وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

پکش سیم درون محفظه‌ی کروی و دینامیک رشته‌ی افتان بر روی سطح متحرک

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

جواد نجفی

استاد راهنما: **دکتر مهدی حبیبی**

شهریور ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

پدر و مادرم

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می دانم که از حمایت‌های بی‌دریغ خانواده‌ام، به خصوص پدر و مادرم تشکر نمایم. همه‌ی موفقیت‌های خود را مدیون زحمات ایشان می‌باشم.

از پروفسور ثبوتی و تمام کسانی که در بنیانگزاری و شکوفا سازی مرکز تحصیلات تکمیلی به هر نحوی سهیم بوده‌اند، به خاطر ایجاد چنین محیط مناسبی برای تحقیق و مطالعه سپاسگزارم. از استاد راهنمای عزیزم، دکتر مهدی حبیبی کمال تشکر را دارم. بی شک بدون مشورت‌ها و کمک‌های ارزنده‌ی ایشان این پایان نامه به انجام نمی‌رسید.

از تمامی دوستان و همکلاسی‌های گرامی‌ام به ویژه در آزمایشگاه سیالات پیچیده به خاطر ایجاد فضای دوستانه در طول مدت تحصیل خود صمیمانه متشکرم و برای همه‌ی ایشان آرزوی موفقیت و سربلندی دارم.

چکیده

ما در بخش اول این پایان نامه به مطالعه‌ی پکش سیم‌های کشسان و پلاستیک درون محفظه‌های کروی خواهیم پرداخت. پکش سیم‌های کشسان را بر اساس میزان انباشتگی پیچش داخلی و هم چنین وجود یا عدم وجود انحنای ذاتی به دو رژیم منظم و نامنظم تقسیم می‌کنیم. سپس در هر رژیم تغییرات کسر پکش را با اندازه‌ی نسبی سیستم (نسبت شعاع سیم به شعاع کره) بررسی می‌کنیم. در نهایت نیز با کمینه کردن انرژی خمشی کشسانی، یک مدل ساده‌ی هندسی برای حالت منظم ارائه کرده و کمیت‌هایی چون کسر پکش، بعد جرم-اندازه، تعداد حلقه‌های تشکیل شده و انرژی خمشی را به دست می‌آوریم و با نتایج تجربی و شبیه‌سازی مقایسه می‌نماییم. هم چنین به طور مختصر اثر اندازه‌ی نسبی سیستم و اصطکاک را در کسر پکش سیم‌های پلاستیک بررسی کرده و نتایج آن را با پکش سیم‌های کشسان مقایسه می‌کنیم.

در بخش دوم به مطالعه‌ی دینامیک رشته‌ی افتان کشسان بر روی یک سطح متحرک می‌پردازیم. وقتی سرعت سقوط رشته و ارتفاع ثابت است، با کاهش سرعت صفحه‌ی متحرک، سه رژیم مختلف قابل تشخیص است. در رژیم اول رشته به صورت یک "منحنی" روی سطح کشیده شده و به طور متناوب می‌لغزد. فاصله‌ی کشیدگی رشته از محل سقوط به صورت تابعی از سرعت صفحه به دست آمده است. هم چنین شکل منحنی رشته توسط محاسبات عددی پیش بینی شده است. در رژیم دوم رشته در محل تماس خود با صفحه شکل "پاشنه‌ای" دارد. در رژیم سوم نیز رشته بر روی صفحه طرح‌های "کوک زنی" جالبی بر جا می‌گذارد. ما فضای فاز این طرح‌ها را تعیین و با نمونه‌ی متناظر سیال مقایسه می‌کنیم. ما طول موج، بسامد و دامنه طرح‌های سینوسی را هم بر حسب سرعت صفحه‌ی متحرک به دست آوردیم.

