

یادداشت پژوهشی

# رفتار سایش کاویتاسیون بر روی پره‌های چرخان با فلزات گوناگون

پژوهش‌نفت

سال بیستم

شماره ۶۴

صفحه ۹۴-۸۷، ۱۳۸۹

نادر دیزجی<sup>۱\*</sup> و مریم سادات اشراف‌زاده<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، گروه مهندسی مکانیک

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، گروه مهندسی شیمی صنایع غذایی

ndizadji@srbiau.ac.ir

## مقدمه

تغییرات فشار و جریان مایع به خاطر شکل هندسی سیستم سبب ایجاد کاویتاسیون می‌گردد. سیال در حال حرکت در مسیر حرکتش به‌طور موضعی دارای سرعت‌های متفاوت است. این تغییرات سرعت باعث تغییرات فشار موضعی سیال می‌شود [۱] که با افزایش بیش از حد سرعت موضعی مایع، فشار موضعی آن کمتر از فشار بحرانی (وابسته به خواص فیزیکی سیال) می‌گردد که سبب تشکیل حباب در مایع می‌شود. این حباب به‌دلایلی حتی با افزایش فشار کمی بیشتر از فشار بحرانی، از بین نمی‌رود. این حالت را کاویتاسیون هیدرودینامیکی می‌گویند. به‌طور کلی در این نوع کاویتاسیون فشار نقطه آستانه کاویتاسیون با فشاری که در آن کاویتاسیون قابل رویت است تفاوت دارد [۲].

مراحل تشکیل و فروپاشی حباب در شکل ۱ آورده شده است.

کاویتاسیون باعث ضربه‌های فشاری شده و سبب سایش، خوردگی سطح، ارتعاش و سر و صدا می‌گردد و از مکانیسم‌های سایش مایع است. موج‌های فشاری در طول انفجار حباب‌ها در برخورد با سطوح جامد سبب صدمه

## چکیده

در این مطالعه به‌صورت تجربی سایش کاویتاسیون بر روی مدل‌هایی از فلزات مختلف (چدن خاکستری، آلومینیم ۱۱۰۰، آلومینیم ۶۰۶۱ و فولاد ضد زنگ کروم دار) به‌صورت چرخان در دور مشخص در عدد بی بعد کاویتاسیون، سرعت و درجه حرارت یکسان در تونل بسته کاویتاسیون مورد بررسی قرار گرفت. نرخ کاهش وزن، تعداد حفره‌ها و نحوه خوردگی با میکروسکوپ‌های نوری و SEM مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر تغییرات دور بر سایش کاویتاسیون برای مدل‌هایی از فلزات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که قطر حفره‌های ناشی از کاویتاسیون مستقل از دور چرخش پره‌ها می‌باشد و با افزایش دور مدل‌ها، تعداد حفره‌ها و سایش کاویتاسیون بیشتر می‌شود. در این مطالعه مشخص گردید که پره از نوع فولاد ضد زنگ کروم‌دار مقاومت بیشتری در برابر سایش کاویتاسیون دارد و روابطی بر حسب نرخ کاهش وزن نسبت به دور ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: کاویتاسیون، فشار بخار اشباع، سایش، نرخ کاهش وزن، عدد بی بعد کاویتاسیون

جدول ۱- مشخصات انواع فلزات مورد استفاده

جنس فلز	استحکام کششی psi	تنش تسلیم psi
آلومینیم ۱۱۰۰	۱۲/۲۵۰	۷/۶۰۰
آلومینیم ۶۰۶۱	۴۳/۳۰۰	۴۰/۰۰۰
چدن خاکستری	۵۰	-
فولاد ضد زنگ کروم دار	۱۲۵/۰۰۰	۱۰۰/۰۰۰

