



## بررسی تجربی ساختار گردابه‌های روی یک مدل زیرسطحی

علی سعیدی نژاد<sup>۱</sup>، علی اکبر دهقان<sup>۲\*</sup>، مجتبی دهقان منشادی<sup>۳</sup>، محمد کاظمی اسفه<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

۳- استادیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پردیس اصفهان

۴- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

\* صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵، adehghan@yazd.ac.ir

**چکیده-** بررسی میدان جریان اطراف اجسام خط جریانی تقارن محوری که تشکیل دهنده بدنه اصلی هواپیماها و زیردریایی‌ها می‌باشد مورد توجه محققان زیادی قرار دارد. این تحقیق سعی دارد تا با استفاده از دو روش مرئی‌سازی، میدان جریان ایجاد شده در اطراف یک مدل زیرسطحی استاندارد را در زوایای حمله مختلف بررسی کند. با بهره‌گیری از روش مرئی‌سازی جریان دود توسط نور لیزر در یک تونل عمودی، ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده در اطراف این مدل در زاویه حمله ۴۰ درجه به صورت کیفی بررسی شده است. آشکارسازی خطوط میدان تنش برشی بر روی سطح مدل نیز با استفاده از روغن و رنگدانه در زوایای حمله  $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$  انجام شده است. استفاده از دو روش تجربی مرئی‌سازی در این تحقیق به درک بیشتر میدان سه بعدی گردابه‌های تشکیل شده در اطراف یک مدل زیرسطحی کمک شایانی کرده است و این پژوهش را نسبت به تحقیقات مرتبط گذشته متمایز می‌سازد. نحوه تشکیل و رشد گردابه اولیه و ثانویه در امتداد مدل با استفاده از نتایج مرئی‌سازی با دود و نور لیزر به صورت کیفی تفسیر شده است. همچنین مکان جدایش‌های اولیه و ثانویه جریان در امتداد سطح مدل در زوایای حمله مختلف با استفاده از نتایج مرئی‌سازی با روغن استخراج شده‌اند.

**کلیدواژگان:** رفتار جریان، مدل زیرسطحی، مرئی‌سازی جریان، تونل باد.

## Experimental investigation of the vortex structure on a submersible model

A. Saeidi Nezhad<sup>1</sup>, A.A. Dehghan<sup>2\*</sup>, M. Dehghan Manshadi<sup>3</sup>, M. Kazemi Esfeh<sup>4</sup>

1- PhD Student, Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran

3- Assist. Prof., Mech. Eng., Malek Ashtar Univ., Esfahan, Iran

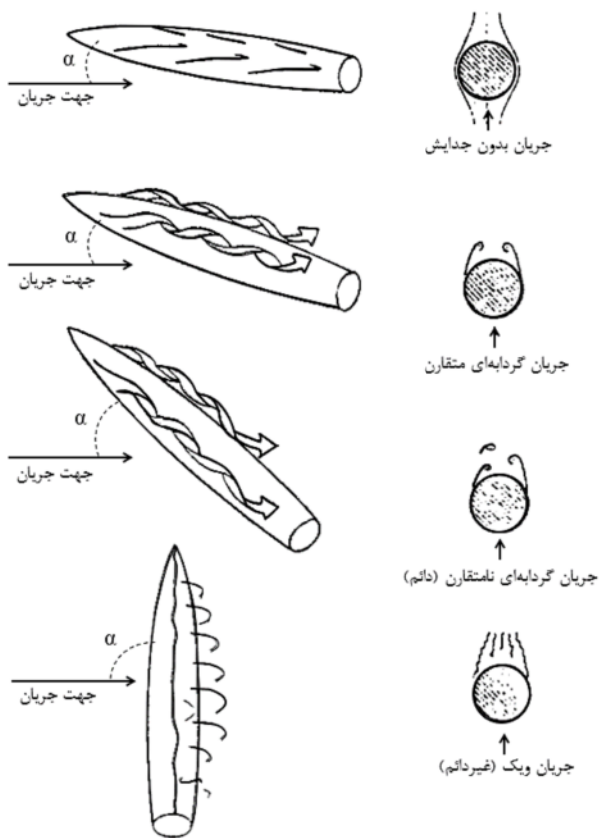
4- MSc Mech. Eng., Yazd Univ., Yazd, Iran

\* P. O. B. 89195-741 Yazd, Iran. adehghan@yazd.ac.ir

**Abstract-** The flow field around the axisymmetric streamlined bodies which forms the main body of the airplanes and submarines has been the subject of several researches. The present study aimed to investigate the flow field around a standard submersible model in various angles of attack by employing two visualization methods. The vortex structures around the model are qualitatively studied at the 40-degree angle of attack in a vertical wind tunnel. These structures are visualized by the laser sheet illumination of the smoke injected flow. The shear stress field lines on the model surface for  $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$  angles of attack are visualized by oil and pigments. Noteworthy and distinct aspect of the present study is the application of two empirical visualizing methods which made three dimensional vortical field more understandable. Formation and development of the primary and secondary vortex along the model length are qualitatively interpreted from the results of the smoke and laser light visualization technique. Moreover, the primary and secondary separation lines along model length for various angles of attack were deduced from the results of the oil flow visualization.

**Keywords:** Flow Behavior, Submersible Model, Flow Visualization, Wind Tunnel.

## ۱- مقدمه



شکل ۱ اثر تغییر زاویه حمله بر روی ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده در اطراف یک جسم خط جریانی شکل [۱]

جدایش عرضی جریان با یک گرادیان فشار عرضی همراه است. در این مکان فشار کمتر در سمت مخالف باد با سمت موافق باد مقایسه می‌شود و در نتیجه یک نیرو و ممان بر روی بدنه تشکیل خواهد شد. نیروهای هیدرودینامیکی که سطوح کنترلی یک وسیله زیرسطحی (رآدر و الویتور) ایجاد می‌کنند معمولاً بزرگ‌تر از نیروهایی هستند که توسط گردابه‌های تشکیل شده روی بدنه ایجاد می‌شوند. اما گردابه‌های تشکیل شده بر روی بدنه ممکن است بر روی مانورها تأثیر بگذارند چنان که آنها با تغییر زاویه حمله محلی بالک‌های افقی می‌توانند نیروهای لیفت و ممان‌های چرخشی بزرگ نامشخصی را به شناور اعمال کنند.

پیش‌بینی چنین پدیده‌هایی برای تعیین نیروها و ممان‌های وارده به بدنه یک وسیله زیرسطحی بسیار حیاتی است [۲]. برای پیش‌بینی رفتار ساختارها و گردابه‌های تشکیل شده در

بررسی میدان جریان اطراف اجسام خط جریانی تقارن محوری، همیشه مورد توجه محققان زیادی قرار داشته است زیرا چنین اجسامی غالباً برای طراحی شکل بدنه اصلی وسایل متحرک در هوا یا آب مانند هواپیماها، زیردریایی‌ها، ازدرها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. بررسی پایداری و کنترل‌پذیری حرکت این وسایل متحرک احتیاج به پیش‌بینی صحیح مقادیر نیروها و ممان‌های وارد به جسم دارد. وقتی که این اجسام نسبت به جریان سیال زاویه می‌گیرند، لایه مرزی در سمت مخالف باد از روی بدنه جدا شده و یک میدان جریان سه‌بعدی گردابه‌ای در اطراف جسم ایجاد می‌شود. این ساختارهای پیچیده گردابه‌ای در زوایای بالا می‌توانند نیروهای غیرخطی و غیردائمی به جسم اعمال کنند. در نتیجه برای تعیین مناسب نیروها و ممان‌های وارده به چنین اجسامی باید جدایش جریان و ساختارهای گردابه‌ای ایجاد شده در میدان جریان اطراف این اجسام به درستی پیش‌بینی شوند.

