

به نام خدا

اظهارنامه

اینجانب **علی حسین نیکخواه** (۹۱۳۱۰۶۸) دانشجوی رشته‌ی **مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی** دانشکده‌ی **مهندسی مکانیک** اظهار میکنم که این پایان نامه حاصل پژوهش خودم بوده و در جاهایی که از منابع دیگران استفاده کرده‌ام، نشانی دقیق و مشخصات کامل آن را نوشته‌ام. همچنین اظهارمی‌کنم که تحقیق و موضوع پایان نامه‌ام تکراری نیست و تعهد مینمایم که بدون مجوز دانشگاه دستاوردهای آن را منتشر ننموده و یا در اختیار غیر قرار ندهم. کلیه حقوق این اثر مطابق با آییننامه مالکیت فکری و معنوی متعلق به دانشگاه شیراز است.

نام و نام خانوادگی : **علی حسین نیکخواه**

تاریخ و امضا:

به نام خدا

مدل سازی عددی جریان مایع مغزی نخاعی درون بطنهای مغز و فضای زیرعنکبوتیه ی مغز و
نخاع

به کوشش:

علی حسین نیکخواه

پایان نامه ی:

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه شیراز به عنوان بخشی از فعالیتهای تحصیلی لازم برای
اخذ درجه ی کارشناسی ارشد

در رشته ی

مهندسی مکانیک (حرارت و سیالات)

دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی کمیته پایان نامه با درجه ی: عالی

دکتر امید ابوعلی ، دانشیار مهندسی مکانیک (استاد راهنما).....
دکتر علی نورافشان ،استاد دانشکده ی پزشکی بخش آناتومی (استاد مشاور).....
دکتر ابراهیم گشتاسبی راد ، استادیار مهندسی مکانیک (داور متخصص داخلی).....

شهریور ۱۳۹۳

تقدیم به هر آنکس که به من علم آموخت

سپاسگزاری

اکنون که این رساله به پایان رسیده است، بر خود لازم می دانم از اساتید ارجمند جناب آقایان دکتر امید ابوعلی و دکتر علی نورافشان که صمیمانه من را در همه ی مراحل یاری نمودند، تشکر و قدردانی کنم. همچنین بر خود فرض می دانم که مراتب سپاس و قدردانی را نسبت به مدیریت محترم بیمارستان دنا، جناب آقای دکتر عاطفی و همچنین کارشناس محترم بخش رادیولوژی آن بیمارستان، سرکار خانم فرشیدفر که بدون یاری ایشان اتمام این رساله امکان پذیر نبود، دارم.

چکیده

مدل سازی عددی جریان مایع مغزی نخاعی درون بطنهای مغز و فضای زیرعنکبوتیه ی مغز و نخاع

به کوشش :

علی حسین نیکخواه

مایع مغزی نخاعی، مایعی شفاف و بدون رنگ موجود در مغز و نخاع است. این مایع دارای وزن مخصوص برابر $1/007$ می باشد و در شبکه کوروئید بطن های مغزی تولید می شود. این مایع، به عنوان یک بالشتک برای مغز و نخاع عمل می کند و ارائه حفاظتی اولیه و مکانیکی و نیز ایمنولوژیک برای مغز در داخل جمجمه را فراهم نموده و نیز نقشی حیاتی در سیستم خودتنظیم مغز در جریان خون مغزی را ایفا می کند. مایع مغزی نخاعی ساکن نبوده و با ضربان قلب اطراف نخاع و مغز در جریان می باشد. جریان مذکور به صورت نوسانی است که شبیه سازی آن هدف تحقیق حاضر می باشد. با تهیه ی هندسه ی مربوط به مسیر جریان مایع مغزی نخاعی و اعمال مدل های ریاضی به آن می توان مقادیر فشار و سرعت را در نقاط مختلف مسیر جریان محاسبه نمود. روند طی شده در راستای انجام تحقیق حاضر شامل سه مرحله ی کلی می باشد. در ابتدا مسیر کامل جریان مایع مغزی نخاعی با استفاده از تصاویر MRI بازسازی شده است. در مرحله ی دوم هندسه ی سه بعدی ساخته شده در مرحله ی نخست با استفاده از المان های چهاروجهی شبکه بندی گردیده است. در انتها و در مرحله ی سوم معادلات حاکم بر جریان که شامل معادله ی بقاء ممنتوم و جرم می باشد، در شبکه ی ایجاد شده به صورت عددی حل شده است و نتایج مورد نظر استخراج گردیده است. نتایج حاصل از شبیه سازی بصورت میدان های فشار و سرعت در مقاطع مختلف نمایش داده شده و مورد بحث قرار گرفته است. یکی از مشخصه های نمودار فشار

