



دانشگاه صنعتی شیراز
دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا گروه مهندسی مکانیک

بررسی عددی جریان خون در مدلی واقعی از آنوریسم در رگ های مغز انسان

پایان نامه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نگارش:

مریم کاویانی

استاد راهنما:

دکتر امیر حسین نیک سرشت

بهمن ماه ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بسمه تعالی

بررسی عددی جریان خون در مدلی واقعی از آنوریسم
در رگ های مغز انسان

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی

نگارش:

مریم کاویانی

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه: عالی

دکتر امیر حسین نیک سرشت دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا (استاد راهنما)

دکتر امیر امیدوار استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا (استاد مشاور)

دکتر رضا مهریار استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا (داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه صنعتی شیراز است.

بهمن ماه ۱۳۹۲

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

بسمه تعالی

اینجانب مریم کاویانی دانشجوی رشته مهندسی مکانیک مقطع کارشناسی ارشد به شماره دانشجویی (۹۰۱۴۴۰۲۵) تأیید می‌نماید کلیه نتایج این پایان‌نامه، بدون هیچگونه دخل و تصرف حاصل مستقیم پژوهش صورت گرفته توسط اینجانب است. در مورد اقتباس مستقیم و غیر مستقیم از سایر آثار علمی، اعم از کتاب، مقاله، پایان‌نامه و... با رعایت امانت و اخلاق علمی، مشخصات کامل منبع مذکور درج شده است.

در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص مقامات ذی صلاح دانشگاه صنعتی شیراز مطابق قوانین و مقررات مربوط و آئین‌نامه‌های آموزشی، پژوهشی و انضباطی عمل خواهد شد و اینجانب حق هرگونه اعتراض و تجدیدنظر را نسبت به رأی صادره از خود ساقط می‌کند. همچنین هرگونه مسئولیت ناشی از تخلف نسبت به صحت و اصالت نتایج مندرج در پایان‌نامه در برابر اشخاص ذی نفع (اعم از حقیقی و حقوقی) و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) متوجه اینجانب خواهد بود و دانشگاه صنعتی شیراز هیچ گونه مسئولیتی در این زمینه نخواهند داشت.

تبصره ۱- کلیه حقوق مادی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شیراز است.

تبصره ۲- اینجانب تعهد می‌نماید بدون اخذ مجوز از دانشگاه صنعتی شیراز دستاوردهای این پایان‌نامه را منتشر نکند و یا در اختیار دیگران قرار ندهد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مریم کاویانی

تاریخ و امضاء

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج پایان‌نامه متعلق به دانشگاه و انتشار نتایج نیز تابع مقررات دانشگاهی است و با موافقت استاد راهنما به شرح زیر، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد راهنما: دکتر امیر حسین نیک سرشت

تاریخ:

امضا:

تقدیم

به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است.

به استوارترین تکیه گاهم

دستان پرمهر پدرم...

به سبزترین نگاه زندگیم

چشمان مادرم...

و تقدیم به همسرم

که سایه مهربانیش سایه سار زندگیم است...

سپاسگذاری

اکنون که این پایان نامه به پایان رسیده است بر خود لازم می دانم که از پدر و مادر عزیزم که مرا در تمام مراحل زندگی یاری نموده و زحمات فراوانی کشیده اند تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از همسر مهربان و گرامیم که با صبر و بردباری فراوان مرا در تمامی مشکلات یاری نموده اند تشکر فراوان دارم.

با تشکر از استاد ارجمند جناب آقای دکتر امیر حسین نیک سرشت که دلسوزانه و صبورانه در تمام مراحل این پایان نامه با راهنمایی های ارزنده ی خود مرا یاری نموده اند و از هیچ کمکی دریغ ننموده اند. در اینجا از ایشان کمال تشکر و قدردانی را به عمل می آورم. همچنین از استاد ارجمند جناب آقای دکتر امیر امیدوار که در انجام این پایان نامه بنده را مشاوره و راهنمایی نمودند کمال تشکر را دارم.