## تئوری

## رفتار دینامیکی حباب‌ها و هسته‌های کائوتاسیون

اگر حباب با هسته کروی به شعاع  $R_0$  را در نظر بگیریم، اختلاف فشار استاتیکی داخل و خارج حباب طبق رابطه زیر داده می‌شود:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} = \frac{2\sigma_0}{R_0} \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $\sigma_0$  کشش سطحی و  $P_{in}$  و  $P_{out}$  به ترتیب فشارهای درون و بیرون حباب می‌باشند. اگر در این هسته اولیه فشار داخل هسته به فشار بخار آب محیط برسد، در آن صورت آب تشکیل دهنده هسته تبخیر شده و به داخل هسته نفوذ می‌کند و بدین ترتیب هسته رشد می‌کند و حباب تشکیل می‌گردد، یعنی:

$$P_{sat} \geq P_{in} = P_{out} + \Delta P \quad (2)$$

بنابراین هنگامی که  $P_{out}$  کمتر از تفاضل فشار بخار و  $\Delta P$  شود، فشار بحرانی  $P_c$  برای شروع کائوتاسیون بدست خواهد آمد که:

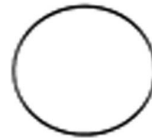
$$P_c \approx P_{sat} - \frac{2\sigma}{R} \quad (3)$$

که  $R$  بزرگترین شعاع هسته و  $P_{sat}$  فشار بخار اشباع آب می‌باشد. با توجه به روابط ذکر شده، مشاهده می‌گردد که پایداری حباب رشد یافته به شعاع حباب و اختلاف فشار وابسته است. حال اگر این حباب به یکباره وارد محیطی با فشار زیاد گردد، جداره‌هایش تحمل این ضربه را نخواهند داشت و حباب از هم خواهد پاشید [۴].

## پارامترهای موثر در سایش کائوتاسیون

مطالعات مختلف نشان داده است که آسیب کائوتاسیون ناشی از عوامل گوناگونی است و وجود یک عامل به تنهایی در ایجاد آن کافی نمی‌باشد،

رساندن به سطح جامد، خوردگی در سطح ارتعاش و سر و صدا می‌گردد [۳]. سطوح آسیب دیده می‌تواند بخش‌هایی از لوله‌ها یا توربو ماشین‌ها (پمپ، توربین، پروانه کشتی و...) باشد. بررسی‌های مختلفی از آسیب سطح توسط کائوتاسیون انجام شده است. در این مطالعه به بررسی اثر سایش کائوتاسیون بر روی مدل‌های چرخان از فلزات چدن خاکستری، آلومینیم ۱۱۰۰، آلومینیم ۶۰۶۱ و فولاد ضد زنگ کروم دار پرداخته می‌شود. در جدول ۱ مشخصات فلزات مورد استفاده آورده شده است.



الف- حباب کروی شکل



ب- تغییر شکل و کاهش اندازه حباب



پ- نفوذ مایع به حباب



ت- حرکت جت آب با سرعت بسیار بالا

ث- حرکت جت آب با سرعت بسیار بالا  
شکل ۱- مراحل تشکیل و فروپاشی حباب

اشباع مایع به صورت مطلق در دمای کاری،  $\rho$  دانسیته مایع در دمای کاری و  $U$  سرعت جریان در سطح مقطع گلوبی می‌باشد.

در عدد کاویتاسیون فرض بر آن است که شروع و گسترش کاویتاسیون بر روی مدل و پروتوتایپ یکسان است و در نتیجه این عدد اهمیت فراوانی در آزمایش دارد. برای محاسبه کاهش وزن ناشی از کاویتاسیون از رابطه

$$\dot{W} = \frac{\Delta W}{T - T_0} \quad (5)$$

که در رابطه فوق  $\Delta W$  کاهش وزن،  $T$  زمان قرارگیری قطعه در دستگاه و  $T_0$  زمان قرارگیری قطعه در دستگاه بدون کاهش وزن می‌باشد [۸].