درون جمجمه ای وجود سه پیشینه‌ی نسبی در نمودار می باشد، که در نتایج بدست آمده کاملاً مشهود است. فشار هیدروستاتیک سیال نسبت به فشار جریان آن قابل توجه بوده بطوری که نتایج بدست آمده برای مقادیر فشار در دو حالت مختلف قرار گیری بدن بطرز قابل توجهی متفاوت می باشد که اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی در حیطه‌ی علوم پزشکی نیز موید این امر می باشد.

فهرست عناوین

- ۱- فصل اول: مقدمه ۱
- ۲-۱- دینامیک سیالات محاسباتی ۳
- ۳-۱- آناتومی تولید و گردش مایع مغز نخاع ۵
- ۱-۳-۱- بطن‌های مغز ۵
- ۲-۳-۱- فضای زیر عنکبوتیه ۸
- ۴-۱- مایع مغزی نخاعی ۹
- ۵-۱- سیستم عصبی مرکزی ۱۱
- ۶-۱- بیماری‌های مرتبط با نارسایی در جریان مایع مغز نخاع ۱۵
- ۱-۶-۱- هیدروسفالی ۱۶
- ۱-۱-۶-۱- علل غیر اکتسابی ۱۷
- ۲-۱-۶-۱- علل اکتسابی ۱۹
- ۱-۶-۱-۲-۱- ضربه به سروصورت ۱۹
- ۱-۶-۱-۲-۲- مننژیت ۲۰
- ۲-۶-۱- فشار زیاد مایع مغزی نخاعی و ادم دیسک بینایی [۲۵] ۲۱
- ۳-۶-۱- سیرنگومیلی ۲۲
- ۴-۶-۱- اپن‌دیوما ۲۳
- ۷-۱- فشار داخل جمجمه ای ۲۵
- ۸-۱- سنجش فشار مایع مغزی نخاعی ۲۵
- ۲- فصل دوم: مروری بر ادبیات موضوع ۲۷
- ۱-۲- مدل متمرکز مونرو ۲۸
- ۲-۲- مدل دوبعدی ناگاشیما و همکارانش از بیماری هیدروسفالوس ۲۹
- ۳-۲- مدل تقریبی جاکویسون و همکارانش از بطن‌های مغز ۲۹
- ۴-۲- مدل‌سازی جریان در سرویکال فضای زیرعنکبوتیه توسط ترسیا و همکارانش ۳۰
- ۵-۲- مدل‌سازی جریان مایع مغز نخاع درون بطن‌های مغز توسط کورت کوگلو و همکارانش ۳۱
- ۶-۲- مدل دوبعدی لینینگر و همکارانش از بطن‌ها و فضای زیرعنکبوتیه ی مغز ۳۳