اریکسون و ردینگ [۱] چهار رژیم مشخص برای رفتار جریان اطراف یک جسم خط جریانی که نسبت به جریان از صفر تا ۹۰ درجه زاویه می‌گیرد، در نظر گرفته‌اند. در شکل ۱ به صورت شماتیک این چهار رژیم جریان نشان داده شده است. در زوایای حمله کم، جدایش جریان وجود ندارد و جریان محوری بر میدان جریان اطراف جسم حکم فرماست. در این رژیم، تغییرات نیروی لیفت و ممان پیچ نسبت به زاویه حمله خطی است. در رژیم میانی، گرادیان فشار جانبی توسط جریان عرضی در روی سطح مدل ایجاد می‌شود و باعث جدایش لایه مرزی از سطح شده و یک جفت گردابه متقارن در سمت مخالف جریان ایجاد می‌شود. به علت تقارنی که این گردابه‌ها در این رژیم دارند هیچ نیروی جانبی به جسم وارد نمی‌شود. با افزایش زاویه حمله، جفت گردابه تشکیل شده تقارن خود را از دست داده و باعث ایجاد نیروها و ممان‌های جانبی نامشخص و غیرخطی به جسم خواهد شد. در زوایای حمله بسیار زیاد، گردابه‌های تشکیل شده همانند میدان جریان اطراف یک سیلندر از اطراف جسم ریزش می‌کنند.

مهمترین گردابه ایجاد شده در هنگام عملیات مانوری یک زیرسطحی، گردابه‌های شکل گرفته در اثر جدایش جریان عرضی می‌باشند.

## 1. Rudder and Elevator

متفاوت مشخص کردند. نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مرئی‌سازی کمک شایانی به تحلیل نتایج حاصل از اندازه-گیری‌های نیرویی داشته‌اند.

هوگینز و پکوود [۹] نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر یک مدل زیرسطحی درگ پایین را در تونل باد اندازه‌گیری کردند. در این تحقیق از روش مرئی‌سازی با خاک رس چینی استفاده شد. میزان رطوبت این نوع خاک تأثیر زیادی بر رنگ آن دارد. با آغشته کردن بدنه مدل با این نوع خاک مرطوب و عبور جریان از روی بدنه مدل می‌توان نوع لایه مرزی تشکیل شده بر روی بدنه و محل گذار آن و جدایش لایه مرزی را مشخص کرد. استفاده از تکنیک مرئی‌سازی بر روی بدنه مدل زیرسطحی با درگ پایین نشان داد که لایه مرزی تا ۷۰ درصد طول مدل ادامه پیدا می‌کند و در ۳۰ درصد باقی‌مانده نیز جدایش جریان وجود ندارد.

فرخی و همکاران [۱۰] نحوه کاهش درگ فشاری یک مدل زیردریایی را به صورت تجربی در تونل باد بررسی کردند. آنها از یک سری مولدهای ورتکس چهار وجهی هوشمند<sup>۱</sup> بر روی سطح یک مدل زیردریایی استفاده کردند. در این آزمایش‌ها از تکنیک مرئی‌سازی به وسیله روغن استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های مرئی‌سازی بر روی بدنه مدل زیردریایی، بدون تولید کننده ورتکس، نشان داده‌اند که یک جدایش گردابه‌ای خیلی قوی در پشت برجک و یک ناحیه جدایش سه‌بعدی بزرگ نیز در قسمت پاشنه زیردریایی روی بدنه تشکیل می‌شود. نتایج حاصل از نصب تولید کننده‌های ورتکس ثابت روی سطح بدنه زیردریایی نشان داد که ناحیه جدایش گردابه-ای بزرگ حذف شده است.

هسدر و سیمسون [۱۱] میزان تنش اصطکاکی روی سطح مدل زیرسطحی استاندارد را برای جریان دائم و غیر دائم با استفاده از سنسورهای فیلم داغ<sup>۲</sup> دما ثابت بررسی کردند. اندازه‌گیری فشار استاتیکی و مرئی‌سازی با روغن نیز روی بدنه در حالت جریان دائم در زوایای حمله ۱۵ و ۲۰ درجه انجام شده است. نتایج جریان دائم نشان می‌دهد که ساختارهای جدایش جریان عرضی در سمت مخالف باد، بر روی بدنه مدل دیده می‌شود. الگوی ناحیه جدایش در مدل دارای برجک، از

یک شبیه‌سازی عددی به حجم محاسبات بسیار زیادی نیاز است. علاوه بر این برای صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی عددی باید از اندازه‌گیری‌های تجربی نیز بهره برد. در نتیجه بررسی تجربی تجسم جریان سیال در اطراف جسم اهمیت داشته و کمک شایانی به فهم چنین پدیده‌هایی خواهد نمود.

استفاده از روش‌های مرئی‌سازی در آزمایش‌های تجربی کمک شایانی به درک فیزیک مسأله مورد بررسی می‌کند. از آزمایش‌های مرئی‌سازی با دود و نور فلاش برای بررسی فیزیک دوبعدی جریان اطراف اجسام استفاده شده است [۳]. با استفاده از صفحه نور لیزر می‌توان به صورت مقطعی گردابه‌های سه‌بعدی را نیز مورد بررسی قرار داد. کارهای متعددی در مورد استفاده از روش‌های مرئی‌سازی روغن و رنگدانه یا دود و نور لیزر بر روی مدل‌های هوافضایی مانند موشک‌ها یا گلوله‌ها انجام شده است [۵،۴].

محققان زیادی برای طراحی بهینه شکل بدنه یک وسیله زیرسطحی، ویژگی‌های جریان اطراف این گونه وسایل را به صورت آزمایشگاهی یا عددی بررسی کرده‌اند. ویژگی‌هایی همچون محل گذار و جدایش لایه‌مرزی تشکیل شده بر روی سطح جسم دارای اهمیت است [۶]. پدیده‌شناسی گردابه‌های مختلف تشکیل شده در اطراف بدنه و قسمت‌های جانبی یک وسیله زیرسطحی نیز مورد توجه بوده است. شبیه‌سازی جریان اطراف بدنه یک مدل زیرسطحی به منظور اندازه‌گیری نیروها و ممان‌های وارده به آن، به طور مکرر در تونل بادهای مختلف دنیا انجام شده است [۷]. این آزمایش‌ها در کنار آزمایش‌های حوضچه کشش و تونل آب همواره در پیشرفت هیدرودینامیک بدنه این وسایل نقش به‌سزایی داشته و هم‌اکنون نیز در مراکز تحقیقاتی معتبر دنیا در حال انجام است.

مکی [۸] یک سری آزمایش‌های مرئی‌سازی و نیرویی بر روی یک مدل زیردریایی استاندارد در یک تونل باد مادون صوت انجام داد. هدف از انجام این آزمایش‌ها مطالعه قابلیت مانور، هیدرودینامیک بدنه و مقایسه نتایج تونل باد با نتایج حاصله از آزمایشات تونل آب بوده است. در ابتدا برای ایجاد دید فیزیکی جریان در اطراف مدل، یک سری آزمایش‌های مرئی-سازی جریان به وسیله روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل انجام شده است. نتایج آزمایش مرئی‌سازی، مکان جدایش را روی بدنه و برجک در زوایای حمله مختلف و اعداد رینولدز

1. Smart Tetrahedral Vortex Generators (STVG)  
2. Hot Film

زیرسطحی استاندارد بدون قسمت‌های جانبی استفاده شده است. در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از تونل دود و روشی نور لیزر ساختارهای گردابه‌های جریان عرضی در مقاطع مختلف از طول مدل بررسی شده‌اند و سپس با استفاده از پخش روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل، مکان جدایش و اثرات گردابه‌ها بر روی سطح مدل در داخل تونل باد مشخص شده‌اند. استفاده از دو روش مرئی‌سازی بر روی یک مدل زیرسطحی جهت درک بیشتر رفتار جریان سه‌بعدی در اطراف مدل، این پژوهش را نسبت به کارهای گذشته متمایز می‌سازد.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش

### ۲-۱- روش مرئی‌سازی جریان با دود و نور لیزر

آزمایش‌های مرئی‌سازی جریان با دود و نور لیزر در یک تونل دود عمودی مکنده در اتاق آزمون به ابعاد (mm)  $100 \times 180 \times 500$  انجام شده است. این تونل دود را می‌توان به دو قسمت مجزا از هم تقسیم کرد: قسمت پایینی تونل که مربوط به مکانیزم تولید دود است و قسمت فوقانی آن که یک تونل باد می‌باشد. مکانیزم تولید دود این دستگاه به این صورت است که گازوئیل از مخزن وارد هیتر شده و در آنجا با هوایی که توسط فن سانتریفیوژ تأمین می‌شود، می‌سوزد. دود حاصل وارد مخزن اولیه شده و از آنجا به سمت مخزن ثانویه دود هدایت می‌شود. در این مخزن علاوه بر آنکه گازوئیل سوخته نشده ته‌نشین می‌شود، جریان دود به صورت کاملاً یکنواخت در می‌آید. دود حاصل بعد از خروج از این مخزن وارد یک تقسیم کننده (پرآب دود) می‌شود. این پرآب دود در مسیر جریان هوای خروجی نازل تونل قرار دارد. این پرآب به صورت خط جریانی طراحی شده تا کمترین اغتشاش را در جریان هوا ایجاد کند.

