

## بررسی تجربی کاویتاسیون در جریان حول یک گوه گسترش یافته

ایرج جعفری گاوزن<sup>۱</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

بهار فیروزآبادی<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

حکمت امینی<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۱)

### چکیده

برای ایجاد انواع مختلف رژیم‌های کاویتاسیون، معمولاً جسم ترکیبی به صورت دماغه گوه‌ای و پس‌جسم مکعب مستطیلی، ساخته می‌شود. در این تحقیق پس‌جسم با نوک گوه‌ای ۶۰ درجه به طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۲۲، ۱۰ و ۱ {cm} تهیه شده است. جسم از جنس فولاد با کیفیت سطح ماشین‌کاری ۰/۰۱ میلی‌متر می‌باشد. علاوه بر آن، مدل با زاویه نوک ۳۰ درجه هم مورد آزمایش قرار گرفته است. دو نمونه آزمایشی ساخته شده در قسمت آزمایش تونل کاویتاسیون سرعت بالا (حداکثر ۲۵ متر بر ثانیه بدون نصب نمونه آزمایشی) نصب شده‌اند. با تغییر سرعت و فشار جریان درون تونل، برای جسم با نوک ۶۰ درجه، کاویتاسیون در فصل مشترک شروع و به صورت یک پوشش سفیدرنگ فصل مشترک را می‌پوشاند، اما در مدل ۳۰ درجه در دنباله پس‌جسم آغاز می‌شود. به محض کاهش جزئی عدد کاویتاسیون، رژیم کاویتاسیون لایه‌ای در طول پس‌جسم مدل ۶۰ درجه‌ای شروع می‌شود که برای صفحات بالایی و پایینی آن، هم‌زمان این رژیم ایجاد نمی‌شود. با افزایش طول کاویتاسیون لایه‌ای، نوسانات طول ناحیه‌ی رژیم لایه‌ای به صورت منظم اتفاق می‌افتد. با جدایی کاویتاسیون لایه‌ای از روی سطح، رژیم ابری‌شکل ایجاد می‌شود و با کاهش پایینی پس‌جسم یکسان نخواهند بود. آزمایش تا حالت سوپر کاویتاسیون انجام شده که به‌ازای یک طول مشخص ناحیه کاویتاسیونی، تغییر میزان طول با عدد کاویتاسیون به شدت افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** رژیم‌های کاویتاسیون، گوه گسترش یافته، نوسانات طول، کاویتاسیون ابری و لایه‌ای

## Experimental Investigation of Cavitation in Flow around an Extended Wedge

I. Jafari-Gavzan

Department of Mech. Eng.  
Semnan University, Semnan, Iran.

B. Firouzabadi

Department of Mech. Eng.  
Sharif University of Technology,  
Tehran, Iran

H. Amini

Department of Mech. Eng.  
Semnan University, Semnan, Iran.

(Received: 24/March/2017 ; Accepted: 20/February/2018)

### ABSTRACT

To establish a variety of cavitating flow regimes, the combined body with wedge nose and rectangular afterbody is usually used. In this research work, the nose angle and the afterbody dimensions of model were 60° and 22cmx10cmx1cm, respectively. Its fabricated material is nearly smooth steel with roughness of 0.01mm. Also, another model with 30° nose angle and the same dimensions of the afterbody is tested. Two mentioned bodies were installed at the test section of a high speed cavitation tunnel. If the speed and pressure of the flow in the tunnel are varied, first cavitation inception occurs, such as a white band at the interface. Then, a little decrease the cavitation number causes the sheet cavitation along the surfaces of the afterbody. However, they are not established simultaneously at the upper and lower planes of the afterbody. By increasing the length of the sheet cavitation, regular oscillation occurs. Observed cloud cavitation is due to the separation of sheet regime which occurs by the re-entrant jet. If cavitation number is decreased slowly, then the vapor sheet covers the upper and lower planes of the afterbody. At the same cavitation numbers, cloud cavitation regimes on the two mentioned planes are not equal. At an especial length of the sheet cavity, the rate of length increase will be intensified.

**Keywords:** Cavitation, Extended Wedge, Length Oscillation, Sheet and Cloud Cavitation

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): i\_jafari@semnan.ac.ir

۲- استاد: fiروزabadi@sharif.edu

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد: aminihekmat@yahoo.com

## فهرست علائم و اختصارات

$P$	فشار استاتیکی در ورودی مقطع آزمایش، Pa
$P_c$	فشار حدی نهایی، Pa
$U$	سرعت جریان آزاد بالادست، m/s

## علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $\text{kg/m}^3$
$\sigma$	عدد کاویتاسیون
$\sigma_i$	عدد کاویتاسیون، شروع

## ۱- مقدمه

تشکیل حباب‌ها با کاهش فشار استاتیکی جریان و انهدام آن‌ها در اثر انتقال به نواحی با فشار استاتیکی بیشتر را کاویتاسیون نامند. کاویتاسیون دارای اثرات مخربی همچون حفره‌زایی روی جسم، سر و صدا، ارتعاشات و کاهش عملکرد خواهد بود.

