



دفتر صحافی مبارک

تبریز: فلک دانشگاه، پاساژ نسیم، طبقه پائین، پلاک ۲۶

۰۹۱۴۱۱۵۰۰۴۹

مسعود زینی زاده

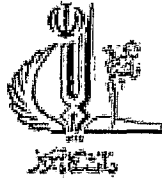
۰۹۱۴۳۱۰۰۰۴۸

دفتر: ۳۳۶ ۴۶۸۰

۰۹۱۴۳۱۳۰۰۴۹

کارگاه: ۶۵۸ ۷۷۷۸

۴۷۷۹۱



دانشکده فنی مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه دکترای در رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

عنوان

بررسی عددی دینامیک یک حباب بخار تولید شده در داخل آب و کنترل آن

استاد راهنما

دکتر محمد تقی شروانی تبار

استاد مشاور

دکتر محمد رضا حیرانی نوبری

پژوهشگر

کریم مقصودی مهربانی

مهر ۱۳۸۶

۴۷۶۹۷

گروه مهندسی مکانیک
دانشکده فنی مهندسی مکانیک
دانشگاه گیلان

۱۳۸۶ ۷۲۷ ۳۸۱

باسمه تعالی

ز لطف پرتویی دارم گدایی
کجا فکر و کجا گنجینه راز
مرا لطف تو می باید دگر هیچ

الهی ندارد راه فکرم روشنایی
اگر لطف تو نبود پرتو انداز
به راه این امید پیچ در پیچ

(وحشی با فقی)

تقدیم به :

- پیشگاه الهی که بدون عنایت و رحمت خاص او هرگز قادر به انجام تحصیل و تحقیق نبودم .
- محضر رسول اکرم (ص) و اهل بیت و امام عصر صاحب الزمان (عج) که خورشید و ستارگان آسمان هدایت و سعادت و ولی نعمت مایند .
- پدر و مادر عزیزم که دعاها و راز و نیازهایشان الهام بخش و راهگشای من و شمع وجودشان زینت بخش زندگیم بوده و هستند و همیشه با ایثار و فداکاری در تربیت و موفقیت فرزندانشان کوشا بوده و برای رشد و اعتلای فرزندانشان از هیچ کوششی فروگذاری نکرده اند .
- همسر مهربانم که با فداکاری و صبر تمام یار و یاور و حامی من بود و در پیشبرد این تحقیق با بزرگواری و تحمل مشکلات نقش بسزائی داشته است و موفقیت ام مرهون حمایت و تشویق های ایشان بوده است .
- ریحانه زندگیم ، مهدیه عزیز ، و ثمره دلم محمد ، که لبخند شیرین آنان آرزوی من و آرام بخش روح و جانم هستند . امید است عالمان صالح در سنگر علم و تقوی گردند .

تقدیر و تشکر

سپاس خداوندی که از همه مهربان تر و نزدیکتر به خلق و الطاف بیکرانیش را در هیچ حال و مکانی از بندگانش دریغ نمی کند .

سپاس به درگاه ایزد منان که توفیق تلاش در سنگر علم را عنایت کرد . حمد باد خداوندی را که توفیق کسب فیض از حضور استادان والا مرتبه را مرحمت فرمود .

اکنون که به یاری خداوند متعال (عز و جل) تدوین این پایان نامه به اتمام رسیده است به مصداق حدیث شریف (من لم یشکر المخلوق ، لم یشکر الخالق) بر خود واجب می دانم مراتب سپاس و قدردانی خود را از اساتید گرانقدر خود ابراز نمایم .

عالی ترین و صمیمانه ترین مراتب سپاس و قدردانی خود را به محضر استاد عالی قدر جناب آقای دکتر محمد تقی شروانی تبار که راهنمایی این پایان نامه را تقبل و مرا کمک و یاری نمود تقدیم نمایم و همچنین از آقای دکتر محمد رضا حیرانی نوبری که مشاوره اینجانب را بر عهده داشته تشکر نمایم .

