



# ISAV2022

## دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران ۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱



### تحلیل آکوستیک جریان آشفته سیال حول استوانه آبگریز

علی رضائی برندق<sup>۱</sup>، جعفر غضنفریان<sup>\*</sup>

<sup>۱</sup>ایران، زنجان، بلوار دانشگاه، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی مکانیک، ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱، کارشناسی ارشد

<sup>\*</sup>دانشیار، پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [j.ghazanfarian@znu.ac.ir](mailto:j.ghazanfarian@znu.ac.ir)

#### چکیده

در مقاله حاضر، تحلیل آکوستیک جریان سه بعدی، ناپایا، آشفته و تراکم ناپذیر سیال نیوتنی حول استوانه در دو حالت بدون لغزش و آبگریز بررسی می شود. برای شبیه سازی از نرم افزار متن باز اوپن فوم و به منظور اعمال آبگریزی سطح، از شرط مرزی نوع سوم رابین استفاده شده است. بدین منظور دو ضریب آبگریزی ۰/۴۲۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شده اند. جریان حول استوانه توسط روش شبیه سازی گردابه های بزرگ در رینولدز ۳۹۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در تحلیل آکوستیکی از آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز استفاده شده است. اثر آبگریزی روی ضرایب نیرو، عدد اشتروهال و همچنین میزان بیشینه صدا و شدت صدای کل همراه با نمودار قطبی انتشار صدا با استفاده از آنالوژی آکوستیکی به دست آمده است. مشاهده گردید که شرایط آبگریزی در بیشترین حالت، منجر به کاهش ۱۴ درصدی ضریب پسا، کاهش ۵۴ درصدی جذر میانگین مربعات ضریب برآ، افزایش ۸ درصدی عدد اشتروهال و کاهش ۵ واحدی شدت صدای تولید شده بر حسب دسی بل می شود.

**کلمات کلیدی:** آبگریزی؛ شبیه سازی گردابه های بزرگ؛ آنالوژی آکوستیک.

#### ۱- مقدمه

جریان حول استوانه یکی از شاخص ترین مسائل مکانیک سیالات می باشد که همواره مورد توجه بوده است. این پدیده که برای اولین بار در مطالعه آزمایشگاهی اشتروهال [۱] مورد بررسی قرار گرفت، جهت صحت سنجی مسائلی که در آن ها پدیده هایی مانند جدایش و ریزش گردابه ها وجود دارد بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که پدیده های ذکر شده تأثیر بالایی در افزایش ضریب پسا، جذر میانگین مربعات ضریب برآ و ارتعاشات سازه ای دارند. ویلیامسون [۲] تحقیقات انجام شده تا سال ۱۹۹۶ در موضوع جریان پشت سیلندر را بررسی کرد و مقاله وی جمع بندی جامعی را در این زمینه ارائه کرده است. از آن زمان، مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعددی با روش های گوناگون در این زمینه صورت گرفته که از این میان می توان به روش های شبیه سازی عددی مختلفی نظیر شبیه سازی گردابه های بزرگ، روش میانگین گیری رینولدز معادلات ناویر-استوکس و شبیه سازی عددی مستقیم اشاره کرد.