از آقای دکتر افشین برهان حقیقی متخصص بیماری های مغز و اعصاب و دانشیار دانشکده پزشکی دانشگاه علوم پزشکی شیراز که در انجام مراحل این پایان نامه و روشن شدن ابهامات موجود پزشکی در مورد رگ های مغز مرا مساعدت و راهنمایی نموده و همچنین آقای دکتر جلیلی رادیولوژیست محترم که عکس های سی تی آنژیوگرافی مغز را در اختیار اینجانب قرار دادند، کمال تشکر را دارم.

در پایان از تمامی دوستان و کسانی که اینجانب را در انجام این پروژه همراهی و یاری نموده اند تشکر می نمایم.

چکیده

بر اساس آمار منتشرشده بیماری‌های شریانی یکی از شایع‌ترین عوامل مرگ‌ومیر در جهان هستند. یکی از بیماری‌های شریانی، آنوریسم می‌باشد که عبارت است از بزرگ شدن یا بیرون زدگی دیواره‌ی بخشی از رگ که ممکن است منجر به ضعف دیواره‌ی رگ و پارگی آن شود. یکی از روش‌های درمان آنوریسم روش عمل جراحی باز است که در آن با استفاده از گیره‌های مخصوص گردن آنوریسم را گیره زده و می‌بندند، تا از رشد آن جلوگیری کنند. به علت پیچیدگی و کثرت پارامترهای مؤثر در ایجاد این نوع بیماری و اهمیت پیش‌بینی احتمال پارگی رگ، ضرورت به کارگیری روش‌های نوین محاسباتی برای پردازش و تحلیل داده‌ها جهت اتخاذ تصمیمات صحیح پیش‌گیرنده و درمانی بسیار محسوس است. در این پژوهش در ابتدا برای نشان دادن صحت روش محاسباتی بکار رفته، یک رگ دارای گرفتگی مدل شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از تصاویر سی‌تی آنژیوگرافی مدلی واقعی از آنوریسم در شریان مغزی میانی یک انسان بیرون آورده شده و هندسه‌ی همین شریان پس از عمل جراحی باز و قرار دادن گیره (کلیپس) بر روی آنوریسم، مدل شده است. پس از مدل‌سازی شریان، به بررسی پارامترهای همودینامیکی که نقش مهمی در ایجاد آنوریسم و توسعه‌ی این بیماری دارند پرداخته شده است. این نتایج شامل بررسی توزیع تنش برشی، توزیع فشار بر روی دیواره‌ی رگ، خطوط جریان و بردارهای سرعت در مدل قبل از عمل جراحی و بعد از آن می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که چه مناطقی بیشتر در معرض ایجاد و یا رشد آنوریسم هستند و همچنین می‌تواند به تخمین چگونگی رشد آنوریسم و تشخیص محل احتمال پارگی کمک کنند. نتایج بدست آمده نشان دادند که شرایط همودینامیک جریان خون بعد از عمل جراحی بهتر شده و این روش درمانی در بهبود بیمار موثر است.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ سیستم گردش خون
۵	۳-۱ سیکل ضربان قلب
۵	۴-۱ شریان‌های مغزی
۷	۵-۱ دایره ویلیس
۸	۶-۱ ساختار شریان‌های خون
۹	۱-۶-۱ لایه داخلی
۹	۲-۶-۱ لایه میانی
۱۰	۳-۶-۱ لایه بیرونی
۱۰	۷-۱ بیماری‌های دستگاه گردش خون
۱۰	۱-۷-۱ تصلب شریان
۱۱	۲-۷-۱ سکته قلبی
۱۱	۳-۷-۱ فشارخون
۱۱	۴-۷-۱ آنوریسم درون جمجمه‌ای
۱۷	۵-۷-۱ جریان در آنوریسم‌های درون جمجمه‌ای
۱۷	۸-۱ رژیم جریان خون
۱۸	۹-۱ پروفیل سرعت و فشار