از خداوند (عز و جل) برای تمامی اساتید و وزنه های علمی این مملکت علی الخصوص استادان گرانقدر خودم در دانشکده مکانیک آقای دکتر اسماعیل خوشروان و دکتر اسماعیل اسماعیل زاده و دکتر پرویز علوی تبریزی سلامتی ، شادکامی و سعادت دنیا و آخرت را مسألت می نمایم و یاد و خاطره آقای دکتر سرابچی را گرمی داشته و از خداوند علو^۱ درجات در سرای باقی برای ایشان آرزومندم .

| | | | |
|---|----------------|---------------------|-----------------|
| نام خانوادگی دانشجو : مقصودی مهربانی | | نام : کریم | |
| عنوان پایان نامه : مطالعه عددی دینامیک یک حباب بخار تولید شده در داخل آب و کنترل آن | | | |
| استاد راهنما : دکتر محمد تقی شروانی تبار | | | |
| استاد مشاور : دکتر محمد رضا حیرانی نوبری | | | |
| مقطع تحصیلی : دکتری | رشته : مکانیک | گرایش : تبدیل انرژی | دانشگاه : تبریز |
| دانشکده : فنی مهندسی | تاریخ : مهر ۸۶ | تعداد صفحه : ۱۶۱ | |
| کلید واژه : حباب کاویتاسیون ، روش المان مرزی ، دینامیک حباب ، میکروجت ، ارتعاش التراسونیک همراه EDM ، تقسیم شدن حباب بخار | | | |
| چکیده : | | | |
| <p>در این پایان نامه دینامیک یک حباب بعد از تقسیم شدن آن در موقعیت های مختلف مورد بررسی واقع می گیرد . تحقیقات نشان می دهند که با کنترل و مدیریت در این پایان نامه دینامیک یک حباب بعد از تقسیم شدن آن در موقعیت های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد . که با کنترل و مدیریت دینامیک حباب های کاویتاسیون و حباب های حاصل از اعمال شدید در زیر آب می توان به سرعت های فروپاشی بالا و در نتیجه به دماها و فشارهای بسیار بالا در داخل حباب دست یافت .</p> <p>سیال مورد مطالعه آب فرض می شود و لزجت صرف نظر گردیده و جریان تراکم ناپذیر و غیر چرخشی خواهد بود و در بعضی موارد اثرات کشش سطحی هم در نظر گرفته خواهد شد .</p> <p>مطالعه عددی رشد و فروپاشی حباب و بررسی رفتار آن بعد از تقسیم شدن حباب از اهداف این پایان نامه می باشد و شامل مراحل زیر می باشد :</p> <p>۱- آهنگ رشد و فروپاشی حباب ۲- فشار داخل حباب به هنگام رشد و فروپاشی ۳- فشار روی سطح و یا روی سطح مجاور حباب ۴- پروفیل های حباب به هنگام رشد و فروپاشی آن در زمان های مختلف</p> <p>تکنیک مورد استفاده روش المان های مرزی خواهد بود و حباب به صورت متقارن محوری منظور شده تابع گرین در میدان حول حباب حاکم خواهد بود و حل تابع گرین در موقعیت های زیرانجام خواهد شد:</p> <p>۱- حباب در بین دو سطح صلب موازی</p> <p>۲- حباب در بین دو سطح صلب موازی با حرکت ارتعاشی یکی از سطوح صلب</p> <p>۳- حباب در بین دو سطح صلب موازی با حرکت ارتعاشی هر دو سطح صلب</p> <p>۴- حباب در مجاورت یک سطح ارتجاعی</p> <p>نتایج عددی نشان می دهد که حباب بخار تولید شده در مرکز بین قطعه کار و ابزار ، به دو حباب مساوی تقسیم شده و در هر کدام یک میکروجت ایجاد شده و به سمت دیواره ضربه می زند . در</p> | | | |

صورتیکه حباب در مجاورت قطعه کار ایجاد شود ، بعد از پدیده گلویی شدن و تقسیم شدن به دو قسمت ، از نظر اندازه ، حباب نزدیک تر به قطعه کار بزرگتر بوده و فشار داخلی حباب کوچکتر بیشتر و آهنگ فروپاشی حباب کمتر می گردد.

هرچه فاصله قطعه کار با ابزار بیشتر شود میکروجت ایجاد شده به مقادیر سرعت بالاتری دست می یابد . نتایج نشان می دهد در شرایطی که در تقسیم شدن حباب پدیده گلویی رخ ندهد و حباب شکل زنگوله به خود بگیرد بیشترین مقادیر سرعت میکروجت در مراحل تشکیل و نفوذ به وجه مقابل حباب را شاهد خواهیم بود .

در تحقیق بعد ، در فرآیند EDM دینامیک حباب بخار همراه با ارتعاش ابزار مورد بررسی واقع گردید و با افزایش دادن دامنه ارتعاش ابزار آهنگ تغییرات حجم حباب بخار افزایش یافته و سرعت میکروجت ایجاد شده نیز زیادتر می گردد و زمان رشد حباب بخار نیز افزایش می یابد . در گام بعدی با افزایش دادن فرکانس ارتعاش ابزار نیز شاهد افزایش آهنگ تغییرات حجم حباب بخار و سرعت میکروجت و زمان رشد حباب بخار و کاهش زمان فروپاشی حباب خواهیم بود .