همچنین یکی از معیارهای بررسی سایش کاویتاسیون، قطر متوسط MDP است که به صورت زیر تعریف می‌گردد [۵]:

$$\text{MDP} = \text{سطح در تماس} / \text{کاهش حجم قطعه} \quad (6)$$

به نظر محققین مختلف یکی از روش‌های بررسی سایش کاویتاسیون استفاده از میکروسکوپ SEM می‌باشد [۹ - ۱۱].

### روش آزمایش

برای بررسی سایش کاویتاسیون از تونل بسته کاویتاسیون که درون آن آب تازه ریخته شده، استفاده گردیده است. آزمایش در آزمایشگاه مکانیک سیالات گروه مهندسی مکانیک واحد علوم و تحقیقات تهران انجام گرفته است. سطح مقطع مجرای کاویتاسیون  $110 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  است. نمودار شماتیک جریان تونل بسته کاویتاسیون در شکل ۲ نشان داده شده است.

به دلیل آنکه وجود حباب‌های هوای حل شده در آب، سبب کاویتاسیون گازی می‌گردد و این امر منحل رخداد کاویتاسیون بخاری است (کاویتاسیون ناشی از کاهش فشار بخار اشباع مایع)، لذا میزان هوای حل شده در آب باید تا حد امکان کم و ثابت نگه‌داشته شود برای این منظور از دستگاه ون اسلایک<sup>۱</sup> استفاده گردید. همچنین کلیه وسایل اندازه‌گیری کالیبره شد.

به طوری که ترکیبی از عوامل هندسی و هیدرودینامیکی و سایر عوامل وابسته در ایجاد آن دخیل هستند. عوامل زیر از مهمترین آنها است [۵]:

### عوامل هندسی

الف- ناهمواری‌های سطحی

ب- ترک‌های ساختاری

پ- جداکننده‌های جریان

ت- دهانه مجاری و لوله‌ها

ث- تغییر در شکل عبور جریان

ج- انحنای یا انحراف در مسیر جریان

چ- اثر انسداد

### عوامل هیدرودینامیکی و نوع مایع

الف- سرعت جریان

ب- درجه حرارت آب

پ- تعداد و اندازه‌های حباب‌های هوا در آب

ت- وجود ذرات معلق کوچک در آب

ث- کشش سطحی

ج- ویسکوزیته

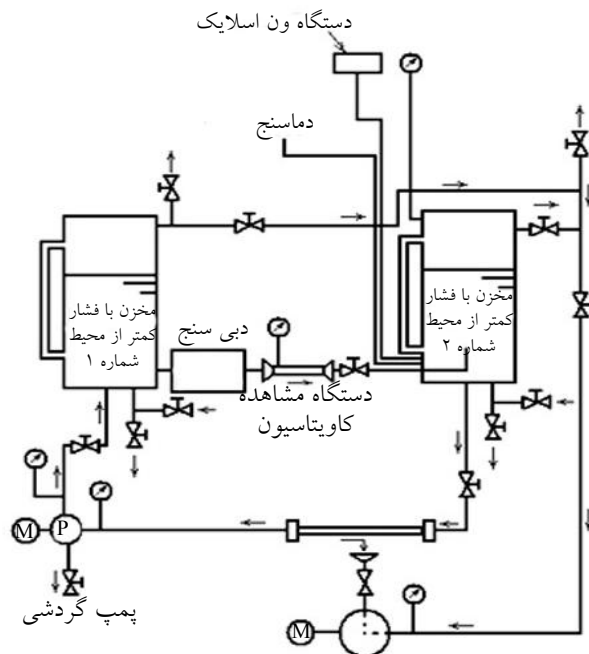
در نتیجه، کلیه عوامل بالا در طول آزمایش کنترل شد.

