بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

شبیه سازی عددی جریان خون در رگهای حاوی گرفتگی های شریانی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-جامد

رساله دکتری مهندسی مکانیک

محمود رضا صادقی

اساتید راهنما

دکتر ابراهیم شیرانی
دکتر سید غلامرضا اعتماد

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری مهندسی مکانیک تبدیل انرژی آقای محمودرضاصادقی

تحت عنوان

شبیه سازی عددی جریان خون در رگهای حاوی گرفتگی های شریانی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-جامد

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۰/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱-استاد راهنمای پایان‌نامه:	دکتر ابراهیم شیرانی
۲-استاد راهنمای پایان‌نامه:	دکتر سیدغلامرضااعتماد
۳-استاد مشاور پایان‌نامه:	دکتر محمد تفضلی شادپور
۴-استاد داور:	دکتر احمدرضاپیشه‌ور
۵-استاد داور:	دکتر محمود اشرفی‌زاده
۶-استاد داور:	دکتر ناصر فتورایی
۷-استاد داور:	دکتر بهمن وحیدی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد رضا سلیم پور

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله)متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فهرست مطالب ..... شش
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱-آسیب شناسی شریانی و اهمیت بررسی آن ۲
۱-۱-۱-مقدمه ۲
۱-۱-۲-سیستم گردش خون ۳
۱-۱-۲-۱- قلب ۳
۱-۱-۲-۲- نحوه جریان خون درون قلب ۳
۱-۱-۲-۳- رگهای خونی ۴
۱-۱-۲-۳-۱- شریانها ۴
۱-۱-۲-۳-۲- دسته بندی شریانها ۵
۱-۱-۳-آسیب شناسی بیماری آتروسکلروسیس ۶
۱-۱-۳-۱- بیماری آتروسکلروسیس ۶
۱-۱-۳-۲- پلاک آتروسکلروتیک ۷
۱-۱-۳-۲-۱- دسته بندی پلاک آتروسکلروتیک ۷
۱-۱-۳-۲-۲- پیدایش پلاک ۹
۱-۱-۳-۲-۳- پیدایش پلاک و پدیده بازسازی ۱۲
۱-۱-۳-۲-۴- پلاکها ازنظر شکل سطح مقطع ۱۳
۱-۱-۳-۲-۵- پلاک آسیب پذیر ۱۳
۱-۱-۳-۲-۶- فاکتورهای بیولوژیکی شکست پلاک ۱۳
۱-۲- بیومکانیک شریان ۱۶
۱-۲-۱-مقدمه ۱۶
۱-۲-۲-ارتباط همودینامیک و پاسخ شریانی ۱۷
۱-۲-۳-ارتباط بین کرنش ها(یا تنش های) دیواره و پاسخ شریان ۱۹
۱-۲-۴-تاثیر گرفتگی ها، خواص مکانیکی، خواص خون و پالسی بودن جریان ۲۰
۱-۲-۴-۱- وجود گرفتگی و تکرار گرفتگی ها ۲۰
۱-۲-۴-۱-۱- درصد گرفتگی و نوع گرفتگی ۲۲
۱-۲-۴-۱-۲- سختی پلاک ها ۲۲
۱-۲-۴-۲- خواص رئولوژیکی خون ۲۳
۱-۲-۴-۲-۱- اثر هماتوکریت بر ویسکوزیته خون ۲۳
۱-۲-۴-۲-۲- حرکت گلبولهای قرمز در رگها ۲۴
۱-۲-۴-۲-۳- اثر قطر رگ بر ویسکوزیته خون ۲۶

۱-۲-۴-۳- پالسی بودن جریان ۲۷
۱-۲-۵-فاکتور مکانیکی جدید ۲۸
۱-۳-مروری بر مطالعات انجام شده ۳۰
۱-۳-۱-مطالعات انجام شده با در نظر گرفتن رفتار غیرنیوتنی خون ۳۱
۱-۳-۱-۱- تجربی وآزمایشگاهی ۳۱
۱-۳-۱-۲- حل تحلیلی و عددی ۳۲
۱-۳-۲-مطالعات انجام شده بر روی گرفتگی های صلب ۳۴
۱-۳-۲-۱- تجربی وآزمایشگاهی ۳۴
۱-۳-۲-۲- حل تحلیلی و عددی ۳۵
۱-۳-۳-مطالعات انجام شده با درنظر گرفتن اندرکنش سیال-جامد ۳۸
۱-۳-۳-۱- مطالعات تحلیلی و عددی مربوط به رگ ساده ۳۸
۱-۳-۳-۲- مطالعات تجربی و آزمایشگاهی گرفتگی ها ۴۱
۱-۳-۳-۳- مطالعات تحلیلی و عددی گرفتگی ها ۴۲
۱-۴-چارچوب کلی تحقیق ۴۵

فصل دوم: بیان ریاضی- مکانیکی مسئله

۲-۱-مقدمه ۴۷
۲-۲-بیان ریاضی ۴۷
۲-۲-۱-مدلهای غیرنیوتنی خون ۴۹
۲-۳-مورفولوژی دیواره شریان ۵۱
۲-۳-۱-رفتار مکانیکی مواد تشکیل دهنده شریان ها ۵۱
۲-۳-۲-رفتار مکانیکی جداره شریان ها ۵۲
۲-۳-۲-۱- رفتار غیر خطی ۵۲
۲-۳-۲-۲- رفتار غیر ایزوتروپیک ۵۳
۲-۳-۲-۳- تراکم ناپذیر بودن ۵۳
۲-۳-۲-۴- تنش مانده ۵۴
۲-۳-۲-۵- خاصیت ویسکوالاستیک ۵۴
۲-۴- بیان ریاضی رفتار مکانیکی دیواره شریان ۵۴
۲-۴-۱-شرایط همبسته سازی سیال و جامد ۵۸

فصل سوم: روشهای حل مسائل اندرکنش

۳-۱-مقدمه ۶۰
۳-۲-الگوهای تقریب عددی معادلات سیال و جامد ۶۱
۳-۳-الگوریتم های همبسته سازی معادلات ۶۲
۳-۳-۱-الگوریتم همبسته سازی ضعیف ۶۳

۳-۳-۲-الگوریتم همبسته سازی قوی ۶۳
۳-۳-۲-۱- معرفی اپراتورهای نگاشت ۶۳

فصل چهارم: تاثیر گرفتگی های متقارن بر همودینامیک خون و پارامترهای دیواره

۴-۱-مقدمه ۶۷
۴-۲-شریان دارای گرفتگی ۶۷
۴-۲-۱-هندسه گرفتگی ها ۶۷
۴-۲-۲-شرایط مرزی ۶۸
۴-۲-۳-فرضیات ۶۹
۴-۲-۴-روش حل عددی ۷۰
۴-۲-۵-نتایج و بحث ۷۵
۴-۲-۵-۱- مقایسه نتایج حاصل از فرض نیوتنی و غیرنیوتنی در بررسی تاثیر حضور گرفتگی ها ۹۴

فصل پنجم: تاثیر گرفتگی های نامتقارن بر همودینامیک خون و پارامترهای دیواره

۵-۱-مقدمه ۱۰۲
۵-۲-شریان دارای گرفتگی ۱۰۲
۵-۲-۱-هندسه گرفتگی ها ۱۰۲
۵-۲-۲-شرایط مرزی ۱۰۳
۵-۲-۳-فرضیات ۱۰۴
۵-۲-۴-روش حل عددی ۱۰۴
۵-۲-۵-نتایج و بحث ۱۰۷