واژه‌های کلیدی: *رشته‌های کشسان*، پکیدگی، *ریخت شناسی*

فهرست

چکیده . . . . . پنج

پیش‌گفتار ۱

۱ مروری بر مفاهیم **۳**

۱.۱ نظریه‌ی کشسانی ۳

۱.۱.۱ مقدمه ۳

۲.۱.۱ تانسور کرنش ۵

۳.۱.۱ تانسور تنش ۷

۴.۱.۱ ثابت‌های کشسانی ۸

۵.۱.۱ خمش کوچک رشته‌ی کشسان ۱۱

۲.۱ فرکتال ۱۳

۱.۲.۱ مقدمه ۱۳

۲.۲.۱ بعد اقلیدسی و توپولوژیکی ۱۴

۳.۲.۱ بعد همانندی ۱۶

۴.۲.۱ بعد شمارش در جعبه ۱۸

۵.۲.۱ بعد هاسدرف ۱۹

۶.۲.۱ بعد جرم-اندازه ۲۱

۲ سیستم‌های به هم پکیده ۲۲

۱.۲ پکش در زندگی روزانه و طبیعت ۲۲

۲.۲ مچاله شدن و پکش اجسام یک بعدی ۲۶

۱.۲.۲ سیم مچاله شده در دو بعد ۲۷

۲.۲.۲ پکش سه بعدی سیم و پکش DNA درون کپسید ۳۵

۳ پکش سیم درون کره ۴۴

۱.۳ رویه‌ی آزمایشی ۴۴

۲.۳ پکش سیم‌های کشسان درون کره ۴۹

۱.۲.۳ پکش سیم‌های کشسان با انحنای ذاتی (پکش نامنظم) ۴۹

۲.۲.۳ پکش سیم‌های کشسان صاف (پکش منظم) ۵۳

۳.۲.۳ مدل تحلیلی برای پکش سیم‌های صاف ۵۶

۳.۳ پکش سیم‌های پلاستیک ۶۲

۴.۳ جمع بندی ۶۵

۴ رشته‌ی کشسان افتان بر روی تسمه‌ی متحرک: چرخ خیاطی کشسان ۶۷

۱.۴ رشته‌ی وشکسان افتان بر روی تسمه‌ی متحرک ۶۸

۲.۴ مارپیچش رشته کشسان بر روی سطح ساکن ۷۵

۳.۴ رشته‌ی کشسان افتان بر روی تسمه‌ی متحرک ۷۷

۱.۳.۴ رویه‌ی آزمایشی ۷۷

۲.۳.۴ مشاهدات تجربی ۷۹

۳.۳.۴ توصیف مدل عددی ۸۹

۴.۳.۴ نیروی وارد بر رشته‌ی کشیده شده ۹۲
۵.۳.۴ مقایسه با ماشین خیاطی سیال ۹۴
مراجع ۹۶
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی ۱۰۲

لیست تصاویر

۱.۱ مولفه‌های مختلف تانسور تنش بر روی یک جزء مکعب مستطیلی شکل نشان داده شده است. ۸

۲.۱ (a) یک خط که با دایره‌هایی با حداقل تقاطع پوشانده شده است. (b) خطی که با تقاطع بیشتری بین دایره‌ها پوشانده می‌شود. ۱۵

۳.۱ تقسیم یک خط، صفحه و حجم به اجزای خود متشابه در مقیاس ε [۳]. ۱۷

۴.۱ در این شکل مجموعه‌ی کانتور، آغازگر و تولید کننده‌ی فرکتال مشخص شده است. ۱۷

۱.۲ (a) پکش کره‌های هم اندازه در نظریه‌ی میکروسکوپیک بلورها و جامدات کاربرد فراوان دارد. (b) پکش یک زنجیر دانه‌ای درون یک ظرف مستطیلی شکل [۱۷]. (c) بلوری شدن کلوییدها را نیز می‌توان با در نظر گرفتن پکش کره‌ها بررسی کرد [۱۸]. (d) پکش آپولونین نیز از مسایل جالب در زمینه‌ی پکش کره‌های غیر هم اندازه است [۱۶]. ۲۳

۲.۲ (a) چروکیده شدن ورقه‌ی نازک کاغذ خیس شده [۲۷]. (b) دستمالی که با گرفتن و بیرون کشیدن یک نقطه از وسط آن از یک روزنه، درون روزنه پکیده می‌شود [۲۸]. (c) مقطعی از کاغذ مچاله شده [۲۹]. (d) شبکه‌ای از خطوط تا شده بر روی یک کاغذ مچاله شده بعد از باز کردن آن [۳۰]. (e) سیم کشسان مچاله شده درون یک محفظه‌ی دایروی با استفاده از نیروی مرکزگرا [۳۱]. (f) مقطعی از یک کلم. . . ۲۴

