۱۳۷۸ /۹/ ۲۰

مرکز اطلاعات ... علمی ایران

بسم الله الرحمن الرحیم

مطالعه اثـــرات خـــواص غیـر نیـــوتنی خـون بر مشخصـــات جـــریان در آنـــوریسم ها

بـوسیلهٔ
رضـا کمـالی

پـایـان نامه

ارائه شده به دانشکده تحصیلات تکمیلی بعنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای اخـذ درجـه کارشنـاسـی ارشـد

در رشتهٔ
مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)
از
دانشگاه شیراز
شیراز، ایران

۴۴۹۰

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه : عـالی
امضـاء اعضاء کمیته پایان نامه :

دکتـــر محمد صادق معیـری، استاد مهندسی مکانیک (رئیس کمیته) .....

دکتـــر محمد مهدی علیشاهی، دانشیار مهندسی مکانیک .....

دکتـــر همـــایـون امـــــداد، استادیار مهندسی مکانیک .....

خـــرداد ۱۳۷۸

۲۷۰۷۶

تقدیم به همسر عزیزم

۲۷۰۷۹

سپاسگـزاری

اکنـون که به یاری ایـزد منـان ایـن رسـاله به پایان رسـیده اسـت برخـود لازم مـی دانـم کـه از اسـتاد گرانقـدر جنـاب آقـای دکـتر معیـری بـه خـاطر زحمـات و راهنمایی های ارزندهٔ شان صمیمانه تشـکر و قدردانی نمایم. شـخصیت والای انسـانی و علمـی ایشـان بـدون هـیچ اغراقـی تـأثیری بـس عمیـق بـر مـن گذاشـته و بـی شـک آموخته هایم در این خصوص بسیار ارزشمندتر از اندوخته های تحصیلی ام خواهـد بـود و از این جهت نیز مراتب تشـکر و سپاسگزاری عمیق خود را از ایشان اعلام می دارم.

همچنین از اساتید محترم کمیتـه پایـان نامـه جنـاب آقـای دکـتر علیشـاهی و جنـاب آقـای دکـتر امـداد بـه خـاطر مساعدتهایشـان در جهـت انجـام ایـن تحقیـق سپاسگزار و متشکرم.

چکیـــــده

مطالعهٔ اثرات خواص غیر نیوتنی خون بر مشخصات جریان در آنوریسم ها

توسط

رضا کمالی

بیماری اتساع عروق، یا گشادشدگی موضعی سطح مقطع رگ، که اغلب آئـورت یـا سـرخ رگ ششـی بـه آن مبتـلا مـی شـود، را اصطلاحـا" آنوریسـم (Aneurysm) می گویند. پدیدهٔ مذکور در اثر ضعف یا نقـص جـدار رگ در نتیجـهٔ بیمـاری یـا آسـیب فیزیکی، بوجود می آید.

در هرصـورت، علـت هرچـه باشـد، رابطـهٔ بیـن مشـخصات جریـان خـون در Aneurysm ها و درصد پیشرفت بیماری از نظر پزشکی بسیار اهمیت دارد. زیـرا عقیـده بر این است که با مطالعهٔ تغییراتی که با شـروع بیمـاری در مشـخصات جریـان خـون از قبیل توزیع فشار و تنش برشی در جداررگ، رخ می دهـد، پزشـکان مـی تواننـد مقـدار پیشرفت بیماری را تشخیص داده و با داشتن اطلاعات کافی از رفتار جریـان، نسـبت بـه علاج بیماری توسط دارو و یا با اجرای عمـل Bypass اتخـاذ تصمیـم نمـایند. بنـابراین مطالعه مشخصات جریان خون در Aneurysm ها از اهمیت خاصی برخوردار است.

هدف اصلی از انجام پروژه حـاضر، مطالعـه اثـر خـاصیت غـیر نیوتنـی خـون در مشخصات جریان خون در Aneurysmها با در نظر گرفتـن مدلهـای مختلـف رئـالوژیک برای خون می باشد.