۱۰-۱	خون و اجزای آن	۲۰
فصل دوم: مبانی، تعاریف و مروری بر کارهای گذشته		
۱-۲	مقدمه	۲۵
۲-۲	رفتار مکانیکی عروق	۲۶
۳-۲	همودینامیک	۳۲
۴-۲	دینامیک سیالات محاسباتی	۳۳
۵-۲	نرم افزار ANSYS	۳۴
۶-۲	نرم افزار CFX	۳۵
۱-۶-۲	CFX-Pre	۳۶
۲-۶-۲	CFX-Solver	۳۶
۳-۶-۲	CFX-Post	۳۶
۷-۲	نرم افزار حل جامدات	۳۷
۸-۲	برهمکنش سیال - جامد	۳۷
۹-۲	توضیحی بر انواع مختلف تصاویر پزشکی	۴۲
۱-۹-۲	روش تصویربرداری سی تی اسکن	۴۲
۲-۹-۲	روش تصویربرداری ام آر آی	۴۳
۳-۹-۲	روش تصویربرداری سی تی آنژیوگرافی	۴۴
۱۰-۲	پیشینه تحقیق	۴۶
فصل سوم: معادلات حاکم		
۱-۳	مقدمه	۵۰
۲-۳	تئوری برهمکنش سیال-جامد	۵۱
۱-۲-۳	تغییر شکل کوچک	۵۳

۵۳	..... ۲-۲-۳ تغییر شکل بزرگ
۵۳	..... سیال ۳-۳
۵۴	..... ۱-۳-۳ معادلات حاکم بر سیال
۵۵	..... ۴-۳ دیواره‌ی جامد
۵۶	..... ۱-۴-۳ معادلات حاکم بر جامد
۵۷	..... ۲-۴-۳ نظریه انرژی واپیچش برای مواد نرم
۶۰	..... ۵-۳ معادلات حاکمه برهمکنش سیال - جامد
۶۱	..... فصل چهارم: روش مدل‌سازی و بررسی نتایج
۶۲	..... ۱-۴ مقدمه
۶۳	..... ۲-۴ اعتبارسنجی مسئله
۶۳	..... ۱-۲-۴ هندسه و شبکه‌ی تولید شده
۶۶	..... ۲-۲-۴ شرایط مرزی
۶۶	..... ۳-۲-۴ مشخصات سیال و جامد
۶۷	..... ۴-۲-۴ نتایج اعتبارسنجی
۷۴	..... ۳-۴ هندسه
۸۰	..... ۴-۴ تولید شبکه
۸۴	..... ۵-۴ مشخصات سیال و جامد
۸۵	..... ۶-۴ شرایط مرزی
۸۶	..... ۷-۴ بررسی میدان جریان خون در آنوریسم قبل از عمل جراحی
۹۳	..... ۸-۴ حل جریان در آنوریسم قبل از عمل جراحی به صورت غیردائمی
۱۰۷	..... ۹-۴ بررسی میدان جریان خون در آنوریسم بعد از عمل جراحی
۱۱۱	..... ۱۰-۴ حل جریان در آنوریسم بعد از عمل جراحی به صورت غیر دائمی
۱۲۳	..... ۱۱-۴ بررسی برهمکنش سیال - جامد در رگ دارای آنوریسم

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۱۳۳
۱-۵ نتیجه‌گیری	۱۳۴
۲-۵ پیشنهادات	۱۳۶
منابع و مأخذ	۱۳۸
پیوست‌ها	۱۴۴
پیوست الف- راهنمای استفاده از نرم‌افزار ANSYS برای حل مسائل FSI	۱۴۵
پیوست ب- راهنمای استفاده از نرم‌افزار Mimics	۱۶۲
پیوست ج- راهنمای استفاده از ICEM	۱۶۸