با توجه به هندسه‌های گوناگون و شرایط هیدرودینامیکی مختلف، کاویتاسیون به صورت حباب ریز شروع شده و ممکن است به حالت‌های لایه‌ای<sup>۱</sup>، گردابه‌ای<sup>۲</sup>، ابری<sup>۳</sup> شکل و سوپر کاویتاسیون<sup>۴</sup> درآید. لازم به ذکر است که به علت خسارات فراوان ناشی از پدیده کاویتاسیون، از حالت سوپر کاویتاسیون استفاده می‌شود. برای اجسام متحرک داخل دریا همچون اژدرها غالباً از این حالت استفاده می‌شود. به محض وقوع سوپر کاویتاسیون، پسای اصطکاکی به شدت کاهش می‌یابد. جریان کاویتاسیونی یک پدیده‌ای غیردائمی همراه با تغییرات فاز خواهد بود که تغییر فاز در فصل مشترک بین حباب و مایع اتفاق می‌افتد. در مرحله فروپاشی حباب‌ها تغییر فاز از بخار به مایع صورت می‌گیرد. با توجه به تحقیقات و بررسی‌های گسترده صورت گرفته، بررسی پدیده کاویتاسیون از لحاظ دینامیکی، هیدرودینامیکی و ترمودینامیکی نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد.

حالت ابری شکل عامل اساسی ناپایداری و نوسانی بودن پدیده کاویتاسیون است که در اطراف یک جسم پس از حالت لایه‌ای رخ می‌دهد. با توجه به هندسه و شرایط هیدرودینامیکی، طول بحرانی برای گذر از کاویتاسیون لایه‌ای به ابری شکل متفاوت خواهد بود.

باید در طراحی و ساخت وسایلی که با کاویتاسیون سروکار دارند از جمله پمپ‌ها، پروانه کشتی‌ها و زیر دریایی‌ها از کاویتاسیون جزئی تا جایی که ممکن است، اجتناب شود.

کارهای زیادی برای بررسی و شناخت رژیم‌ها و نوسانات کاویتاسیون انجام شده است [۱-۲]. با کاهش عدد کاویتاسیون، کاویتاسیون لایه‌ای، ابری شکل و سوپر کاویتاسیون مشاهده خواهد شد. فروپاشی حباب‌ها و ایجاد سروصدا در فاز کاویتاسیون ابری مهم‌تر از بقیه فازهای کاویتاسیون است [۳-۴]. دو عامل شکل هندسی و شرایط جریان سیال بر روی فرآیندهای فاز کاویتاسیون تاثیر می‌گذارند. بر روی شرایط سیال، مطالعات زیادی انجام شده است [۵-۲]. تحقیقات آزمایشگاهی زیادی بر روی هیدروفویل‌های خانواده NACA، استوانه و کره صورت گرفته است [۶-۱۰]. اما بر روی هندسه‌های ترکیبی کارهای آزمایشگاهی کمتری انجام شده است.

فرانک و سایر همکاران در سه تونل مختلف به منظور مقایسه بین عملکرد تونل‌ها بر نشر حباب‌ها، آزمایش‌های جامعی انجام داده اند [۱۱-۱۲]. اثر کشش سطحی بر روی جریان کاویتاسیونی روی هیدروفویل‌ها به صورت عددی بررسی شده است و با نتایج تجربی همخوانی دارد [۱۳-۱۴]. در مراجع [۱۵-۱۷] فیزیک ناپایداری حباب کاویتاسیونی و نیز تشکیل جت بازگشتی به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است.

بر اساس مطالعات گسترده انجام شده بر روی انواع رژیم‌های کاویتاسیون، این اتفاق نظر وجود دارد که عامل نوسان، وجود جت بازگشتی و رژیم کاویتاسیون ابری شکل خواهد بود. کار بر روی گوه‌های همراه با پس جسم در طی سال‌های اخیر شروع شده و آغاز کاویتاسیون بر روی فصل مشترک گوه با پس جسم تا به حال مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر این، ایجاد کاویتاسیون لایه‌ای گسترده در هندسه‌های بررسی شده امکان‌پذیر نبوده است. در این پژوهش، آزمایش ایجاد کاویتاسیون لایه‌ای گسترده همراه با