برای پیش بینی رفتار کاویتاسیون تئوری دقیقی وجود ندارد. در نتیجه اکثر تحقیقات انجام گرفته به صورت تجربی است. معمولاً برای بررسی سایش کاویتاسیون روش‌های متعددی استفاده می‌گردد که می‌توان از روش امواج اولتراسونیک برای نوسان‌سازی نام برد [۶] که استاندارد ASTM G32 (قطعه ساکن و در فاصله ۱ mm) برای آن تعریف شده است و این روش نیز توسط محققین مختلف مورد بازبینی قرار گرفته است [۷]. از روش‌های دیگر می‌توان از روش صفحه دوار و تونل بسته کاویتاسیون نام برد.

در این مطالعه اثر سایش کاویتاسیون بر روی مدل‌های چرخان در تونل بسته کاویتاسیون مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامتر کلیدی برای ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش و مبنای مقایسه معمولاً استفاده از عدد بی بعد کاویتاسیون

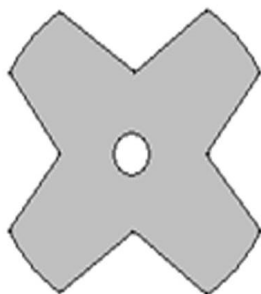
$$\sigma = \frac{P - P_{sat}}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (4)$$

است که به صورت زیر تعریف می‌شود: که در آن  $P$  فشار مطلق در بالادست مدل و  $P_{sat}$  فشار بخار



شکل ۲- نمودار جریان تونل بسته کاویتاسیون

انجام شد. برای محاسبه کاهش وزن نسبت به زمان از رابطه (۲) استفاده گردید و زمان قرارگیری قطعه در دستگاه بدون کاهش وزن  $T_0$  برای هر مدل به دقت محاسبه شد. برای محاسبه قطر متوسط نیز رابطه (۶) مورد استفاده قرار گرفت. برای توزین ابتدا قطعات کاملاً خشک (با آون یا به صورت طبیعی) و سپس سطوح آن با استون تمیز گردید. برای بررسی و مشاهده سایش کاویتاسیون و حفره‌های ناشی از آن، مدل‌ها اچ شد. بدین ترتیب که برای هر فلز ترکیب اسیدی متناسب با آن و زمان تماس مطابق با استاندارد، انتخاب و با آن مدل اچ گردید. سپس سطح قطعات و حفره‌های ناشی از کاویتاسیون با استفاده از میکروسکوپ نوری و نحوه خوردگی با میکروسکوپ الکترونی (SEM) مشاهده و مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳- شماتیک مدل

برای کالیبراسیون فشارسنج از دستگاه آزمایشی وزن مرده، کالیبره کردن دماسنج مقاومتی از اهم‌متر و کالیبراسیون ترازوی مورد استفاده از سیستم خود ترازو و وزنه‌های خارجی استفاده گردید. دقت ترازوی مورد استفاده یک ده هزارم گرم می‌باشد. سطح قطعات قبل از انجام آزمایش کاملاً پرداخت و پولیش گردید تا اثرات زبری در سایش کاویتاسیون کاهش یابد.

برای بررسی سایش کاویتاسیون نخست مدل‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات مطابق شکل ۳ ساخته شد و سپس هر مدل با شفت به یک موتور الکتریکی کوچک با قابلیت تغییر دور متصل گردید و جهت آب‌بندی قطعه از بلرینگ سری ۶۰ و کاسه نمد مناسب استفاده شد.

ابتدا مدل‌هایی از جنس چدن خاکستری، آلومینیم ۱۱۰۰، آلومینیم سخت ۶۰۶۱ و فولاد ضد زنگ کروم‌دار انتخاب گردید.