۳.۲ (a،b) بیماری آماس رگ مغزی و روش جدید درمان آن [۳۷]. (c) باز شدن تدریجی یک برگ تا شده درون جوانه [۳۸]. (d) بسیاری از دانه‌های گیاهان به صورت پکیده در کنار هم قرار می‌گیرند. ۲۶

۴.۲ سیم مچاله شده‌ی مسی درون محفظه‌ی دو بعدی [۴۰]. در این شکل زاویه‌ای که کانال‌ها با هم می‌سازنند ۱۸۰ درجه است. ۲۷

۵.۲ تابع توزیع تعداد حلقه‌هایی که مساحتشان برابر با s است، بر حسب مساحت در حد TP نشان داده شده است [۴۳]. ۲۹

۶.۲ نمودار لگاریتمی-لگاریتمی تعداد حلقه‌های تشکیل شده، n_l، بر حسب کسر پکش p. نمودار داخلی تعداد کل تماس‌های حلقه‌ها با یکدیگر (n_{ll}) را نشان می‌دهد [۴۳]. ۳۰

۷.۲ تعداد کل تماس‌های سیم با سیم به صورت $n_{ww} \sim p^{۲/۰\pm۰/۱}$ مقیاس‌بندی می‌شود. نمودار داخلی تعداد متوسط عدد همارایی را نشان می‌دهد [۳۹]. ۳۰

۸.۲ سیم مچاله شده درون یک محفظه‌ی دایروی. نتایج تجربی (ردیف بالا) و شبیه‌سازی (ردیف پایین) سه ریخت شناسی مختلف را نشان می‌دهند. جنس سیم‌ها استیل به ضخامت ۸ میلی‌متر بدون روغن سیلیکون درون محفظه (چپ) و با روغن سیلیکون (وسط) و سیم لحیم کاری $Sn_{۹۹}Cu_۱$ به ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشد [۴۴]. . . ۳۲

۹.۲ طرح‌های به وجود آمده برای آلیاژ $Sn_{۰/۶}Cu_{۰/۴}$ به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر در یک محفظه‌ی شبه دو بعدی به ارتفاع ۱/۶ میلی‌متر و شعاع ۷۵ میلی‌متر [۴۵]. . . . ۳۴

۱۰.۲ پیکربندی‌های فاز منظم نشان داده شده است.(a) قرقره مانند (b) راه راه و (c) توپ تنیس مانند [۴۷]. ۳۶

۱۱.۲ در این شکل اثر هندسه‌ی کپسید بر روی ساختار DNA پکیده شده درون کپسید به طور خلاصه آورده شده است. ۳۸

۱۲.۲ در این نمودار چگالی پلیمر، ρ، بر حسب فاصله‌ی شعاعی R از مرکز کره نشان داده شده است. خط‌چین مربوط به حالت بدون چرخش و خط پررنگ مربوط به حالت با چرخش است [۵۶]. ۴۰

۱۳.۲ انرژی کل E (○)، انرژی تراکمی E_{com} (+)، انرژی خمشی E_{bend} (△)، انرژی پیچشی E_{twist} ()، انرژی خود بر هم کنشی E_{int} (▽) و انرژی بر هم کنشی با کپسید E_{capsid} (×) بر حسب تابعی از کسر پکش Φ_p برای حالت پکش با چرخش نشان داده شده است [۵۶]. ۴۱

۱۴.۲ برای یک لوله به ضخامت △ شعاع خم‌های موضعی نباید از این ضخامت کم‌تر بوده و فاصله‌ی خط مرکزی لوله در دو نقطه‌ی دلخواه باید از این مقدار بیشتر باشد. این دو شرط را به این صورت می‌توان خلاصه کرد که شعاع دایره‌ی گذرنده از سه نقطه‌ی دلخواه بر روی خط مرکزی لوله، r_{ijk}، باید بزرگ‌تر یا مساوی با △ باشد [۵۷]. ۴۳