فصل ششم: تاثیر سخت شدن گرفتگی ها بر همودینامیک خون و پارامترهای دیواره

۶-۱-مقدمه ۱۲۵
۶-۲-شریان دارای گرفتگی ۱۲۶
۶-۲-۱-هندسه گرفتگی ها ۱۲۶
۶-۲-۲-شرایط مرزی ۱۲۷
۶-۲-۳-فرضیات ۱۲۷
۶-۲-۴-روش حل عددی ۱۲۷
۶-۲-۵-نتایج و بحث ۱۲۸

فصل هفتم: تاثیرانواع گرفتگی ها برهمودینامیک خون وپارامترهای دیواره درحالت جریان ناپایا

۷-۱-مقدمه ۱۴۱
۷-۲-شریان دارای گرفتگی ۱۴۲
۷-۲-۱-هندسه گرفتگی ها ۱۴۲
۷-۲-۲-شرایط مرزی ۱۴۲

۷-۲-۳-فرضیات ۱۴۲
۷-۲-۴-روش حل عددی ۱۴۴
۷-۲-۴-۱- ارزیابی الگوریتم عددی و صحت نتایج در حالت ناپایا ۱۴۴
۷-۲-۴-۱-۱- جریان آرام و ناپایای خون با فرض سیال نیوتنی در یک مجرای صلب ۱۴۴
۷-۲-۴-۱-۲- جریان آرام و ناپایای خون با فرض سیال غیرنیوتنی در یک مجرای صلب ۱۴۸
۷-۲-۴-۱-۳- حل عددی جریان ناپایا در یک مجرای صلب و الاستیک حاوی گرفتگی مشخص .. ۱۵۰
۷-۲-۵-نتایج و بحث ۱۵۵

فصل هشتم: بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر گرفتگی های متقارن بر روی تغییر پارامترهای همودینامیکی و همبستگی آنها

۸-۱-مقدمه ۲۳۲
۸-۲-سیستم آزمایشگاهی ۲۳۴
۸-۲-۱- پمپ جریان ساز نوسانی ۲۳۵
۸-۲-۲-لوله الاستیک ۲۳۶
۸-۲-۳-سیال مشابه خون ۲۳۷
۸-۲-۴-سیستم جمع آوری و پردازش اطلاعات ۲۳۸
۸-۲-۵-پروتکل انجام آزمایش ۲۴۱
۸-۲-۶-طراحی آزمایش ها ۲۴۲
۸-۳-مدلسازی عددی ۲۴۳
۸-۳-۱-هندسه گرفتگی ها ۲۴۳
۸-۳-۲-شرایط مرزی ۲۴۳
۸-۳-۳-فرضیات ۲۴۳
۸-۳-۴-روش حل عددی ۲۴۴
۸-۳-۵-نتایج و بحث ۲۴۴

فصل نهم: بررسی اثر گرفتگی های متوالی متقارن بر روی تغییر پارامترهای همودینامیکی و همبستگی آنها

۹-۱-مقدمه ۲۶۱
۹-۲-شریان دارای گرفتگی ۲۶۲
۹-۲-۱-هندسه گرفتگی ها ۲۶۲
۹-۲-۲-شرایط مرزی ۲۶۳
۹-۲-۳-فرضیات ۲۶۳
۹-۲-۴-روش حل عددی ۲۶۳
۹-۲-۵-نتایج و بحث ۲۶۴

فصل دهم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۰-۱- نتیجه‌گیری ۲۹۰
۱۰-۲- پیشنهادات ۲۹۴
پیوست ۲۹۵
مراجع ۲۹۷

فهرست علائم

عنوان ..... علامت	
بردار سرعت	V
اندیس سیال	f
اندیس جامد	s
دانسیته	ρ
ویسکوزیته	μ
ویسکوزیته ظاهری	μ'
ضریب اصلاح کننده نرخ برش	λ
میدان حل عددی	Ω
بردار مختصات نقطه	x
بردار سرعت شبکه سیال	W
تنش برشی سیال	τ
تنش تسلیم	τ_0
نرخ برش	$\dot{\gamma}$
ضریب پواسون.	ν
بردار جابجایی جامد	u
تانسور تنش کاوچی	σ
نیروی حجمی	f
تانسور کرنش های کوچک جامد	ε
تانسور تنش مرتبه ۲ پیولا-کریشوف	S
تانسور گرادیان تغییر شکل جامد	F
ژاکوبین	J
تانسور کرنش گرین-لاگرانژ	G
تانسور تغییر شکل کاوچی-گرین	B
ضخامت دیواره	h
تابع انرژی کرنشی	w
بردار نرمال سطح	n
هماتوکریت	H
دبی	Q
تعداد گره های شبکه	N
اپراتورهای تصویری	M
قطر شریان	D
شعاع شریان	R

شعاع قسمت گرفتگی	R_0
طول گرفتگی	L_{st}
مختصات محوری نقطه ماکزیمم گرفتگی	z_m
شعاع شریان در گلوگاه	$R_{0,t}$
فاصله محوری نقطه شروع گرفتگی	d
قطر شریان	D
ماکزیمم سرعت	$u_{\max}$
فشار	P
فرکانس ضربان	ω
عدد ومرسلی	α
زمان	t
مدت زمان پالس دبی	T

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ : ساختار قلب..... ۳
شکل ۱-۲ : مدار گردش خون..... ۴
شکل ۱-۳ : لایه های تشکیل دهنده دیواره شریان ۵
شکل ۱-۴: مراحل مختلف بیماری آتروسکلروسیس ۹
شکل ۱-۵ : نفوذ لیپوپروتئین ها به سلولهای اندوتلیال و شکل گیری پلاک آتروسکلروسیس..... ۱۱
شکل ۱-۶: ارتباط افزایش درصد گرفتگی با سطح مقطع مجرا در بازسازی شریان ۱۲
شکل ۱-۷: تحریکات مکانیکی سلولهای اندوتلیال ۱۷
شکل ۱-۸: پدیده شکست پلاک و بدنبال آن شکل گیری لخته..... ۲۰
شکل ۱-۹: وجود گرفتگی های مجاورهم درشریان کاروتیدمشترک وگرفتگی های متوالی در شریان های کرونری ۲۱
شکل ۱-۱۰: ایجاد یک رولکس در یک جریان برشی. ۲۴
شکل ۱-۱۱: مقایسه تغییرات خون معمولی، خون بدون فیبرینوژن(NA) وخون با گلبولهای سخت شده(HA)..... ۲۵
شکل ۱-۱۲: تغییرات ویسکوزیته خون با افزایش نرخ برش در هماتوکریت های مختلف ۲۵
شکل ۱-۱۳: تغییرات نرخ جریان بر حسب زمان در رگ کاروتید..... ۲۷
شکل ۱-۱۴: الگوی تنش وارده بر سلول های اندوتلیال در دیواره داخلی شریان ۲۸
شکل ۲-۱ : بخشی از شریان قابل اتساع. ۴۸
شکل ۲-۲ : نمونه ای از رابطه تنش-کرنش کلاژن و الاستین..... ۵۲
شکل ۲-۳ : نمونه ای از رابطه تنش-کرنش دیواره آئورت ۵۳
شکل ۳-۱: نگاشت بین مش های سیال و جامد..... ۶۴
شکل ۴-۱: شکل مدل های مورد استفاده : الف) گرفتگی ساده ب) گرفتگی متوالی مجاور هم..... ۶۹
شکل ۴-۲: مقایسه پروفیل های سرعت حاصل از حل عددی توسط نرم افزار ADINA و حل تحلیلی ۷۰
شکل ۴-۳ : هندسه گرفتگی ۴۵٪ که در آن mm 5/1 L= می باشد..... ۷۱
شکل ۴-۴ : نقاط TB-PB-SB-SE-PE-TE در مدل مورد مطالعه ۷۱
شکل ۴-۵: مقایسه تغییرات فشار در جهت طولی برای گرفتگی ساده ۸۰٪ ۷۲
شکل ۴-۶: مقایسه تغییرات تنش برشی درجهت طولی برای گرفتگی ساده ۸۰٪ ۷۲
شکل ۴-۷: مقایسه تغییرات جابجایی درجهت طولی برای گرفتگی ساده ۸۰٪ ۷۳
شکل ۴-۸: مقایسه تغییرات تنش فون میزز درجهت طولی برای گرفتگی ساده ۸۰٪ ۷۳
شکل ۴-۹: مقایسه تغییرات فشار درجهت طولی برای گرفتگی متوالی مجاور هم ۸۰٪ ۷۴
شکل ۴-۱۰: مقایسه تغییرات تنش برشی درجهت طولی برای گرفتگی متوالی مجاور هم ۸۰٪..... ۷۴
شکل ۴-۱۱: مقایسه تغییرات جابجایی درجهت طولی برای گرفتگی متوالی مجاور هم ۸۰٪..... ۷۵
شکل ۴-۱۲: مقایسه تغییرات تنش فون میزز درجهت طولی برای گرفتگی متوالی مجاور هم ۸۰٪..... ۷۵
شکل ۴-۱۳: پروفیل های سرعت محوری در موقعیت های قبل ازگرفتگی، گلوگاه و بعد از گرفتگی ساده ۷۰٪..... ۷۶
شکل ۴-۱۴: پروفیل های سرعت محوری در موقعیت های قبل ازگرفتگی، گلوگاه ها و بعد از گرفتگی متوالی ۷۰٪ ۷۷
شکل ۴-۱۵: مقایسه پروفیل های سرعت در ناحیه بعد از گرفتگی های ساده و متوالی مجاور هم ۷۰٪..... ۷۸