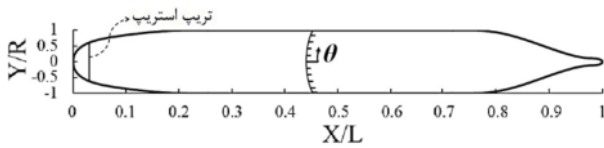
قسمت فوقانی این تونل دود شامل قسمت‌های مختلف یک تونل باد (نازل، اتاق آزمون، دیفیوزر، فن محوری، لانه‌زنبوری و توری) می‌باشد. دیوارهای اتاق آزمون این تونل از جنس پلکسی گلاس شفاف ساخته شده‌اند تا نور لیزر به خوبی از آن عبور کند. سرعت جریان هوای این تونل دود حداکثر  $5 \text{ m/s}$  بوده و بیشترین شدت اغتشاش جریان آن به  $0.7\%$  می‌رسد. مدل زیرسطحی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، یک

الگوهای جدایش جریان بدون برجک پیروی می‌کند. جدایش جریان در حالت مدل با برجک، به شدت تحت تأثیر حضور گردابه نعل اسبی ناشی از اتصال برجک بر بدنه قرار می‌گیرد. پانتلاتوس و متیولاکیس [۱۲] میدان جریان اطراف یک استوانه با دماغه کروی شکل را بررسی کردند. این آزمایش‌ها در جریان با عدد رینولدز  $10^5 \times 1/88 = \text{Re}$  تا زاویه حمله  $40^\circ$  درجه انجام شدند. مرئی‌سازی روی سطح مدل با استفاده از دو نوع ماده مختلف انجام شد. آنها ابتدا از کریستال مایع (حساس به نور فرابنفش) استفاده کردند و سپس مرئی‌سازی با استفاده از مخلوط روغن و اکسید تیتانیوم انجام شده است. نتایج مرئی‌سازی‌ها، تشکیل جدایش حبابی<sup>۱</sup> دماغه و خط جدایش اولیه را به وضوح نشان می‌دهند.

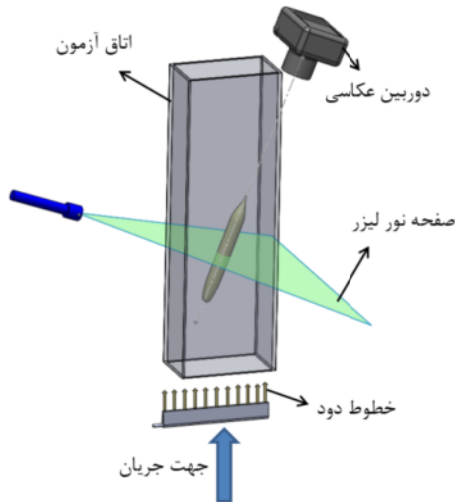
بهشتی و همکاران [۱۳] نیروی درگ وارد به یک مدل کشتی هوایی را در حوضچه کشش به صورت تجربی بررسی کردند. برای درک بیشتر ویژگی‌های آیرودینامیکی و توضیح نتایج نیرویی اخذ شده، فیزیک جریان شامل جدایش جریان، گذار لایه مرزی و تداخل بدنه با قسمت‌های جانبی با استفاده از آزمایش‌های مرئی‌سازی بررسی شد. مرئی‌سازی جریان به وسیله پخش ذرات فلورسنت یا رنگدانه و روشن‌سازی با استفاده از نور لیزر بوده است.

یکی از رایج‌ترین روش‌های مرئی‌سازی جریان به منظور بررسی ساختار میدان جریان نزدیک به سطح یک مدل در تونل باد، استفاده از روش مرئی‌سازی به کمک روغن و ماده رنگی می‌باشد. در اکثر تحقیقات تجربی گذشته جهت تعیین الگوی تنش برشی و مکان جدایش جریان بر روی سطح مدل‌های زیرسطحی، از جریان مخلوط روغن و دوده یا روغن با اکسید تیتانیوم بر روی سطح مدل استفاده شده است. با توجه به مطالعات انجام گرفته، کارهای مرئی‌سازی زیادی بر روی مدل‌های هوافضایی مانند موشک‌ها و گلوله‌ها انجام شده است، اما در هیچ تحقیقی از مرئی‌سازی با دود و نور لیزر برای بررسی ساختارهای گردابه‌ای اطراف یک مدل زیرسطحی داخل تونل باد استفاده نشده است. در این تحقیق از دو روش آشکار سازی جریان برای بررسی ساختار جریان شامل جدایش جریان و ساختارهای گردابه‌ای تشکیل شده در اطراف یک مدل

### 1. Bubble Separation



شکل ۲ پروفیل شکل مدل زیرسطحی سابوف به صورت بدون بعد



شکل ۳ نحوه نصب مدل زیرسطحی در اتاق آزمون و نحوه عکس برداری از میدان جریان اطراف مدل

همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، در حالتی که مدل نسبت به جریان ورودی زاویه مناسب را داشته باشد، صفحه نور لیزر کاملاً عمود بر محور طولی مدل قرار می‌گیرد و با استفاده از یک دوربین عکاسی سرعت بالا که در راستای محور طولی مدل و عمود بر صفحه لیزر قرار گرفته است، تصاویر مورد نظر از گردابه‌های تشکیل شده در اطراف مدل اخذ می‌شوند. از هم راستایی تابش و بازتابش نور برخوردار کرده به سطح مدل می‌توان اطمینان حاصل کرد که نور لیزر دقیقاً عمود بر سطح تابانده شده است. اندازه‌گیری‌ها به منظور بررسی تمامی گردابه‌های تشکیل شده (اولیه و ثانویه) در زاویه  $\alpha = 40^\circ$  انجام شده است.