- 1- Sheet
- 2- Vortex
- 3- Cloud
- 4- Supercavitation

۹۴ سانتی متر و مقطع عرضی آن به ارتفاع ۱۵ و عرض ۱۰ سانتی متر است. مولد جریان، یک پمپ گریز از مرکز با دبی اسمی ۸۳۰ متر مکعب بر ساعت و ارتفاع فشاری ۱۷/۳ متر خواهد بود و حداکثر سرعت جریان در حالت سوپر کاویتاسیون در مقطع آزمایش ۲۵ متر بر ثانیه خواهد بود. با تغییر سرعت و یا با تغییر فشار، می توان عدد کاویتاسیون را تغییر داد. مقطع آزمایش دارای ابعاد  $۱۵^*۸۴^*۱۰$  سانتی متر می باشد. سرعت از ۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه تغییر می کند. جسم با نوک گوه ای ۶۰ درجه به عرض ۱۰، طول ۲۲ و ارتفاع ۱ سانتی متر می باشد. مطابق شکل ۲، مدل از جنس فولاد با کیفیت سطح ماشین کاری ۰/۰۱ میلی متر ساخته شده است. تصویربرداری با دوربین نیکون p530 و نورپردازی با دو پرژکتور درلو برای روشنایی مناسب جهت وضوح کامل تصاویر انجام می شود. دمای آب در شرایط آزمایش ۱۵ درجه سانتی گراد و فشار هوا ۹۰۰۰۰ پاسکال است. در محاسبه عدد کاویتاسیون از فشار نهایی اندازه گیری شده در پشت جسم استفاده می شود. برای اندازه گیری فشار حدی نهایی درون حباب سوپر کاویتاسیون، یک سوراخ ریز در امتداد طولی و روزنه ریز دیگری که با یک مجرای فوق در ارتباط است، طوری تعبیه می شود که با یک پیچ توخالی به فشارسنج با گیج منفی ارتباط برقرار کند. قبل از فشارسنج یک شیر تخلیه برای تخلیه هوا و گازهای آزاد شده استفاده می شود که قبل از اندازه گیری، باز شده و سپس بسته می شود. عقربه فشارسنج فوق در حالت حدی که بدون نوسان می باشد (در این حالت درون فشارسنج روغن وجود ندارد)، بر روی عدد ۰/۸۵- قرار می گیرد.

اندازه گیری فشار پشت مدل با دو فشارسنج گیج مثبت و منفی با دقت ۰/۱ بار انجام شده است. همچنین طول ناحیه کاویتاسیون با یک صفحه مدرج با دقت ۱/۰ میلی متر اندازه گیری می گردد. فشار ورودی مقطع آزمایش و فشار ورودی نازل به ترتیب با فشارسنج های گیج منفی و مثبت با دقت ۰/۱ بار ثبت شده است. به منظور اطمینان از صحت نتایج، بدون تعویض آب تونل، آزمایش برای هر حالت کاویتاسیونی سه الی پنج بار تکرار شده است.

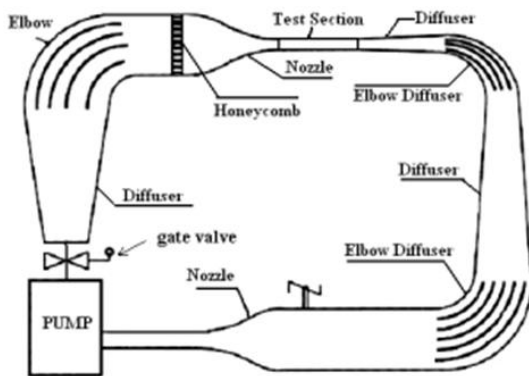
فاز ابری شکل ارائه خواهد شد. موضوعات کاویتاسیون لایه ای، ابری شکل، نحوه گذار از لایه ای به ابری و نوسان طول حباب به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می گیرد.

در طراحی تونل کاویتاسیون سرعت بالا، مقطع آزمایش در جهت پایین دست واگرا طراحی شده که در این تونل مقدار زاویه واگرایی ۰/۵ درجه است. بررسی اثرات تداخلی دیواره و جریان کاویتا در حالت کاویتاسیون ابری موضوع بسیار پیچیده ای بوده و هنگام اندازه گیری نیروی پسای وارد بر نمونه آزمایشی باید مدنظر قرار گیرد. سه مدل مختلف بسته شدن کاویتا، شامل مدل دنباله باز، ریبوچاینسکی<sup>۱</sup> و جت بازگشتی در نظر گرفته می شود. برای به حداقل رساندن اثرات تداخلی اشاره شده، مدل های آزمایشی با ضخامت ۱ سانتی متر ساخته شده اند. با توجه به عدد رینولدز بالا و گرادیان فشار ناچیز در جهت جریان، ضخامت لایه مرزی معشوش آب در انتهای مقطع آزمایش ناچیز خواهد بود.

در این تحقیق فقط اثر جت بازگشتی در بررسی نوسان حباب کاویتاسیون مدنظر قرار گرفته است. برنه در سال ۲۰۱۴ نشان داد که عدد کاویتاسیون کمینه حدی، تابعی از ضخامت نمونه مورد آزمایش و ضخامت حباب سوپر کاویتاسیون در انتهای پایین دست مدل خواهد بود [۱۸]. ناناسکاندان و سایر همکاران در سال ۲۰۱۶ مشخصه های دنباله نزدیک جریان کاویتاسیونی حول استوانه را به روش عددی در دو رینولدز ۲۰۰ و ۳۰۹۰۰ بررسی کردند [۱۹]. آنها نشان دادند که با ایجاد کاویتاسیون، عدد اشتروهل نشر گردابه ها کاهش می یابد. در سال ۱۳۸۵ منوچهر راد و همکاران به بررسی شروع و گسترش حباب کاویتاسیون به صورت تجربی و عددی پرداختند. آنها دریافتند که نمی توان شروع کاویتاسیون را با روش عددی برآورد نمود. اما می توان گسترش کاویتاسیون حول جسم ترکیبی با دماغه گوه ای را به خوبی شبیه سازی نمود [۲۰].