شکل ۴-۱۶: مقایسه تغییرات ماکزیمم سرعت برحسب درصد گرفتگی بین مدل های صلب و الاستیک ۷۹
شکل ۴-۱۷: مقایسه تغییرات ماکزیمم سرعت برحسب درصد گرفتگی بین گرفتگی های ساده و متوالی..... ۸۰
شکل ۴-۱۸: تغییرات فشار درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده ۸۱
شکل ۴-۱۹: تغییرات فشار درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی ۸۱
شکل ۴-۲۰: تغییرات فشار بالادست بر حسب درصد گرفتگی های ساده..... ۸۲
شکل ۴-۲۱: مقایسه تغییرات فشار برحسب درصد گرفتگی بین گرفتگی های ساده و متوالی..... ۸۲
شکل ۴-۲۲: مقایسه تغییرات جابجایی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده ۸۳
شکل ۴-۲۳: مقایسه تغییرات جابجایی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی..... ۸۳
شکل ۴-۲۴: محل ماکزیمم و مینیمم تنش معادل دیواره شریان در: الف)گرفتگی متوالی ۸۰٪ ب)گرفتگی ساده ۸۰٪ ۸۴
شکل ۴-۲۵: : مقایسه تغییرات الف) مینیمم تنشهای فون میزز ب)ماکزیمم تنش های فون میزز برحسب درصد گرفتگی..... ۸۵
شکل ۴-۲۶: تغییرات تنش های فون میزز درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده ۸۵
شکل ۴-۲۷: تغییرات تنش های فون میزز درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی..... ۸۶
شکل ۴-۲۸: محل ماکزیمم و مینیمم کرنش محیطی دیواره شریان در: الف)گرفتگی متوالی ۸۰٪ ب)گرفتگی ساده ۸۰٪ ۸۶
شکل ۴-۲۹: مقایسه تغییرات الف) مینیمم کرنشهای محیطی ب)ماکزیمم کرنش های محیطی برحسب درصد گرفتگی..... ۸۷
شکل ۴-۳۰: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده ۸۸
شکل ۴-۳۱: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی..... ۸۹
شکل ۴-۳۲: مقایسه تغییرات ماکزیمم تنش برشی برحسب درصد گرفتگی بین گرفتگی های ساده و متوالی..... ۸۹
شکل ۴-۳۳: مقایسه پروفیل های سرعت حاصل از حل عددی توسط نرم افزار ADINA درموقعیت های مختلف..... ۹۵
شکل ۴-۳۴: مقایسه ماکزیمم سرعت ها در صورت استفاده از فرض نیوتنی (الف و ج) ویا غیرنیوتنی(ب و د)..... ۹۶
شکل ۴-۳۵: مقایسه پروفیل های سرعت مربوط به مد ل های نیوتنی و غیرنیوتنی در ناحیه بعد از گرفتگی های ساده ۷۰٪ ۹۷
شکل ۴-۳۶: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین مدل نیوتنی و غیرنیوتنی در گرفتگی های ساده ۷۰٪ ۹۸
شکل ۴-۳۷: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین مدل نیوتنی و غیرنیوتنی در گرفتگی های متوالی ۷۰٪ ۹۹
شکل ۴-۳۸: مقایسه تغییرات فشار درجهت طولی بین مدل نیوتنی و غیرنیوتنی در گرفتگی های ساده ۷۰٪..... ۹۹
شکل ۴-۳۹: مقایسه تغییرات الف) مینیمم تنشهای فون میزز ب)ماکزیمم تنش های فون میزز برحسب درصد گرفتگی..... ۱۰۰
شکل ۴-۴۰: مقایسه تغییرات الف) مینیمم کرنشهای محیطی ب)ماکزیمم کرنش های محیطی..... ۱۰۰
شکل ۵-۱: شکل مدل های مورد استفاده : الف) گرفتگی ساده ب) گرفتگی متوالی مجاور هم..... ۱۰۳
شکل ۵-۲: مقایسه تغییرات فشار در جهت طولی برای گرفتگی ساده ۸۰٪ نامتقارن ۱۰۵
شکل ۵-۳: مقایسه تغییرات تنش برشی درجهت طولی برای گرفتگی ساده ۸۰٪ نامتقارن..... ۱۰۵
شکل ۵-۴: مقایسه تغییرات تنش فون میزز درجهت طولی برای گرفتگی ساده ۸۰٪ نامتقارن..... ۱۰۶
شکل ۵-۵: مقایسه تغییرات فشار درجهت طولی برای گرفتگی متوالی مجاور هم ۸۰٪ نامتقارن ۱۰۶
شکل ۵-۶: مقایسه تغییرات تنش برشی درجهت طولی برای گرفتگی متوالی مجاورهم ۸۰٪ نامتقارن..... ۱۰۷
شکل ۵-۷: مقایسه تغییرات تنش فون میزز درجهت طولی برای گرفتگی متوالی مجاورهم ۸۰٪ نامتقارن..... ۱۰۷
شکل ۵-۸ : ماکزیمم سرعت در گرفتگی های الف) ساده متقارن ب) ساده نامتقارن ج) متوالی متقارن د)متوالی نامتقارن..... ۱۰۸
شکل ۵-۹: مقایسه پروفیل های سرعت در ناحیه بعد از گرفتگی های ساده و متوالی مجاور هم ۷۰٪ نامتقارن..... ۱۰۹