در تحقیق بعد ، در فرآیند EDM رفتار حباب بخار همراه با ارتعاش ابزار و قطعه کار به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفت و در دو مرحله ، ۱- افزایش دامنه ارتعاش و ۲- افزایش فرکانس ارتعاش نتایج زیر حاصل گردید . نتایج نشان می دهد که با افزایش دو مورد فوق نرخ تغییرات حجم حباب بیشتر شده و زمان رشد حباب بخار بیشتر و زمان فروپاشی حباب کمتر می گردد و سرعت میکروجت فوق العاده افزایش می یابد و این امر باعث افت فشار در داخل حباب بخار و روی سطح قطعه کار و سبب تسهیل در خروج مواد مذاب از چاله جوش می شود .

فهرست مطالب

| صفحه | عنوان |
|------|---|
| | فصل اول : کلیات |
| ۲ | مقدمه |
| | فصل دوم : پیشینه پژوهش |
| ۶ | ۱-۲- پدیده کایتاسیون |
| ۶ | ۲-۲- تاریخچه |
| ۷ | ۳-۲- دسته بندی کایتاسیون |
| ۸ | ۴-۲- کایتاسیون هیدرودینامیکی |
| ۸ | ۵-۲- کایتاسیون صوتی |
| ۹ | ۶-۲- کایتاسیون ذره ای و نوری |
| ۹ | ۷-۲- حباب single bubble |
| ۹ | ۱-۷-۲- آنالیز رایلی Rayleigh Analysis |
| ۱۰ | ۲-۷-۲- راه حل رایلی Rayleigh's solution |
| ۱۱ | ۸-۲- حباب از نظر نوع سیال داخلی |
| ۱۲ | ۹-۲- اثر تراکم پذیری سیال |
| ۱۲ | ۱۰-۲- اثر ویسکوزیته سیال و کشش سطحی |
| ۱۲ | ۱۱-۲- اثر دمای سیال |
| ۱۲ | ۱۲-۲- تبخیر و تقطیر گاز داخل حباب و گازهای غیر قابل تقطیر |

| | | |
|---------------------------------|-------|--|
| ۱۳ | ..... | ۱۳-۲- میکرووجت |
| ۱۳ | ..... | ۱۴-۲- نیروی شناوری و نیروی جاذبه سطح صلب |
| ۱۴ | ..... | ۱۵-۲- پدیده splitting, necking |
| ۱۴ | ..... | ۱۶-۲- پدیده Rebound |
| ۱۴ | ..... | ۱۷-۲- فشار و دمای فروپاشی حباب Collapse |
| ۱۵ | ..... | ۱۸-۲- حباب در مجاورت یک سطح صلب |
| ۱۵ | ..... | ۱-۱۸-۲- تحقیقات تجربی |
| ۱۵ | ..... | ۲-۱۸-۲- تحقیقات عددی |
| ۱۷ | ..... | ۱۹-۲- حباب در بین دو سطح صلب |
| ۱۹ | ..... | ۲۰-۲- دینامیک حباب بین دو سطح صلب |
| ۲۵ | ..... | ۲۱-۲- ارتعاش التراسونیک در EDM |
| ۲۷ | ..... | ۲۲-۲- سطوح ارتجاعی Compliant boundary |
| ۲۹ | ..... | ۲۳-۲- کاربردهای پزشکی |
| فصل سوم : مبانی و روش ها | | |
| ۳۳ | ..... | ۱-۳- بیان مسأله |
| ۳۳ | ..... | ۲-۳- نوآوری مسأله |
| ۳۴ | ..... | ۳-۳- تکنیک عددی مورد استفاده |
| ۳۵ | ..... | ۴-۳- مقایسه ای بین روش های BE, FE |
| ۳۷ | ..... | ۵-۳- فرضیات مسأله |
| ۳۸ | ..... | ۶-۳- معادلات حاکم بر حرکت حباب |
| ۴۰ | ..... | ۷-۳- روش انتگرال مرزی |