۳۵	۷-۲ مدل سه بعدی سوئیتمن و همکارانش از بطن‌ها و فضای زیرعنکبوتیه ی مغز.....
۳۹	۸-۲ مدل سه بعدی گوپتا و همکارانش از فضای زیرعنکبوتیه ی مغز و سیلکوسها.....
۴۴	۹-۲ بررسی تأثیر شدت ضربان قلب بر جریان مایع مغزی نخاعی توسط لینگ و همکارانش.....
۴۶	۱۰-۲ بررسی تأثیر کیاری بر الگوی جریان در ناحیه ی گردنی فضای زیرعنکبوتیه توسط رولدان و همکارانش.....
۴۹	۱۱-۲ تحلیل CFD جریان مایع مغزی نخاعی در ناحیه ی سرویکال و مقایسه با داده‌های MRI توسط یالورو و همکارانش.....
۵۱	۱۲-۲ تحلیل میدان جریان در ناحیه ی گردنی توسط راتکوواسکا و همکارانش قبل و بعد از عمل جراحی.....
۵۲	۱۳-۲ تحلیل تعامل سازه و سیال در بطن‌های مغز توسط شاکون چنگ.....
۵۶	فصل سوم: مدل سازی و روش حل.....
۵۷	۱-۳ بازسازی مدل سه بعدی با استفاده از تصاویر MRI.....
۶۴	۲-۳ شبکه بندی دامنه ی حل.....
۶۸	۳-۳ مدل سازی ریاضی جریان مایع مغزی نخاعی.....
۶۸	۱-۳-۳ معادلات حاکم بر جریان.....
۶۸	۱-۱-۳-۳ معادله ی ناویه استوکس.....
۶۹	۲-۱-۳-۳ معادلات حاکم در محیط متخلخل.....
۷۱	۳-۱-۳-۳ معادله ی مومنتم در محیط متخلخل.....
۷۲	۲-۳-۳ شرایط مرزی.....
۹۸	۴- فصل چهارم: نتایج.....
۹۹	۱-۴ شبیه سازی بدون در نظر گیری اثر پمپاژ مایع مغزی نخاعی توسط پارانشیم.....
۱۰۱	۲-۴ بررسی اثر گام زمانی در محاسبات.....
۱۰۲	۳-۴ بررسی استقلال نتایج از شبکه.....
۱۰۳	۴-۴ مدل شامل فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف نخاع و اثر ضربان پارانشیم.....
۱۰۴	۱-۴-۴ فشارهای ایجاد شده در نواحی مختلف.....
۱۲۰	۲-۴-۴ سرعت ایجاد شده در مقاطع مختلف.....
۱۳۱	۵-۴ نتایج پیش بینی شده در ستون نخاعی.....

۱۳۴	۶-۴- تأثیر محل جذب مایع بر نتایج.....
۱۳۸	۷-۴- شبیه‌سازی خونریزی در فضای زیرعنکبوتیه (SAH).....
۱۴۴	۸-۴- تأثیر موقعیت قرارگیری بدن بر نتایج.....
۱۴۸	۵- فصل پنجم: بحث در نتایج و پیشنهادهای.....
۱۴۹	۵-۱- جمع‌بندی نتایج.....
۱۵۰	۵-۲- آینده‌ی تحقیقات.....
۱۵۲	۶- فهرست منابع و مأخذ.....

فهرست جداول

- جدول ۱- حداکثر و متوسط اختلاف فشار در طول دوره‌ی تناوب حرکت مایع مغزی نخاعی در داوطلب سالم و داوطلب مبتلا به کیاری در تعداد ضربان قلب متفاوت محاسبه شده توسط لینگ [۴۲]..... ۴۵
- جدول ۲- محدوده‌ی تصاویر MRI گرفته‌شده در هر بخش در ساخت مدل سه‌بعدی..... ۶۰
- جدول ۳- ضرایب مربوط به سری فوریه‌ی تطبیق داده‌شده به داده‌های استخراج‌شده از نوسانات جریان مایع مغزی نخاعی درون بطن‌ها با استفاده از روش MRI توسط دیوید زو [۵۱]..... ۷۵
- جدول ۴- پارامترهای استفاده‌شده در ناحیه‌ی متخلخل..... ۷۹
- جدول ۵- ضرایب مربوط به سری فوریه‌ی تطبیق داده‌شده به داده‌های استخراج‌شده از نوسانات جریان مایع مغزی نخاعی درون بطن‌ها، مجرای مگنوم و پارانشیم با استفاده از روش MRI توسط دنرس و همکارانش [۵۷]..... ۸۹
- جدول ۶- ضرایب مربوط به سری فوریه‌ی تطبیق داده‌شده به داده‌های استخراج‌شده از نوسانات جریان مایع مغزی نخاعی در مجرای مگنوم با استفاده از روش MRI توسط آلپرین و همکارانش [۵۸]..... ۹۶
- جدول ۷- نتایج مربوط به فشار وارد بر بطن‌ها در گام‌های زمانی متفاوت در تحقیق حاضر..... ۱۰۲
- جدول ۸- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل با محدوده‌ی گزارش‌شده در روش سنجش جریان با روش PC MRI توسط سوئیتمن، گوپتا و همکارانشان [۴۰ و ۴۱]..... ۱۲۵