شکل ۵-۱۰: تغییرات فشار درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده نامتقارن..... ۱۱۱
شکل ۵-۱۱: تغییرات فشار درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی..... ۱۱۱
شکل ۵-۱۲: : مقایسه تغییرات فشار برحسب درصد گرفتگی بین گرفتگی های ساده نامتقارن و متوالی متقارن..... ۱۱۲
شکل ۵-۱۳: : مقایسه تغییرات فشار برحسب درصد گرفتگی بین گرفتگی های ساده و متوالی نامتقارن..... ۱۱۲
شکل ۵-۱۴: محل ماکزیمم و مینیمم تنش معادل دیواره شریان در: الف)گرفتگی های ساده ب)گرفتگی های متوالی..... ۱۱۴
شکل ۵-۱۵: مقایسه تغییرات الف) مینیمم تنشهای فون میزز ب)ماکزیمم تنش های فون میزز برحسب درصد گرفتگی..... ۱۱۵
شکل ۵-۱۶: محل ماکزیمم و مینیمم کرنش محیطی دیواره شریان در: الف)گرفتگی های ساده ب)گرفتگی های متوالی..... ۱۱۶
شکل ۵-۱۷: مقایسه تغییرات الف) مینیمم کرنش های محیطی ب)ماکزیمم کرنش های محیطی برحسب درصد گرفتگی ۱۱۷
شکل ۵-۱۸: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده نامتقارن ۱۱۹
شکل ۵-۱۹: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی نامتقارن..... ۱۲۰
شکل ۵-۲۰: مقایسه تغییرات ماکزیمم تنش برشی برحسب درصد گرفتگی بین گرفتگی های ساده و متوالی متقارن و نامتقارن..... ۱۲۱
شکل ۵-۲۱: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین دو نوع گرفتگی ساده متقارن و نامتقارن ۷۰٪ ۱۲۴
شکل ۵-۲۲: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین دو نوع گرفتگی متوالی متقارن و نامتقارن ۷۰٪ ۱۲۴
شکل ۶-۱ : شکل مدل های مورد استفاده : الف) گرفتگی ساده ب) گرفتگی متوالی مجاور هم..... ۱۲۶
شکل ۶-۲: مقایسه ماکزیمم سرعت در گرفتگی های دارای پلاک: الف) نرمال ب) سخت ج) نرمال د) سخت ۱۲۸
شکل ۶-۳: تغییرات ماکزیمم سرعت برحسب درصد گرفتگی درگرفتگی های ساده..... ۱۲۹
شکل ۶-۴ : تغییرات ماکزیمم سرعت برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های متوالی. ۱۲۹
شکل ۶-۵:مقایسه تغییرات فشار درجهت طولی بین مدل پلاک نرمال و سخت درگرفتگی ساده ۷۰٪ ۱۳۰
شکل ۶-۶: مقایسه تغییرات فشار درجهت طولی بین مدل پلاک نرمال و سخت درگرفتگی متوالی ۷۰٪..... ۱۳۰
شکل ۶-۷: تغییرات فشار بالادست بر حسب درصد گرفتگی در گرفتگی های ساده..... ۱۳۱
شکل ۶-۸: تغییرات فشار برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های متوالی ۱۳۱
شکل ۶-۹: مقایسه تغییرات جابجایی درجهت طولی بین مدل پلاک نرمال و سخت در گرفتگی های ساده ۱۳۲
شکل ۶-۱۰: : مقایسه تغییرات جابجایی درجهت طولی بین مدل پلاک نرمال وسخت در گرفتگی های متوالی..... ۱۳۲
شکل ۶-۱۱: محل ماکزیمم و مینیمم تنش معادل دیواره شریان در: الف)گرفتگی متوالی ۸۰٪ ب)گرفتگی ساده ۸۰٪ ۱۳۳
شکل ۶-۱۲: تغییرات تنش های فون میزز درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده دارای پلاک سخت..... ۱۳۴
شکل ۶-۱۳: : تغییرات تنش های فون میزز درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی دارای پلاک سخت..... ۱۳۴
شکل ۶-۱۴: مقایسه تغییرات تنش های فون میزز درجهت طولی بین مدل پلاک نرمال و سخت در گرفتگی ساده ۷۰٪..... ۱۳۵
شکل ۶-۱۵: تغییرات ماکزیمم تنش های فون میزز برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های ساده..... ۱۳۶
شکل ۶-۱۶: تغییرات ماکزیمم تنش های فون میزز برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های متوالی مجاور هم ۱۳۶
شکل ۶-۱۷: تغییرات مینیمم تنش های فون میزز برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های ساده..... ۱۳۷
شکل ۶-۱۸: تغییرات مینیمم تنش های فون میزز برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های متوالی مجاور هم..... ۱۳۷
شکل ۶-۱۹: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین مدل پلاک نرمال و سخت در گرفتگی ساده ۷۰٪..... ۱۳۸
شکل ۶-۲۰: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین مدل پلاک نرمال و سخت در گرفتگی متوالی ۷۰٪..... ۱۳۸
شکل ۶-۲۱: تغییرات ماکزیمم تنش برشی برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های ساده..... ۱۳۹

شکل ۶-۲۲: تغییرات ماکزیمم تنش برشی برحسب درصد گرفتگی در گرفتگی های متوالی. ۱۳۹
شکل ۷-۱ : شکل موج دبی شریان کاروتید مشترک مورد استفاده در این تحقیق ۱۴۳
شکل ۷-۲: شکل موج فشار شریان کاروتید مشترک مورد استفاده در این تحقیق. ۱۴۳
شکل ۷-۳: شکل موج دبی اصلی و تقریب دبی به کمک هارمونیک های اصلی. ۱۴۶
شکل ۷-۴ : شکل موج گرادیان فشار بدست آمده از حل ومرسلی و حل عددی ۱۴۷
شکل ۷-۵: پروفیل های سرعت محوری بدست آمده از حل عددی و حل ومرسلی در چند فاز (phase=ωt)مختلف ۱۴۷
شکل ۷-۶: مقایسه پروفیل های سرعت محوری در مجرای صلب ساده با طول های مختلف و در زمان های مختلف ۱۴۹
شکل ۷-۷: شکل موج دبی مورد استفاده برای ارزیابی صحت نتایج ۱۵۰
شکل ۷-۸: مقایسه بین نتایج حاصل با نتایج لی و همکارانش و اندازه گیری های اجها و همکارانش ۱۵۱
شکل ۷-۹: مقایسه بین نتایج حاصل برای سرعت های محوری با نتایج لی و همکارانش در سه موقعیت بعد از مرکز گرفتگی. ۱۵۲
شکل ۷-۱۰: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین نتایج حاضر و نتایج لی و همکارانش در چهار زمان بی بعد ۱۵۳
شکل ۷-۱۱: مقایسه بین نتایج حاصل برای سرعت های محوری با نتایج لی و همکارانش. ۱۵۴
شکل ۷-۱۲: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین نتایج حاضر و نتایج لی و همکارانش در دو زمان بی بعد. ۱۵۴
شکل ۷-۱۳: بردارهای سرعت برای مدل ۵۰٪ گرفتگی ساده متقارن در زمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۵۶
شکل ۷-۱۴: نواحی جریان برگشتی در مدل ۳۰٪ گرفتگی ساده متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۵۷
شکل ۷-۱۵: نواحی جریان برگشتی در مدل ۵۰٪ گرفتگی ساده متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۵۸
شکل ۷-۱۶: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی ساده متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۵۹
شکل ۷-۱۷: نواحی جریان برگشتی در مدل ۷۰٪ گرفتگی ساده متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۶۰
شکل ۷-۱۸: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده متقارن در زمان های مختلف. ۱۶۲
شکل ۷-۱۹: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در سه موقعیت قبل، قله و انتهای گرفتگی های ساده : الف) ۵۰٪ ب) ۷۰٪ ۱۶۳
شکل ۷-۲۰: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در چند موقعیت بعد از انتهای گرفتگی های ساده : الف)۵۰٪ ب) ۷۰٪ ۱۶۴
شکل ۷-۲۱: پروفیل های متوسط تنش برشی و شاخص برش نوسانی در گرفتگی های ساده متقارن ۳۰٪، ۵۰ ٪ و) ۷۰٪ ۱۶۷
شکل ۷-۲۲: بردارهای سرعت برای مدل ۵۰٪ گرفتگی متوالی متقارن در زمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۶۸
شکل ۷-۲۳: نواحی جریان برگشتی در مدل ۳۰٪ گرفتگی های متوالی مجاور هم متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۶۹
شکل ۷-۲۴: نواحی جریان برگشتی در مدل ۵۰٪ گرفتگی های متوالی مجاور هم متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۷۰
شکل ۷-۲۵: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی های متوالی مجاور هم متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۷۱
شکل ۷-۲۶: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی دردرصدهای مختلف گرفتگی های متوالی متقارن درزمان های مختلف. ۱۷۲
شکل ۷-۲۷: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در چند موقعیت گرفتگی های متوالی متقارن: الف) ۳۰٪ ب) ۵۰٪ ۱۷۳
شکل ۷-۲۸: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در چند موقعیت بعد از انتهای گرفتگی های متوالی متقارن : الف)۳۰٪ ب) ۵۰٪ ۱۷۴
شکل ۷-۲۹: پروفیل های متوسط تنش برشی و شاخص برش نوسانی در گرفتگی های متوالی متقارن ۳۰٪ و۵۰ ٪ ۱۷۶
شکل ۷-۳۰: تغییرات تنش های محیطی دیواره برحسب زمان درنقاط مختلف گرفتگی : الف) ساده ۵۰٪ ب) متوالی ۵۰٪ ۱۷۶
شکل ۷-۳۱: تغییرات جابجایی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های ساده در زمان جریان ماکزیمم ۱۷۷
شکل ۷-۳۲: تغییرات جابجایی درجهت طولی در درصدهای مختلف گرفتگی های متوالی در زمان ماکزیمم جریان. ۱۷۷
شکل ۷-۳۳: بردارهای سرعت برای مدل ۵۰٪ گرفتگی ساده نا متقارن در زمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۷۹