از آنجایی که مدلهای رئالوژیک مختلفی برای خون پیشنهاد شده است، در این تحقیق از سه مدل غیر نیوتنی Biviscosity , Casson , Power Law استفاده شده است. جریان خون به صورت آرام (Laminar) ، دائمی (Steady) و باتقارن محوری (Axisymmetric) در نظر گرفته شده و از خاصیت ارتجاعی جداررگ نیز چشم پوشی شده است.

با در نظر گرفتن یک شبکهٔ متعامد منطبق بر مرز، فرم تفاوتهای محدود (Finite Difference) معادلات حاکم در صحفهٔ محاسباتی با روش حجم کنترل (Control Valume) بدست آمده و با استفاده از الگوریتم شناخته شدهٔ SIMPLE حل شده اند. برای هریک از مدل های رئالوژیک مورد مطالعه، حل معادلات با در نظر گرفتن مقادیر مختلف عدد رینولدز جریان اصلی بدست آمده است.

جهت انجام محاسبات در این تحقیق، یک برنامهٔ کامپیوتری به زبان FORTRAN 77 نوشته شده که خروجی آن شامل توزیع سرعت، فشار، تابع جریان و ورتیسیتی در حوزه جریان، و تنش برشی روی جداررگ می باشد. نتایج بدست آمده برای مدلهای مختلف با یکدیگر و نیز با سیال نیوتنی مقایسه شده اند. این مقایسه نشان می دهد که برای یک آنوریسم با ۶۹ درصد افزایش سطح مقطع، جدایی جریان برای مدلهای نیوتنی ,Biviscosity,Casson,Power-Law به ترتیب در اعداد رینولدز بزرگتر از ۸۵،۳۴، ۸۰و۱۲۵ اتفاق می افتد.

فهـــرست مـــطالب

عنـــــوان صفحـــــه

فهرست شکلها ..... هشت

فصل اول ـ مقدمه ۱

فصل دوم ـ مروری بر تحقیقات گذشته ۵

فصل سوم ـ معادلات حاکم بر جریان ۸

۳-۱ معادلات جریان سیال غیر قابل تراکم و لزج در مختصات استوانه ای ۸

۳-۲ مدلهایی که در این تحقیق برای سیال غیر نیوتنی انتخاب شده اند ۱۲

۳-۲-۱ مدل Power Law ۱۲

۳-۲-۲ مدل Casson ۱۵

۳-۲-۳ مدل Biviscosity ۱۸

۳-۳ فرم بدون بعد معادلات حاکم ۲۰

۳-۳-۱ فرم بدون بعد معادلهٔ پیوستگی ۲۱

۳-۳-۲ فرم بدون بعد معادلهٔ مومنتوم در جهت z ۲۱

۳-۳-۳ فرم بدون بعد معادلهٔ مومنتوم در جهت r ۲۲

۳-۳-۴ فرم بدون بعد نامتغیر دوم تانسور سرعت تغییر شکل (I_2) ۲۲

۳-۳-۵ فرم بدون بعد توزیع سرعت جریان یک بعدی بدست آمده برای چهار مدل بکار رفته در این تحقیق ۲۴

۳-۴ لزوم استفاده از شبکه های محاسباتی برای حل معادلات با روش تفاوتهای محدود در جریانهایی که مرزهای پیچیده دارند ۲۶

۳-۵ روش بدست آوردن شبکه محاسباتی متعامد ۲۹

۳-۶ معادلات حاکم در صفحهٔ محاسباتی ۳۱

۳-۶-۱ معادلهٔ پیوستگی در صفحهٔ محاسباتی(مختصات η و ξ) برای جریان با تقارن محوری ۳۴

۳-۶-۲ معادلات مومنتوم در صفحهٔ محاسباتی ۳۵

۱-۲-۶-۳ روشی برای ساده سازی معادلات مومنتوم در صفحهٔ محاسباتی . ۳۸
۳-۶-۳ معادلهٔ اینـورینت دوم تانسور سرعت تغییر شکل (I_2) در صفحـــهٔ محاسباتی ۴۱