فهرست نمودارها و شکل‌ها

- شکل ۱- مراحل اصلی انجام شبیه‌سازی CFD مایع مغز نخاع [۱]..... ۳
- شکل ۲- بطن‌های مغزی (Brian ventricular system) [۳]..... ۶
- شکل ۳- مجراهای خروجی از بطن چهارم [۵]..... ۷
- شکل ۴- لایه‌ی مننژ در مغز و نخاع [۷]..... ۸
- شکل ۵- شبکه‌ی کوروئیدی بطن‌های طرفینی [۹]..... ۹
- شکل ۶- پرزهای عنکبوتیه در سینوس‌های سهموی [۱۰]..... ۱۱
- شکل ۷- نام‌گذاری بخش‌های مختلف قوس کمر [۱۱]..... ۱۱
- شکل ۸- مکانیسم جریان پالسی مایع مغز نخاع [۱۳]..... ۱۳
- شکل ۹- کیسه‌ی تکال در قوس کمری ستون نخاعی [۱۵]..... ۱۴
- شکل ۱۰- شماتیک مسیر جریان مایع مغز نخاع [۱۶]..... ۱۵
- شکل ۱۱- بیماری‌های متداول در رابطه با نارسایی مایع مغز نخاع [۱۷]..... ۱۵
- شکل ۱۲- ابعاد بزرگ بطن‌های جانبی در بیماری هیدروسفالی [۱۸]..... ۱۶
- شکل ۱۳- درزهای استخوان جمجمه [۱۹]..... ۱۷
- شکل ۱۴- تنگی مجرای سیلویوس [۲۰]..... ۱۸
- شکل ۱۵- شنت گذاری در بطن‌های مغز [۲۱]..... ۱۸
- شکل ۱۶- انواع مختلف شنت گذاری [۲۲]..... ۱۹
- شکل ۱۷- خونریزی در فضای زیرعنکبوتیه [۲۳]..... ۲۰
- شکل ۱۸- کیست در فضای زیرعنکبوتیه [۲۴]..... ۲۱
- شکل ۱۹- فشار زیاد مایع CSF اطراف عصب چشمی..... ۲۲
- شکل ۲۰- وجود کیست در طناب نخاعی [۲۷]..... ۲۳
- شکل ۲۱- اپن‌دیموما در بطن چهارم [۳۰]..... ۲۴
- شکل ۲۲- پونسیون کمری [۳۲]..... ۲۶
- شکل ۲۲- شماتیک طرح مونرو برای مدل‌سازی جریان مایع مغز نخاع [۳۳]..... ۲۸
- شکل ۲۳- مدل‌های در نظر گرفته‌شده از فضای زیرعنکبوتیه‌ی ناحیه‌ی گردنی توسط ترسیا [۳۷]..... ۳۰
- شکل ۲۴- مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل میدان سیال با سنجش جریان به روش 4D MRI [۳۷]..... ۳۱
- شکل ۲۵- مدل بطن‌های ساخته‌شده توسط وارتان [۳۸]..... ۳۲
- شکل ۲۶- میدان‌های سرعت محاسبه‌شده در مجرای سیلویوس توسط وارتان [۳۸]..... ۳۳
- شکل ۲۷- مدل دوبعدی در نظر گرفته‌شده توسط لینینگر [۳۹]..... ۳۴
- شکل ۲۸- مدل در نظر گرفته‌شده توسط سوئیتمن [۴۰]..... ۳۶
- شکل ۲۹- فشارهای به‌دست‌آمده از تحلیل انجام‌شده توسط لینینگر..... ۳۷
- شکل ۳۰- مدل اطراف پارانشیم، انجام‌شده توسط گوپتا [۴۱]..... ۳۸

