Melbourne, Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 6(1) (1980) 73-88.
- [6] G.N. Lygidakis, S.S. Sarakinos, I.K. Nikolos, Simulation of the Flow Over the CAARC Standard Tall Building Using Different LES Turbulence Models, in: ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [7] A. Elshaer, H. Aboshosha, G. Bitsuamlak, A. El Damatty, A. Dagne, LES evaluation of wind-induced responses for an isolated and a surrounded tall building, *Engineering Structures*, 115 (2016) 179-195.
- [8] A.K. Dagne, G.T. Bitsuamalk, R. Merrick, Computational evaluation of wind pressures on tall buildings, in: 11th American conference on Wind Engineering. San Juan, Puerto Rico, 2009.
- [9] F.-Q. Meng, B.-J. He, J. Zhu, D.-X. Zhao, A. Darko, Z.-Q. Zhao, Sensitivity analysis of wind pressure coefficients on CAARC standard tall buildings in CFD simulations, *Journal of Building Engineering*, 16 (2018) 146-158.
- [10] W. King, E. Pfizenmaier, An experimental study of sound generated by flows around cylinders of different

- [26] H. Tanaka, N. Lawen, Test on the CAARC standard tall building model with a length scale of 1: 1000, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 25(1) (1986) 15-29.
- [27] S. Huang, Q. Li, S. Xu, Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD, *Journal of Constructional Steel Research*, 63(5) (2007) 612-627.
- [28] S. Gowing, Pressure and shear stress measurement uncertainty for DARPA SUBOFF experiment, David Taylor research center Bethesda MD ship hydromechanics Dept., 1990.
- [29] E. Obasaju, Measurement of forces and base overturning moments on the CAARC tall building model in a simulated atmospheric boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40(2) (1992) 103-126.
- [30] A.L. Braun, A.M. Awruch, Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation, *Computers & Structures*, 87(9-10) (2009) 564-581.
- [31] S. Becker, M. Kaltenbacher, I. Ali, M. Escobar, C. Hahn, Sound Generation by Flow around Simple Geometries: Simulation and Experiment, in: 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference), Cambridge, Massachusetts, 2006.
- [20] C. Cheong, P. Joseph, Y. Park, S. Lee, Computation of aeolian tone from a circular cylinder using source models, *Applied Acoustics*, 69(2) (2008) 110-126.
- [21] D.A. Russell, J.P. Titlow, Y.-J. Bommen, Acoustic monopoles, dipoles, and quadrupoles: An experiment revisited, *American Journal of Physics*, 67(8) (1999) 660-664.
- [22] Y. Wang, J. Chen, H. Lee, K. Li, Accurate simulations of surface pressure fluctuations and flow-induced noise near bluff body at low mach numbers, in: *The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7)*, Shanghai, China, 2012.
- [23] S.W. Rienstra, A. Hirschberg, An introduction to acoustics, Extended and revised edition of Report IWDE92-06, Eindhoven University of Technology, 2017.
- [24] M. Mohamadrezai, A.A. Dehghan, A. Movahedi, Comparison of different methods of numerical simulation of flow and sound around a square cylinder at various incidence angles, *Modares Mechanical Engineering*, 17 (2017) 147-158.
- [25] J. Dorneanu, Whistling of a rod in cross-flow: effect of angle of attack and reynolds number, MSc. Thesis, University of Twente, 2010.