## ۲-۲- روش مرئی‌سازی توسط روغن و رنگدانه

مرئی‌سازی با روغن نیز بر روی سطح همین مدل انجام شده است. برای مشخص شدن خطوط میدان تنش برشی بر روی سطح مدل از مخلوط گازوئیل با رنگدانه‌های فلورسنت استفاده شده است. این مخلوط با حل ۳ واحد رنگدانه‌های فلورسنت در ۵ واحد گازوئیل بدست می‌آید. به منظور جلوگیری از لخته

مدل زیرسطحی تقارن محوری استاندارد به نام سابف<sup>۱</sup> است. این مدل اولین بار توسط پژوهشکده دیوید تیلور<sup>۲</sup> طراحی شد [۱۴] و مورد آزمایش‌های متفاوتی در تونل باد و حوضچه کشش قرار گرفته است [۱۵، ۱۶]. آزمایش‌های انجام شده توسط این پژوهشکده در تونل باد، شامل آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت، فشار و تنش اصطکاکی بر روی سطح مدل بوده است و علاوه بر آن در پایین‌دست مدل نیز سرعت جریان به صورت سه‌بعدی اندازه‌گیری شده است. در این آزمایش‌ها بررسی کیفی جریان به صورت مرئی‌سازی با روغن بر روی سطح مدل یا دود در اطراف مدل انجام نشده است. پروفیل شکل بدنه این مدل به صورت بدون بعد بر حسب طول کلی مدل ( $L = 0.229 \text{ m}$ ) و شعاع بیشینه ( $R = 0.134 \text{ m}$ ) در شکل ۲ نشان داده شده است. این مدل بدون قسمت‌های جانبی از جنس آلومینیم با استفاده از روش CNC با دقت  $\pm 0.1 \text{ mm}$  ساخته شده است. برای شبیه‌سازی لایه مرزی توربولانسی بر روی سطح مدل، یک سیم نازک (تریپ استریپ) با مقطع دایره‌ای به قطر  $0.2 \text{ mm}$  از نوک دماغه در مکان  $X/L = 0.03$  به صورت یک حلقه دایره‌ای شکل قرار داده شده است. در شکل ۲ مکان تریپ استریپ نشان داده شده است. جهت انتخاب اندازه و مکان سیم تریپ استریپ از تجربیات کارهای گذشته استفاده شده است [۸]. به منظور تعیین دقیق مکان جدایش، از دو مختصات مکان طولی و زاویه جانبی  $(\theta)$  استفاده شده است. نحوه اندازه‌گیری این دو مختصات در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت تعیین مکان طولی جدایش در امتداد بدنه از یک خط کش درجه‌بندی شده و جهت تعیین زاویه جدایش بر روی محیط مدل نیز از یک حلقه مدرج استفاده شده است.

نمای شماتیکی از نحوه قرارگیری مدل زیرسطحی در اتاق آزمون تونل دود و نحوه عکس‌برداری از گردابه‌های ایجاد شده در اطراف مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. نور لازم برای مرئی‌سازی جریان توسط یک منبع نور لیزر سبز با توان  $50 \text{ mW}$  تأمین می‌شود. خط نور ایجاد شده به وسیله منبع نور لیزر، توسط یک شیشه استوانه‌ای به یک صفحه نوری تبدیل می‌شود.

1. SUBOFF
2. David Taylor Research Center
3. Circumferential Angle

### ۳- بررسی و تحلیل نتایج

در این تحقیق به منظور بررسی کامل رفتار جریان در اطراف یک مدل زیرسطحی، از دو روش مجسم‌سازی جریان استفاده شده است. ابتدا با استفاده از روش آشکارسازی با دود و نور لیزر، ساختار گردابه‌های تشکیل شده در اطراف جسم در زاویه حمله ۴۰ درجه بررسی شده است و سپس اثرات این گردابه‌ها بر سطح مدل مانند مکان جدایش یا مکان اتصال مجدد سیال به سطح<sup>۱</sup> به وسیله جریان روغن و رنگدانه بر روی سطح بدنه مدل در زوایای مختلف تعیین شده است. نتایج کمی مکان جدایش و مکان اتصال مجدد سیال به سطح با استفاده از تحلیل نتایج مرئی‌سازی با روغن استخراج شده‌اند. میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های انجام شده با توجه به دقت نحوه تعیین مکان جدایش با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری، حدود ۳ درصد می‌باشد.

وقتی که وسایل متحرک زیرسطحی با بدنه خط جریانی شکل همانند زیردریایی‌ها، اژدرها و غیره، نسبت به جریان آزاد زاویه می‌گیرند، مؤلفه‌های جریان سیال برخورد کننده با جسم به دو قسمت تقسیم می‌شود:

- (۱) مؤلفه‌ای از جریان که در امتداد محور جسم است و جریان محوری نام دارد.
- (۲) مؤلفه‌ای که عمود بر محور مدل بوده و جریان عرضی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

با افزایش زاویه مدل نسبت به جریان، گرادیان فشار معکوس عرضی بین سمت موافق و مخالف جریان، باعث جدایش لایه مرزی در سمت مخالف جریان می‌شود. لایه مرزی جدا شده با جریان طولی برخورد کرده و تشکیل گردابه‌هایی را در سمت مخالف باد می‌دهد. یک جفت گردابه متقارن (با چرخش مخالف) در سمت مخالف جریان ایجاد می‌شوند که در زوایای حمله بالا، از مدل ریزش می‌کنند. در شکل ۵ نمای شماتیکی از این جفت گردابه متقارن با چرخش مخالف نشان داده شده است. در قسمت بالایی این شکل، جفت گردابه‌های سه‌بعدی تشکیل شده در اطراف بدنه مدل زیرسطحی استاندارد سابوف در زاویه حمله ۴۰ درجه به صورت شماتیک نشان داده شده است. یک صفحه نور لیزر به صورت عمودی بر راستای محور

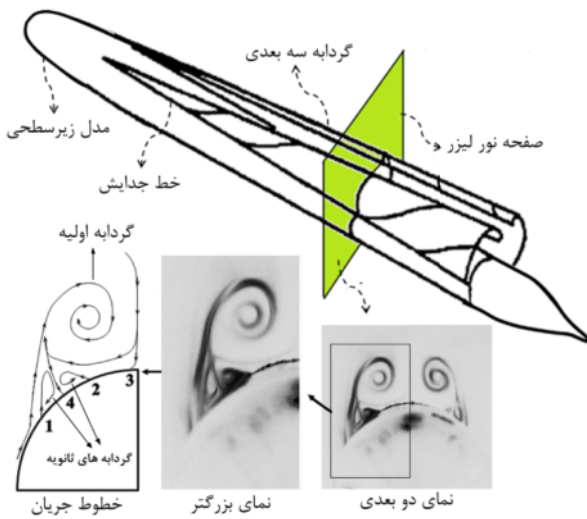
شدن رنگدانه‌ها و همچنین کنترل اندازه آنها، چند قطره اسید اولئیک به این مخلوط اضافه شده است. هنگامی که مخلوط روغن و رنگدانه آماده شد، با استفاده از یک برس نقاشی، مخلوط روغن و رنگدانه بر روی تمامی قسمت‌های بدنه مدل کشیده شد تا اینکه هیچ جایی از بدنه خالی نماند. مقدار مخلوط پخش شده بر روی بدنه نباید به حدی کم باشد که خطوط جدایش و غیره تشکیل نشود. همچنین مقدار مخلوط پخش شده بر روی سطح مدل نباید آنقدر زیاد باشد که باعث تجمع بیش از اندازه مخلوط روغن و رنگدانه در یک مکان شده و جریان هوا توانایی حرکت آن را نداشته باشد. در نتیجه مقدار مناسبی از مخلوط باید روی بدنه پخش شود.

به منظور عکس‌برداری مناسب از رنگ‌های فلورسنت از لامپ‌های مهتابی با رنگ آبی برای نورپردازی استفاده شده است. آزمایش‌های مرئی‌سازی با روغن در یک تونل باد مادون صوت از نوع مدار باز با اتاق آزمون بسته انجام شده است. در شکل ۴ نمایی از اتاق آزمون این تونل باد نشان داده شده که دارای مقطعی با ابعاد  $350 \times 350 \text{ mm}^2$  و با طول  $700 \text{ mm}$  می‌باشد. دیوارهای جانبی این تونل شفاف بوده و قابلیت عکس‌برداری از مدل بعد از انجام آزمایش‌ها وجود دارد. تمام آزمایش‌ها در سرعت جریان آزاد  $5 \text{ m/s}$  که معادل عدد رینولدز  $Re = 67400$  می‌باشد، انجام شده است. با توجه به ابعاد مدل، نسبت انسداد تونل باد در بیشترین زاویه کمتر از ۵٪ است که در این نسبت انسداد از تأثیر دیواره‌ها تونل باد بر روی ساختارهای جریان اطراف مدل می‌توان صرف‌نظر کرد [۱۷]. تمامی اندازه‌گیری‌ها در یک سرعت و در زوایای مختلف  $\alpha \leq 30^\circ$  درجه انجام شده است.