- شکل ۳۱- تغییرات سطح جانبی سطوح بطن‌های جانبی [۳۹]..... ۳۹
- شکل ۳۲- مدل در نظر گرفته شده از فضای زیرعنکبوتیه ی سر توسط گوپتا [۴۱]..... ۴۰
- شکل ۳۳- اعمال شرایط مرزی استخراج شده از نتایج MRI [۴۱]..... ۴۱
- شکل ۳۴- نتایج به دست آمده برای سرعت توسط گوپتا در فضای زیرعنکبوتیه ی سر [۴۱]..... ۴۲
- شکل ۳۵- افت فشار پیش‌بینی شده در فضای زیرعنکبوتیه ی سر توسط گوپتا [۴۱]..... ۴۳
- شکل ۳۶- فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف نیم‌کره‌های مخچه در هندسه ی بازسازی شده در تحقیق حاضر..... ۴۳
- شکل ۳۷- مدل فضای زیرعنکبوتیه ی گردنی ارائه شده توسط لینگ [۴۲]..... ۴۴
- شکل ۳۸- نمودار مربوط به توابع در نظر گرفته شده در ضربان های مختلف قلب [۴۲]..... ۴۵
- شکل ۳۹- مدل فضای زیرعنکبوتیه گردنی ساخته شده توسط رولدان [۴۳]..... ۴۷
- شکل ۴۰- مقایسه ی نتایج حاصل از تحلیل عددی جریان با داده‌های سنجش جریان در روش PC MRI توسط رولدان [۴۳]..... ۴۸
- شکل ۴۱- مدل‌های در نظر گرفته شده از فضای زیرعنکبوتیه ی ناحیه ی گردنی توسط یالورو [۴۴]..... ۴۹
- شکل ۴۲- مقایسه ی نتایج پیش‌بینی شده توسط یالورو با داده‌های 4d PC MRI [۴۴]..... ۵۰
- شکل ۴۳- بازسازی ۳ بعدی ناحیه ی گردنی فضای زیرعنکبوتیه [۴۵]..... ۵۲
- شکل ۴۴- مدل دوبعدی ساخته شده از فضای بطن‌های مغزی ارائه شده توسط شاکون چنگ [۴۶]..... ۵۳
- شکل ۴۵- تابع فشار اعمال شده به بطن‌های جانبی توسط شاکون چنگ [۴۶]..... ۵۳
- شکل ۴۶- تغییر شکل پارانشیم مغز [۴۶]..... ۵۴
- شکل ۴۷- تصویر MRI کل ستون فقرات با بار وزنی T1 و T2..... ۵۸
- شکل ۴۸- تقسیم بندی قوس ستون فقرات [۵۰]..... ۵۹
- جدول ۲- محدوده ی تصاویر MRI گرفته شده در هر بخش در ساخت مدل سه بعدی..... ۶۰
- شکل ۴۹- بازسازی سه بعدی بطن‌های مغز با استفاده از تصاویر MRI در تحقیق حاضر..... ۶۰
- شکل ۵۰- بازسازی سه بعدی فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف پارانشیم با استفاده از تصاویر MRI در تحقیق حاضر..... ۶۱
- شکل ۵۱- بازسازی سه بعدی فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف قوس گردنی نخاع با استفاده از تصاویر MRI..... ۶۱
- شکل ۵۲- بازسازی سه بعدی فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف قوس پشتی نخاع با استفاده از تصاویر MRI..... ۶۲
- شکل ۵۳- بازسازی سه بعدی فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف قوس کمری نخاع با استفاده از تصاویر MRI..... ۶۲
- شکل ۵۴- بخش‌های مختلف مسیر جریان مغز نخاع..... ۶۳
- شکل ۵۵- یکپارچه سازی کل مسیر جریان مایع مغز نخاع..... ۶۳
- شکل ۵۶- هموارسازی مدل ساخته شده..... ۶۴
- شکل ۵۷- شبکه ی ایجاد شده درون و روی سطوح بطن‌های مغز..... ۶۵
- شکل ۵۸- شبکه ی ایجاد شده روی سطح عنکبوتیه مغز..... ۶۶
- شکل ۵۹- شبکه ی ایجاد شده روی سطح پارانشیم..... ۶۷