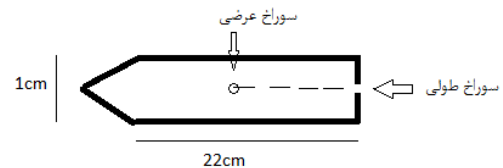
## ۲- بستر تست تجربی

همه آزمایش ها در تونل کاویتاسیون سرعت بالای دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. مطابق شکل ۱ تونل دارای نازل با نسبت باریک شونده ۱۷/۱ و همچنین ۳ دیفیوزر اصلی با زوایای ۷ تا ۱۰ درجه می باشد. طول مقطع آزمایش



شکل (۱): تونل کاویتاسیون سرعت بالا دانشگاه صنعتی شریف.

کاویتاسیون را به صورت حالتی که قابل مشاهده باشد نسبت داد ( $\sigma_i = 0.75$ ). همان طور که از شکل‌ها پیداست، کاویتاسیون در فصل مشترک رویه‌های بالایی و پایینی رخ می‌دهد که در بالایی زودتر اتفاق افتاده ولی صورت کاویتاسیونی آن‌ها یکسان است. به‌ازای عدد کاویتاسیون ثابت، فشار استاتیکی در مقطع آزمایش در جهت قائم از کف به سقف کاهش می‌یابد، بنابراین، مقدار فشار استاتیکی در فصل مشترک پایینی بیشتر از مقدار آن در فصل مشترک بالایی خواهد بود. یعنی پدیده کاویتاسیون در فصل مشترک بالایی زودتر رخ می‌دهد.



شکل (۲): نمونه آزمایشی مدل ۶۰ درجه با پس جسم ۲۲ سانتی‌متری.



شکل (۳): آغاز کاویتاسیون به‌ازای  $\sigma = 0.75$  در فصل مشترک بالایی و پایینی.

همان‌طور که، در شکل ۴ نشان داده شده است، با کمی افزایش سرعت و فشار، عدد کاویتاسیون  $0.706$  به‌دست می‌آید. همان‌طور که در تصویر اول ملاحظه می‌شود، کاویتاسیون لایه‌ای با طول متوسط ۱ سانتی‌متر به ابتدای پس جسم می‌چسبد. در حالی که در تصویر دوم مشاهده می‌شود که جت بازگشتی در حال جدا کردن لایه بخار به طول  $1/5$  سانتی‌متر از روی جسم می‌باشد. در تصویر سوم مشاهده می‌شود با ورود جت بازگشتی به زیر لایه، حباب چسبیده بلند شده و به صورت ابر جدا شده و بالا می‌رود. ضخامت لایه بخار چندین برابر ضخامت لایه آب می‌گردد و

### ۳- داده برداری و تفسیر نتایج

نتایج به صورت یک سری تصاویر به‌ازای اعداد کاویتاسیون مختلف ارائه می‌شود. عدد کاویتاسیون از  $0.75$  تا  $0.451$  تغییر می‌کند که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma = \frac{P - P_c}{0.5\rho U^2}, \quad (1)$$

که در آن،  $U$  سرعت جریان آزاد،  $p$  فشار استاتیکی در ورودی مقطع آزمایش،  $P_c$  فشار حدی نهایی و  $\rho$  چگالی آب که برابر با  $1000$  کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. به دلیل غیردائمی و گذرا بودن پدیده کاویتاسیون، برای هر عدد کاویتاسیون خاص، حداکثر سه تصویر ارائه می‌شود که با وجود شباهت‌های ظاهری در جزئیات متفاوت هستند. شکل ۳ مربوط به عدد کاویتاسیون  $0.75$  می‌باشد. می‌توان شروع

چسبیده، کمتر از فاز تبخیر ناحیه دم حباب لایه‌ای است و در مکانی این دو سرعت برابر و پس از آن سرعت مایع بیشتر از سرعت تبخیر می‌گردد که پس از آن جت بازگشتی رخ می‌دهد. در همین شکل هر سه تصویر دارای کاویتاسیون لایه‌ای بر روی سطح فوقانی جسم بوده، اما حالت‌های کاویتاسیون ابری بر روی سطح تحتانی رخ می‌دهد که از نظر نشر ابر کاویتاسیونی یکسان نخواهند بود. نشر ابر کاویتاسیونی در تصویر میانی از دو تصویر دیگر بیشتر است.



شکل (۵): کاویتاسیون ابری و لایه‌ای بر روی سطوح بالا و پایین در عدد کاویتاسیون ۰/۶۵۲.