سطوح آبگریز به عنوان یکی از روش‌های کاهش ضریب پسا در کاربردهای مهندسی توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. این سطوح به سختی خیس شده و زاویه تماس قطره آب با این گونه از سطوح، مطابق با گفته وانگ [۳] بیش از ۱۵۰ درجه می‌باشد. خاصیت برگ گل نیلوفر آبی و تمایل شدید آن به دفع آب، خاستگاه سطوح آبگریز و استفاده از آن‌ها در کاربردهای مختلف مهندسی می‌باشد [۴]. تئوری‌های آبگریزی کیسی-بکستر [۵] و ونزل [۶] میزان خیس‌شوندگی و زبری سطح را به هم مرتبط می‌کنند. تئوری ونزل بیانگر این است که آب به طور کامل به درون شیارهای سطح نفوذ کرده و حاصل این امر، ایجاد خط اتصال آب-آب خواهد بود. در حالی که در تئوری کیسی-بکستر هوا یا هر گاز دیگری در این شیارها محبوس شده و نتیجه آن، خط اتصال گاز-آب می‌باشد. آنچه آزمایشات بعدی نشان داد این بود که حالت آبگریزی کیسی-بکستر تنها یک حالت گذار بوده و زمان لازم برای گذار از این حالت به حالت ونزل مشخص کننده زبری سطح می‌باشد. به طور کلی عامل ایجاد آبگریزی، وجود شیارهای در ابعاد میکرو و نانو روی سطح جسم می‌باشد. مطالعات انجام شده روی استوانه آبگریز نشانگر این است که این پدیده منجر به تعویق جدایش گردابه‌ها تا اعداد رینولدز بالاتر شده و عدد اشتروهال را افزایش می‌دهد. همچنین این سطوح در رینولدزهای پایین، طول ناحیه چرخشی را در راستای جریان افزایش داده و این در حالی است که نیروی برای نرمالیزه شده را کاهش می‌دهند. در این مطالعات، آبگریزی با ایجاد شیارهایی روی سطح استوانه حاصل شده بود [۷ و ۸]. لجاندر و همکاران [۹] با بررسی جریان دو بعدی در رژیم آرام، اثر یک شرط مرزی لغزشی را روی پارامترهای مختلف و دینامیک جریان پشت استوانه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دهنده ایجاد تاخیر در بازچرخش جریان پشت استوانه و ریزش گردابه‌ها بود که با نتایج تجربی پیشین هماهنگ می‌باشد. زینعلی و همکاران [۱۰] با استفاده از یک شرط مرزی نوع سوم و همچنین معرفی سطوح ژانوس، ضریب آبگریزی متناظر با مقاله‌ی دنیلو و همکاران [۷] را برای جریان آشفته حول استوانه، ۰/۴۲۵ به دست آوردند. مفهوم سطوح ژانوس به معنای تقسیم یک ذره یا هندسه به دو بخش با خصوصیات مختلف می‌باشد، به طوری که قسمتهایی از سطح که نقش بیشتری را در تأثیر آبگریزی روی کاهش ضریب پسا و نیروی برای نرمالیزه شده و همچنین افزایش عدد اشتروهال ایفا می‌کنند، شناسایی شوند تا از این طریق یک راهکار عددی برای استفاده از این ویژگی در هندسه‌های پیچیده‌تر به دست آید. با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه و بررسی پارامترهایی نظیر عدد اشتروهال، ضریب پسا، توزیع تنش برشی و سرعت لغزشی، اعمال آبگریزی روی زاویه‌های بیشتر از ۹۰ درجه در استوانه، اثر ناچیزی در مقادیر ذکر شده دارد. در صورتی که اعمال آبگریزی روی سطح جلوی استوانه، یعنی زوایای بین صفر تا ۹۰، کاهش ضریب پسا را در پی خواهد داشت.

به طور کلی ایده اصلی مطالعه صدای تولید شده ناشی از جریان سیال بر مبنای تبدیل معادلات حرکت سیال به معادله انتشار موج می‌باشد. این امر نخستین بار توسط لایتھیل [۱۱] برای بررسی صدای تولید شده توسط جت سیال در یک محیط ساکن محقق شد. این تئوری مفاهیم پایه‌ای و اساسی صدای تولید شده در جریان سیال را بیان می‌کند و علی‌رغم این که به طور مستقیم از معادلات حرکت سیال بدون هیچ گونه فرضیاتی به دست می‌آید، دارای محدودیت‌هایی بوده و نمی‌تواند به طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. گسترش تئوری لایتھیل به منظور در نظر گرفتن اثر حضور مرزهای جامد در جریان سیال توسط کرل [۱۲] صورت گرفت که منجر به ارائه آنالوژی کرل شد. در این روش اثرات نیروهای وارده بر سطح جامد توسط سیال لحاظ شده و بررسی دقیق‌تری از صدای تولید شده ممکن خواهد بود. محدودیت بسیار اساسی این آنالوژی ساکن فرض کردن سطوح جامد بوده و اثرات حرکت نسبی میان سیال و سطوح در نظر گرفته نمی‌شود. در بسیاری از کاربردهای اساسی ایروآکوستیک مانند پيشرانها و پره توربوماشینها، سطوح دارای حرکت بوده و می‌بایست تئوری اصلاح‌شده‌ای پایه‌ریزی شود تا این اثرات در نظر گرفته شود. فاکس ویلیامز و هاوکینگز [۱۳] در مطالعه خود به بررسی این مهم پرداخته و آنالوژی جدید و کاملی ارائه کردند که به نام آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز شناخته می‌شود. کاربرد دیگر آنالوژی‌های ایروآکوستیک استفاده از معادلات یکسان برای تحلیل هایدروآکوستیک جریان، یعنی بررسی صدای تولید شده ناشی از جریان آب روی اجسام می‌باشد. در این حالت می‌توان با تغییر مقادیر چگالی سیال و سرعت انتشار امواج فشاری در محیط که همان سرعت صوت می‌باشد، به تحلیل هایدروآکوستیک جریان نیز پرداخت. با توجه به مروری که از پژوهش‌های پیشین صورت گرفت، تا جایی که نویسندگان مطلع می‌باشند، اثر پدیده آبگریزی روی هایدروآکوستیک جریان حول اجسام مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله، موارد زیر به ترتیب مورد بررسی قرار گرفته و اثرات پدیده‌های ذکر شده روی بیشینه صدای تولیدی و شدت صدای کل در رژیم جریان آشفته بررسی می‌شود.