فصل چهارم ـ فرم تفاوتهای محدود معادلات و روش حل آنها ۴۳
۴-۱ فرم تفاوتهای محدود برای معادلهٔ پیوستگی ۴۵
۴-۲ فرم تفاوتهای محدود معادلهٔ اندازه حرکت در جهت ξ ۴۷
۴-۳ فرم تفاوتهای محدود معادلهٔ اندازه حرکت در جهت η ۶۲
۴-۴ فرم تفاوتهای محدود معادلهٔ فشار ۷۶
۴-۵ فرم تفاوتهای محدود اینورینت دوم تانسور سرعت تغییر شکل ۷۹
۴-۶ شـــــرایط مرزی ۸۲
۴-۶-۱ شرایط مرزی برای جریان با تقارن محوری در صفحهٔ فیزیکی ۸۲
۴-۶-۲ شرایط مرزی برای جریان با تقارن محوری در صفحهٔ محاسباتی ۸۶
۴-۶-۳ نحوهٔ اعمال شرایط مرزی ۸۷
۴-۷ روش حل فرم تفاوتهای محدود معادلات ۸۹

فصل پنجم ـ ارائه نتایج ۹۲
۵-۱ برنامه کامپیوتری و الگوریتم محاسباتی ۹۲
۵-۲ نتایج مربوط به جریان در یک لوله ۹۸
۵-۳ نتایج مربوط به جریان داخلی با تقارن محوری در یک مجرای آنوریسم ۱۰۲
۵-۳-۱ نتایج مربوط به سیال نیوتنی برای آنـوریسم با ۶۹ درصد افـــزایش سطح مقطع ۱۰۴
۵-۳-۲ نتایج مربوط به مدل Power Law ۱۲۶
۵-۳-۳ نتایج مربوط به مدل Casson ۱۳۸
۵-۳-۴ نتایج مربوط به مدل Biviscosity ۱۴۹
۵-۴ مقایسه نتایج بدست آمده برای مدل های مختلف ۱۶۰
۵-۵ نتایج مربوط به یک آنوریسم که در پایین دست یک Stenosis قرار دارد ... ۱۷۴

جمعبندی و نتیجه گیری ۱۸۷
پیشنهادات در جهت ادامه پژوهش ۱۸۸
فهرست مراجع ۱۸۹
صفحهٔ چکیده و صفحهٔ عنوان به زبان انگلیسی

فهـــرست شـــکلها

شکل صفحـــه

۱ - مختصات استوانه ای برای جریان با تقارن محوری ۹
۲- فرم توزیع سرعت برای مدل Casson ۱۶
۳- تقسیم بنـدی قسمتـــی از یک حوزه جریان دو بعـــدی بـــوسیلهٔ خطوط مـــوازی
با محورهای x و y ۲۶
۴- صفحات فیزیکی و محاسباتی برای یک آنوریسم ۳۱
۵- حوزهٔ جریان در صفحهٔ محاسباتی ۴۵
۶-المان داخلی در نظر گرفته شده برای فرم تفاوتهای محدود معادلهٔ پیوستگی ۴۶
۷- المان داخلی برای بـدست آوردن فـــرم تفاوت محـــدود معـــادلهٔ اندازه حـــرکت
در جهت ξ ۴۸
۸- المان داخلی برای بدست آوردن فرم تفاوتهای محدود معادلهٔ مومنتوم در جهت η ... ۶۲
۹- المان داخلی برای بدست آوردن فرم تفاوتهای محدود I_2 ..... ۸۰
۱۰- حوزه جریان برای یک آنوریسم با تقارن محوری در صفحهٔ فیزیکی ۸۲
۱۱- فلوچارت برنامه کامپیوتری ۹۷
۱۲- مقایسه توزیع سرعت جریان یکنواخت در لوله برای سیال نیوتنی ۱۰۰
۱۳- مقایسه توزیع سرعت جریان یکنواخت در لوله برای مدل Power law ۱۰۰
۱۴- مقایسه توزیع سرعت جریان یکنواخت در لوله برای مدل Casson ۱۰۱
۱۵- مقایسه توزیع سرعت جریان یکنواخت در لوله برای مدل Biviscosity ۱۰۱
۱۶- شبکه مورد استفاده برای یک آنوریسم با $\delta = ۰/۳$ ۱۰۳
۱۷- ناحیه مرکزی شبکه (۲۱×۱۵۱) برای آنوریسم با ۶۹ درصد افزایش سطح مقطع ۱۰۴
۱۸- نحوه همگرایی برنامه کامپیوتری مربوط به سیال نیـــوتنی در Re = 500 بااستـــفاده
ازشبکه (۲۱×۱۵۱) ۱۰۵
۱۹- پروفیلهای سرعت *u مربوط به سیال نیوتنی در عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۱۰
۲۰- پروفیلهای سرعت *u مربوط به سیال نیوتنی در عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۱۰
۲۱- خطوط جریان مربوط به سیال نیوتنی برای عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۱۱
۲۲- خطوط جریان مربوط به سیال نیوتنی برای عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۱۱
۲۳- سرعت*u روی خط مرکزی در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برای سیال نیوتنی ۱۱۲