در شکل ۶،  $\sigma = 0/605$  مشاهده می‌شود که در تصویر اول طول کاویتاسیون لایه‌ای بر روی صفحه بالایی به  $4/5$  سانتی‌متر و بر روی صفحه پایینی رژیم لایه‌ای مشاهده نمی‌شود. بر روی صفحه پایینی جت بازگشتی تمام لایه را جدا نموده و به صورت رژیم ابری درآورده است. در تصویر دوم رژیم لایه‌ای صفحه بالایی، کاهش یافته و به  $3/5$  سانتی‌متر رسیده است و رژیم ابری شکل در انتهای آن رخ داده است. در تصویر سوم می‌توان دید که کاویتاسیون لایه‌ای بر روی صفحه بالایی بلندتر شده است، اما کاویتاسیون رژیم ابری شکل در صفحه پایینی افزایش یافته و به طول  $10$  سانتی‌متر رسیده است و کاویتاسیون ابری در سطح تحتانی از نظر نشر حباب از دو تصویر دیگر قوی‌تر است. جسم آزمایشی در هر سه تصویر مانع حرکت ابر کاویتاسیونی به سمت بالا خواهد شد. نیروی شناوری وارد بر ابر کاویتاسیونی عامل مولفه حرکت در جهت قائم می‌باشد.

چرخیدن مایع حول ناحیه کاویتاسیونی بیشتر می‌شود. با کاهش زاویه گوه، چرخیدن مایع حول فصل مشترک کاهش می‌یابد و اعداد شروع کاویتاسیون کوچکتر خواهند شد. بعد از کاهش کوچک عدد کاویتاسیون، رژیم کاویتاسیون تبدیل به رژیم لایه‌ای می‌شود که به علت ضخامت کم بخار، جدایی بخار به صورت تصادفی اتفاق می‌افتد و وقتی عدد کاویتاسیون بیشتر کاهش می‌یابد، کاویتاسیون لایه‌ای بلندتر شده و مطابق شکل ضخیم‌تر می‌گردد. اثر جت بازگشتی قوی‌تر شده و جدایش به صورت متناوب و منظم اتفاق می‌افتد. در فاز رشد بخار، سرعت رشد بخار در ابتدا به‌ازای طول کوچک حفره (کاویتا) بخار خیلی بیشتر از سرعت جریان مایع روی آن می‌باشد، تا این‌که در مرحله نهایی رشد، سرعت رشد حفره (کاویتا) بخار کمتر از سرعت مایع روی آن می‌گردد. در این حالت جت مایع به سطح جامد به صورت مورب برخورد کرده که مولفه موازی با سطح، در جهت بالا دست لایه بخار را جاروب می‌کند و به صورت کاویتاسیون ابری شکل ظاهر می‌گردد و این چرخه مجدداً از فصل مشترک تکرار می‌گردد.



شکل (۴): کاویتاسیون در عدد  $0/706$  در لحظه‌های مختلف، رژیم‌های گوناگون رخ می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، طول کاویتاسیون لایه‌ای بلندتر شده و به  $3$  سانتی‌متر می‌رسد. به محض رسیدن طول لایه به اندازه  $4$  سانتی‌متر در  $\sigma = 0/652$ ، دنباله حباب چسبیده، به وسیله جت بازگشتی از روی جداره جدا شده و به صورت رژیم ابری در می‌آید. بنابراین، طول حباب چسبیده کاهش یافته و دائماً در حال نوسان در بازه  $3-4$  سانتی‌متر می‌باشد. در فاز گسترش کاویتاسیون لایه‌ای، سرعت جریان مایع بر روی حباب

در شکل ۸،  $\sigma = 0/48$ ، در تصویر اول مشاهده می‌شود که حالت ابری در صفحه فوقانی، کل قسمت پس جسم را در بر گرفته است. اما در تصویر دوم حالت لایه‌ای کل جسم را پوشانده است و در انتهای لایه کاویتاسیونی حالت ابری شکل ناچیزی وجود دارد.

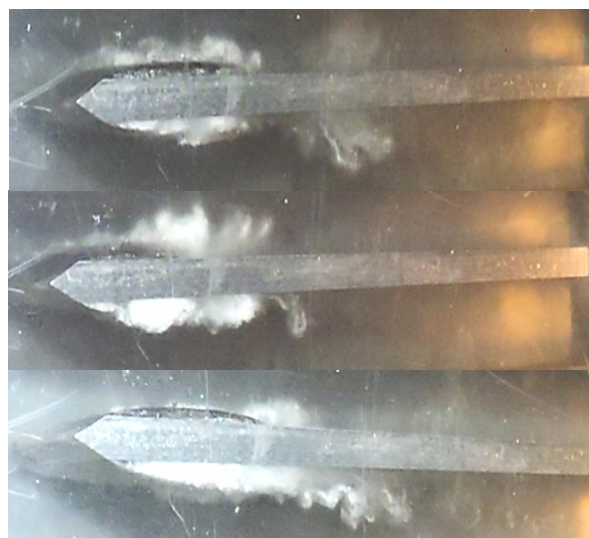


شکل (۸): دو رژیم کاملاً متمایز لایه‌ای با طول مختلف در عدد کاویتاسیون  $0/48$ .