- بررسی جریان حول استوانه در حالت بدون لغزش و آبریز
- مقایسه مقادیر ضرایب پسای فشاری و اصطکاکی، ضریب برآ و عدد اشروهل در دو حالت بدون لغزش و آبریز
- بررسی تغییرات توزیع محلی ضریب فشار و سرعت لغزشی روی استوانه در حالت آبریز
- هایدروآکوستیک جریان حول استوانه بدون لغزش و آبریز و محاسبه بیشینه صدا و شدت صدای کل

## ۲- معادلات حاکم و مسئله مورد بررسی

در این بخش ابتدا معادلات حاکم بر جریان آشفته به شکل معادلات فیلترگیری شده برای شبیه سازی گردابه های بزرگ مطرح شده و در ادامه اعداد بی بعد مهم در این مقاله بررسی می شوند. در آخر نیز معادلات مربوط به آنالوژی آکوستیک مورد بررسی قرار می گیرند. معادلات حاکم برای روش شبیه سازی گردابه های بزرگ، معادلات فیلترگیری شده پیوستگی و اندازه حرکت تراکم ناپذیر برای سیال نیوتنی می باشند. این معادلات در مختصات کارتزین و به شکل تانسوری مطابق معادلات (۱) و (۲) هستند.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^m}{\partial x_j}. \quad (2)$$

پارامترهای  $\bar{p}$  و  $\tau_{ij}^m$  به ترتیب مطابق  $\bar{p} \equiv \bar{p} + \frac{1}{3} \tau_{kk}^s \delta_{ij}$  و  $\tau_{ij}^m \equiv \tau_{ij}^s - \frac{1}{3} \tau_{kk}^s \delta_{ij}$  تعریف می شوند. در این روابط  $\bar{u}$ ،  $\bar{p}$  و  $\tau_{ij}^m$  به ترتیب سرعت فیلترشده، فشار فیلترشده اصلاح شده و تانسور تنش زیرشبه اصلاح شده می باشند. برای مدل سازی تانسور تنش زیرشبه از مدل اسمگورینسکی<sup>۱</sup> استفاده شده است. همچنین به منظور اعمال شرط آبریزی سطح از یک شرط مرزی نوع سوم مطابق با فرمول (۳) استفاده شده است.

$$u_{slip}^* + (1 - \beta) \left( \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right)_{wall} = 0. \quad (3)$$

در این فرمول،  $u_{slip}$  سرعت جریان سیال روی دیواره و  $\beta$  ضریب قابل تغییر می باشد که مقدار آن در مقاله زینعلی و همکاران [۱۰] برای جریان آشفته بر اساس داده های تجربی موجود [۷]، ۰/۴۲۵ محاسبه شده است. در مقاله حاضر علاوه بر این ضریب، مقدار ۰/۱ نیز به منظور مقایسه اثر درجه آبریزی روی نتایج، بررسی شده است.

اعداد بی بعد مهم در این مقاله اعداد رینولدز، ماخ و اشروهل بوده که به ترتیب  $Re = \frac{UD}{\nu}$ ،  $Ma = \frac{U}{c}$  و  $St = \frac{fD}{U}$  می باشند. در این روابط  $U$ ،  $D$ ،  $\nu$ ،  $c$  و  $f$  به ترتیب نشانگر سرعت مشخصه، طول مشخصه، ویسکوزیته سینماتیک، سرعت صوت و فرکانس جدایش گردابه ها می باشند.

فاکس ویلیامز و هاوکینگز با ارائه آنالوژی خود پاسخ جامعی برای بررسی صدای تولید شده ناشی از جریان حول اجسام با امکان حضور مرزهای جامد متحرک ارائه کردند. معادله فاکس ویلیامز-هاوکینگز که مطابق انتظار، یک معادله موج ناهمگن می باشد، پس از انجام عملیات ریاضی روی معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، مطابق رابطه (۴) به دست می آید.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_\infty v_n + \rho(u_n - v_n)] \delta(f) \} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{ T_{ij} H(f) \}. \quad (4)$$