شکل ۴ نحوه قرار گیری مدل زیرسطحی در اتاق آزمون تونل باد برای انجام آزمایش‌های مرئی‌سازی با روغن

1. Reattachment
2. Cross Flow



شکل ۵ آشکارسازی گردابه‌های ایجاد شده در اطراف مدل زیرسطحی سابوف در مکان  $X/L=0/3$  در زاویه  $40^\circ$

در این فاصله گردابه‌های ثانویه وجود ندارند. با افزایش فاصله از نوک دماغه، مکان جدایش اولیه (شماره ۱) از سمت مخالف باد به سمت موافق حرکت می‌کند و جدایش، سهم بیشتری از مقطع مدل را در بر می‌گیرد. ابعاد گردابه اولیه نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله بین جدایش اولیه (شماره ۱) و مکان اتصال دوباره جریان (شماره ۴) گردابه‌های ثانویه بزرگتر می‌شوند ( $0/4$  و  $X/L=0/3$ ). با حرکت طولی جریان و افزایش بیشتر فاصله از دماغه، جفت گردابه‌های اولیه به اندازه‌ای بزرگ می‌شوند که در راستای عرضی جای کمی برای رشد پیدا می‌کنند در نتیجه در راستای دیگر کشیده شده و شکل دایره مانند خود را از دست می‌دهند ( $X/L=0/5$ ). این گردابه‌ها در فواصل بیشتر از دماغه کاملاً پایداری خود را از دست داده و از هم واپاشیده می‌شوند. به این حالت واپاشیدگی ورتکس<sup>۳</sup> گفته می‌شود.

شکل ۷ کانتور میدان تنش برشی روی سطح یک مدل زیرسطحی حاصل از نتایج عددی را نشان می‌دهد [۱۸]. چگونگی تشخیص مکان جدایش اولیه، ثانویه و ناحیه چسبیدن دوباره جریان به سطح به صورت شماتیک در این شکل نشان داده شده است.

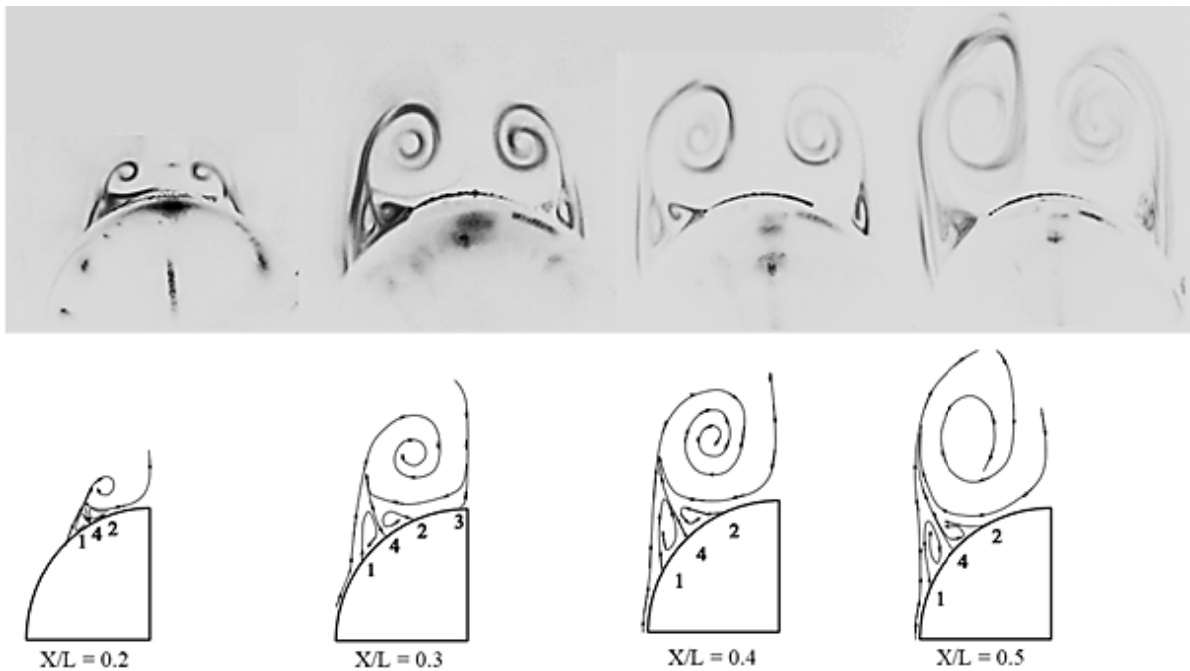
این گردابه‌ها در مقطع  $X/L=0/3$  تابیده شده و یک نمای دوبعدی از مقطع جفت گردابه بدست آمده است. در این شکل تقارن بسیار خوب جفت گردابه‌ها دیده می‌شود. جهت بررسی بهتر مکان جدایش جریان از سطح<sup>۱</sup> یا اتصال مجدد جریان به سطح<sup>۲</sup>، نمای بزرگتری از یکی از گردابه‌ها نشان داده شده است. با استفاده از ترسیم مکان خطوط دود که مبین خطوط جریان می‌باشند، نحوه جدایش لایه مرزی و تشکیل گردابه اولیه و ثانویه تفسیر شده است.

در قسمت پایین شکل ۵ تفسیر خطوط دود نشان داده شده است. در مکان شماره (۱) جدایش اولیه جریان در اثر گرادیان فشار نامطلوب عرضی رخ می‌دهد و لایه مرزی از سطح جدا می‌شود. در اثر این جدایش یک گردابه عرضی (گردابه اولیه) تشکیل می‌شود. گردابه اولیه جدا شده از سطح، دوباره به قسمتی از سطح مدل که پشت به جریان باد است، برخورد کرده و باعث اتصال دوباره جریان به سطح می‌شود. این ناحیه بر روی شکل با شماره (۳) مشخص شده است. نکته قابل توجه آن است که این جریان چسبیده به سطح دوباره در مکان شماره (۲) از سطح جدا شده و تشکیل خط جدایش ثانویه را موجب می‌شود. در اثر جدایش ثانویه گردابه‌های کوچکی بین سطح مدل و گردابه اولیه تشکیل شده که به عنوان گردابه‌های ثانویه شناخته می‌شود. بین دو گردابه ثانویه که چرخش برعکس یکدیگر دارند، جریان دوباره به سمت سطح مدل حرکت کرده و در مکان شماره (۴) دوباره به سطح مدل می‌چسبند. در نتیجه در سمت مخالف جریان، گردابه‌های عرضی باعث می‌شوند تا جریان دو مرتبه از سطح مدل جدا شده و دوباره به مدل بچسبند.

در شکل ۶ نحوه رشد گردابه عرضی با افزایش فاصله از دماغه در زاویه  $40^\circ$  برای مدل استاندارد سابوف نشان داده شده است. در این شکل، ساختار واقعی گردابه‌های عرضی جریان به همراه تفسیرهای آنها آورده شده است تا به فهم بیشتر نحوه رشد این گردابه‌ها کمک کند. در مکان‌های نزدیک به دماغه مدل ( $X/L=0/2$ )، مکان جدایش اولیه (شماره ۱) نزدیک به سمت مخالف باد بوده و ناحیه جدایش کوچک است. در نتیجه، اندازه گردابه اولیه نیز کوچک بوده و به سطح مدل نزدیک است.

1. Flow Separation
2. Reattachment

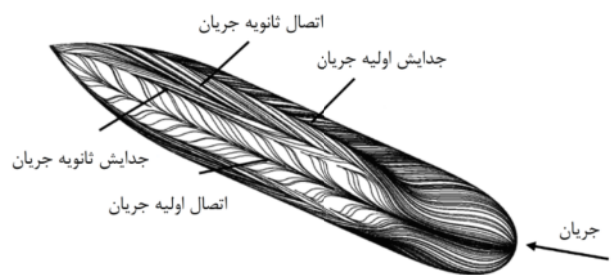
### 3. Vortex Breakdown



شکل ۶ نحوه رشد گردابه عرضی با افزایش فاصله از دماغه مدل استاندارد سابوف در زاویه  $40^\circ$

کننده این مطلب می‌باشد. در زوایایی بیشتر از  $10^\circ$  درجه لایه مرزی‌های تشکیل شده بر روی سطح جسم با جریان عرضی برخورد کرده و از روی بدنه جدا شده و تشکیل گردابه‌هایی را در پشت مدل می‌دهند. در زوایای حمله کم، ناحیه جدا شده کاملاً کوچک بوده و در انتهای مدل قرار دارد ولی با افزایش زاویه جریان، ناحیه جدا شده قسمت زیادی از سطح جسم را فرا گرفته و به سمت جلوی مدل پیش می‌رود.