شکل

صفحـــه

۲۴- توزیع فشار *P روی محور تقارن برای سیال نیوتنی با حضور آنوریسم وبـدون حضـورآنوریسم در اعداد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۱۳

۲۵- توزیع فشار *P روی جدار برای سیال نیوتنی در اعداد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۱۴

۲۶- شکل (۷)مرجع [۷] ۱۱۵

۲۷- خطوط فشار ثابت برای سیال نیوتنی و عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۱۶

۲۸- خطوط فشار ثابت برای سیال نیوتنی و عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۱۶

۲۹ -الف - تـــوزیع *u, *v, *P و ورتیسیتی در مقطـــع z*=0 برای سیـــال نیـــوتنی و Re=500 ..... ۱۱۷

۲۹- ب - توزیع *P و *v در مقطع z*=0 برای سیال نیوتنی و Re= 500 ..... ۱۱۷

۳۰- خطوط ورتیسیتی ثابت برای سیال نیوتنی و عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۱۸

۳۱- خطوط ورتیسیتی ثابت برای سیال نیوتنی و عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۱۸

۳۲- خطوط *u ثابت مربوط به سیال نیوتنی در رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۱۹

۳۳- خطوط *u ثابت مربوط به سیال نیوتنی در رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۱۹

۳۴- خطوط *v ثابت برای سیال نیوتنی با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۲۰

۳۵- خطوط *v ثابت برای سیال نیوتنی با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۲۰

۳۶- تنش برشی روی جداره مربوط به سیال نیوتنی دردو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ... ۱۲۱

۳۷- قسمتـــی از تنش برشی روی جداره مربوط به سیال نیـــوتنی در دو عـــدد رینـــولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۲۲

۳۸- شکل (۵) مرجع [۷] ۱۲۳

۳۹- توزیع τ^* روی دیـوار همراه با توزیع *u در چند مقطع برای سیال نیـــوتنی با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۲۴

۴۰- توزیع τ^* روی دیـوار همراه با توزیع *u در چند مقطع برای سیال نیـــوتنی با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۲۴

۴۱- پروفیلهای سرعت *u برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۲۷

۴۲- پروفیلهای سرعت *u برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۲۷

۴۳- خطوط جریان برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۲۸

۴۴- خطوط جریان برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۲۸

۴۵- ســـرعت *u روی خط مـــرکزی در دو عـــدد رینـــولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ بـرای مـدل Power Law ۱۲۹