- ۴۰ (Approximation Method) روش حل تقریبی لاپلاس ۱-۷-۳
- ۴۲ تابع دلتای دیراک ۲-۷-۳
- ۴۳ (Green's Second Identity) اتحاد دوم گرین ۳-۷-۳
- ۴۵ حل اساسی معادله لاپلاس ۴-۷-۳
- ۴۸ (Boundary Integral Equation) معادله انتگرالی مرزی ۸-۳
- ۴۹ انتگرال مرزی برای مسأله پتانسیل متقارن محوری ۹-۳
- ۵۰ شرایط اولیه ۱۰-۳
- ۵۱ دینامیک حباب ۱۱-۳
- ۵۵ پارامترهای بی بعد ۱۲-۳
- ۵۶ فرم متقارن انتگرال گرین ۱۳-۳
- ۶۲ تقریب شکل سطح ، پتانسیل و مشتق عمودی آن ۱۴-۳
- ۶۲ تابع ثابت ۱-۱۴-۳
- ۶۳ تابع خطی ۲-۱۴-۳
- ۶۵ تابع درجه دو ۳-۱۴-۳
- ۶۶ تابع ثابت ۴-۱۴-۳
- ۷۰ انتگرال گیری عددی ۱۵-۳
- ۷۱ تکنیکی در نقطه $\xi = 1/2$ ۱-۱۵-۳
- ۷۴ عضوهای قطری ماتریس H ۱۶-۳
- ۷۵ انتخاب تعداد المان های مرزی در روی مرز حباب ۱۷-۳

فصل چهارم : مطالعه عددی روی تقسیم یک حباب

| | |
|-----|--|
| ۷۷ | ۱-۴- مقدمه |
| ۷۹ | ۲-۴- قسمت اول - تقسیم شدن حباب در بین قطعه کار و ابزار |
| ۸۰ | ۳-۴- مدل ریاضی مسأله |
| ۸۱ | ۴-۴- گسسته سازی |
| ۸۲ | ۵-۴- المان اسپیلاین مکعبی - تابع فیزیکی ثابت |
| ۸۴ | ۶-۴- سرعت مماس بر مرز حباب |
| ۸۵ | ۷-۴- اجرای برنامه کامپیوتری |
| ۸۷ | ۸-۴- نتایج عددی و بحث |
| ۹۵ | ۹-۴- قسمت دوم - تقسیم حباب در مجاورت قطعه کار |
| ۹۵ | ۱۰-۴- نتایج عددی و بحث |
| ۱۱۱ | ۱۱-۴- نتیجه گیری |

فصل پنجم : مطالعه عددی روی رفتار دینامیکی حباب بخار بعد از تقسیم شدن در فرآیند

EDM همراه با ارتعاش التراسونیک

| | |
|-----|--|
| ۱۱۵ | ۱-۵- مقدمه |
| ۱۱۶ | ۲-۵- تعریف هندسی مساله |
| ۱۱۸ | ۳-۵- ارتعاش التراسونیک ابزار و قطعه کار |
| ۱۱۹ | ۴-۵- نتایج عددی و بحث |
| ۱۲۰ | ۱-۴-۵- ارتعاش التراسونیک ابزار با تغییرات دامنه نوسان |
| ۱۲۴ | ۲-۴-۵- ارتعاش التراسونیک ابزار با تغییرات فرکانس نوسان |
| ۱۲۸ | ۳-۴-۵- ارتعاش التراسونیک ابزار و قطعه کار |

| | |
|---|--|
| ۱۳۱ | ۴-۴-۵ ارتعاش التراسونیک ابزار و قطعه کار با تغییرات دامنه نوسان |
| ۱۳۳ | ۵-۴-۵ ارتعاش التراسونیک ابزار و قطعه کار با تغییرات فرکانس نوسان |
| ۱۳۵ | ۵-۵ نتیجه گیری |
| فصل ششم: ایجاد پدیده necking در رفتار حباب در کنار یک سطح ارتجاعی در غیاب نیروی شناوری | |
| ۱۳۹ | ۱-۶ مقدمه |
| ۱۴۰ | ۲-۶ روش حل عددی |
| ۱۴۴ | ۳-۶ نتایج و بحث |
| ۱۴۶ | ۴-۶ تأثیر کشش سطحی در رفتار حباب با تقارن محوری |
| ۱۴۸ | ۵-۶ نتیجه گیری |
| ۱۵۲ | نتیجه گیری نهایی |
| ۱۵۵ | پیشنهادات |
| ۱۵۶ | فهرست منابع |