- شکل ۶۰- شبکه‌ی ایجادشده اطراف نیم‌کره‌های مخچه..... ۶۷
- شکل ۶۱- شرایط مرزی در بطن‌های و سینوس‌های وریدی..... ۷۳
- شکل ۶۲- حرکت نوسانی مایع مغزی نخاعی درون بطن‌های مغز [۵۱]..... ۷۴
- شکل ۶۳- منحنی مربوط به سری فوریه‌ی تطبیق داده‌شده به داده‌های سنجش جریان توسط دیوید زو ۷۴
- شکل ۶۴- جریان خون شریانی بیزیلار [۴۰]..... ۷۶
- شکل ۶۵- موقعیت قرارگیری شریان بیزیلار [۵۲]..... ۷۶
- شکل ۶۶- شماتیک مربوط به پرزهای عنكبوتیه [۵۴]..... ۷۷
- شکل ۶۷- محل حضور پرزهای عنكبوتیه در شکاف طولی سر ۷۸
- شکل ۶۸- گسترش و نحوه‌ی پراکندگی پرزهای عنكبوتیه اطراف شکاف طولی سر..... ۷۸
- شکل ۶۹- شماتیک حرکت نوسانی مایع مغزی نخاع درون فضای جمجمه ای و اطراف نخاع [۴۰]..... ۸۰
- شکل ۷۰- کانتور مربوط به جابه‌جایی دینامیکی مغز مربوط به داوطلب دارای سلامت..... ۸۱
- شکل ۷۱- جابه‌جایی مغز در بخش‌های مختلف آن در طول دوره‌ی قلبی [۵۶]..... ۸۲
- شکل ۷۲- ضخامت فضای زیرعنكبوتیه‌ی اطراف پارانشیم مغز در تحقیق حاضر ۸۳
- شکل ۷۳- شدت جریان بدون بعد به‌دست‌آمده از نتایج سنجش جریان با استفاده از روش PC MRI در داوطلبان جوان و مسن در مقطعی از مجرای سیلویس توسط دنرس و همکاران [۵۷]..... ۸۴
- شکل ۷۴- شدت جریان بدون بعد به‌دست‌آمده از نتایج سنجش جریان با استفاده از روش PC MRI در داوطلبان جوان و مسن در مقطعی از مجرای مگنوم توسط دنرس و همکارانش [۵۷]..... ۸۵
- شکل ۷۵- شرایط مرزی استفاده‌شده در مدل بدون در نظرگیری ستون نخاعی و با لحاظ کردن مدل جریان رفت و برگشتی برای حرکت بطن‌ها و پارانشیم مغز ۸۶
- شکل ۷۶- جریان رفت و برگشتی مورد استفاده به‌عنوان شرط مرزی شده روی بطن‌ها..... ۸۶
- شکل ۷۷- جریان رفت و برگشتی مورد استفاده به‌عنوان شرط مرزی در مجرای مگنوم ۸۷
- شکل ۷۸- جریان رفت و برگشتی مورد استفاده روی سطح پارانشیم ۸۸
- شکل ۷۹- مرزهای مربوط به مدل کامل مسیر جریان مایع مغزی نخاعی با در نظرگیری ستون نخاعی ۹۰
- شکل ۸۰- تصویربرداری MRI در حالت نشسته [۵۸]..... ۹۱
- شکل ۸۱- زمانمندی جریان خون شریانی و وریدی در دو موقعیت متفاوت قرارگیری بدن، ۹۲
- شکل ۸۲- مقایسه بین میزان خالص جریان ورودی به مغز مایع مغزی نخاعی خروجی از آن در دو موقعیت مختلف قرارگیری بدن ۹۳
- شکل ۸۳- منحنی تطبیق داده‌شده فوریه به داده‌های MRI مربوط به جریان مایع مغزی نخاعی در مجرای مگنوم در حالت دراز کشیده..... ۹۴
- شکل ۸۴- منحنی تطبیق داده‌شده فوریه به داده‌های MRI مربوط به جریان مایع مغزی نخاعی در مجرای مگنوم در حالت نشسته ۹۵
- شکل ۸۵- مقایسه‌ی شدت جریان مایع مغزی نخاعی در سوراخ مگنوم در حالات نشسته و دراز کشیده ۹۷