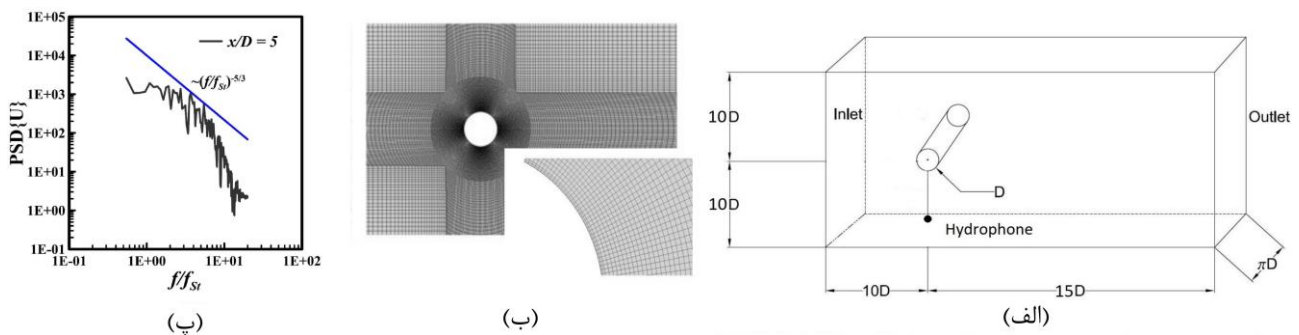
در این معادله،  $p'$  نوسانات فشار،  $u_i$  مولفه سرعت سیال در راستای  $x_i$ ،  $u_n$  و  $v_n$  به ترتیب مولفه های سرعت سیال و سرعت مرز در راستای عمود بر سطح می باشند. همچنین لازم به ذکر است که سطح کنترل مورد نظر توسط مقدار تابع  $f$  مشخص

<sup>۱</sup> Smagorinsky

شده که مقادیر منفی این تابع بیانگر داخل سطح، مقدار صفر بیانگر روی سطح و مقادیر مثبت نشان دهنده محیط بیرونی سطح کنترل می‌باشند. بردار نرمال سطح توسط پارامتر  $n_i$  نشان داده شده است که به سمت بیرون سطح می‌باشد. پارامترهای  $c$  و  $T_{ij}$  نیز به ترتیب سرعت صوت و تانسور تنش لایتهیل می‌باشند. در مطالعات آکوستیکی کمیت نهایی برای سنجش میزان صدا، سطح فشار صوتی بر حسب دسی بل است. رابطه مورد استفاده برای محاسبه سطح فشار صوتی  $SPL = 20 \log_{10}(p_{rms} / p_{ref})$  می‌باشد که در آن  $p_{rms}$  جذر میانگین مربعات نوسانات فشاری و  $p_{ref}$  فشار مرجع هستند که اگر سیال مورد نظر هوا باشد، مقدار فشار مرجع برابر با  $2 \times 10^{-5} \text{ pa}$  و برای آب  $1 \times 10^{-6} \text{ pa}$  در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن برآیند میزان صدا در فرکانس‌های مختلف که به عنوان سطح فشار صوتی کل شناخته می‌شود، از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$OASPL = 20 \log_{10} \sqrt{\sum_{i=a}^b (10^{PSD(f_i)/20})^2} \quad (5)$$

در این رابطه  $PSD(f_i)$  میزان طیف فشاری در فرکانس  $f_i$  ام می‌باشد. بدین ترتیب با توجه به نیاز، می‌توان میزان صدا را از طریق نوسانات فشاری در تک فرکانس و یا به صورت برآیندی از فرکانس‌های مختلف محاسبه نمود و مورد بررسی قرار داد. در مقاله حاضر جریان آشغته و تراکم‌ناپذیر سیال نیوتنی حول استوانه در دو حالت بدون لغزش و فوق‌آبگریز بررسی شده است. هندسه مورد مطالعه مطابق شکل (۱) (الف) می‌باشد. محل قرارگیری هایدروفون جهت محاسبه شدت صدا در ۳۰۰ میلی‌متری پایین استوانه می‌باشد. همچنین شبکه ایجاد شده برای شبیه‌سازی جریان حول استوانه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مطابق شکل (۱) (ب)، شبکه‌ای سازمان یافته بوده و به تدریج از مجاورت استوانه تا نقاط دیگر میدان حل، اندازه آن از کوچک به بزرگ تغییر پیدا کرده است. ایجاد شبکه به گونه‌ای بوده است که در تمامی حالات برای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مقدار بیشینه  $y^+$  روی استوانه، کمتر از یک می‌باشد. با توجه به عدم نیاز به بررسی استقلال از شبکه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، به منظور حصول اطمینان از کیفیت مناسب شبکه، از روش آنالیز طیف انرژی استفاده شده است. در این روش، با داده‌برداری از سرعت محوری جریان در فاصله بی بعد  $x/D = 5$  از پشت استوانه و تبدیل فوریه نمودار حاصل از آن، طیف انرژی مورد نظر به دست آمده است. لازم به ذکر است که این فاصله از استوانه در پشت آن، مطابق با مقاله کراوچنکو و معین [۱۴] انتخاب شده است. مطابق با شکل (۱) (پ) با توجه به حصول شیب  $-5/3$  در این نمودار، شبکه مورد استفاده دارای کیفیت مناسبی می‌باشد.



شکل ۱. (الف) میدان حل سه‌بعدی، (ب) شبکه تولید شده در نمای دور و نزدیک استوانه و (پ) طیف انرژی به دست آمده برای سرعت محوری پشت استوانه.