فهرست جداول

مقادیر پارامتر قدرت و شعاع اولیه حباب (۱-۳) جدول

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) یک حباب کروی
- شکل (۲-۲) رشد و فروپاشی یک حباب کاویتاسیون در مجاورت سطح صلب و آزاد
- شکل (۳-۲) موقعیت حباب در بین دو سطح صلب
- شکل (۴-۲) رفتار حباب بین دو سطح صلب
- شکل (۵-۲) پروفیل حباب بخار در EDM $\gamma_T = 1.25$, $GAP = 2.25$
- شکل (۶-۲) پروفیل حباب بخار در EDM $\gamma_T = 1.25$ $\gamma_w = 0.75$ $GAP = 2$
- شکل (۷-۲) پروفیل حباب بخار در EDM $\gamma_T = 1.375$ $\gamma_w = 0.875$ $GAP = 2.25$
- شکل (۸-۲) تغییرات حجم حباب نسبت طول عمر حباب تحت فشارهای متفاوت محیط
- شکل (۹-۲) تغییرات فشار داخل حباب نسبت به زمان در فشارهای متفاوت محیط
- شکل (۱۰-۲) تغییرات فشار روی سطح قطعه کار و ابزار دقیقاً زیر مرکز حباب در فشارهای متفاوت محیط
- شکل (۱۱-۲) اثر ارتعاش التراسونیک روی خروج مواد مذاب
- شکل (۱۲-۲) اثر ارتعاش التراسونیک روی خروج مواد مذاب
- شکل (۱-۳) مختصات q, p در دستگاه مختصات استوانه ای
- شکل (۲-۳) روش اسپلین مکعبی برای مرز یک حباب با نقاط مرتب شده در وسط هر المان
- شکل (۳-۳) تغییرات نسبت حجم حباب به حجم اولیه در مقابل زمان بی بعد در دو حالت

محیط سیال و مرزهای آن (شکل ۱-۴)

طرحواره مرزهای گسسته شده محیط سیال (شکل ۲-۴)

پروفیل های وابسته به زمان حباب بخار تولید شده در اثر تخلیه الکتریکی بین قطعه کار (شکل ۳-۴)

$$\text{و ابزار با مقادیر } \gamma_W = 1.0 \text{ و } GAP = 2.0$$

پروفیل های وابسته به زمان حباب تولید شده در اثر تخلیه الکتریکی بین قطعه کار و ابزار با (شکل ۴-۴)

$$GAP = 2.25 \text{ و } \gamma_W = 1.125$$

پروفیل های وابسته به زمان حباب تولید شده در اثر تخلیه الکتریکی بین قطعه کار و ابزار (شکل ۵-۴)

$$\text{با } \gamma_W = 1.25 \text{ و } GAP = 2.5$$

رابطه بین تغییرات حجم حباب با زمان بدون بعد (شکل ۶-۴)

افت فشار روی مقطع محور عمودی سطح قطعه کار (شکل ۷-۴)

تغییرات نسبت حجم حباب بعد از جدایش به می نیمم حجم اولیه در برابر زمان بدون بعد (شکل ۸-۴a)

تغییرات نسبت حجم حباب بعد از تقسیم شدن به حجم اولیه حباب بعد از تقسیم در (شکل ۸-۴b)

برابر زمان بدون بعد

تغییرات سرعت بدون بعد میکروجت سیال بعد از تقسیم حباب نسبت به (شکل ۹-۴)

زمان بدون بعد

پروفیل های حباب وابسته به زمان بین قطعه کار و ابزار با $GAP = 2.0$ (شکل ۱۰-۴)

$$\text{و } \gamma_W = 0.875 \text{ و } \gamma_T = 1.125$$

نرخ فروپاشی حباب بالایی و حباب پایینی را بعد از تقسیم شدن حباب اولیه با (شکل ۱۱-۴)

$$GAP = 2.0 \text{ و } \gamma_W = 0.875 \text{ ، } \gamma_T = 1.125$$

تغییرات فشارد اخلی حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه (شکل ۱۲-۴)

$$\text{با } \gamma_T = 1.125 \text{ و } \gamma_W = 0.875 \text{ و } GAP = 2.0$$

حرکت مرکز حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن با شرایط: (شکل ۱۳-۴)

$$GAP = 2.0 \text{ و } \gamma_W = 0.875 \text{ و } \gamma_T = 1.125$$

پروفیل های حباب وابسته به زمان بین قطعه کار و ابزار با $GAP = 2.0$ ، $\gamma_W = 0.75$ (شکل ۱۴-۴)