در شکل ۸ ساختار جریان بر روی سطح مدل زیرسطحی سابوف در سمت مقابل جریان در زاویه حمله  $30^\circ$  نشان داده شده است. این شکل از نتایج مرئی‌سازی با روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل بدست آمده است. هنگامی که مدل نسبت به جریان زاویه می‌گیرد، در سمت موافق باد<sup>۱</sup> در امتداد طولی مدل (قسمت میانی) سرعت جریان هنگام برخورد با جسم به صفر رسیده و خط سکون<sup>۲</sup> ایجاد می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود حرکت خطوط جریان، با رسیدن به مکان جدایش متوقف می‌شوند. در این مکان لایه نازکی از روغن روی هم انباشته می‌شود. این لایه نازک روغن به صورت یک خط در امتداد بدنه زیرسطحی در این شکل قابل مشاهده



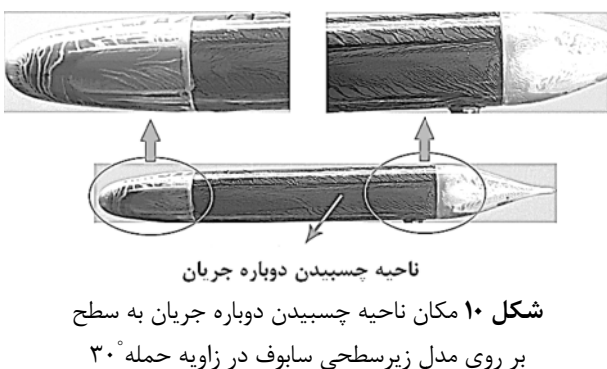
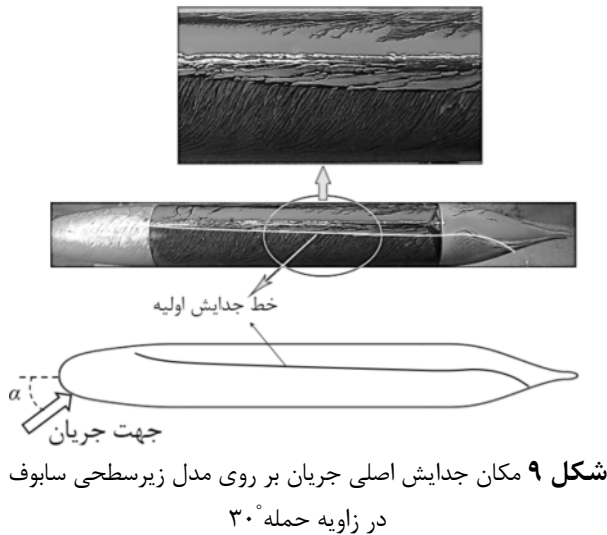
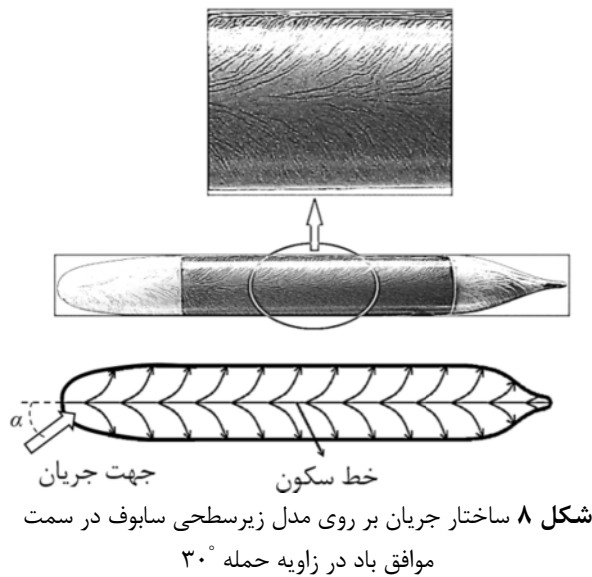
شکل ۷ کانتور میدان تنش برشی روی سطح یک مدل زیرسطحی حاصل از نتایج عددی [۱۸]

در این شکل نیز به وضوح می‌توان مشاهده کرد که در ناحیه چسبیدن اولیه جریان به سطح، خطوط جریان نسبت به یک خط مرکزی از یکدیگر واگرا شده‌اند و قسمتی از آنها به سمت نیمه بالایی مدل و قسمتی دیگر به سمت نیمه پایینی مدل حرکت کرده است.

آزمایش‌های مرئی‌سازی با روغن و رنگدانه در زوایای حمله  $0^\circ$  الی  $30^\circ$  درجه بر روی مدل مورد مطالعه انجام شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مرئی‌سازی‌های انجام شده، در زوایای حمله صفر،  $5^\circ$  و  $10^\circ$  درجه، لایه مرزی، جریان قسمت‌های دماغه و مسطح بدنه را بدون جدایش پشت سر می‌گذارد و به رشد خود ادامه می‌دهد و نهایتاً در قسمت انتهایی دم از سطح جدا می‌شود. نتایج دیگر محققین نیز تایید

1. Windward Direction  
2. Stagnation Line





است. از آنجایی که این مدل کاملاً تقارن محوری می‌باشد ساختار جریان در نیمه بالایی و پایینی مدل یکسان است. به همین دلیل در این قسمت تنها ساختار جریان در نیمه بالایی مدل بررسی می‌شود.

در شکل ۹ نمای بالایی از ساختار جریان در اطراف مدل زیرسطحی سابوف در زاویه حمله  $30^\circ$  نشان داده شده است. لایه‌های مرزی که به سمت نیمه بالایی و پایینی مدل حرکت می‌کنند، در اثر گرادیان فشار نامطلوب که در عرض مدل (در اثر انحنای سطح مدل) وجود دارد، از سطح جدا می‌شوند و باعث تشکیل گردابه عرضی می‌شود. جایی که جریان از روی مدل جدا می‌شود، خطوط و رگه‌های مخلوط روغن و رنگدانه به آن سمت همگرا می‌شوند و در آنجا تجمع می‌کنند [۱۸]. در شکل ۹ مکان ناحیه جدایش اولیه (اصلی) بر روی بدنه زیردریایی سابوف در زاویه حمله  $30^\circ$  دیده می‌شود. همان‌گونه که قبلاً نیز در تفسیر نتایج مرئی‌سازی با دود و لیزر بررسی شد، مکان جدایش اولیه با فاصله گرفتن از نوک دماغه از سمت مخالف باد به سمت موافق باد حرکت می‌کند. همان‌گونه که در این شکل نیز نشان داده شده است، خط جدایش جریان با افزایش فاصله از نوک دماغه به سمت جلوی مدل حرکت کرده است. در شکل ۱۰ قسمتی از سطح مدل که در سمت مخالف جهت باد قرار دارد نشان داده شده است. همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، گردابه‌ها تشکیل شده در اثر جدایش جریان، دوباره به سطحی از مدل که پشت به جریان می‌باشد، برخورد کرده و باعث چسبیدن دوباره جریان به سطح مدل می‌شوند.

ناحیه‌ای که جریان دوباره به مدل می‌چسبد (در شکل ۲ نقطه شماره ۳) در شکل ۱۰ به وضوح قابل رویت می‌باشد. این ناحیه که در آن خطوط روغن به طور متقارن از خط وسط مدل به سمت بالا و پایین واگرا شده‌اند تقریباً از ابتدای دماغه شروع می‌شود و تا انتهای مدل پیش می‌رود [۱۸].