### ۳- صحت‌سنجی

در این بخش نتایج به دست آمده برای جریان حول استوانه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ در جدول (۱) با مقادیر تجربی و عددی موجود مقایسه می‌شوند. پارامترهای مورد بررسی شامل  $\langle C_d \rangle$ ،  $\langle C_l \rangle_{rms}$ ،  $St$ ،  $\langle C_{p,b} \rangle$  و  $\langle \theta_{sep} \rangle$  که به ترتیب ضریب پسای

میانگین، جذر میانگین مربعات ضریب برآ، عدد اشتروهاال، ضریب فشار در محل پشت استوانه (زاویه ۱۸۰ درجه) و زاویه جدایش می‌باشند. با توجه به مقادیر گزارش شده برای میانگین ضریب پسا، میانگین خطا بین مقدار محاسبه شده در این مقاله و مقادیر پیشین، کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین میانگین خطا در مقادیر محاسبه شده برای عدد اشتروهاال، ضریب فشار در پشت استوانه و زاویه جدایش نیز کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. نکته حائز اهمیت در محاسبه مقدار جذر میانگین مربعات ضریب برآ، وابستگی شدید این مقدار به شرایط آزمایشگاهی و مدل زیرشبکه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ می‌باشد. به طور کلی مقایسه این پارامتر در مقاله حاضر با مقادیر پیشین، نشان‌دهنده محدوده خطای بین ۹ تا ۶۰ درصد می‌باشد.

جدول ۱. مقایسه مقادیر محاسبه شده در مقاله حاضر در رینولدز ۳۹۰۰ با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و داده‌های موجود در مطالعات

پیشین

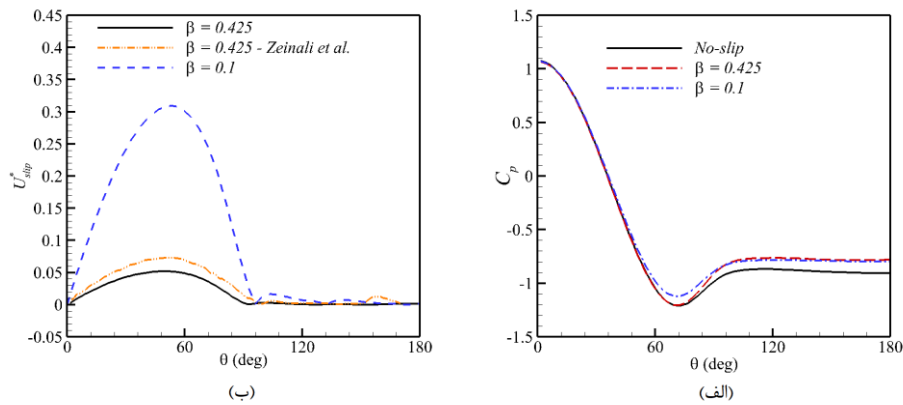
$\langle \theta_{sep} \rangle$	$\langle C_{p,b} \rangle$	$St$	$\langle C_l \rangle_{rms}$	$\langle C_d \rangle$	
۸۸	۰/۹۴	۰/۲۱		۱/۰۴	کراوچنکو و معین [۱۴]
	۰/۹۰		۰/۰۴ - ۰/۱۵	۰/۹۸	نوربرگ [۱۵ و ۱۶]
۸۹	۰/۸۰	۰/۱۹	۰/۴۴	۱/۱۸	لیسنکو [۱۷]
۸۹	۰/۹۰	۰/۲۰۹	۰/۱۶۴	۱/۰۷۶	مقاله حاضر