در شکل ۹، با کاهش اندک عدد کاویتاسیون  $\sigma = 0/451$ ، مشاهده می‌گردد که کاویتاسیون همه جای مدل را فراگرفته و در این حالت سوپرکاویتاسیون اتفاق می‌افتد. شکل حباب سوپرکاویتاسیون تغییر نکرده و فقط در انتهای آن ناپایداری مشاهده می‌شود. در این حالت، حباب سوپرکاویتاسیون از نظر طول و شکل تقریباً پایا باقی می‌ماند. سطح فوقانی هر سه تصویر دارای سوپرکاویتاسیون یکسان و پایا بوده اما سطح تحتانی به حالت سوپرکاویتاسیون پایا نرسیده است.



شکل (۹): پراکندگی حباب‌ها در اندازه‌های مختلف در پایین دست جریان در مرحله سوپر کاویتاسیون ( $\sigma = 0/45$ ).



شکل (۶): کاویتاسیون لایه‌ای توسعه یافته روی سطح بالایی در عدد کاویتاسیون  $0/605$ .

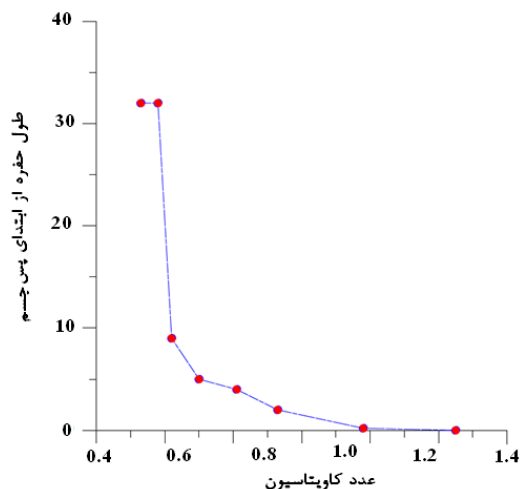
در شکل ۷،  $\sigma = 0/55$  مشاهده می‌شود که در تصویر اول طول کاویتاسیون لایه‌ای بر روی صفحه بالایی به ۶ سانتی‌متر رسیده است. اما در تصویر دوم به دلیل وجود جت بازگشتی، طول این رژیم  $3/5$  سانتی‌متر شده است. در تصویر سوم طول حالت لایه‌ای نسبت به قبل، بلندتر شده و در صفحه پایینی رژیم کاویتاسیون کاملاً ابری شکل حاکم است. ضمناً تصویر دوم و سوم نشان می‌دهند که ابر کاویتاسیونی به علت وجود سطح تحتانی نمی‌تواند به‌طور قائم حرکت کند. همچنین صدای فروپاشی حباب در مرحله کاویتاسیون ابری بسیار شدید خواهد بود.



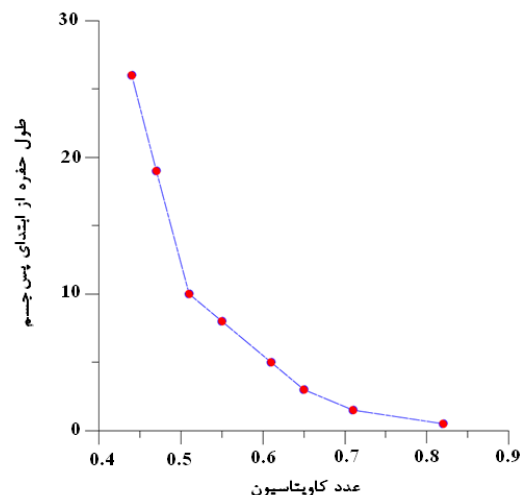
شکل (۷): گسترش طول کاویتاسیون لایه‌ای روی سطح بالایی مدل و ایجاد کاویتاسیون ابری در عدد کاویتاسیون  $0/55$ .

لایه‌ای اتفاق می‌افتد. اما برای مدل زبر در عدد کاویتاسیون ۰/۸ رخ می‌دهد.