$$\gamma_T = 1.25$$

- شکل (۱۵-۴) نرخ فروپاشی حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه با:
 $GAP = 2.0$ و $\gamma_W = 0.75$ و $\gamma_T = 1.25$
- شکل (۱۶-۴) تغییرات فشار داخلی حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه با
 $GAP = 2.0$ و $\gamma_W = 0.75$ و $\gamma_T = 1.25$
- شکل (۱۷-۴) حرکت مراکز حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه با
 $GAP = 2.0$ و $\gamma_W = 0.75$ و $\gamma_T = 1.25$
- شکل (۱۸-۴) پروفیل های حباب وابسته به زمان بین قطعه کار و ابزار با
 $GAP = 2.5$, $\gamma_W = 1.125$ و $\gamma_T = 1.375$.
- شکل (۱۹-۴) نرخ فروپاشی حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه با
 $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 1.125$ و $\gamma_T = 1.375$
- شکل (۲۰-۴) تغییرات فشار داخلی حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه
 با: $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 1.125$ و $\gamma_T = 1.375$
- شکل (۲۱-۴) حرکت مراکز حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه
 $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 1.125$ و $\gamma_T = 1.375$
- شکل (۲۲-۴) پروفیل های حباب وابسته به زمان بین قطعه کار و ابزار با
 $GAP = 2.5$, $\gamma_W = 1.0$ و $\gamma_T = 1.5$
- شکل (۲۳-۴) نرخ فروپاشی حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه با
 $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 1.0$ و $\gamma_T = 1.5$
- شکل (۲۴-۴) تغییرات فشار داخلی حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه
 با: $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 1.0$ و $\gamma_T = 1.5$
- شکل (۲۵-۴) حرکت مراکز حباب بالایی و حباب پایینی بعد از تقسیم شدن حباب اولیه
 $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 1.0$ و $\gamma_T = 1.5$
- شکل (۲۶-۴) پروفیل های حباب وابسته به زمان بین قطعه کار و ابزار با شرایط:
 $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 0.875$ و $\gamma_T = 1.625$
- شکل (۲۷-۴) پروفیل های حباب بخار وابسته به زمان بین قطعه کار و ابزار با شرایط:
 $GAP = 2.5$ و $\gamma_W = 0.45$ و $\gamma_T = 2.05$

شکل (۴-۲۸) حرکت مرکز حباب با شرایط $GAP = 2.5$ و $\gamma_w = 0.875$ (منحنی ۱) و

و $0.5, 0.55, 0.6, 0.6875, 0.75$ (منحنی ۷) 0.45

شکل (۴-۲۹) نرخ رشد و فروپاشی حباب در شرایط شکل ۴-۲۶ (منحنی ۱) و شکل ۴-۲۷ (منحنی ۷)

شکل (۴-۳۰) تغییرات سرعت بدون بعد میکروجت برای حباب بین قطعه کار و ابزار با شرایط:

$GAP = 2.5$ و $\gamma_w = 0.875$ (منحنی ۱) $0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.6875, 0.75$ (منحنی ۷)

شکل (۵-۱-۲) حباب بخار حاصل از تخلیه الکتریکی بین قطعه کار و ابزار

شکل (۵-۱-۳) موقعیت ابزار در لحظه تخلیه الکتریکی در فرآیند EDM همراه با ارتعاش

شکل (۵-۱-۳) حباب بخار در فرآیند EDM با ارتعاش التراسونیک همزمان قطعه کار و ابزار

شکل (۵-۲) پروفیل های حباب بخار وابسته به زمان که بین قطعه کار و ابزار ثابت و بدون ارتعاش ایجاد

شده است با: $R_m = 30\mu m$ و $gap = 80\mu m$

شکل (۵-۳) پروفیل های وابسته به زمان حباب بخار با ارتعاش التراسونیک ابزار با

مقادیر: $A = 4\mu m$ and $f = 20KHz$ $R_m = 30\mu m$, $gap = 80\mu m$

شکل (۵-۴) پروفیل های وابسته به زمان حباب بخار با ارتعاش التراسونیک ابزار با مقادیر

$A = 6\mu m$, $f = 20KHz$ and $R_m = 30\mu m$, $gap = 80\mu m$

شکل (۵-۵) تغییرات حجم حباب نسبت به زمان بدون بعد در شرایط زیر:

(1) $gap = 80\mu m$, $R_m = 30\mu m$, $f = 20KHz$ and $A = 4\mu m$, (2) $gap = 80\mu m$,
 $R_m = 30\mu m$, $f = 20KHz$ and $A = 6\mu m$

شکل (۵-۶) تغییرات سرعت میکروجت ایجاد شده در حباب پایینی که به سمت

قطعه کار حرکت می کند نسبت به زمان بدون بعد در حالت های زیر:

(1) $gap = 80\mu m$, $R_m = 30\mu m$, $f = 20KHz$ and $A = 4\mu m$,

(2) $gap = 80\mu m$, $R_m = 30\mu m$, $f = 20KHz$ and $A = 6\mu m$.