#### ۴- نتایج

در این بخش به بررسی نتایج به دست آمده برای استوانه در دو حالت بدون لغزش و آگریز پرداخته می‌شود. بدین منظور جریان آب حول استوانه در عدد رینولدز ۳۹۰۰ توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بررسی شده است. پارامترهای مهم در این حالت، ضریب برآ و پسا، عدد اشتروهاال و توزیع فشار حول استوانه می‌باشند. همچنین برای حالت فوق آگریز، دو ضریب آگریزی ۰/۴۲۵ و ۰/۱ انتخاب شده‌اند. در جدول (۳)، مقادیر متوسط پارامترهای مربوط به جریان در دو حالت بدون لغزش و آگریز در عدد رینولدز ۳۹۰۰ گزارش شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، آگریزی در بیشترین حالت منجر به کاهش ۱۴ درصدی ضریب پسا و ۵۴ درصدی نوسانات ضریب برآ و همچنین افزایش عدد اشتروهاال به میزان ۸ درصد می‌شود. لازم به ذکر است که کاهش ضریب پسا عمدتاً ناشی از کاهش بخش اصطکاک، یعنی  $\langle C_{df} \rangle$  بوده که ۶۰ درصد کاهش یافته است. این امر با توجه به خواص سطوح آگریز، مورد انتظار می‌باشد. کاهش ضریب پسای فشاری، یعنی  $\langle C_{dp} \rangle$  نیز برگرفته از تغییرات اندک توزیع فشار حول استوانه می‌باشد که در شکل (۲) (الف) قابل مشاهده است. مطابق این شکل، ضریب فشار جلو و پشت استوانه در حالت آگریز نسبت به حالت بدون لغزش، اختلاف کمتری داشته و این امر منجر به کاهش ۱۰ درصدی ضریب پسای فشاری می‌شود. در شکل (۲) (ب) نیز تغییرات سرعت لغزشی روی سطح استوانه برای دو ضریب مختلف آگریزی قابل مشاهده است. همانطور که دیده می‌شود، بیشینه مقدار سرعت لغزشی برای ضریب ۰/۱ حدود ۶ برابر این مقدار برای ضریب ۰/۴۲۵ بوده و زاویه متناظر با این بیشینه سرعت در هر دو مورد، حدود ۵۰ درجه می‌باشد. همچنین به منظور مقایسه با نتایج زینعلی و همکاران [۱۰]، توزیع سرعت لغزشی روی استوانه از طریق مدل‌سازی تانسور تنش زیرشبکه توسط روش دینامیک انرژی جنبشی نیز به دست آمده است. لازم به ذکر است که در مقاله زینعلی و همکاران [۱۰]، عدد رینولدز برابر با ۴۱۶۰ می‌باشد که اختلاف کم موجود بین توزیع به دست آمده در این مقاله و مقاله مذکور به همین علت است.

جدول ۲. نتایج به دست آمده برای استوانه در دو حالت بدون لغزش و آگریز در عدد رینولدز ۳۹۰۰ توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

$St$	$\langle C_l \rangle_{rms}$	$\langle C_{df} \rangle$	$\langle C_{dp} \rangle$	$\langle C_d \rangle$	
۰/۲۰۹	۰/۱۶۴	۰/۰۷۹	۰/۹۹۷	۱/۰۷۶	بدون لغزش
۰/۲۱۰	۰/۰۸۴	۰/۰۴۸	۰/۹۲۷	۰/۹۷۵	ضریب آگریزی ۰/۴۲۵
۰/۲۲۵	۰/۰۷۶	۰/۰۳۳	۰/۸۹۷	۰/۹۳۰	ضریب آگریزی ۰/۱

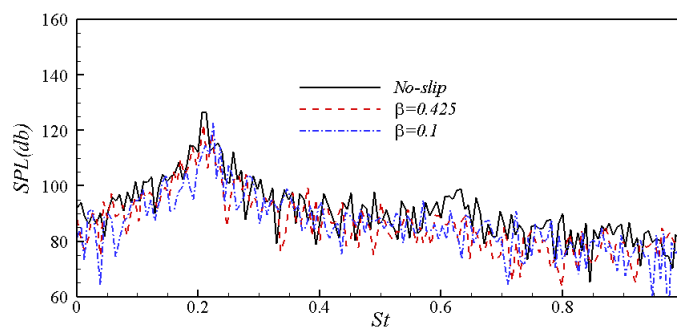


شکل ۲. توزیع محلی ضریب فشار حول استوانه برای دو ضریب آبگریزی ۰/۴۲۵ و ۰/۱ و (ب) سرعت لغزشی بی بعد روی استوانه در دو ضریب آبگریزی ۰/۴۲۵ و ۰/۱ و مقایسه آن با نتایج زینعلی و همکاران [۱۰].

نتایج مربوط به آکوستیک جریان حول استوانه که شامل مقدار بیشینه صدا و شدت صدای کل در محل هایدروفون مذکور در بخش های قبلی می باشد، برای دو حالت بدون لغزش و آگریز در جدول (۳) برای آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز نشان داده شده است. همچنین نمودار طیف صوتی در شکل (۳) قابل مشاهده می باشد. همانطور که دیده می شود، مقدار بیشینه صدا و شدت صدای کل با آگریز شدن استوانه، به ترتیب ۴ و ۵ درصد کاهش یافته اند. البته تأثیر درجه آگریزی روی پارامترهای ذکر شده، ناچیز بوده و نتایج دو حالت آگریزی با ضرایب مختلف، بسیار نزدیک به هم می باشند. نکته حائز اهمیت در این نتایج، در نظر گرفتن حساسیت لگاریتمی دریافت کننده های صدا به شدت آن می باشد. به نحوی که حتی کاهش یک واحدی شدت صدا نیز می تواند تأثیر بسزایی در دریافت آن توسط حسگرها داشته باشد. لذا ممکن است صرفاً با در نظر گرفتن میزان نسبی کاهش صدا، افت آن ناچیز به نظر برسد. در صورتی که به طور مطلق، استفاده از آگریزی، به طور میانگین حدود ۵ واحد کاهش دسی بل صدا را به همراه داشته است که در کاربردهای آکوستیکی، افت بسیار محسوسی می باشد.