۱.۳ داده‌های مربوط به آزمایشی با رشته‌ای به قطر ۱ میلی‌متر و جرم واحد طول ۰/۰۱۴۴ گرم بر سانتی‌متر نشان داده شده است. ضریب کشسانی به دست آمده برابر $۴/۹۹ \pm ۰/۰۴ MPa$ است. ۴۵

۲.۳ نتایج تست کشش برای دو سیم متفاوت در این شکل نشان داده شده است. (a) طناب کشسان با ضریب کشسانی $۸ \pm ۰/۰۸ MPa$، (b) نخ ماهی‌گیری باریک با ضریب کشسانی $۲ \pm ۰/۰۱ GPa$. ۴۶

۳.۳ (a) طرحواره‌ی چیدمان سیستماتیک برای پکش سیم. (b) سیم از میان دو غلطک عبور کرده و با چرخاندن یکی از غلطک‌ها توسط موتور الکتریکی، سیم به درون کره هدایت می‌شد. ۴۷

۴.۳ نخ‌های ماهی‌گیری در حالت عادی شعاع انحنایی از مرتبه‌ی شعاع قرقره‌ی خود دارند. ۴۹

۵.۳ (a) نتیجه‌ی شبیه‌سازی عددی برای حالتی که پیچش در سیم‌ها انباشته می‌شود (رژیم نامنظم). رنگ‌های گرم‌تر انرژی خمشی بیشتر را نشان می‌دهند [۵۸]. (b) نتیجه‌ی تجربی برای رژیم نامنظم. (c) سطح مقطع نوعی برای رژیم نامنظم. نسبت a/R برای این ساختارها به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۲۵ و ۰/۱ است. ۵۰

۶.۳ در رژیمی که به علت وجود انحنای ذاتی پیچش در سیم داخل کره جمع شده و اجازه‌ی آزاد شدن به آن داده نمی‌شود، امکان تشکیل شکل هشت لاتین (&) وجود دارد که در تصویر مشخص است. ۵۱

۷.۳ کسر پکش رژیم نامنظم بر حسب اندازه‌ی نسبی سیستم. دایره‌ی تو خالی، مربع و مثلث توپر به ترتیب مربوط به شبیه‌سازی عددی، حالت اصطکاک زیاد و اصطکاک کم است. اصطکاک تأثیر زیادی بر روی کسر پکش ندارد. کسر پکش حالت اصطکاک زیاد در بازه‌ی ۰/۰۱۹۱ و ۰/۲۳۲۱ به صورت یک قانون توانی به شکل $p_{max} \sim (a/R)^{۰/۴۵\pm۰/۰۳}$ رفتار می‌کند. توان منحنی که به داده‌های عددی برازش می‌یابد ۰/۳ است. ۵۲

۸.۳ (a) نتیجه‌ی شبیه‌سازی عددی برای حالتی که پیچش سیم‌ها آزاد می‌شود (رژیم منظم). رنگ‌های گرم‌تر انرژی خمشی بیشتر را نشان می‌دهند [۵۸]. (b) نتیجه‌ی تجربی برای رژیم منظم. (c) سطح مقطع نوعی برای رژیم منظم. نسبت a/R برای این ساختارها به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۲۵ و ۰/۱۶۸ است. ۵۴

۹.۳ کسر پکش بیشینه‌ی سیستم در رژیم منظم بر حسب اندازه نسبی سیستم. دایره‌ی توپر نتایج تجربی و دایره‌ی توخالی نتایج شبیه‌سازی عددی است. خط پررنگ و خط چین مربوط به نتایج مدل تحلیلی است که در بخش ۳.۲.۳ جزییات آن شرح داده شده است. ۵۵

۱۰.۳ بعد جرم-اندازه برای سیم‌هایی با ضخامت مختلف نشان داده شده است. مربع توخالی مربوط به نتایج شبیه‌سازی و منحنی‌ها مربوط به مدل تحلیلی است. همان طور که مدل ارائه شده در بخش ۳.۲.۳ نشان می‌دهد، وقتی شعاع کره‌ها به اندازه‌ی کافی بزرگ باشند، سیم‌هایی با شعاع متفاوت دارای بعد یکسان ۲/۵ می‌باشند که توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی دارد. ۵۶