در ۸۰۰ rpm میزان سایش برای کل مدل‌ها با جنس‌های مختلف اندازه‌گیری شد و برای آلومینیم ۱۱۰۰ و چدن خاکستری نرخ کاهش وزن در ۳۰۰ rpm، ۶۰۰ rpm و ۱۰۰۰ rpm نیز مورد بررسی قرار گرفت و برای فولاد ضد زنگ کروم‌دار، آزمایش در ۱۲۰۰ rpm و ۱۸۰۰ rpm انجام گردید. آزمایش در شرایط عدد بی بعد کاویتاسیون یکسان، سرعت و درجه حرارت تقریباً ثابت

**نتایج**

آزمایش در عدد بی بعد کاویتاسیون  $\sigma = 1/2$  و در دمای تقریباً ثابت  $28^{\circ}C$  انجام شد.

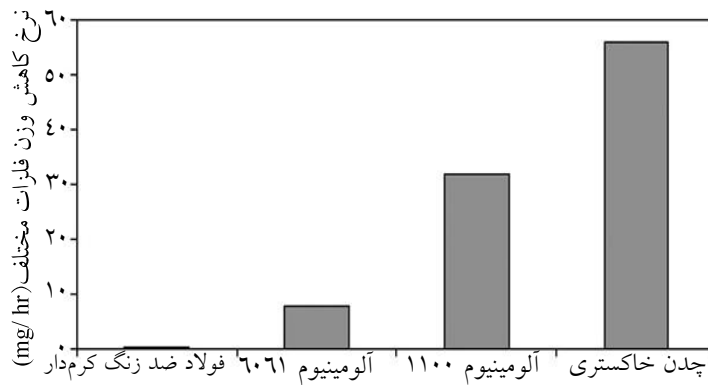
در شکل ۴ نرخ کاهش وزن (mg/hr) برای مدل‌هایی از فلزات چدن، آلومینیم نرم، آلومینیم سخت و فولاد ضد زنگ کروم دار با  $800\text{ rpm}$  نشان داده شده است.

در شکل ۵ نرخ کاهش وزن برای مدلی از جنس آلومینیم نرم با  $300\text{ rpm}$ ،  $600\text{ rpm}$  و  $800\text{ rpm}$

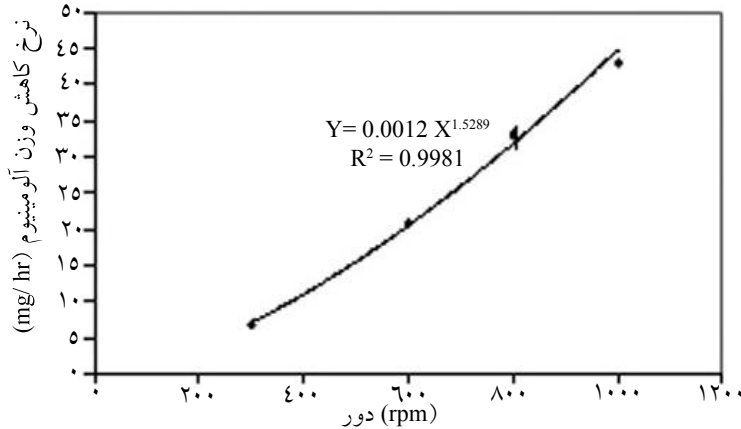
$1000$  نشان داده شده است.

در شکل ۶ نرخ کاهش وزن برای مدلی از جنس چدن خاکستری با  $300\text{ rpm}$ ،  $600\text{ rpm}$  و  $800\text{ rpm}$  نشان داده شده است.