چکیده به زبان انگلیسی

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۸.....	جدول (۱-۱): مقادیر مختلف رینولدز، سرعت و عدد و مرسلی در انسان و سگ.....
۲۱.....	جدول (۲-۱): اجزا خون انسان.....
۸۳.....	جدول (۱-۴): تعداد شبکه‌ی تولید شده برای هر مدل.....
	جدول (۲-۴): مطالعه‌ی استقلال از شبکه بر اساس پارامترهای مهم مسئله برای مدل
۸۳.....	قبل از جراحی.....
	جدول (۳-۴): مطالعه‌ی استقلال از شبکه بر اساس پارامترهای مهم مسئله برای مدل
۸۴.....	بعد از جراحی.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱): شریان‌های اصلی در بدن انسان	۴
شکل (۲-۱): شماتیک موج فشاری خروجی از قلب	۵
شکل (۳-۱): نمایی از شریان‌های مغز انسان	۷
شکل (۴-۱): شریان‌های دایره ویلیس در مغز انسان	۸
شکل (۵-۱): نمایی از لایه‌های تشکیل‌دهنده شریان	۹
شکل (۶-۱): فرم‌های معمول از آنوریسم داخل جمجمه	۱۲
شکل (۷-۱): رایج‌ترین منطقه‌ی آنوریسم‌های درون جمجمه‌ای (دایره‌ی ویلیس)	۱۴
شکل (۸-۱): روش عمل جراحی باز برای درمان آنوریسم	۱۶
شکل (۹-۱): روش اندوواسکولار برای درمان آنوریسم	۱۶
شکل (۱۰-۱): نوسانات فشار در یک سیکل ضربان قلب در نقاط مختلف بدن	۱۹
شکل (۱۱-۱): تنش برشی بر حسب نرخ برش	۲۲
شکل (۱۲-۱): تنش برشی بر حسب نرخ کرنش و به‌عنوان تابعی از سطح هماتوکریت ...	۲۳
شکل (۱-۲): شعاع‌های انحنای R_1 و R_2	۳۰
شکل (۲-۲): پاسخ مکانیکی یک شریان به برآمدگی یا تورم	۳۱
شکل (۳-۲): شماتیکی از چگونگی کارکرد روش اول	۳۸
شکل (۴-۲): شماتیکی از چگونگی کارکرد روش دوم	۳۹
شکل (۵-۲): شماتیکی از چگونگی کارکرد روش سوم، گروه اول	۴۰
شکل (۶-۲): شماتیکی از چگونگی کارکرد روش سوم، گروه دوم	۴۰
شکل (۷-۲): شماتیکی از چگونگی کارکرد روش چهارم	۴۱

- شکل (۳-۱): تنش های وارد بر المان حجمی ۵۷
- شکل (۴-۱): نمایی از یک شریان رسوب گرفته با ۰.۴۵٪ کاهش سطح مقطع ۶۳
- شکل (۴-۲): هندسه‌ی تولید شده برای قسمت جامد ۶۴
- شکل (۴-۳): هندسه‌ی تولید شده برای قسمت سیال ۶۴
- شکل (۴-۴): شبکه‌ی تولید شده برای ناحیه جامد ۶۵
- شکل (۴-۵): شبکه‌ی تولید شده برای ناحیه سیال ۶۵
- شکل (۴-۶): نمودار تغییرات سرعت ورودی بازمان ۶۶
- شکل (۴-۷): توزیع سرعت بر روی $Z' = 1$ و در $\frac{t}{t_p} = 0.25$ ۶۸
- شکل (۴-۸): توزیع سرعت بر روی $Z' = 1$ و در $\frac{t}{t_p} = 0.75$ ۶۹
- شکل (۴-۹): توزیع سرعت بر روی $Z' = 4/3$ و در $\frac{t}{t_p} = 0.25$ ۷۰
- شکل (۴-۱۰): توزیع سرعت بر روی $Z' = 4/3$ و در $\frac{t}{t_p} = 0.75$ ۷۱
- شکل (۴-۱۱): توزیع تنش برشی در راستای محور طولی ۷۱
- شکل (۴-۱۲): نمایی از فشار ایجاد شده توسط سیال بر روی دیواره داخلی جامد ۷۲
- شکل (۴-۱۳): برشی در امتداد محور طولی و نمایش میزان توزیع تنش ون - میزز ۷۳
- شکل (۴-۱۴): برشی در امتداد محور طولی و نمایش میزان تغییرات کرنش ۷۳
- شکل (۴-۱۵): نمایی از سه صفحه‌ی اصلی در تصاویر سی تی آنژیوگرافی ۷۴
- شکل (۴-۱۶): هندسه‌ی اولیه‌ی وارد شده به نرم‌افزار میمیکس ۷۵
- شکل (۴-۱۷): نمایی از ایجاد هندسه‌ی سه بعدی شریان در نرم‌افزار میمیکس ۷۶
- شکل (۴-۱۸): نمایی از هندسه‌ی سه بعدی شریان در نرم‌افزار میمیکس ۷۶
- شکل (۴-۱۹): نمایی از هندسه‌ی سه بعدی شریان‌های مغز در نرم‌افزار میمیکس ۷۷
- شکل (۴-۲۰): نمایی از هندسه‌ی سه بعدی شریان‌های مغز ۷۷