۱۱.۳ بعد بر حسب شعاع برای سیم‌های کشسان صاف با شعاع متفاوت. این سیم‌ها که درون یک توپ پلاستیکی به شعاع ۱۹/۳۱ میلی‌متر پکیده شده‌اند، بعد شمارش در جعبه‌ی تقریباً یکسانی دارند. این مقدار برابر با ۲٫۸۳ ± ۰٫۰۳ است. ۵۷

۱۲.۳ مدل تحلیلی ارائه شده در بخش ۳.۲.۳ نشان می‌دهد که تعداد حلقه‌های تشکیل شده درون کره در R/aهای بزرگ یک رابطه‌ی توانی با این نسبت به شکل $N \sim (R/a)^{۱٫۵}$ دارد. دایره‌ی توپر، دایره‌ی توخالی و خط پررنگ به ترتیب مربوط به نتایج تجربی، نتایج شبیه‌سازی و مدل تحلیلی است (تعداد حلقه‌ها عدد صحیح است، اما برای مقایسه‌ی راحت‌تر پیوسته کشیده شده است). نمودار داخلی تعداد حلقه‌های تشکیل شده در بیرونی‌ترین لایه ($N_۱$) را نشان می‌دهد. هم چنین این نمودار نشان می‌دهد که قید مربوط به گذار تشکیل حلقه‌ها از لایه‌ی خارجی به لایه‌ی درونی قید مناسبی است. ۵۸

۱۳.۳ طرحواره‌ی مدل ارائه شده نشان داده شده است. a و R به ترتیب شعاع سیم و شعاع کره است. $r_۱$ شعاع لایه‌ی اول و $r_۱ - ۲a$ شعاع لایه‌ی دوم می‌باشد. ۵۹

۱۴.۳ انرژی و نیروی خمشی کشسانی بی بعد شده برای سیمی به شعاع ۱/۹۳ میلی‌متر که درون کره‌ای به شعاع ۱۹/۳۱ میلی‌متر پکیده می‌شود به صورت تابعی از کسر پکش نشان داده شده است. ۶۱

۱۵.۳ (a) پکش پلاستیک در حالت اصطکاک زیاد به صورت تا شدن‌های متوالی رخ می‌دهد. (b) در مراحل ابتدایی حالت اصطکاک کم، پکش با تشکیل حلقه‌های تقریباً دایروی، اما در مراحل پایانی با تا شدن سیم انجام می‌گیرد. حلقه‌ها در نیمه‌ی پایینی ساختار قابل مشاهده هستند. (c) در پکش اصطکاک کم پلاستیک، سیم‌ها در کنار دیواره‌ی کره متمرکز نشده‌اند، بلکه توزیع تقریباً یکنواختی دارند. نسبت a/R این سیستم‌ها به ترتیب ۰/۰۲۵، ۰/۰۲۹ و ۰/۰۲۹ می‌باشد. ۶۳

۱۶.۳ دایره‌های توخالی و توپر به ترتیب کسر پکش حالت‌های اصطکاک کم و زیاد را نشان می‌دهند. کسر پکش پلاستیک در حالت اصطکاک زیاد در بازه‌ی ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۹۷ با نسبت a/R یک رابطه‌ی توانی به شکل $p_{max} \sim (a/R)^{۱/۱۲\pm۰/۰۳}$ دارد. به نظر می‌رسد کسر پکش حالت‌های اصطکاک کم و زیاد تفاوت چندانی نداشته باشد. ۶۴

۱۷.۳ ریخت شناسی سیم‌های کشسان پکیده شده درون محفظه‌های کروی. ردیف بالا: (a) رژیم پیچ خوردگی کم رژیمی منظم است که با مارپیچش حلقوی مشخص می‌شود. (c) سطح مقطع پکش ساختار لایه‌ای آن را نشان می‌دهد. (b و d) توموگرافی اشعه‌ی X آزمایش‌ها نشان داده شده است. ردیف پایین: (e و g) رژیم پیچ خوردگی زیاد رژیمی نامنظم است. (f و h) آزمایش‌های مربوط به رژیم نامنظم را نشان می‌دهند. رنگ‌ها انرژی خمشی را نشان می‌دهند. نسبت a/R برای شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌های حالت‌های منظم و نامنظم به ترتیب ۰/۰۲، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱۷ است [۵۸]. ۶۶