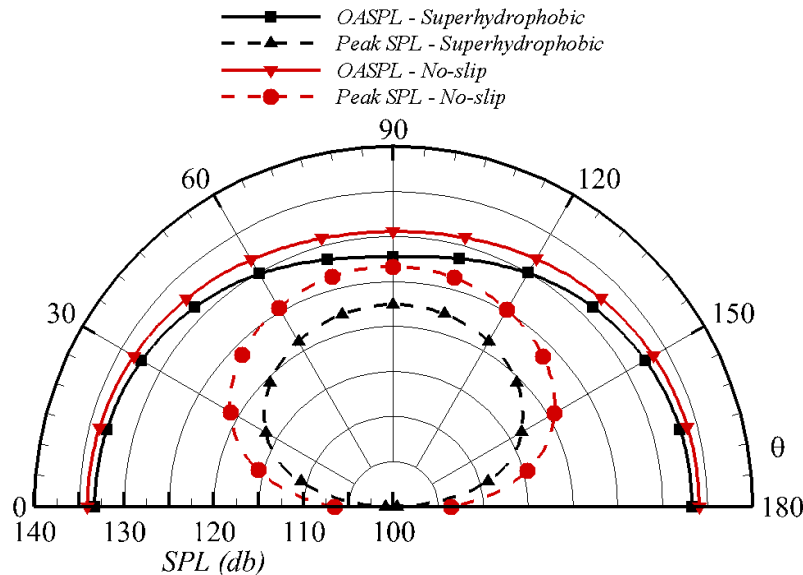
جدول ۳. مقایسه مقادیر بیشینه صدا و شدت صدای کل برای استوانه در دو حالت بدون لغزش و آگریز در رینولدز ۳۹۰۰ توسط روش شبیه سازی گردابه های بزرگ - آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز

شدت صدای کل	بیشینه صدا	
۱۳۰/۵۳۷	۱۲۶/۶۲۹	بدون لغزش
۱۲۵/۵۲۳	۱۲۲/۱۰۸	ضریب آگریزی ۰/۴۲۵
۱۲۴/۷۴۲	۱۲۲/۵۲۵	ضریب آگریزی ۰/۱



شکل ۳. طیف صوتی برای جریان آب حول استوانه در دو حالت بدون لغزش و آگریز در عدد رینولدز ۳۹۰۰ توسط روش شبیه سازی گردابه های بزرگ و آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز.

در شکل (۴) نمودار توزیع قطبی شدت صدای کل و بیشینه صدای به دست آمده حول استوانه بدون لغزش و آبگریز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع بیشینه صدای تولیدی نشانگر الگوی دو قطبی بوده و مقادیر متناظر با زوایای نزدیک ۹۰ درجه بیشتر از مقادیر متناظر با نقاط سکون جلو و عقب استوانه می‌باشند. در مقابل، توزیع شدت صدای کل به گونه‌ایست که مقادیر صدا در نقاط سکون جلو و عقب استوانه بیشتر از این مقادیر در نزدیکی ۹۰ درجه از سطح استوانه می‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود که آبگریزی منجر به کاهش هر دو مقدار شدت صدای کل و بیشینه صدای تولیدی در تمام زوایای اطراف استوانه می‌شود، به نحوی که مطابق موارد پیشین، به طور میانگین کاهش ۵ واحدی دسی‌بل صدا را به همراه دارد.



شکل ۴. نمودار توزیع قطبی صدا برای جریان آب حول استوانه در دو حالت بدون لغزش و آبگریز در عدد رینولدز ۳۹۰۰ توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تحلیل آکوستیک جریان سه‌بعدی، ناپایا، آشفته و تراکم‌ناپذیر سیال نیوتنی حول استوانه بدون لغزش و آبگریز بررسی شد. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار متن‌باز اوپن‌فوم و به منظور اعمال آبگریزی سطح، از شرط مرزی نوع سوم رابین استفاده شد. بدین منظور دو ضریب مختلف ۰/۴۲۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شدند. جریان حول استوانه توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در رینولدز ۳۹۰۰ بررسی گردید. همچنین در تحلیل آکوستیکی از آنالوژی فاکس ویلیامز-هاوکینگز استفاده شد.