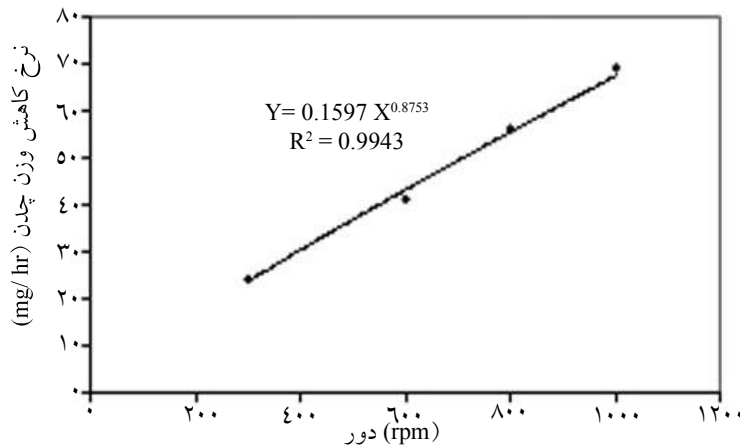
همچنین برای مدلی از جنس فولاد ضد زنگ کروم دار آزمایش در دوره‌های مختلف تکرار گردید و در شکل ۷ نتایج آورده شد و مشاهده شد که اثر سایش کاویتاسیون با تغییر دور حتی در دوره‌های بالا ( $1800\text{ rpm}$ ) قابل اغماض می‌باشد.



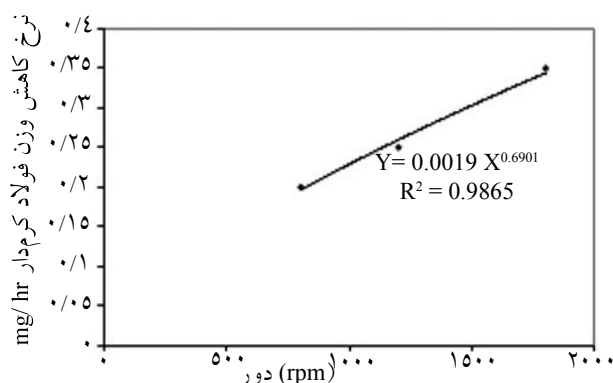
شکل ۴- مقایسه نرخ کاهش وزن در مدل‌هایی با فلزات مختلف در عدد بی بعد کاویتاسیون  $\sigma = 1/2$  و  $800\text{ rpm}$



شکل ۵- نرخ کاهش وزن برای مدلی از جنس آلومینیم ۱۱۰۰ در  $300\text{ rpm}$ ،  $600\text{ rpm}$ ،  $800\text{ rpm}$  و  $1000\text{ rpm}$

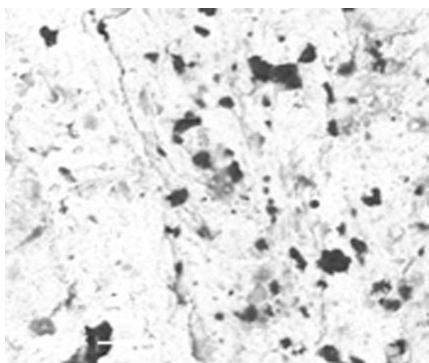


شکل ۶- نرخ کاهش وزن برای مدلی از جنس چدن خاکستری در  $300\text{ rpm}$ ،  $600\text{ rpm}$  و  $800\text{ rpm}$  و  $1000\text{ rpm}$

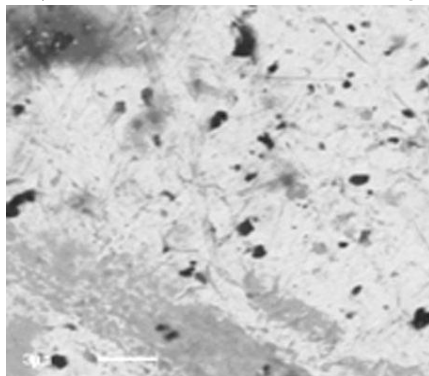


شکل ۷- نرخ کاهش وزن برای مدلی از جنس فولاد ضد زنگ کروم دار در ۸۰۰ rpm، ۱۲۰۰ rpm و ۱۸۰۰ rpm

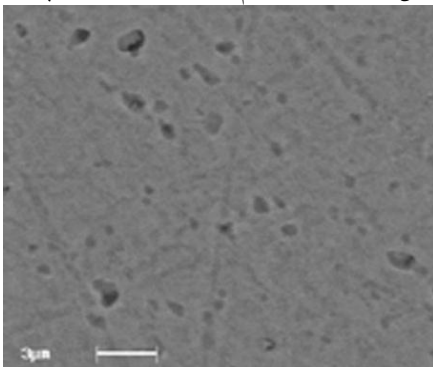
در شکل های ۱۰ تا ۱۳ نحوه خوردگی مدل ها با استفاده از میکروسکوپ SEM آورده شده است.