۱.۴ چپ: برخی از طرح‌های کوکی که توسط یک ماشین چرخ خیاطی سیال با $d = ۰/۸cm$ (قطر روزنه) و مقادیر مختلف Q (شار حجمی)، و شکسانی ν، ارتفاع فرود (H) و سرعت تسمه‌ی (V) تولید شده است. جزییات مربوط به مقادیر کمیت‌های ذکر شده در مرجع [۶۶] قابل دستیابی است. (a) رشته‌ی پایدار کشیده شده، (b) سینوسی، (c) حلقه‌های مورب، (d) به هم بافته، (e) هشت لاتین، (f) دبلیو، و (g) مارپیچش منتقل شده است. تسمه از چپ به راست حرکت می‌کند و کوچکترین بخش مقیاس در شکل برابر با mm است. راست: نوسان‌هایی با دوره‌ی تناوب دوگانه (a) مارپیچ دوتایی، (b) سینوسی با دوره‌ی تناوب دوگانه، (c) هشت لاتین با دوره‌ی تناوب دوگانه، (d) هشت لاتین بسیار کشیده‌ای که در اثر پس زنی جانبی ایجاد می‌شود و (e) رفتار نامنظم [۶۵]. ۶۹

۲.۴ شکل رشته‌ی پایدار کشیده شده به صورت تابعی از سرعت تسمه (V). پیش بینی حل عددی معادلات مربوطه (خطوط سیاه) و مشاهدات تجربی (تصاویر خاکستری) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در همه‌ی حالت‌ها $H = ۶/۰۵cm$ و در (a) $V = ۲/۵cm/s$، (b) $V = ۴/۷cm/s$، (c) $V = ۸/۳cm/s$ و (d) $V = ۱۴/۵cm/s$ است [۶۶]. ۷۰

۳.۴ فاصله‌ی کشیدگی، $\bar{x}_۱(\bar{l})$، به صورت تابعی از سرعت تسمه برای آزمایشی با $H = ۷cm$، $d = ۰/۸cm$ و $Q = ۰/۰۱۹۵cm^۳s^{-۱}$ نشان داده شده است. H، d و Q به ترتیب ارتفاع فرود، قطر روزنه و نرخ شارش را نشان می‌دهند. دایره‌ها اندازه‌گیری‌های تجربی، خط سیاه پیش بینی عددی نظریه‌ی کامل و خط چین پیش بینی نظریه‌ی کشیدگی محض را نشان می‌دهد [۶۶]. ۷۱

۴.۴ سرعت بحرانی تسمه، $V = V_c$، به عنوان تابعی از ارتفاع سقوط H برای آزمایش‌هایی با (a) $d = ۱cm$، $Q = ۰/۰۶۸۹cm^۳s^{-۱}$ (b) $d = ۰/۶۵cm$، $Q = ۰/۰۵۷cm^۳s^{-۱}$ و (c) $d = ۸/۰cm$، $Q = ۰/۰۶۸۹cm^۳s^{-۱}$ نشان داده شده است. دایره‌های سیاه اندازه‌گیری‌های تجربی و خط پررنگ پیش‌بینی تحلیل پایداری خطی است. نقطه چین‌ها که تقریباً از خط پررنگ غیر قابل تشخیص‌اند، سرعت محوری $U_۱ \equiv \frac{Q}{\pi a_۱^۲}$ را در انتهای رشته نشان می‌دهد که بر روی یک سطح ساکن ($V = ۰$) با پارامترهای تجربی یکسان مارپیچش می‌کند. خط‌چین‌ها سرعت بحرانی تسمه را نشان می‌دهند که در آن حل کشیدگی محض ارائه شده توسط CWL وجود ندارد [۶۶]. . . . ۷۲