در شکل ۱۱ نحوه تغییرات مکان جدایش اولیه برای چهار زاویه حمله متفاوت مدل زیرسطحی سابوف نشان داده شده است. در این منحنی محور افقی  $(X/L)$  فاصله بدون بعد از ابتدای دماغه مدل در امتداد مدل بوده و محور عمودی نشان دهنده موقعیت زاویه جانبی  $^1(\theta)$  روی بدنه مدل می‌باشد که مبدا آن در محل خط سکون (مرکز مدل در سمت موافق باد) قرار دارد.

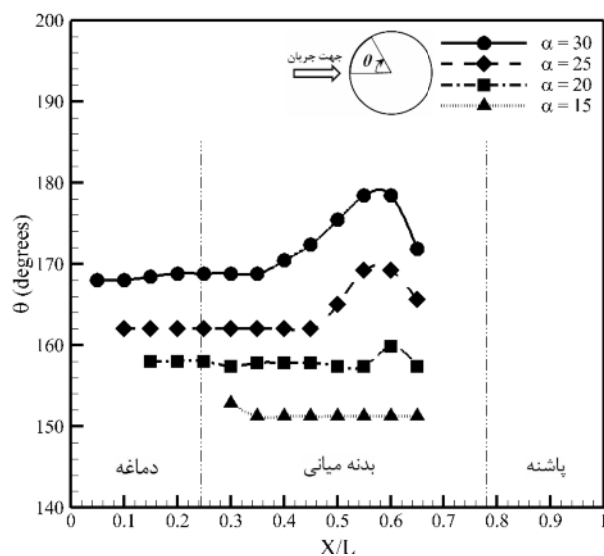
### 1. Circumferential Angle

موقعیت مکان جدایش در این شکل نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از دماغه مدل به سمت پاشنه، جدایش روی سطح مدل از سمت مخالف جریان به سمت موافق جریان

در شکل ۱۳ تغییرات مکان جدایش ثانویه با زاویه حمله برای چهار زاویه حمله متفاوت مدل زیرسطحی سابوف نشان داده شده است. همانند جدایش اولیه، شروع مکان جدایش ثانویه نیز با کاهش زاویه حمله از دماغه به سمت میانی زیرسطحی حرکت می‌کند. نکته دیگری که باید به آن توجه داشت این است که، مختصات زاویه عرضی جدایش ثانویه در قسمت انتهایی بدنه میانی دچار تغییرات شدیدی می‌شود. البته این تغییرات با کاهش زاویه حمله کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در زاویه حمله ۱۵ درجه هیچ گونه تغییر شدیدی مشاهده نمی‌شود. در این پژوهش هیچ گونه جدایش ثانویه‌ای بر روی پاشنه زیرسطحی سابوف مشاهده نشد. در شکل ۱۴ نیز چگونگی تغییرات ناحیه اتصال ثانویه جریان به سطح با زاویه حمله بر روی زیرسطحی سابوف نشان داده شده است. بررسی داده‌های شکل ۱۴ نشان می‌دهد که مکان چسبیدن جریان به سطح تقریباً مستقل از زاویه حمله است و برای تمام زوایای حمله جریان به صورت خطی از ابتدای قسمت میانی تا انتهای آن کاهش می‌یابد.

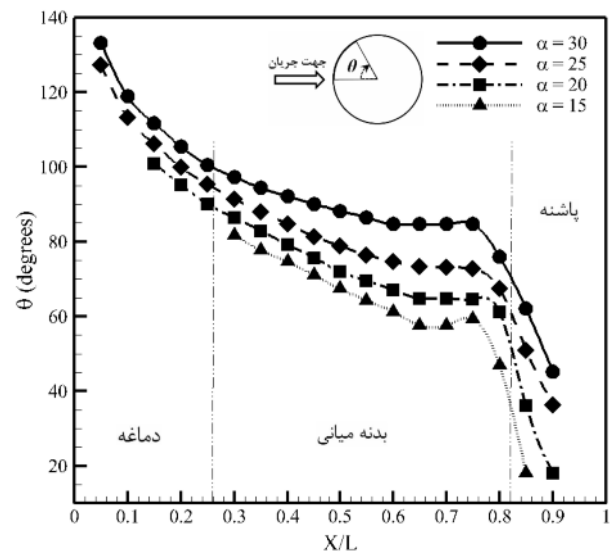
#### ۴- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی فیزیک میدان جریان اطراف بدنه یک مدل زیرسطحی استاندارد از روش مرئی‌سازی جریان توسط روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل در تونل باد استفاده شده است.

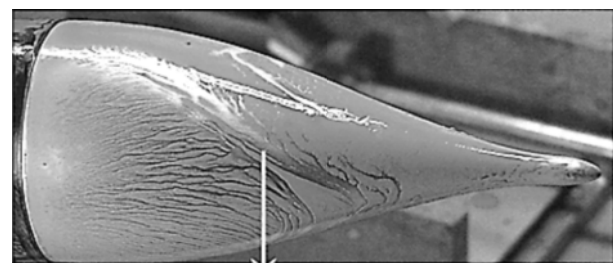


شکل ۱۳ مکان جدایش ثانویه بر روی زیردریایی سابوف در زوایای حمله مختلف

حرکت کرده و باعث می‌شود که ناحیه بیشتری از سطح مدل دچار جدایش شود. با افزایش زاویه حمله، شروع جدایش در موقعیت‌های نزدیک‌تری به دماغه اتفاق می‌افتد. اما در یک موقعیت مکانی  $X$  ثابت، با افزایش زاویه حمله، مکان جدایش به سمت مخالف جریان حرکت می‌کند (مقادیر  $\theta$  افزایش می‌یابند). در شکل ۱۲ مکان جدایش جریان در قسمت پاشنه (دم) زیرسطحی نشان داده شده است. در تمام زوایای حمله، مختصات زاویه جانبی جدایش بر روی پاشنه زیرسطحی به شدت کاهش می‌یابد و قسمت وسیعی از پاشنه زیرسطحی تحت تأثیر ناحیه جدایش جریان قرار می‌گیرد. این جدایش وسیع جریان در این قسمت ناشی از شیب زیاد منحنی پاشنه می‌باشد.



شکل ۱۱ مکان جدایش اصلی بر روی زیر دریایی سابوف در زوایای حمله مختلف



خط جدایش جریان

شکل ۱۲ خط جدایش جریان بر روی پاشنه مدل زیرسطحی سابوف در زاویه حمله ۳۰

خلاصه بیان می‌شود:

- (۱) در زوایای حمله  $0 \leq \alpha \leq 10^\circ$  در قسمت دماغه و قسمت میانی بدنه مدل زیرسطحی هیچ جدایش جریانی به چشم نمی‌خورد. اما در قسمت پاشنه مدل به علت شیب منحنی زیاد بدنه، جدایش در زوایای حمله ۵ و ۱۰ درجه رخ می‌دهد.
- (۲) در زوایای حمله  $15^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  با حرکت از سمت دماغه مدل زیرسطحی به سمت پاشنه آن، مختصات عرضی زاویه جدایش اولیه و ثانویه کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر ناحیه بیشتری از سطح بدنه در منطقه ویک قرار می‌گیرد.
- (۳) در زوایای حمله زیاد، مکان جدایش در قسمت دماغه زیرسطحی قرار دارد اما با کاهش زاویه حمله، شروع مکان جدایش اولیه و ثانویه به قسمت میانی بدنه زیرسطحی منتقل می‌شود. همچنین با افزایش زاویه حمله مکان زاویه عرضی جدایش نیز افزایش می‌یابد.