شکل صفحـــه

۴۶- توزیع فشار *p روی محور تقارن برای مدل Power Law با حضور آنوریسم و بدون حضور آنوریسم دراعداد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۳۰
۴۷- توزیع فشار*p روی جدار برای مدل Power Law در اعدادرینولدز۵۰۰ و ۱۰۰۰ . ۱۳۱
۴۸- خطوط فشار ثابت برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۳۲
۴۹- خطوط فشار ثابت برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۳۲
۵۰- خطوط ورتیسیتی ثابت برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۳۳
۵۱- خطوط ورتیسیتی ثابت برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۳۳
۵۲-خطوط *u ثابت برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۳۴
۵۳- خطوط *u ثابت برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۳۴
۵۴-تنش برشی روی جداره برای مدل Power Law در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ .. ۱۳۵
۵۵- قسمتی از τ_w^* برای مدل Power Law در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۳۵
۵۶- توزیع τ^* روی دیوار همراه با توزیع *u در چنـد مقطع برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۳۶
۵۷- توزیع τ^* روی دیوار همراه با توزیع *u در چنـد مقطع برای مدل Power Law با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۳۷
۵۸- پروفیلهای سرعت *u برای مدل Casson با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۳۹
۵۹- پروفیلهای سرعت *u برای مدل Casson با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۳۹
۶۰- خطوط جریان برای مدل Casson با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۴۰
۶۱- خطوط جریان برای مدل Casson با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۴۰
۶۲- سرعت *u روی محور تقارن در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برای مدلCasson ... ۱۴۱
۶۳- توزیع فشار*p روی محور تقارن در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برای مدل Casson باحضور آنوریسم و بدون حضور آنوریسم ۱۴۲
۶۴- خطوط فشار ثابت برای مدل Casson با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۴۳
۶۵- خطوط فشار ثابت برای مدل Casson با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۴۳
۶۶- خطوط ورتیسیتی ثابت برای مدل Casson با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۴۴
۶۷- خطوط ورتیسیتی ثابت برای مدل Casson با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۴۴
۶۸- خطوط *u ثابت برای مدل Casson با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۴۵
۶۹- خطوط *u ثابت برای مدل Casson با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۴۵
۷۰- تنش برشی روی جداره برای مدل Casson در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۴۶

شکل صفحـــه

۷۱- قسمتی از τ^*_w برای مدل Casson در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۴۶
۷۲- توزیع τ^* روی دیوار همراه با توزیع *u در چند مقطع برای مدل Casson با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۴۷
۷۳- توزیع τ^* روی دیوار همراه با توزیع *u در چند مقطع برای مدل Casson با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۴۸
۷۴- پروفیلهای سرعت *u برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۵۰
۷۵-پروفیلهای سرعت *u برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۵۰
۷۶-خطوط جریان برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۵۱
۷۷- خطوط جریان برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۵۱
۷۸- سرعت*u روی محور تقارن در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ برای مدل Biviscosity ۱۵۲
۷۹- توزیع فشار *p روی محور تقارن برای مدل Biviscosity با حضور آنوریسم و بدون حضور آنوریسم در اعداد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۵۳
۸۰- خطوط فشار ثابت برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۵۴
۸۱- خطوط فشار ثابت برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۵۴
۸۲- خطوط ورتیسیتی ثابت برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۵۵
۸۳- خطوط ورتیسیتی ثابت برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۵۵
۸۴- خطوط *u ثابت برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۵۶
۸۵- خطوط *u ثابت برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۵۶
۸۶- تنش برشی روی جداره برای مدل Biviscosity در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ .. ۱۵۷
۸۷- قسمتی از τ^*_w برای مدل Biviscosity در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ..... ۱۵۷
۸۸- توزیع τ^* روی دیوار همراه با توزیع *u در چند مقطع برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۵۸
۸۹- توزیع τ^* روی دیوار همراه با توزیع *u در چند مقطع برای مدل Biviscosity با عدد رینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۵۹
۹۰- محل نقاط Separation و Reattachment برای مدلهای مختلف ۱۶۳
۹۱-الف- فشار *p روی محور تقارن برای سیال نیوتنی و سه مدل غیر نیوتنی و عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۶۴