شکل ۷-۳۴: نواحی جریان برگشتی در مدل ۳۰٪ گرفتگی ساده نامتقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۸۰
شکل ۷-۳۵: نواحی جریان برگشتی در مدل ۵۰٪ گرفتگی ساده نامتقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۸۱
شکل ۷-۳۶: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی ساده نامتقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۸۲
شکل ۷-۳۷: نواحی جریان برگشتی در مدل ۷۰٪ گرفتگی ساده نامتقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۸۳
شکل ۷-۳۸: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره پایینی گرفتگی های ساده نامتقارن در زمان های مختلف ۱۸۴
شکل ۷-۳۹: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره بالایی گرفتگی های ساده نامتقارن در زمان های مختلف ۱۸۵
شکل ۷-۴۰: : تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در چند موقعیت دیواره پایینی گرفتگی های نامتقارن ۵۰٪ و ۷۰٪..... ۱۸۸
شکل ۷-۴۱: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در چند موقعیت دیواره بالایی گرفتگی های نامتقارن ۵۰٪ و ۷۰٪..... ۱۸۸
شکل ۷-۴۲: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان دردیواره بالایی و پایینی گرفتگی ساده نامتقارن ۵۰٪ در فواصل مختلف..... ۱۹۱
شکل ۷-۴۳: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در دیواره بالایی و پایینی گرفتگی ساده نامتقارن ۷۰٪ در فواصل مختلف..... ۱۹۲
شکل ۷-۴۴: پروفیل های متوسط تنش برشی و شاخص برش نوسانی در دیواره پایینی گرفتگی های ساده نامتقارن ۳۰٪، ۵۰ ٪ و ۷۰٪ ۱۹۳
شکل ۷-۴۵: پروفیل های متوسط تنش برشی و شاخص برش نوسانی در دیواره بالایی گرفتگی های ساده نامتقارن ۳۰٪، ۵۰ ٪ و ۷۰٪ ۱۹۴
شکل ۷-۴۶: بردارهای سرعت برای مدل ۵۰٪ گرفتگی های متوالی نا متقارن در زمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S..... ۱۹۶
شکل ۷-۴۷: نواحی جریان برگشتی در مدل ۳۰٪ گرفتگی های متوالی نامتقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S. ۱۹۷
شکل ۷-۴۸: نواحی جریان برگشتی در مدل ۵۰٪ گرفتگی های متوالی نامتقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۹۸
شکل ۷-۴۹: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی های متوالی نامتقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S ۱۹۹
شکل ۷-۵۰: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره پایینی گرفتگی های متوالی نامتقارن در زمان های مختلف..... ۲۰۰
شکل ۷-۵۱: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره بالایی گرفتگی های متوالی نامتقارن در زمان های مختلف..... ۲۰۱
شکل ۷-۵۲: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در چند موقعیت دیواره پایینی گرفتگی های متوالی نامتقارن ۳۰٪ و ۵۰٪ ۲۰۳
شکل ۷-۵۳: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در چند موقعیت دیواره بالایی گرفتگی های متوالی نامتقارن ۳۰٪ و ۵۰٪..... ۲۰۴
شکل ۷-۵۴: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان دردیواره بالایی و پایینی گرفتگی متوالی نامتقارن ۵۰٪ در فواصل مختلف ۲۰۵
شکل ۷-۵۵: پروفیل های متوسط تنش برشی و شاخص برش نوسانی در دیواره پایینی گرفتگی های متوالی نامتقارن ۳۰٪ و ۵۰ ٪..... ۲۰۶
شکل ۷-۵۶: پروفیل های متوسط تنش برشی و شاخص برش نوسانی در دیواره پایینی گرفتگی های متوالی نامتقارن ۳۰٪ و ۵۰ ٪..... ۲۰۷
شکل ۷-۵۷: مقایسه تغییرات تنش های محیطی دیواره برحسب زمان درنقاط مختلف گرفتگی نامتقارن ساده ومتوالی ۵۰٪..... ۲۰۸
شکل ۷-۵۸: مقایسه تغییرات تنش های محیطی دیواره درانتهای گرفتگی های متقارن و نامتقارن ساده و متوالی ۵۰٪ ۲۰۸
شکل ۷-۵۹: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی های ساده متقارن درزمان های ۰/۱۴۱S الی ۰/۴۵۷S و با فرض سیال نیوتنی ۲۱۰
شکل ۷-۶۰: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی های متوالی متقارن درزمان هایS ۰/۱۴۱ الی ۰/۴۵۷S با فرض سیال نیوتنی..... ۲۱۱
شکل ۷-۶۱: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی های ساده نامتقارن درزمان هایS ۰/۱۴۱ الی ۰/۴۵۷S و با فرض سیال نیوتنی..... ۲۱۲
شکل ۷-۶۲: نواحی جریان برگشتی در مدل ۶۰٪ گرفتگی های متوالی نا متقارن درزمان های مختلف و با فرض سیال نیوتنی..... ۲۱۳
شکل ۷-۶۳: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان در دیواره بالایی و پایینی گرفتگی ساده نامتقارن ۷۰٪ در فواصل مختلف..... ۲۱۴
شکل ۷-۶۴: : تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در گرفتگی متوالی متقارن ۶۰٪ و در زمان های مختلف ۲۱۵
شکل ۷-۶۵: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره پایینی گرفتگی ساده نا متقارن ۶۰٪ در زمان های مختلف..... ۲۱۶
شکل ۷-۶۶: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره بالایی گرفتگی ساده نامتقارن ۶۰٪ در زمان های مختلف..... ۲۱۷
شکل ۷-۶۷: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره پایینی گرفتگی متوالی نامتقارن ۶۰٪ در زمان های مختلف..... ۲۱۸