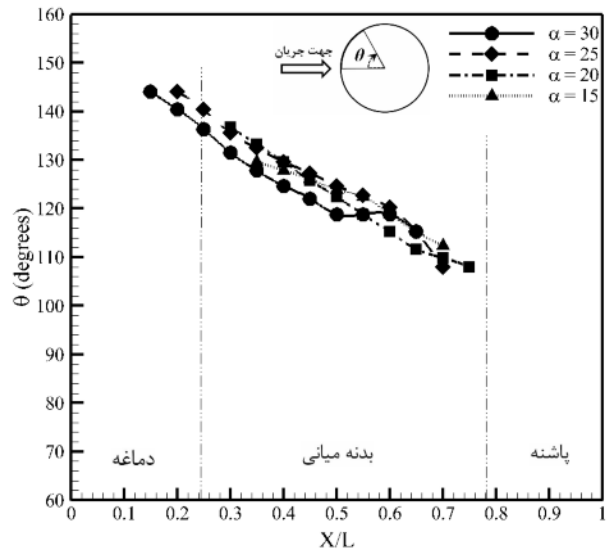
- (۴) در تمام زوایای حمله مختصات زاویه عرضی جدایش بر روی پاشنه زیرسطحی به شدت کاهش می‌یابد در نتیجه قسمت زیادی از پاشنه زیرسطحی تحت تأثیر ناحیه جدایش جریان قرار می‌گیرد.
- (۵) در تمامی زوایای حمله مکان چسبیدن دوباره جریان به سطح تقریباً مستقل از زاویه حمله است و به صورت خطی از ابتدای قسمت میانی تا انتهای آن کاهش می‌یابد.

## ۵- فهرست علائم

$L$	طول کلی مدل (m)
$R$	شعاع بیشینه منحنی مدل (m)
$r$	شعاع منحنی مدل (m)
Re	عدد رینولدز ( $\rho UL\mu^{-1}$ )
$U$	سرعت جریان آزاد ( $\text{ms}^{-1}$ )
$X$	فاصله از نوک دماغه در امتداد بدنه مدل (m)
$Y$	فاصله عمودی از محور مرکزی مدل (m)

**علائم یونانی:**

$\alpha$	زاویه حمله (degree)
$\beta$	زاویه پیرامونی روی سطح مدل (degree)
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی هوا ( $\text{kgm}^{-3}$ )



شکل ۱۴ مکان ناحیه اتصال ثانویه جریان به سطح بر روی زیردریایی سابوف در زوایای حمله مختلف

همچنین روش مرئی‌سازی توسط خطوط دود و نور لیزر در جریان اطراف مدل در داخل تونل دود نیز به کار گرفته شده است. نتایج کیفی استخراج شده از آزمایش‌های مرئی‌سازی در تونل دود نشان می‌دهد که وقتی یک مدل زیرسطحی نسبت به جریان زاویه می‌گیرد در اثر گردیدان فشار معکوسی که در عرض مدل رخ می‌دهد جریان از روی سطح مدل جدا می‌شود. جدایش جریان باعث تشکیل جفت گردابه عرضی (گردابه‌های اولیه) می‌شود که به صورت سه‌بعدی در امتداد طولی مدل کشیده شده‌اند. به علت چرخش معکوس دو گردابه نسبت به یکدیگر، جریان در سمت مخالف باد بین دو گردابه، به مدل برخورد کرده و به آن می‌چسبد. با حرکت از سمت دماغه مدل به سمت انتهای آن، ابعاد گردابه اولیه بزرگ‌تر شده و از سطح مدل فاصله می‌گیرد. بین سطح مدل و گردابه اولیه گردابه‌های ثانویه قرار دارند که معمولاً ابعاد آنها همانند گردابه اولیه بوده و با فاصله گرفتن از دماغه افزایش می‌یابد. در زوایای حمله بالا ( $\alpha \geq 30^\circ$ ) در انتهای مدل، گردابه‌های عرضی ساختار خود را از دست داده و از هم واپاشیده می‌شوند.

نتایج مرئی‌سازی با استفاده از روغن و رنگدانه بر روی سطح مدل میدان تنش برشی روی سطح مدل را آشکار می‌سازد. در این قسمت نتایج کیفی و کمی اندازه‌گیری شده که رفتار مکان جدایش اولیه و ثانویه و مکان چسبیدن دوباره جریان روی سطح مدل زیرسطحی استاندارد را نشان می‌دهند به طور

## ۶- مراجع

- [11] Hosder S., Simpson, R. L., "Unsteady Turbulent Skin Friction and Separation Location Measurements on a Maneuvering Undersea Vehicle", *Report of Department of Aerospace and Ocean Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2002.
- [12] Pantelatos D. K., Mathioulakis D. S., "Experimental Flow Study Over a Blunt-Nosed Axisymmetric Body at Incidence", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 19, 2004, pp. 1103-1115.
- [13] Beheshti, B. H., Wittmer F., Abhari R. S., "Flow Visualization Study of an Airship Model Using a Water Towing Tank", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 13, 2009, pp. 450-458.
- [14] Groves N. C., Huang T. T., Chang M. S., "Geometric Characteristics of DARPA SUBOFF Models (DTRC Model Nos. 5470 And 5471)", *Report DTRC/SHD-1298-01*, 1989.
- [15] Huang T., Liu H. L., Groves N., Forlini T., Blanton, J., Gowing, S., "Measurements of Flows Over an Axisymmetric Body With Various Appendages in a Wind Tunnel: the DARPA SUBOFF Experimental Program", *19th Symposium on Naval Hydrodynamics*. Seoul, Korea, 1992.
- [16] Roddy, R. F., "Investigation of the Stability and Control Characteristics of Several Configurations of the DARPA SUBOFF Model (DTRC Model 5470) From Captive-Model Experiments", *David Taylor Research Center, Ship Hydromechanics Department*, DTRC/SHD-1298-08, 1990.
- [17] West, G. S., Apelt, C. J., "The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers between  $10^4$  and  $10^5$ ", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 14, 1982, pp. 361-377.
- [18] Jeans T. L., Holloway A. G. L., "Flow-Separation Lines on Axisymmetric Bodies with Tapered Tails", *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 6, 2010, pp. 2177-2183.
- [1] Ericsson L. E., Reding J. P., "Vortex-Induced Asymmetric Loads in 2-D and 3-D Flows", *AIAA 18<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting*, Pasadena, California, 1980.
- [2] Gorski, J. J., "Marine Vortices and Their Computation", *RTO Applied Vehicle Technology Panel (AVT) Symposium*, Leon, Norway, 2001.
- [3] Kazemi Esfeh, M., Dehghan, A. A., Dehghan Manshadi, M., "Experimental Investigation of Upstream Structure Influence on the Ventilation Performance of One-Side Wind-Catchers", *Modares Mechanical Engineering Journal*, Vol. 13 No. 1, 2013, pp. 49-60 (In Persian).
- [4] Xueying, D., Gang, W., Xuerui, C., Yankui, W., Peiqing, L., Zhongxiang, X., "A Physical Model of Asymmetric Vortices Flow Structure in Regular State Over Slender Body at High Angle of Attack", *Science in China*, Vol. 46, No. 6, 2003, pp. 561-573.
- [5] Keener, E. R., "Oil Flow Separation Patterns on an Ogive Forebody", *AIAA J.*, Vol. 21, No. 4, 1983, pp. 550-556.
- [6] Paster, D. L., "Importance of Hydrodynamic Considerations for Underwater Vehicle Design", *IEEE*, CH2363-0/86/0000, 1986, pp. 1413-1422.
- [7] Barlow, J. B., Rae, W. H., Pope A., *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, Third Ed., John Wiley and Sons, 1999, pp. 627-630.
- [8] Mackay M., "Flow Visualization Experiments with Submarine Models in a Wind Tunnel", *Report DREA TM 88/204, Defense R&D Canada*, 1988.
- [9] Huggins, A., Packwood, A. R., "Wind Tunnel Experiments on a Fully Appended Laminar Flow Submersible for Oceanographic Survey", *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 22, No. 2, 1995, pp. 207-221.
- [10] Farokhi S., Taghavi R., Barrett R., "Pressure Drag Reduction Concepts for Maneuvering Submarines", *10th European Drag Reduction Working Meeting*, Berlin, Germany, 1997.