شکل صفحـــه

۹۱-ب- فشار *p روی محور تقارن برای سیـــال نیوتنی و سه مدل غیر نیـــوتنی و عـــددرینولدز ۱۰۰۰ ..... ۱۶۵
۹۲- منحنی تغییرات فشار*p روی دیوار برای سیال نیوتنی و مدل های غیر نیوتنی با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۶۶
۹۳- منحنی تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز با مقیـاس لگاریتمـی بـرای سیـــال نیوتنی و مدل های غیر نیوتنی ۱۶۷
۹۴- منحنی تغییرات*u روی محور تقارن برای سیال نیوتنی و مدل های غیر نیوتنی با عدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۶۸
۹۵- توزیع سرعت *u برای مدل های مختلف با عدد رینولدز ۵۰۰ در Z*=0 ..... ۱۶۹
۹۶- توزیع سرعت *v برای مدل های مختلف با عدد رینولدز ۵۰۰ در Z*=0 ..... ۱۶۹
۹۷- توزیع *p برای مدل های مختلف با عدد رینولدز ۵۰۰ در Z*=0 ..... ۱۷۰
۹۸- توزیع Ω^* برای مدل های مختلف با عدد رینولدز ۵۰۰ در Z*=0 ..... ۱۷۰
۹۹- توزیع τ^* برای مدل های مختلف با عدد رینولدز ۵۰۰ در Z*=0 ..... ۱۷۱
۱۰۰- الف- منحنی تغییـــرات تنش برشی روی دیـــوار برای مـــدل های مختلف با عـــدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۷۲
۱۰۰- ب - قسمتی از منحنی تغییرات τ^* روی دیوار برای مـدل های مختلف با عـدد رینولدز ۵۰۰ ..... ۱۷۲
۱۰۱- شبکهٔ مورد استفاده در مطالعه یک آنوریسم که در پایین دست یک Stenosis قـرار دارد ۱۷۶
۱۰۲- الف - قسمتی از خطوط جریان مربوط به سیال نیوتنی در عدد رینولدز ۲۰۰ ... ۱۷۷
۱۰۲- ب - قسمتی از خطوط جریان برای مدل Power Law در عدد رینولدز ۲۰۰ ... ۱۷۷
۱۰۳ - الف- خطوط *u ثابت برای قسمتی از حوزه جریان، برای سیال نیوتنی درعدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۷۸
۱۰۳- ب- خطوط *u ثابت برای قسمتی از حوزه جریان، برای مدل Power Law در عـــدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۷۸
۱۰۴- سـرعت روی محـــور تقارن برای سیال نیـــوتنی و مـــدل Power Law در عـــدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۷۹
۱۰۵- الف - خطوط ورتیسیتی ثابت برای قسمتی از حوزه جریان برای سیال نیـوتنی در عدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۸۰

شکل صفحـــه

۱۰۵- ب-خطوط ورتیسیتی ثابت برای قسمتی ازحوزه جریان برای مدلPower Law در عدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۸۰
۱۰۶- الف - خطوط فشار ثابت برای سیال نیوتنی در عدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۸۱
۱۰۶- ب- خطوط فشار ثابت برای مدل Power Law در عدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۸۱
۱۰۷-منحنی توزیع فشار*p روی محور تقارن برای سیال نیوتنی و مدلPower Law با حضور تنگ شدگی و آنوریسم و بدون حضور تنگ شدگی و آنوریسم ۱۸۲
۱۰۸- توزیع تنش بـرشی روی دیوار بـــرای سیال نیوتنی و مدل Power Law در عـــدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۸۳
۱۰۹- الف - توزیع تنش برشی روی دیوار همراه با توزیع *u در چنـــد مقطع برای سیـــال نیوتنی در عدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۸۴
۱۰۹- ب - تـوزیع تنش برشی روی دیوار همراه با تـــوزیع *u در چند مقطع برای مـــدل Power Law در عدد رینولدز ۲۰۰ ..... ۱۸۵

فصـــــل اول

مقـــــدمه

علوم پزشکی و مسایل مربوط به سلامت جسمی بشر، از جمله قدیمـــی تریـن و نیز مهمترین علوم مورد توجه آدمی بوده است. در گذشته های نه چندان دور، دو بخش عمدهٔ علوم بشری، یعنی مهندسی و پزشکی به شکل مستقیم و صریح با یکدیگر مرتبـط نبودند، اما با پدیدآمدن پیشرفتهای شگرف در علوم مهندسی و پزشکی و توسـعه دانـش بشـری، و بـا تخصصـی تـر شـدن مبـاحث بخشـهای مختلـف علـوم، لـزوم اســتفاده از تخصصهای گوناگون در کنار هم برای بررســی مسـائل موجـود در علـوم، بیـش از پیـش احساس گردید. بسیاری از مسائل مورد علاقه در پزشــکی، از جملـه مسـائل مربـوط بـه جریان خون در رگها، نیز اینچنین می باشند.