شکل ۷-۶۸: تغییرات تنش های برشی درجهت طولی در دیواره بالایی گرفتگی متوالی نامتقارن ۶۰٪ در زمان های مختلف..... ۲۱۹
شکل ۷-۶۹: مقایسه تغییرات تنش های برشی برحسب زمان بین مدل نیوتنی و غیرنیوتنی خون در گرفتگی ساده ۶۰٪ ۲۲۰
شکل ۷-۷۰: مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین مدل نیوتنی و غیرنیوتنی خون درگرفتگی متوالی ۶۰٪ ۲۲۰
شکل ۷-۷۱: مقایسه تغییرات تنش های برشی برحسب زمان بین مدل نیوتنی و غیرنیوتنی خون در گرفتگی ساده نامتقارن ۶۰٪ ۲۲۱
شکل ۷-۷۲: : مقایسه تغییرات تنش های برشی درجهت طولی بین مدل نیوتنی و غیرنیوتنی خون در گرفتگی متوالی نامتقارن ۶۰٪.. ۲۲۱
شکل ۷-۷۳: تغییرات تنش های برشی برحسب زمان دردیواره پایینی گرفتگی ساده نامتقارن ۳۰٪ براساس دونوع شرط مرزی..... ۲۲۳
شکل ۷-۷۴:. تغییرات تنش های برشی برحسب زمان دردیواره بالایی گرفتگی ساده نامتقارن ۳۰٪ براساس دونوع شرط مرزی..... ۲۲۴
شکل ۷-۷۵: تغییرات تنش های محیطی برحسب زمان دردیواره پایینی گرفتگی ساده نامتقارن ۳۰٪ براساس دونوع شرط مرزی..... ۲۲۵
شکل ۷-۷۶: تغییرات تنش های محیطی برحسب زمان دردیواره پایینی گرفتگی ساده نامتقارن ۳۰٪ براساس دونوع شرط مرزی ۲۲۶
شکل ۷-۷۷: تغییرات زاویه فاز تنش (SPA) درجهت طولی در گرفتگی متقارن : الف) ساده ب) متوالی..... ۲۲۷
شکل ۷-۷۸: تغییرات زاویه فاز تنش درجهت طولی در امتداد دیواره پایینی و بالایی گرفتگی نامتقارن ساده ومتوالی ۳۰٪..... ۲۳۱
شکل ۸-۱ : نمای شماتیک سیستم آزمایشگاهی ۲۳۴
شکل ۸-۲: شکل موج دبی شریان کرونری راست مورد استفاده در این تحقیق..... ۲۳۶
شکل ۸-۳: مقایسه بین ویسکوزیته سیال مشابه خون و خون واقعی ۲۳۸
شکل ۸-۴: نمایی از ترانسدیودسرهای MLT0670..... ۲۳۹
شکل ۸-۵ : نقشه فنی ترانسدیودسرهای MLT0670..... ۲۳۹
شکل ۸-۶: نحوه اتصال ترانسدیودسرها به لوله الاستیک..... ۲۴۰
شکل ۸-۷: پنجره خروجی نتایج، نمایش دهنده موج های فشار و گرادیان فشار..... ۲۴۰
شکل ۸-۸: شمای کلی سیستم آزمایشگاهی ۲۴۱
شکل ۸-۹: نحوه قرار گیری پوشش خارجی برای ایجاد گرفتگی ها..... ۲۴۲
شکل ۸-۱۰: فشار ورودی (P1) و خروجی (P2) در درصد گرفتگی های: الف)۳۰٪ ب) ۴۰٪ ج) ۵۰٪ د) ۶۰٪ ه) ۷۰٪ و و)۸۰٪ ۲۴۵
شکل ۸-۱۱: مقایسه مقادیر متوسط زمانی فشار ورودی بر حسب درصد گرفتگی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی..... ۲۴۶
شکل ۸-۱۲: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی فشار بالادست در گرفتگی ۳۰٪..... ۲۴۷
شکل ۸-۱۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی فشار بالادست در گرفتگی ۵۰٪..... ۲۴۷
شکل ۸-۱۴: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی فشار بالادست در گرفتگی ۷۰٪..... ۲۴۸
شکل ۸-۱۵: پروفیل های سرعت محوری در گرفتگی ۷۰٪ و۵۰٪ و زمان های$t/T=0.25$ و $t/T=0.53$..... ۲۴۹
شکل ۸-۱۶: تنش های برشی در سه موقعیت قبل، قله و بعد از گرفتگی ۳۰٪..... ۲۵۰
شکل ۸-۱۷: تنش های برشی در سه موقعیت قبل، قله و بعد از گرفتگی ۵۰٪..... ۲۵۰
شکل ۸-۱۸: تنش های برشی در سه موقعیت قبل، قله و بعد از گرفتگی ۷۰٪..... ۲۵۱
شکل ۸-۱۹:. تنش های محیطی دیواره در قبل از گرفتگی الف) ۳۰٪ ب)۵۰٪ ج) ۷۰٪.و قله گرفتگی د) ۳۰٪ ه)۵۰٪) و ۷۰٪..... ۲۵۲
شکل ۸-۲۰: تنش های محیطی دیواره در بعد از گرفتگی الف) ۳۰٪ ب) ۵۰٪ ج) ۷۰٪..... ۲۵۳
شکل ۸-۲۱: پروفیل های متوسط تنش برشی، شاخص برش نوسانی و زاویه فاز تنش در راستای محوری در گرفتگی ۳۰٪ ۴۰٪..... ۲۵۷
شکل ۸-۲۲: پروفیل های متوسط تنش برشی، شاخص برش نوسانی و زاویه فاز تنش در راستای محوری در گرفتگی ۵۰٪ و ۶۰٪..... ۲۵۸
شکل ۸-۲۳: پروفیل های متوسط تنش برشی، شاخص برش نوسانی و زاویه فاز تنش در راستای محوری در گرفتگی ۷۰٪..... ۲۵۹