- شکل (۴-۲۱): هندسه‌ی رگ دارای آنوریسم برای ناحیه‌ی سیال..... ۷۸
- شکل (۴-۲۲): هندسه‌ی رگ دارای آنوریسم برای ناحیه‌ی جامد..... ۷۹
- شکل (۴-۲۳): هندسه‌ی رگ دارای گیره در محل آنوریسم برای ناحیه‌ی سیال..... ۸۰
- شکل (۴-۲۴): شبکه‌ی تولیدشده برای هندسه‌ی سیال دارای آنوریسم..... ۸۱
- شکل (۴-۲۵): شبکه‌ی تولیدشده برای هندسه‌ی جامد دارای آنوریسم..... ۸۲
- شکل (۴-۲۶): شبکه‌ی تولیدشده برای هندسه‌ی رگ دارای کلیپس بر روی آنوریسم... ۸۲
- شکل (۴-۲۷): سیکل سرعت ورودی به شریان..... ۸۵
- شکل (۴-۲۸): توزیع تنش برشی بر روی کیسه‌ی آنوریسم در حالت دائمی..... ۸۷
- شکل (۴-۲۹): توزیع تنش برشی بر روی کیسه‌ی آنوریسم در حالت دائمی از نمایی
دیگر..... ۸۷
- شکل (۴-۳۰): توزیع فشار بر روی دیواره رگ آنوریسم دار در حالت دائمی..... ۸۸
- شکل (۴-۳۱): توزیع فشار بر روی دیواره رگ آنوریسم دار در حالت دائمی از نمایی
دیگر..... ۸۹
- شکل (۴-۳۲): بردار سرعت در حالت دائمی در برشی عمودی از کیسه‌ی آنوریسم..... ۹۰
- شکل (۴-۳۳): بردار سرعت در حالت دائمی در برشی افقی از کیسه‌ی آنوریسم..... ۹۱
- شکل (۴-۳۴): خطوط جریان رگ آنوریسم دار در حالت دائمی..... ۹۲
- شکل (۴-۳۵): خطوط جریان رگ آنوریسم دار در حالت دائمی..... ۹۲
- شکل (۴-۳۶): نمودار تغییرات بیشینه‌ی تنش برشی بر حسب زمان..... ۹۳
- شکل (۴-۳۷): نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار بر روی دیوار بر حسب زمان..... ۹۴
- شکل (۴-۳۸): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۱ ثانیه..... ۹۴
- شکل (۴-۳۹): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۲ ثانیه..... ۹۵
- شکل (۴-۴۰): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۳ ثانیه..... ۹۶
- شکل (۴-۴۱): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۴ ثانیه..... ۹۷
- شکل (۴-۴۲): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۵ ثانیه..... ۹۷

- شکل (۴-۴۳): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۶ ثانیه..... ۹۸
- شکل (۴-۴۴): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۷ ثانیه..... ۹۸
- شکل (۴-۴۵): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۸ ثانیه..... ۹۹
- شکل (۴-۴۶): هندسه‌ی رگ دارای آنوریسم و محل قرارگیری صفحه (الف)..... ۹۹
- شکل (۴-۴۷): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۱ ثانیه..... ۱۰۰
- شکل (۴-۴۸): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۲ ثانیه..... ۱۰۱
- شکل (۴-۴۹): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۳ ثانیه..... ۱۰۲
- شکل (۴-۵۰): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۴ ثانیه..... ۱۰۳
- شکل (۴-۵۱): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۵ ثانیه..... ۱۰۳
- شکل (۴-۵۲): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۶ ثانیه..... ۱۰۴
- شکل (۴-۵۳): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۷ ثانیه..... ۱۰۵
- شکل (۴-۵۴): الگوی جریان در صفحه (الف) در زمان ۰/۸ ثانیه..... ۱۰۵
- شکل (۴-۵۵): چگونگی الگوی جریان در هندسه‌ی سه بعدی رگ دارای آنوریسم..... ۱۰۶
- شکل (۴-۵۶): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در حالت دائمی..... ۱۰۷
- شکل (۴-۵۷): توزیع فشار بر روی دیوار شریان در حالت دائمی..... ۱۰۸
- شکل (۴-۵۸): بردار سرعت در سطح مقطعی افقی از قسمت جلویی شریان که گیره قرار گرفته است..... ۱۰۹
- شکل (۴-۵۹): خطوط جریان درون شریان دارای گیره در حالت دائمی..... ۱۱۰
- شکل (۴-۶۰): نمودار تغییرات بیشینه‌ی تنش برشی بر حسب زمان..... ۱۱۱
- شکل (۴-۶۱): نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار بر روی دیوار بر حسب زمان..... ۱۱۲
- شکل (۴-۶۲): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۱ ثانیه..... ۱۱۲
- شکل (۴-۶۳): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۲ ثانیه..... ۱۱۳
- شکل (۴-۶۴): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۳ ثانیه..... ۱۱۴
- شکل (۴-۶۵): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۴ ثانیه..... ۱۱۵