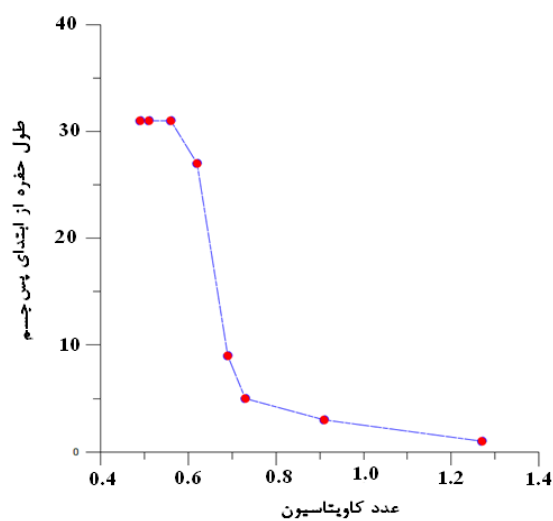
در شکل ۱۰، برای مدل صاف با طول پس جسم ۲۲ سانتی‌متر به‌ازای عدد کاویتاسیون ۰/۵، افزایش شدید طول کاویتاسیون



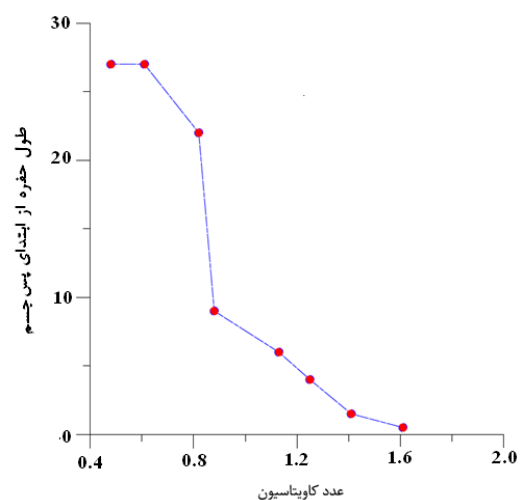
مدل صاف با طول پس جسم ۲۳/۱ سانتی‌متر، افزایش طول کاویتاسیون بعد از عدد ۰/۶



مدل صاف با طول پس جسم ۲۲ سانتی‌متر



مدل زبر با طول پس جسم ۲۳/۱ سانتی‌متر



مدل زبر با طول پس جسم ۲۲ سانتی‌متر

**شکل (۱۰):** طول ناحیه کاویتاسیونی بر حسب عدد کاویتاسیون به‌ازای طول‌های مختلف پس‌جسم در حالت زبر و صاف با دماغه ۶۰ درجه.

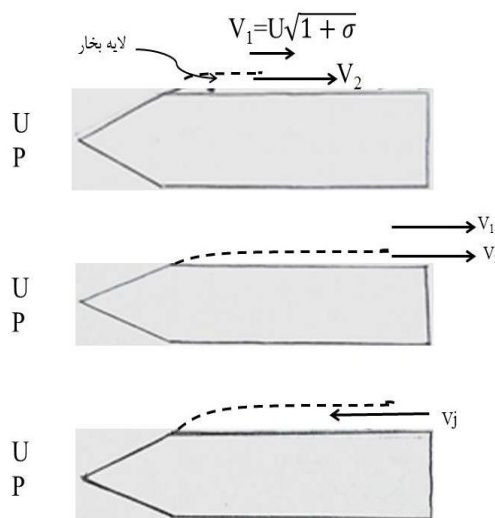
برای بررسی اثر زبری بر شروع و گسترش کاویتاسیون، سنباده‌های کاغذی ۶۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۲۰۰ بر دماغه و سطوح بالا و پایین به‌طور مجزا پوشانده شده است. با زبر شدن سطح، عدد شروع کاویتاسیون و همچنین عدد کاویتاسیون نظیر حالت سوپر کاویتاسیون افزایش یافته است. با افزایش ارتفاع زبری، عدد شروع کاویتاسیون و همچنین عدد سوپر کاویتاسیون افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۱، U و P به ترتیب سرعت و فشار جریان بالادست می‌باشند. در تصویر اول فاز رشد کاویتاسیون لایه‌ای که در آن سرعت مایع روی لایه حباب و سرعت رشد حباب است، مشاهده می‌گردد. تصویر دوم لحظه توقف رشد حباب لایه‌ای که سرعت رشد حباب با سرعت مایع روی آن یکسان است را نشان می‌دهد. در تصویر سوم سرعت جت بازگشتی می‌باشد.

۷- برای دو هندسه آزمایش شده، رفتار نوسانی طول ناحیه کاویتاسیون، به وضوح تایید می‌گردد.