شکل ۱۰- مدل چدن خاکستری با میکروسکوپ SEM

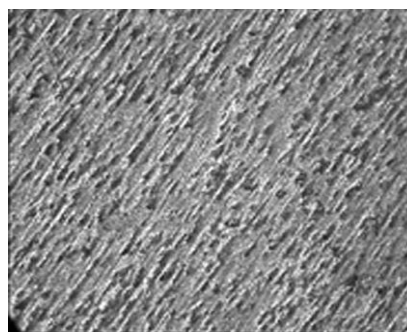


شکل ۱۱- مدل آلومینیم ۱۱۰۰ با میکروسکوپ SEM

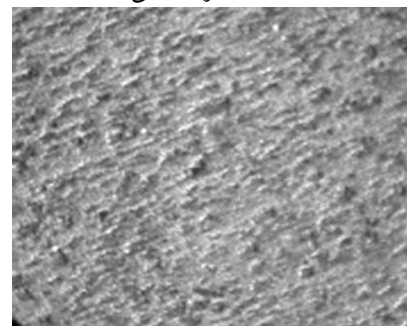


شکل ۱۲- مدل آلومینیم ۶۰۶۱ با میکروسکوپ SEM

با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰، حفره ها در سطحی معادل ۱ mm<sup>2</sup> در قسمت های مختلف پره شمارش گردید و دیده شد که تعداد حفره ها متناسب با میزان سایش کائیتاسیون است که برای چدن تعداد حفره ها از همه بیشتر و برای فولاد ضد زنگ کروم دار از همه کمتر می باشد. قطر حفره ها مستقل از جنس مدل بیشتر بین ۱۵ تا ۲۵۰ میکرون است و برای مدل های چدن و آلومینیم نرم مشاهده گردید که با تغییر دور قطر حفره ها تفاوت محسوسی نمی کند ولی تعداد حفره ها زیاد می شود. در شکل های ۸ و ۹ نمونه هایی از نحوه خوردگی مدل ها با استفاده از میکروسکوپ نوری آورده شده است.



شکل ۸- حفره های ناشی از کائیتاسیون برای مدل آلومینیم ۶۰۶۱ در ۱۰۰۰ rpm با بزرگنمایی ۲۰۰



شکل ۹- حفره های ناشی از کائیتاسیون برای مدل آلومینیم ۶۰۶۱ در ۶۰۰ rpm با بزرگنمایی ۲۰۰

SEM در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. از این آزمایش نتیجه می‌شود که فولاد ضد زنگ کروم‌دار در برابر سایش کاویتاسیون مقاوم‌تر بوده و می‌تواند انتخاب مناسبی برای پره پمپ باشد.

### علائم و نشانه‌ها

$MDP$ : قطر متوسط سایش کاویتاسیون، (mm)

$P$ : فشار مطلق در بالادست مدل، (Pa)

$P_{in}$ : فشار داخل حباب، (Pa)

$P_{out}$ : فشار خارج حباب، (Pa)

$P_{sat}$ : فشار بخار اشباع آب محیط، (Pa)

$P_c$ : فشار بحرانی برای شروع کاویتاسیون، (Pa)

$\Delta P$ : اختلاف فشارهای داخل و خارج، (Pa)

$R_0$ : شعاع هسته، (mm)

$\Delta W$ : کاهش وزن، (gr)

$\dot{W}$ : نرخ کاهش وزن، (gr/hr)

$T$ : زمان قرارگیری قطعه در دستگاه، (s)

$T_0$ : زمان قرارگیری قطعه بدون کاهش وزن، (s)