- شکل (۴-۶۶): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۵ ثانیه..... ۱۱۵
- شکل (۴-۶۷): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۶ ثانیه..... ۱۱۶
- شکل (۴-۶۸): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۷ ثانیه..... ۱۱۶
- شکل (۴-۶۹): توزیع تنش برشی بر روی دیواره رگ در زمان ۰/۸ ثانیه..... ۱۱۷
- شکل (۴-۷۰): هندسه‌ی رگ گیره دار و محل قرارگیری صفحه (ب)..... ۱۱۷
- شکل (۴-۷۱): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۱ ثانیه..... ۱۱۸
- شکل (۴-۷۲): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۲ ثانیه..... ۱۱۹
- شکل (۴-۷۳): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۳ ثانیه..... ۱۱۹
- شکل (۴-۷۴): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۴ ثانیه..... ۱۲۰
- شکل (۴-۷۵): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۵ ثانیه..... ۱۲۰
- شکل (۴-۷۶): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۶ ثانیه..... ۱۲۱
- شکل (۴-۷۷): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۷ ثانیه..... ۱۲۱
- شکل (۴-۷۸): الگوی جریان در صفحه (ب) در زمان ۰/۸ ثانیه..... ۱۲۲
- شکل (۴-۷۹): چگونگی الگوی جریان در هندسه‌ی سه بعدی رگ گیره دار..... ۱۲۲
- شکل (۴-۸۰): شیوه کوپل کردن One-Way..... ۱۲۴
- شکل (۴-۸۱): شیوه کوپل کردن Two-Way..... ۱۲۵
- شکل (۴-۸۲): نمایش وارد نمودن فشار از حل CFD..... ۱۲۶
- شکل (۴-۸۳): برشی از رگ آنوریسم دار و نمایش وارد نمودن فشار از حل CFD..... ۱۲۶
- شکل (۴-۸۴): نمایش میزان تغییر شکل حجمی در رگ دارای آنوریسم..... ۱۲۷
- شکل (۴-۸۵): تغییر شکل حجمی رگ دارای آنوریسم از نمایی دیگر..... ۱۲۷
- شکل (۴-۸۶): میزان تنش ون- میزز در برشی افقی از رگ دارای آنوریسم..... ۱۲۸
- شکل (۴-۸۷): میزان تغییرات کرنش در برشی افقی از رگ دارای آنوریسم..... ۱۲۹
- شکل (۴-۸۸): میزان تنش ون- میزز در رگ دارای آنوریسم از نمایی دیگر..... ۱۲۹
- شکل (۴-۸۹): میزان تغییرات کرنش در رگ دارای آنوریسم از نمایی دیگر..... ۱۳۰

- شکل (۹۰-۴): میزان تنش ون- میزز در کیسه ی آنوریسم از نمای بالا ۱۳۰
- شکل (۹۱-۴): میزان تغییرات کرنش در کیسه ی آنوریسم از نمای بالا ۱۳۱
- شکل (۹۲-۴): میزان تنش ون- میزز در کیسه ی آنوریسم از نمایی دیگر ۱۳۱
- شکل (۹۳-۴): میزان تغییرات کرنش در کیسه ی آنوریسم از نمایی دیگر ۱۳۲

فصل اول