شکل ۸-۲۴: مقایسه توزیع های زاویه فاز تنش در راستای محوری در درصد های مختلف گرفتگی..... ۲۶۰
شکل ۹-۱ : فشار ورودی (P1) و خروجی (P2) در گرفتگی های متوالی: الف)۳۰٪ ب) ۴۰٪ ج) ۵۰٪ د) ۶۰٪ ه) ۷۰٪ و و)۸۰٪ ۲۶۵
شکل ۹-۲: فشار ورودی (P1) و خروجی (P2) در گرفتگی های متوالی: الف)۷۰٪-۵۰٪ ب)۵۰٪-۷۰٪ ج) ۵۰٪ -۵۰٪..... ۲۶۶
شکل ۹-۳: مقایسه مقادیر متوسط زمانی فشار ورودی بر حسب درصد گرفتگی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی..... ۲۶۷
شکل ۹-۴ : مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی فشار بالادست در گرفتگی های متوالی ۳۰٪ ۲۶۸
شکل ۹-۵: نتایج آزمایشگاهی و عددی فشار بالادست در گرفتگی های متوالی ۵۰٪..... ۲۶۸
شکل ۹-۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی فشار بالادست در گرفتگی ۷۰٪..... ۲۶۹
شکل ۹-۷: کانتورهای سرعت محوری و محل ماکزیمم سرعت در گرفتگی های متوالی : الف) ۳۰٪ ب) ۵۰٪ ج) ۷۰٪..... ۲۶۹
شکل ۹-۸: کانتورهای سرعت محوری و محل ماکزیمم سرعت در گرفتگی های متوالی ۵۰٪ : الف) بدون فاصله ب) بافاصله..... ۲۷۰
شکل ۹-۹: کانتورهای سرعت محوری و محل ماکزیمم سرعت در گرفتگی های متوالی : الف) ۷۰٪-۵۰٪ ب) ۵۰٪-۷۰٪ ۲۷۰
شکل ۹-۱۰: خطوط جریان در زمان ماکزیمم جریان در گرفتگی های متوالی: الف) ۳۰٪ ب) ۵۰٪ ج) ۷۰٪..... ۲۷۲
شکل ۹-۱۱: خطوط جریان در زمان ماکزیمم جریان در گرفتگی های متوالی: الف) ۷۰٪-۵۰٪ ب) ۵۰٪-۷۰٪..... ۲۷۲
شکل ۹-۱۲: خطوط جریان در گرفتگی های متوالی ۵۰٪ : الف) بدون فاصله ب) بافاصله دو برابر قطر ۲۷۳
شکل ۹-۱۳: تنش های برشی در سه موقعیت قبل، قله و بعد از اولین گرفتگی و دومین گرفتگی..... ۲۷۴
شکل ۹-۱۴:. تنش های محیطی دیواره در قبل و قله اولین گرفتگی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪..... ۲۷۵
شکل ۹-۱۵:. تنش های محیطی دیواره در قبل و قله دومین گرفتگی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪..... ۲۷۶
شکل ۹-۱۶:. تنش های محیطی دیواره در بعد از اولین و دومین گرفتگی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪. ۲۷۷
شکل ۹-۱۷: مقایسه تنش های محیطی دیواره در قله گرفتگی های متوالی یکسان ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪..... ۲۷۸
شکل ۹-۱۸: مقایسه تغییرات زاویه فاز تنش در راستای محوری گرفتگی های متوالی یکسان ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪..... ۲۷۹
شکل ۹-۱۹: مقایسه تغییرات زاویه فاز تنش در گرفتگی ساده ۵۰٪ وگرفتگی های متوالی ۵۰٪-۵۰٪ و ۷۰٪-۵۰٪ ۲۸۲
شکل ۹-۲۰: مقایسه تنش های محیطی دیواره در قله گرفتگی های ساده ۵۰٪ ومتوالی ۵۰٪- ۵۰٪ و ۷۰٪-۵۰٪..... ۲۸۳
شکل ۹-۲۱: مقایسه تغییرات زاویه فاز تنش بر روی گرفتگی دوم درگرفتگی های متوالی ۵۰٪- ۵۰٪ و ۷۰٪-۵۰٪..... ۲۸۴
شکل ۹-۲۲: مقایسه تغییرات زاویه فاز تنش در راستای محوری گرفتگی های متوالی ۵۰٪-۵۰٪ و ۵۰٪-۷۰٪..... ۲۸۵
شکل ۹-۲۳: پروفیل های متوسط تنش برشی، شاخص برش نوسانی و زاویه فاز تنش در گرفتگی های متوالی ۳۰٪ و ۵۰٪ ۲۸۸
شکل ۹-۲۴: پروفیل های متوسط تنش برشی، شاخص برش نوسانی و زاویه فاز تنش در گرفتگی های متوالی ۷۰٪ و ۵۰٪ ۲۸۹

فهرست جداول

جدول ۴-۱: مقایسه نتایج برای جابجایی ها ۷۱
جدول ۷-۱ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای گرفتگی ساده متقارن ۳۰٪ ۱۶۱
جدول ۷-۲ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای گرفتگی ساده متقارن ۵۰٪ ۱۶۱
جدول ۷-۳ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای گرفتگی ساده متقارن ۶۰٪ ۱۶۱
جدول ۷-۴ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای گرفتگی ساده متقارن ۷۰٪ ۱۶۱
جدول ۷-۵: ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای گرفتگی های متوالی متقارن ۳۰٪ ۱۷۳
جدول ۷-۶ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای گرفتگی های متوالی متقارن ۵۰٪ ۱۷۳
جدول ۷-۷ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای گرفتگی های متوالی متقارن ۶۰٪ ۱۷۳
جدول ۷-۸ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره پایینی گرفتگی ساده نا متقارن ۳۰٪ ۱۸۶
جدول ۷-۹ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره بالایی گرفتگی ساده نا متقارن ۳۰٪ ۱۸۶
جدول ۷-۱۰ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره پایینی گرفتگی ساده نا متقارن ۵۰٪ ۱۸۶
جدول ۷-۱۱: ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره بالایی گرفتگی ساده نا متقارن ۵۰٪ ۱۸۶
جدول ۷-۱۲: ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره پایینی گرفتگی ساده نا متقارن ۶۰٪ ۱۸۷
جدول ۷-۱۳: ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره بالایی گرفتگی ساده نا متقارن ۶۰٪ ۱۸۷
جدول ۷-۱۴ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره پایینی گرفتگی ساده نا متقارن ۷۰٪ ۱۸۷
جدول ۷-۱۵: ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی در زمان های مختلف برای دیواره بالایی گرفتگی ساده نا متقارن ۷۰٪ ۱۸۷
جدول ۷-۱۶: ماکزیمم تنش برشی وطول نواحی جریان برگشتی درزمان های مختلف دردیواره پایینی گرفتگیهای متوالی نا متقارن ۳۰٪ ۲۰۲
جدول ۷-۱۷: ماکزیمم تنش برشی وطول نواحی جریان برگشتی درزمان های مختلف دردیواره بالایی گرفتگیهای متوالی نا متقارن ۳۰٪ ۲۰۲
جدول ۷-۱۸: ماکزیمم تنش برشی وطول نواحی جریان برگشتی درزمان های مختلف دردیواره پایینی گرفتگیهای متوالی نا متقارن ۵۰٪ ۲۰۲
جدول ۷-۱۹: ماکزیمم تنش برشی وطول نواحی جریان برگشتی درزمان های مختلف دردیواره بالایی گرفتگیهای متوالی نا متقارن ۵۰٪ ۲۰۲
جدول ۷-۲۰: ماکزیمم تنش برشی وطول نواحی جریان برگشتی درزمان های مختلف دردیواره پایینی گرفتگیهای متوالی نا متقارن ۶۰٪ ۲۰۲
جدول ۷-۲۱: ماکزیمم تنش برشی وطول نواحی جریان برگشتی درزمان های مختلف دردیواره بالایی گرفتگیهای متوالی نا متقارن ۶۰٪ ۲۰۳
جدول ۷-۲۲ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی درگرفتگی ساده متقارن ۶۰٪ بااستفاده از فرض سیال نیوتنی ۲۰۹
جدول ۷-۲۳ : ماکزیمم تنش برشی و طول نواحی جریان برگشتی درگرفتگی ساده متقارن ۶۰٪ بااستفاده از فرض صلب بودن دیواره ۲۲۲
جدول ۸-۱ : ضرایب مدل اصلاح شده کیسن برای برای سیال مشابه خون ۲۳۷
جدول ۸-۲: مشخصات فنی ترانسدیودسرهای MLT0670 ..... ۲۳۹
جدول ۸-۳: بررسی وابستگی پارامترها به تعداد المان های شبکه سیال و جامد در مدل شریان با گرفتگی ۲۴۴
جدول ۸-۴: مقایسه موقعیت هایی که در آنجا زاویه فاز تنش ۱۰۰° - و یا متوسط زمانی تنش برشی ۱Paمی باشد ۲۶۰
جدول ۹-۱: بررسی وابستگی پارامترها به تعداد المان های شبکه سیال و جامد در مدل شریان با گرفتگی ۲۶۴
جدول ۹-۲: مقایسه موقعیت هایی که در آنجا زاویه فاز تنش ۱۰۰° - و یا متوسط زمانی تنش برشی ۱Pa می باشد ۲۸۷