شکل (۵-۷) پروفیل های وابسته به زمان حباب بخار تولید شده در بین قطعه کار و ابزار با

ارتعاش التراسونیک ابزار با شرایط:

$gap = 80\mu m$ $R_m = 30\mu m$, $f = 25KHz$ and $A = 6\mu m$

شکل (۸-۵) پروفیل های وابسته به زمان حباب بخار تولید شده در بین قطعه کار و ابزار

با ارتعاش التراسونیک ابزار با شرایط :

$$A = 6\mu m, \text{ and } f = 30KHz, R_m = 30\mu m \text{ gap} = 80\mu m$$

شکل (۹-۵) تغییرات حجم حباب نسبت به زمان بدون بعد در حالات زیر :

$$gap = 80\mu m \text{ and } R_m = 30\mu m$$

شکل (۱۰-۵) تغییرات سرعت میکروجت ایجاد شده در مرز حباب پایینی که به سمت قطعه کار

حرکت می کند نسبت به زمان بدون بعد در شرایط ذیل :

$$R_m = 30\mu m \text{ and } gap = 80\mu m$$

شکل (۱۱-۵) پروفیل های وابسته به زمان حباب بخار تولید شده در بین قطعه کار و ابزار با ارتعاش

همزمان قطعه کار و ابزار با شرایط ذیل :

$$A = 6\mu m \text{ and } f = 20KHz, R_m = 30\mu m, \text{ gap} = 80\mu m$$

شکل (۱۲-۵) تغییرات حجم حباب بخار نسبت به زمان بدون بعد در شرایط ذیل :

$$R_m = 30\mu m \text{ and } gap = 80\mu m$$

شکل (۱۳-۵) تغییرات سرعت میکروجت ایجاد شده در حباب پایینی به سمت قطعه کار در شرایط

$$R_m = 30\mu m \text{ and } gap = 80\mu m$$

شکل (۱۴-۵) تغییرات حجم حباب نسبت به زمان بدون بعد در حالات :

ارتعاش همزمان ابزار و قطعه کار : $gap = 80\mu m, R_m = 30\mu m, f = 20KHz \text{ and } A = 4\mu m$

ارتعاش همزمان ابزار و قطعه کار : $A = 6\mu m \text{ and } f = 20KHz, R_m = 30\mu m, \text{ gap} = 80\mu m$

شکل (۱۵-۵) تغییرات سرعت میکروجت ایجاد شده روی هر دو حباب بالایی و پایینی

که به سمت دیواره ها حرکت می کند نسبت به زمان بدون بعد در شرایط :

ارتعاش همزمان قطعه کار و ابزار با شرایط : $gap = 80\mu m, R_m = 30\mu m, f = 20KHz \text{ and } A = 4\mu m$

ارتعاش همزمان قطعه کار و ابزار با شرایط : $A = 6\mu m \text{ and } f = 20KHz, R_m = 30\mu m, \text{ gap} = 80\mu m$

شکل (۱۶-۵) تغییرات حجم حباب نسبت به زمان بدون بعد در شرایط :

ارتعاش همزمان قطعه کار و ابزار با شرایط : $gap = 80\mu m, R_m = 30\mu m, f = 20KHz \text{ and } A = 6\mu m$

ارتعاش همزمان قطعه کار و ابزار با شرایط : $gap = 80\mu m, R_m = 30\mu m, f = 25KHz \text{ and } A = 6\mu m$

شکل (۵-۱۷)

تغییرات سرعت میکروجت روی حباب بالایی و پایینی

نسبت به زمان بدون بعد در شرایط ذیل :

ارتعاش همزمان قطعه کار و ابزار در شرایط : $gap = 80\mu m$, $R_m = 30\mu m$, $f = 20KHz$ and $A = 6\mu m$

ارتعاش همزمان قطعه کار و ابزار در شرایط : $gap = 80\mu m$, $R_m = 30\mu m$, $f = 25KHz$ and $A = 6\mu m$

شکل حباب در شروع رشد حباب و در انتهای فاز فروپاشی در بالای یک سطح صلب بدون شکل (۶-۱)

$\gamma = 1$ نیروی شناوری با

شکل حباب در شروع رشد حباب و در انتهای فاز فروپاشی پس از چندین نوسان در بالای یک شکل (۶-۲)