۵.۴ فرکانس زاویه‌ای نوسان، σ_i، در سرعت بحرانی تسمه، $V = V_c$، به عنوان تابعی از ارتفاع H نشان داده شده است. پارامترهای آزمایش همانند شکل ۴.۴ است. دایره‌های سیاه اندازه‌گیری تجربی و خط پررنگ فرکانس محاسبه شده با استفاده از تحلیل پایداری خطی است. خط‌چین‌ها فرکانس زاویه‌ای مارپیچش پایدار، ω، بر روی یک سطح ساکن را برای پارامترهای تجربی یکسان نشان می‌دهند [۶۶]. . ۷۳

۶.۴ اندازه‌گیری تجربی شعاع حلقه‌ها (R). (a) R به عنوان تابعی از H برای رشته‌ای با $U = ۲cm/s$ (مربع‌های توخالی)، $U = ۱۰cm/s$ (مربع‌های توپر) و $U = ۱۰cm/s$ (دایره‌ها). (b) R به عنوان تابعی از U برای رشته‌ای با $H = ۱/۳cm$ (مربع‌ها)، $H = ۵۰cm$ (دایره‌های توپر) و $H = ۱۰۰cm$ (دایره‌های توخالی). جزییات مربوط به نخ‌های به کار رفته در هر آزمایش در مرجع [۶۸] قابل مشاهده است. ۷۶

۷.۴ چیدمان آزمایش. یک رشته‌ی سیلیکونی به دور یک چرخ پیچانده شده است. این چرخ با یک موتور الکتریکی چرخانده شده و رشته را با سرعت U از میان یک حلقه راهنما در ارتفاع H از سطح تسمه فرود می‌آورد. تسمه نیز خود توسط موتوری با سرعت ثابت چرخانده می‌شود. ۷۸

۸.۴ شکل‌های رشته کشسان (خطوط سیاه) از نمای جانبی با $H = ۲۰cm$ و $U = ۱۰cm/s$ نشان داده شده است. مقیاس بر حسب سانتی‌متر است. تسمه از راست به چپ حرکت می‌کند و حلقه‌ی راهنما در قسمت بالای تصویر قابل مشاهده است. (a) حالت خمیده ($V = ۱۵/۷cm/s$). (b) پاشنه‌ای پایدار ($V = ۱۰/۳cm/s$). (c) آغاز طرح سینوسی ($V = ۱۰cm/s$). (d) طرح سینوسی ($V = ۹/۵cm/s$). خط‌چین‌های سفید شکل‌های پیش‌بینی شده‌ی عددی را نشان می‌دهند که بهترین برازش را بر شکل‌های مشاهده شده‌ی رشته دارند (چون حالت d ناپایدار است برای آن پیش‌بینی عددی انجام نشده است). پیکان‌ها در قسمت b و c نقطه‌ای را نشان می‌دهند که تنش محوری از حالت کششی (بالا) به تراکمی (پایین) تغییر می‌کند. نیروی F که توسط تسمه بر رشته وارد می‌شود به عنوان شرط مرزی در حل عددی اعمال می‌شود (جهت در راستای حرکت تسمه مثبت است). ۸۰

۹.۴ طرح‌های مشاهده شده‌ی رشته بر روی تسمه (مقیاس برابر با ۱۰ سانتی‌متر است). برای همه‌ی حالت‌ها $U = ۸cm/s$ است به جز i و j که برایشان $U = ۳۰cm/s$ است. مقادیر (V, H) برای هر حالت در زیر آمده است. (a) خمیده‌ی پایدار (۳۵ cm، ۸ cm/s)، (b) سینوسی (۷۰ cm، ۷.۵ cm/s)، (c) سینوسی (۱۰ cm، ۵.۵ cm/s)، (d) سینوسی (۱۰ cm، ۴ cm/s)، (e) سینوسی با دوره‌ی تناوب دوگانه (۴۵ cm، ۶ cm/s)، (f) سینوسی با دوره‌ی تناوب دوگانه (۱۰ cm، ۵.۵ cm/s)، (g) شکل دبلیو (۳۰ cm، ۴.۵ cm/s)، (h) هشت لاتین (۱۵ cm، ۳ cm/s)، (i) شکل هشت لاتین (۲۰ cm، ۸ cm/s)، یک به یک (۲۰ cm، ۱۵ cm/s)، (k) دو به یک (۳۰ cm، ۳ cm/s)، (l) دو به دو (۳۰ cm، ۳ cm/s)، (m) مارپیچش دوتایی (۴۰ cm، ۲ cm/s)، (n) مارپیچش منتقل شده (۱۰cm، ۲ cm/s). ۸۱