- شکل ۸۶- فشار محاسبه شده ی وارد بر بطنهای جانبی و بطن سوم در مدل شبیه سازی شده بدون در نظر گیری اثر ضربان پارانشیم در تحقیق حاضر..... ۱۰۰
- شکل ۸۷- فشار وارد بر بطنهای جانبی و بطن سوم در مدل شبیه سازی شده توسط لینینگر بدون در نظر گیری اثر ضربان پارانشیم [۳۹]..... ۱۰۰
- شکل ۸۸- بررسی استقلال نتایج از مقدار مربوط به گام زمانی با استفاده از معیار فشار وارد بر بطنهای جانبی و بطن سوم در تحقیق حاضر..... ۱۰۱
- جدول ۸- نتایج مربوط به فشار وارد بر بطنها در گامهای زمانی متفاوت در تحقیق حاضر..... ۱۰۲
- شکل ۸۹- بررسی استقلال نتایج از تعداد سلولهای شبکه با استفاده از معیار فشار وارد بر بطنهای جانبی و بطن سوم..... ۱۰۳
- شکل ۹۰- بخشهای جدا شده جهت بررسی فشار (مجرای سیلویوس و بطن چهارم)..... ۱۰۴
- شکل ۹۱- بخشهای جدا شده جهت بررسی فشار (بطنهای جانبی و بطن سوم)..... ۱۰۵
- شکل ۹۲- بخشهای جدا شده جهت بررسی فشار (ناحیه ی گردنی و پشتی-کمری فضای زیر عنکبوتیه)..... ۱۰۵
- شکل ۹۳- بخش جدا شده ی طناب نخاعی جهت بررسی فشار..... ۱۰۵
- شکل ۹۴- فشار محاسبه شده در بطنهای جانبی در تحقیق حاضر..... ۱۰۷
- شکل ۹۵- روش EVD جهت تعیین مقدار فشار درون بطنهای جانبی [۵۹]..... ۱۰۸
- شکل ۹۶- بیشینه های نسبی نمودار فشار در بطنها نقاط P2, P1 و P3 [۶۰]..... ۱۰۸
- شکل ۹۷- مقایسه ی بین فشار درون بطنها و ضربان پارانشیم در تحقیق حاضر..... ۱۰۹
- شکل ۹۸- فشار محاسبه شده وارد بر مجرای سیلویوس در تحقیق حاضر..... ۱۱۰
- شکل ۹۹- فشار محاسبه شده وارد بر بطن چهارم در تحقیق حاضر..... ۱۱۱
- شکل ۱۰۰- کانتورهای فشار در ناحیه ی زیر عنکبوتیه ی اطراف پارانشیم در لحظات ۰ تا ۰/۴ ثانیه..... ۱۱۲
- شکل ۱۰۱- کانتورهای فشار در ناحیه ی زیر عنکبوتیه ی اطراف پارانشیم در لحظات ۰/۵ تا ۱ ثانیه..... ۱۱۳
- شکل ۱۰۲- کانتورهای فشار در بطنهای مغزی در لحظات ۰ تا ۰/۴ ثانیه..... ۱۱۴
- شکل ۱۰۳- کانتورهای فشار در بطنهای مغزی در لحظات ۰/۵ تا ۱ ثانیه..... ۱۱۵
- شکل ۱۰۴- فشار محاسبه شده در فضای کرانیال توسط گوپتا و همکارانش [۴۱]..... ۱۱۶
- شکل ۱۰۵- افت فشار پیشبینی شده توسط سوئیتمن و همکارانش در عبور جریان از مجرای سیلویوس..... ۱۱۶
- شکل ۱۰۶- تبادل فشار بین مغز و نخاع در لحظات ۰ تا ۰/۳ ثانیه..... ۱۱۸
- شکل ۱۰۷- تبادل فشار بین مغز و نخاع در لحظات ۰/۴ تا ۰/۸ ثانیه..... ۱۱۹
- شکل ۱۰۸- مقاطع در نظر گرفته شده جهت بررسی تغییرات سرعت..... ۱۲۰
- شکل ۱۰۹- تغییرات متوسط سرعت محاسبه شده در مقطع در نظر گرفته شده در سوراخ ماژندی بر حسب زمان در تحقیق حاضر..... ۱۲۱
- شکل ۱۱۰- تغییرات سرعت متوسط محاسبه شده در مقاطع در نظر گرفته شده در مجراهای لوشکا بر حسب زمان در تحقیق حاضر..... ۱۲۲