سطح ارتجاعی بدون نیروی شناوری با $\gamma = 1$, $K=3$, $M=2$

شکل حباب در شروع رشد حباب و در انتهای فاز فروپاشی در بالای یک سطح ارتجاعی شکل (۶-۳) بدون نیروی

شناوری با $\gamma = 1$, $K=3$, $M=1$

طرحواره سطح دورانی با تقارن محوری و دو انحنای آن شکل (۶-۴)

المان روی سطح شکل (۶-۵)

شکل حباب در شروع رشد حباب و در انتهای فاز فروپاشی در بالای یک سطح شکل (۶-۶)

و بدون در نظر گرفتن کشش سطحی $\gamma = 1$ صلب بدون نیروی شناوری با

شکل حباب در شروع رشد حباب و در انتهای فاز فروپاشی در بالای یک سطح شکل (۶-۷)

و با در نظر گرفتن کشش سطحی $\gamma = 1$ صلب بدون نیروی شناوری با

منحنی تغییرات حجم حباب به حجم اولیه نسبت به زمان بی بعد در حالت‌های (۱) شکل (۶-۸)

بدون در نظر گرفتن کشش سطحی (۲) با در نظر گرفتن کشش سطحی

منحنی تغییرات سرعت بی بعد جت مایع نسبت به زمان بی بعد در حالت‌های (۱) شکل (۶-۹)

بدون در نظر گرفتن کشش سطحی (۲) با در نظر گرفتن کشش سطحی

نمادها

نمادهای انگلیسی

| | |
|-----------------|--|
| D | قطر جت مایع |
| $DLAM$ | قطر استوانه |
| F_r | عدد فرود |
| G | تایع گرین |
| g | شتاب ثقل |
| h | ارتفاع حباب |
| k | اندیس پلی تروپیکی |
| n | بردار عمود بر سطح حباب |
| P | فشار هر نقطه داخل سیال و نقطه دلخواهی از میدان |
| P_a | فشار اتمسفریک |
| P_{bub} | فشار داخل حباب |
| P_c | فشار بخار اشباع |
| P_g | فشار جزء گاز ایده آل در داخل حباب |
| p_i | فشار اولیه حباب |
| p_{ig} | فشار اولیه گاز در حباب |
| P_l | فشار سیال ، فشار مایع روی سطح حباب |
| P_v | فشار بخار اشباع سیال خالص ، فشار جزء بخار |
| P_∞ | فشار در محیط بیکرانه سیال |
| P_o | فشار خارج حباب |
| q | هر نقطه روی سطح حباب |
| R | شعاع حباب |
| R_m | شعاع بیشینه حباب |
| R_e | عدد رینولدز |
| \mathcal{R}_o | شعاع اولیه حباب |
| r | محور شعاعی در مختصات قطبی استوانه ای |
| S | سطح حباب ، ارتفاع حباب |
| T | زمان بی بعد |
| T | زمان |
| u | مؤلفه شعاعی سرعت |
| V | حجم حباب ، سرعت جت |
| V_c | سرعت در مختصات استوانه ای |
| V_i | حجم اولیه حباب |
| W_e | عدد وبر |

| | |
|------------|--------------------------|
| K | ضریب بی بعد فنریت |
| M | جرم بی بعد واحد سطح غشاء |
| K_r, K_z | شعاع های انحنای حباب |
| α | پارامتر قدرت |

نمادهای یونانی

| | |
|---------------|--|
| γ | توان پلی تروپیک گاز ، ارتفاع بی بعد حباب |
| δ | پارامتر نسبت شناوری به فشار |
| δ_{ij} | دلتای کرونیکر |
| ε | پارامتر قدرت حباب |
| η | مؤلفه مماسی سرعت بر سطح حباب |
| θ | زاویه دوران |
| κ | توان پلی تروپیک گاز |
| V | سرعت جت ، حجم حباب ، ویسکوزیته سینماتیکی |
| ξ | تبدیل بی بعد |
| π | عدد کاویتاسیون |
| ρ | چگالی سیال |
| ϕ | پتانسیل سرعت |
| ϕ_0 | پتانسیل اولیه سرعت |
| ψ | مؤلفه عمودی سرعت بر سطح حباب |
| Ω | میدان |

زیرنویس‌ها

| | |
|-----------------|--------------------|
| C | اشباع |
| <i>collapse</i> | فروپاشی |
| g | گاز |
| <i>growth</i> | رشد |
| o, i | حالت اولیه |
| <i>max, m</i> | بیشینه |
| <i>min</i> | کمینه |
| <i>tot</i> | کل |
| ∞ | بینهایت دور فیزیکی |

فصل اول

کلیات