بررســی مشـخصات جریـان خـون در رگهـا سـابقه ای بسـیار طولانـــی دارد. بررســی هــای تــاریخی نشــان مــی دهــد کــه مطالعــه جریــان خــون از زمــان ارسطو (۳۸۴ ـ ۳۲۲ قبل از میلاد مسیح) و بقراط (۴۶۰ ـ ۳۷۵ قبل از میلاد مسـیح) شروع شده [۱] و تا این زمان ادامه یافته است. اگر چه مطالعات مبسوطی در این زمینه صورت گرفته و امروزه نیز تعداد زیادی از پژوهشگران به بررســی جنبـه هـای گونـاگون گردش خون در بدن انسان و حیوانات مشغولند، اما با وجود امکانات تحقیقاتی پیشـرفته امروزی، هنوز اطلاعاتی کامل و جامع در این خصوص بدست نیامده است.

از نظر مهندســی سیسـتم گـردش خـون مسـئله ای بسـیار پیچیـده محسـوب می شود، بطوریکه انتخاب مدل ریاضی جامع و کـاملی بـرای آن، بـه دلیـل تعـداد زیـاد پارامترهای موجود، تا این زمان امکان پذیر نبوده است. در یک مدل ریـاضی مربـوط بـه جریان خون می بایستی عواملی از قبیل تپشی بودن جریان، رفتار غیر نیوتنـی سـیال و خاصیت ارتجاعی جداررگها در نظر گرفته شوند. با توجـه بـه شـکل پیچیـدهٔ قسـمتهای مختلف سیستم گردش خون و اندازه متفاوت رگها و بخصوص با توجه بـه ایـن حقیقـت

که مشخصات تپشی بودن جریان و ماهیت غیر نیوتنی خون و ارتجاعی بودن جدار رگ برای تمام قسمتها یکسان نمی باشند، امکان دستیابی به یک مدل کامل، تقریباً غیر ممکن به نظرمی رسد.

به عنوان مثال، این حقیقت که خون دارای رفتار غیر نیوتنی است، برای اولین بار در نیمهٔ دوم قرن حاضر شناخته شد [۱]. و سپس برای دستیابی به معادلات متشکلهٔ مربوط به آن تحقیقات مفصلی صورت گرفت. نتیجه این تحقیقات دستیابی به مدل های متفاوتی برای رفتار غیرنیوتنی خون بوده است که هریک می تواند در شرایطی خاص رفتار غیر نیوتنی خون را به درستی بیان کند.

آزمایشات انجام شده توسط محققین، دو حقیقت را نمایان ساخته است. نخست اینکه ویسکوزیته خون با افزایش نرخ برشی (Shear rate) کاهش پیدا می کند. (سیالی که چنین رفتاری از خود نشان می دهد، سیال Pseudoplastic نامیده می شود). دوم اینکه خون دارای تنش تسلیم کوچکی می باشد. به عبارت دیگر برای به جریان درآمدن آن می بایستی که تنش به یک مقدار معین، اگر چه بسیار کوچک، برسد.

دو روش کلی برای مطالعه جریان خون موجود است. روش اول مطالعات تجربی و آزمایشگاهی است که توسط یک مدل آزمایشگاهی مربوط به جریان مورد نظر، صورت می گیرد، و یا این که آزمایشات مستقیماً برروی حیوانات انجام می شود. روش دوم حل عددی معادلات حاکم بر جریان می باشد که روشی تقریبی است، زیرا همانطور که اشاره شد، امکان استفاده از یک مدل ریاضی و یا معادلاتی که در آنها کلیهٔ عوامل فیزیکی منظور شده باشند تقریباً وجود ندارد. بنابراین، در این روش با در نظر گرفتن فرض هایی معمولاً مسئله ساده سازی شده و سپس مدل می شود. مثلاً اگر از خاصیت ارتجاعی جداررگ چشم پوشی شود، معادلات حاکم شامل معادلهٔ پیوستگی، معادلات مومنتوم و معادلات سازگاری خون خواهند بود که می بایستی به همراه شرایط اولیه و شرایط مرزی مربوط به مسئله، با روش های عددی حل گردند.

تا کنون چندین مدل برای معادلات سازگاری خون بعنوان یک سیال غیر نیوتنی پیشنهاد شده است که یکی از آنها مدلی است که در سال ۱۹۵۹ میلادی