#### ۶- مراجع

1. Keil, T., Pelz, P.F., and Buttenbender, J. "On the Transition from Sheet to Cloud Cavitation", The 8<sup>th</sup> International Symposium on Cavitation, August 13-16, Singapore, Singapore, 2012.
2. Franc, J. P. "Physics and Control of Cavitation. in Design and Analysis of High Speed Pumps" University of Gernoble, France, RTO-EN-AVT-143, 2006.
3. Brennen, C.E. "Cavitation and Bubble Dynamics", Oxford University Press, New York, USA, 1995.
4. Franc, J.P. and Michel, J.M. "Fundamentals of Cavitation", Grenoble Sciences", Dordrecht, Netherlands, 2004.
5. Wang, G., Senocak, I., Shyy, W. Ikohagi, T., and Cao, S. "Dynamics of Attached Turbulent Cavitating flows", Prog. Aerosp. Sci, Vol. 37, pp. 551-581, 2001.
6. Kawakami, D.T., Fujii, A., Tsujimoto, Y., and Arndt, R.E.A. "An Assessment of the Influence of Environmental Factors on Cavitation Instabilities", J. Fluids Eng., Vol. 130, pp. 1-8, 2008.
7. Kim, J. and Lee, J.S., "Numerical Study of Cloud Cavitation Effects on Hydrophobic Hydrofoils" Int. J. Heat and Mass Trans., Vol. 83, pp. 591-603, 2015.
8. Roohi, E. Zahiri, A.P., and Fard, M.P. "Numerical Simulation of Cavitation around A Two-dimensional Hydrofoil, Using VOF Method and LES Turbulence Model", Appl. Math. Model, Vol. 37, pp. 6469-6488, 2013.
9. Vinogradova, O.I., "Slippage of Water over Hydrophobic Surfaces", Int. J. Miner. Process, Vol. 56, pp. 31-60, 1999.
10. Reisman, G.E., Wang Y.C., and Brennen, C.E. "Observations of Shock Waves in Cloud Cavitation", J. Fluid Mech., Vol. 355, pp. 255-283, 1998.
11. Dular, M. and Petkovsek, M. "Simultaneous Observation of Cavitating Structures and Cavitation Erosion", Wear, Vol. 300, pp. 55-64, 2013.
12. Franc, J.P. "Partial Cavity Instabilities and Re-entrant Jet", International Symposium on Cavitation CAV2001, Pasadena, USA, 2001.
13. Kravtsova, A.Y., Markovich, D.M., Pervunin, K.S., and Imoshevskiy, M.V.T, "Experimental Investigation of Cavitating Flow about a Cascade of NACA0015 Series Hydrofoils", the 16th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to



شکل (۱۱): مکانیزم تشکیل جت بازگشتی بر روی پس جسم با دماغه ۶۰ درجه.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج اصلی تحقیق عبارتند از:

- ۱- با ایجاد پس جسم بعد از نوک گوه‌ای، کاویتاسیون لایه‌ای تشکیل می‌گردد که ضخامت دو لایه بر روی سطوح به علاوه ضخامت جسم، کمتر از ضخامت ناحیه کاویتاسیونی در حالت بدون پس جسم است.
- ۲- با این مدل، رژیم لایه‌ای گسترده بر روی پس جسم ایجاد می‌گردد.
- ۳- رژیم کاویتاسیون ابری شکل گسترده در اعداد کاویتاسیون نزدیک به فاز سوپر کاویتاسیون ایجاد می‌گردد.
- ۴- به محض شروع کاویتاسیون لایه‌ای، سرعت مایع بر روی لایه بخار در فاز رشد، کمتر از سرعت رشد بخار است. به ازای یک طول معین، سرعت رشد حباب با سرعت مایع روی آن برابر شده و پس از آن سرعت مایع بیشتر از سرعت رشد حباب شده و با برخورد جت مایع به سطح پس جسم، دو مولفه سرعت مختلف جهت، یکی به سمت بالادست به صورت جت بازگشتی و دیگری به سمت پایین دست ایجاد می‌شود.
- ۵- فاز کاویتاسیون لایه‌ای به صورت شفاف و نازک، جداره را می‌پوشاند.
- ۶- در رژیم کاویتاسیون ابری که فازهای مایع و بخار هم‌زمان وجود دارند، صدای انهدام بسیار شدید خواهد بود و



17. Jafari Gavzan, I. and Rad, M. "Influence of After Body and Boundary Layer on Cavitating Flow", *Int. J. Eng.*, Vol. 22, No. 2, pp. 185–196, 2009.
18. Brennen, C.E. "Cavitation and Bubble Dynamics", Cambridge University Press, New York, USA, 2014.
19. Gnanaskandan, A. and Mahesh, K. "Numerical Investigation of Near-Wake Characteristics of Cavitating Flow over a Circular Cylinder", *JFM*, Vol. 790, pp. 453-491, 2016.
20. Shams, I., Jafari Gavzan, I., and Rad, M. "Evaluation of Numerical Simulation and Experimental Study on Cavitation and Bubble Development", ISME Conference, Isfahan, Iran, 2006.
- Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, pp. 09-12, 2012.
14. Ji, B., Luo X.W., Roger E., Arndt, A., Xiaoxing P., and Wu, Y. "Large Eddy Simulation and Theoretical Investigations of the Transient Cavitating Vortical flow Structure around a NACA66 Hydrofoil", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 68, pp.121–134, 2015.
15. Brander, P.A., Walker, G.J., Niekamp, P.N. and Anderson, B. "An Experimental Investigation of Cloud Cavitation about a Sphere", *J. Fluid Mech.*, Vol. 656, pp. 147-176, 2010.
16. Biluš, I., Bombek, G., Hočevár, M., Širok, B., Cenčič, T., and Petkovšek, M. "The Experimental Analysis of Cavitating Structure Fluctuations and Pressure Pulsations in the Cavitation Station", *J. Mech. Eng.*, Vol. 60, No. 3, pp. 147-157, 2014.