۱۰.۴ طرح‌های گذرا و شبه تصادفی در مقادیر U و V بزرگ. مقادیر H، U و V برای هر حالت در ادامه به ترتیب ذکر شده است. (a) ۲۰ cm، ۵۰ cm/s و ۷ cm/s (b) ۲۰ cm، ۵۰ cm/s و ۱۱ cm/s (c) ۳۰ cm، ۸ cm/s و ۲.۵ cm/s (d) ۳۰ cm، ۸ cm/s و ۲ cm/s (e) ۲۰ cm، ۹۰ cm/s و ۵۵.۱ cm/s (f) ۲۰ cm، ۹۰ cm/s و ۵۵.۱ cm/s (g) ۲۰ cm، ۹۰ cm/s و ۳۱ cm/s (h) ۲۰ cm، ۹۰ cm/s و ۳۱ cm/s ۸۲

۱۱.۴ فضای فاز در صفحه‌ی $V - H$ برای $U = ۸cm/s$. طرح‌های مربوط به حالت‌ها در شکل‌های ۹.۴ و ۱۰.۴ نشان داده شده‌اند. ۸۳

۱۲.۴ فضای فاز در صفحه‌ی $V-U$ برای $H=۲۰cm$. طرح‌های مربوط به حالت‌ها در شکل‌های ۹.۴ و ۱۰.۴ نشان داده شده‌اند. گذار بین رژیم گرانشی (G) و لختی (I) در حالت مارپیچش پایدار در نقطه‌ی $U=۳۸/۶cm/s$ رخ می‌دهد. به تفاوت در مقیاس عمودی دو قسمت چپ و راست نمودار توجه شود. ۸۴

۱۳.۴ فاصله‌ی کشیدگی از مرکز حلقه‌ی راهنما به صورت تابعی از سرعت تسمه، V، برای $H=۲۰cm$ و $U=۱۰cm/s$ نشان داده شده است. ۸۵

۱۴.۴ دامنه‌ی طرح‌های سینوسی به صورت تابعی از سرعت تسمه، V، برای $H=۲۰cm$ و $U=۱۰cm/s$. ۸۶

۱۵.۴ بسامد طرح‌های سینوسی به صورت تابعی از سرعت تسمه، V، برای $H=۲۰cm$ و $U=۱۰cm/s$. ۸۷

۱۶.۴ طول موج طرح‌های سینوسی به صورت تابعی از سرعت تسمه، V، برای $H=$ $۲۰cm$ و $U=۱۰cm/s$. ۸۷

۱۷.۴ بسامد طرح‌های سینوسی به صورت تابعی از سرعت فرود رشته، U، برای سه ارتفاع مختلف نشان داده شده است. توجه شود که هنگام آغاز طرح‌های سینوسی، سرعت تسمه کمی کوچک‌تر از سرعت فرود رشته است. ۸۸

۱۸.۴ مارپیچش پایدار کشسان در فضای بی‌بعد شده‌ی ارتفاع فرود $\hat{H}=H(\rho g/d^۲E)^{۱/۳}$ و سرعت تغذیه‌ی بی‌بعد $\hat{U}=U(\rho/d^۲g^۲E)^{۱/۶}$ [۶۹]. رژیم‌های مختلف مارپیچش نشان داده شده‌اند: کشسانی (E)، گرانشی (G)، لختی (I)، ریسمان چرخان و میله‌ی چرخان که زیر بخش رژیم لختی می‌باشند. محدوده‌ای از مقادیر $\hat{H}$ و $\hat{U}$ برای آزمایش‌هایی که ما انجام داده‌ایم با T وارونه نشان داده شده است. ۹۱