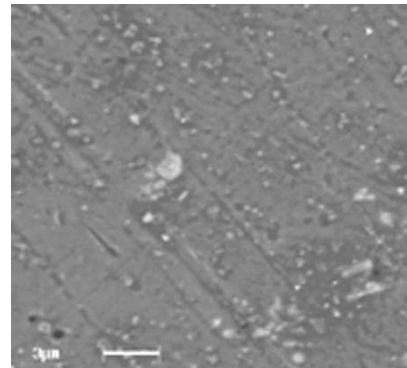
$U$ : سرعت جریان در سطح مقطع گلوبی، (m/s)

### علائم یونانی

$\rho$ : دانسیته مایع در دمای کاری، ( $\text{kg/m}^3$ )

$\sigma$ : عدد بی بعد کاویتاسیون

$\sigma_0$ : کشش سطحی، (N/m)



شکل ۱۳- مدل فولادی ضد زنگ کروم‌دار با میکروسکوپ SEM

### بحث و بررسی نتایج

با توجه به نتایج شکل ۴ دیده می‌شود که بیشترین نرخ کاهش وزن مربوط به چدن است.

از طرف دیگر با افزایش دور، نرخ کاهش وزن افزایش یافته است و روابطی برای نرخ کاهش وزن برای آلومینیم ۱۱۰۰ و چدن خاکستری در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، فولاد ضد زنگ کروم‌دار دارای کمترین نرخ کاهش وزن با تغییر دور است و کمترین حساسیت را به دور دارد. همچنین تعداد حفره‌های دیده شده توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۲۰۰، با کاهش وزن نسبت مستقیم دارد و مستقل از جنس مدل‌ها است. این حفره‌ها به صورت مدور بوده و بیشتر دارای قطری بین ۱۵ تا ۲۵۰ میکرون است و تعداد حفره‌ها با افزایش دور نسبت مستقیم دارد. نحوه خوردگی با استفاده از میکروسکوپ

### منابع

- [1] Brennen C.E., *Cavitation and Bubble dynamics*, Oxford uni., 1995.
- [2] LeCoffre Y., Maracoz, M.A., & Valibouse, B., *Cavitation erosion in fluid systems*, ASME, pp. 133-138, 1981.
- [3] Dominguez-Cortazar M.A., France, J.P. & Mishel, J., M., *The erosive axial collapse of cavitating vortex*, IM-echE, c453, pp. 43-48, 1992.
- [4] Franc J.P. & Michel J.M., *Fundamental of cavitation*, Kluwer Academic, 2004
- [5] Young F.R., *Cavitation*, McGraw- Hill, 1989
- [6] Hobbs J. M., Laird A. & Brunton W.C., *Laboratory evaluation of the vibratory cavitation erosion test*, N.E.L. rep. no. 271, National Engineering Laboratory, 1967.

- [7] Brunton W.C., Hobbs J.M. & Laird A., *Investigation of a cavitating film erosion test*, N.E.L. rep. no. 431, National Engineering Laboratory, 1967
- [8] Selim S. M.A., & Hutton S.P., *Hydrodynamic similitude for cavitation erosion*, Proc. I Mech E, Second Int. Symp. on cavitation, pp. 15-25, 1981.
- [9] Marques P.V. & Trevisan R.E., "An *sem-b* method for the evaluation of the cavitation behavior of materials", materials characterization, Vol. 41, No. 5, pp. 193-200, 1998.
- [10] Dular M., Bachert B., Stoffel B. & Širok B., "Relation between cavitation structures and cavitation damage", Wear, Vol. 257, No. 11, pp. 1176-1184, 2004.
- [11] Ahmed S.M., Hokkirigawa, K., Ito Y., Oba R. & Matsvdaira Y., "Scanning on the incubation period of vibratory cavitation erosion", Wear, Vol. 142, pp. 303 – 314, 1991.