چکیده:

اعتقاد بر آن است که تغییرات پارامترهای همودینامیکی نظیر تنش های برشی ناشی از عبور جریان خون و تنش ها (یا کرنش های) محیطی دیواره ناشی از فشار خون از طریق بارگذاری سلول های اندوتلیال در شکل گیری و توسعه بیماریهایی نظیر آتروسکلروسیس دخالت دارند. با شروع و توسعه بیماری آتروسکلروسیس، سطح مقطع داخلی شریان کاهش یافته، گرفتگی های شریانی شکل گرفته و موجب پیچیدگی الگوهای همودینامیکی می شوند. در حالیکه برخی از مطالعات صرفا پارامترهای همودینامیکی نظیر متوسط زمانی تنش برشی و شاخص برش نوسانی (OSI) را مرتبط با ضخیم شدگی و شروع بیماری دیواره دانسته اند، مطالعات دیگری نیز وجود دارند که در آنها ارتباطی بین الگوهای تنش برشی و ضخیم شدگی دیواره نمی توان یافت. یکی از دلایل این اختلاف را می توان تمرکز این مطالعات صرفا بر روی تنش برشی سیال دانست. زیرا برخی از مطالعات نشان داده اند که پاسخ های مورفولوژیکی و بیوشیمیایی سلول های اندوتلیالی که تحت تاثیر همزمان تنش برشی وتنش (یا کرنش) محیطی (که می توان توسط پارامتر همودینامیکی زاویه فاز تنش آنرا بیان نمود) قرار می گیرند، متفاوت با پاسخ آنها به تک تک تنش هاست. از طرف دیگر پیچیدگی الگوهای همودینامیکی نیز خود ممکن است بر روی همبستگی پارامترهای همودینامیکی تاثیرگذار باشد. لذا در این رساله تاثیر افزایش پیچیدگی الگوهای همودینامیکی بر روی تغییرات زاویه فاز تنش و همبستگی آن با پارامترهایی نظیر متوسط زمانی تنش برشی و شاخص برش نوسانی از طریق افزایش درصد و تعداد گرفتگی ها و با استفاده از روش های عددی مبتنی بر در نظر گرفتن اندرکنش سیال–جامد و استفاده از فرض سیال غیرنیوتنی مطالعه شده است. برای شبیه سازی رفتار گذرا در سیستم شریانی از داده های آزمایشگاهی برای شریان کرونری استفاده شده است. جهت بدست آوردن داده های آزمایشگاهی یک سیستم آزمایشگاهی با توانایی شبیه سازی شرایطی نزدیک به شرایط فیزیولوژیک جریان خون در شریان طراحی شده است. شبیه سازی های عددی نیز توسط نرم افزار ADINA 8.2 انجام شده است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهند که هر عاملی که موجب افزایش پیچیدگی الگوهای همودینامیکی شود، می تواند بر همبستگی پارامترهای همودینامیکی نظیر متوسط زمانی تنش برشی، شاخص برش نوسانی و زاویه فاز تنش تاثیر گذار باشد به گونه ای که افزایش پیچیدگی جریان می تواند منجر به ایجاد نواحی شود که اگرچه در آنجا متوسط تنش برشی بیشتر از ۱ Pa و شاخص برش نوسانی مساوی صفر است، حال آنکه زاویه فاز تنش مقدار منفی بزرگی دارد و نشان می دهد که حتی در این نواحی امکان توسعه بیماری وجود دارد. علاوه براین نتایج نشان می دهند که رشد هریک از پلاک های متوالی با تاثیر گذاری بر روی زاویه فاز تنش می تواند بر پایداری و یا ناپایداری پلاک دیگر تاثیر بگذارد. همچنین از آنجا که تغییرات هندسی ناشی از وجود پلاک ها و تعامل سیال (خون) با جامد (یعنی پلاک و دیواره) می تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در میدان سرعت و فشار و در نتیجه تنش برشی سیال و تنش (یا کرنش) دیواره شود، تاثیر حضور گرفتگی های متوالی مجاورهم بر روی تغییرات پارامتر های همودینامیکی نظیر تنش برشی سیال، تنش (یا کرنش) دیواره و زاویه فاز تنش مطالعه شده است. در این راستا ابتدا تاثیر هندسه گرفتگی ها، افزایش درصد و تعداد آنها و نیز تاثیر سخت شدن پلاک ها بر روی نحوه تغییرات تنش های برشی سیال و تنش ها (یا کرنش های) دیواره در حالت پایا و سپس تاثیر برخی از این فاکتورها بر روی تغییرات پارامترهای همودینامیکی نظیر متوسط زمانی تنش برشی، شاخص برش نوسانی و زاویه فاز تنش با استفاده از شکل موج های فشار و جریان پالسی فیزیولوژیکی موجود برای شریان کاروتید در حالت ناپایا مطالعه شده است. نتایج بدست آمده برای انواع گرفتگی ساده و متوالی مجاورهم متقارن و نامتقارن در هر دو حالت جریان پایا وناپایا نشان می دهند که به دلیل کاهش تنش برشی، افزایش شاخص برش نوسانی و منفی تر شدن زاویه فاز تنش در ناحیه پایه پلاک های نامتقارن، این نوع پلاک ها و مخصوصا پلاک های متوالی مجاورهم نامتقارن در مقایسه با پلاک های متقارن بیشتر مستعد ناپایداری و به دلیل پایین بودن مینیمم تنش های دیواره بیشتر مستعد متراکم شدن و در نتیجه شکست هستند. در صورت رشد این نوع پلاک ها به درصدهای بالای گرفتگی نیز ماکزیمم تنش برشی در آنها بیشتر از پلاک های متقارن بوده و لذا بیشتر مستعد سایش و درنتیجه ایجاد ترومبوس هستند. همچنین بزرگتر بودن ناحیه جریان برگشتی، بزرگتر بودن شاخص برش نوسانی بعد از دومین نقطه ماکزیمم این شاخص و نیز منفی تر بودن زاویه فاز تنش در ناحیه بعد از پلاک های نامتقارن و مخصوصا پلاک های متوالی نامتقارن نشان دهنده بالاتر بودن احتمال توسعه پلاک و شکل گیری پلاکی جدید در ناحیه بعد از پلاک های نامتقارن در مقایسه با پلاک های متقارن است. نتایج بررسی تاثیر سخت شدن پلاک ها نیز نشان دهنده افزایش شدید تمرکز تنش در مرز پلاک ودیواره ، کاهش تنش حداقل، افزایش تنش برشی در قله گرفتگی وافزایش فشار در پروکسیمال گرفتگی نسبت به حالت نرمال می باشد که شرایط نامطلوبی نسبت به حالت نرمال است.