اثر آبگریزی روی ضرایب نیرو، عدد اشتروهمال و همچنین میزان بیشینه صدا و شدت صدای کل با استفاده از آنالوژی آکوستیکی به دست آمد. مشاهده گردید که شرایط آبگریزی در بیشترین حالت، منجر به کاهش ۱۴ درصدی ضریب پسا، کاهش ۵۴ درصدی جذر میانگین مربعات ضریب برآ و افزایش ۸ درصدی عدد اشتروهمال می‌شود. همچنین با بررسی ضرایب پسا فشاری و اصطکاکی، دیده شد که مقدار این ضرایب در حالت آبگریزی به ترتیب ۱۰ و ۶۰ درصد کاهش یافتند. بیشینه سرعت لغزشی روی سطح استوانه نیز در حالت ضریب آبگریزی ۰/۱، حدود ۶ برابر این مقدار در ضریب آبگریزی ۰/۴۲۵ محاسبه شد. همچنین زاویه متناظر با این بیشینه سرعت، تقریباً برابر با ۵۰ درجه از نقطه سکون جلوی استوانه می‌باشد. در ادامه با بررسی نمودار طیف صوتی، مشاهده شد که آبگریزی منجر به کاهش ۵ واحدی شدت صدای تولید شده ناشی از جریان حول استوانه بر حسب دسی‌بل می‌شود. همچنین نمودار توزیع قطبی شدت صدای کل و بیشینه صدای تولیدی در زوایای اطراف استوانه مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مشاهده گردید که آبگریزی منجر به کاهش بیشینه صدای تولیدی و شدت صدای کل در تمامی زوایای اطراف استوانه می‌شود.

مراجع

۱. V. Strouhal, *Über eine besondere Art der Tonerregung*, Stahel, ۱۸۷۸.
۲. C. Williamson, "Vortex dynamics in the cylinder wake", *Annual review of fluid mechanics* ۲۸ (۱), ۴۷۷-۵۳۹ (۱۹۹۶).
۳. C. Wang, H. Tang, S.C. Yu, and F. Duan, "Active control of vortex-induced vibrations of a circular cylinder using windward-suction-leeward-blowing actuation", *Physics of Fluids* ۲۸ (۵):۰۵۳۶-۰۱ (۲۰۱۶).
۴. W. Barthlott, C. Neinhuis, "Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces", *Planta* ۲۰۲(۱), ۱-۸ (۱۹۹۷).
۵. A.B.D. Cassie, S. Baxter, "Wettability of porous surfaces", *Transactions of the Faraday society* ۴۰, ۵۴۶-۵۵۱ (۱۹۴۴).
۶. R.N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Industrial & Engineering Chemistry* ۲۸ (۸), ۹۸۸-۹۹۴ (۱۹۳۶).
۷. R. Daniello *et al.*, "Influence of slip on vortex-induced motion of a superhydrophobic cylinder", *Journal of Fluids and structures* ۴۲, ۳۵۸-۳۶۸ (۲۰۱۳).
۸. Muralidhar *et al.*, "Influence of slip on the flow past superhydrophobic circular cylinders", *Journal of fluid mechaics* ۶۸۰, ۴۵۹-۴۷۶ (۲۰۱۱).
۹. D. Legendre, E. Lauga, and J. Magnaudet, "Influence of slip on the dynamics of two-dimensional wakes", *Journal of fluid mechanics* ۶۳۳, ۴۳۷-۴۴۷ (۲۰۰۹).
۱۰. B. Zeinali, J. Ghazanfarian, and B. Lessani, "Janus surface concept for three-dimensional turbulent flows", *Computers & Fluids* ۱۷۰, ۲۱۳-۲۲۱ (۲۰۱۸).
۱۱. M.J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically i. general theory", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* ۲۱۱(۱۱۰۷), March ۵۶۴-۵۸۷ (۱۹۵۲).
۱۲. N. Curle, "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* ۲۳۱(۱۱۸۷), September ۵۰۵-۵۱۴ (۱۹۵۵).
۱۳. J.E. Ffowcs Williams, D.L. Hawkings, "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion", *Philosophical Transactions for the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* ۲۶۴(۱۱۵۱), May ۳۲۱-۳۴۲ (۱۹۶۹).
۱۴. A.G. Kravchenko, P. Moin, "Numerical studies of flow over a circular cylinder at  $Re_D = ۳۹۰۰$ ", *Physics of fluids* ۱۲(۲), ۴۰۳-۴۱۷ (۲۰۰۰).
۱۵. C. Norberg, "An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio", *Journal of Fluid Mechanics* ۲۵۸, ۲۸۷-۳۱۶ (۱۹۹۴).
۱۶. C. Norberg, "Flow around a circular cylinder: aspects of fluctuating lift", *Journal of fluids and structures* ۱۵(۳-۴), ۴۵۹-۴۶۹ (۲۰۰۱).
۱۷. D.A. Lysenko, I.S. Ertesvåg, and K.E. Rian, "Large-eddy simulation of the flow over a circular cylinder at Reynolds number ۳۹۰۰ using the OpenFOAM toolbox", *Flow, turbulence and combustion* ۸۹(۴), ۴۹۱-۵۱۸ (۲۰۱۲).