- شکل ۱۱۱- تغییرات سرعت متوسط محاسبه شده در مقاطع در نظر گرفته شده در مجراهای لوشکا بر حسب زمان در تحقیق حاضر ۱۲۲
- شکل ۱۱۲- تغییرات سرعت متوسط محاسبه شده در مقاطع در نظر گرفته شده در مجراهای لوشکا بر حسب زمان در تحقیق حاضر ۱۲۴
- شکل ۱۱۳- تغییرات سرعت متوسط محاسبه شده در مقاطع در نظر گرفته شده در مقطع اتصال مجرای سیلویوس و بطن چهارم در تحقیق حاضر ۱۲۴
- شکل ۱۱۴- بیشینه ی تغییرات جریان خون در مرحله ی سیستمیک قلب [۵۶] ۱۲۵
- شکل ۱۱۵- مقطع در نظر گرفته شده در سیستم پنتاین ۱۲۶
- شکل ۱۱۶- کانتور سرعت در مقطع در نظر گرفته شده در سیستم پنتاین در لحظات ۰ و ۰/۱ ثانیه ۱۲۷
- شکل ۱۱۷- کانتور سرعت در مقطع در نظر گرفته شده در سیستم پنتاین در لحظات ۰/۲، ۰/۳، و ۰/۵ ثانیه ۱۲۸
- شکل ۱۱۸- کانتور سرعت در مقطع در نظر گرفته شده در سیستم پنتاین در لحظات ۰/۶، ۰/۷، و ۰/۸ ثانیه ۱۲۹
- شکل ۱۱۹- نتایج سرعت محاسبه شده با روش PC MRI توسط گوپتا [۴۱] ۱۳۰
- شکل ۱۲۰- در نظر گیری ناحیه ی قوس پشتی و کمری فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف به عنوان محل تبادل جریان در ستون نخاعی ۱۳۱
- شکل ۱۲۱- مقایسه ی فشار وارد بر ناحیه ی گردنی فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف نخاع در دو حالت متفاوت محل تبادل جریان در ستون نخاعی. نمودار خط چین ۰,۱ ثانیه در محور زمان جابه جا شده است. ۱۳۲
- شکل ۱۲۲- مقایسه ی فشار وارد بر ناحیه ی پشتی و کمری فضای زیرعنکبوتیه ی اطراف نخاع در دو حالت متفاوت محل تبادل جریان در ستون نخاعی ۱۳۳
- شکل ۱۲۳- مقایسه ی فشار وارد بر طناب نخاع در دو حالت متفاوت محل تبادل جریان در ستون نخاعی ۱۳۴
- شکل ۱۲۴- استفاده از ناحیه ی دریاچه ی ونوسی به عنوان محل جذب مایع مغزی نخاعی ۱۳۵
- شکل ۱۲۵- فشار وارد بر بطن های جانبی و بطن سوم با تغییر محل جذب مایع مغزی نخاعی تولید شده. ۱۳۵
- شکل ۱۲۶- فشار وارد بر بطن چهارم با تغییر محل جذب مایع مغزی نخاعی تولید شده. ۱۳۶
- شکل ۱۲۷- فشار وارد بر سطح مجرای سیلویس با تغییر محل جذب مایع مغزی نخاعی تولید شده. ۱۳۷
- شکل ۱۲۸- فشار وارد بر طناب نخاعی با تغییر محل جذب مایع مغزی نخاعی تولید شده. ۱۳۸
- شکل ۱۲۹- مقایسه ی فشار در بطن های جانبی و بطن سوم در دو حالت طبیعی و خون ریزی در فضای زیرعنکبوتیه ۱۴۰
- شکل ۱۳۰- مقایسه ی فشار در بطن چهارم در دو حالت طبیعی و خون ریزی در فضای زیرعنکبوتیه ۱۴۰
- شکل ۱۳۱- مقایسه ی فشار در مجرای سیلویوس در دو حالت طبیعی و خون ریزی در فضای زیرعنکبوتیه ... ۱۴۱
- شکل ۱۳۲- مقایسه ی فشار در پارانشیم مغز در دو حالت طبیعی و خون ریزی در فضای زیرعنکبوتیه ۱۴۱
- شکل ۱۳۳- مقایسه ی فشار در فضای زیرعنکبوتیه ی مغز در دو حالت طبیعی و خون ریزی در فضای زیرعنکبوتیه ۱۴۲

- شکل ۱۳۴- مقایسه‌ی فشار در ناحیه‌ی گردنی فضای زیرعنکبوتیه در دو حالت طبیعی و خون‌ریزی در فضای زیرعنکبوتیه..... ۱۴۲
- شکل ۱۳۵- مقایسه‌ی فشار در ناحیه‌ی پشتی و کمری زیرعنکبوتیه در دو حالت طبیعی و خون‌ریزی در فضای زیرعنکبوتیه..... ۱۴۳
- شکل ۱۳۶- مقایسه‌ی فشار وارد بر طناب نخاعی در دو حالت طبیعی و خون‌ریزی در فضای زیرعنکبوتیه... ۱۴۳
- شکل ۱۳۷- فشار وارد بر سطوح بطن‌های مغز در دو حالت مختلف قرارگیری بدن..... ۱۴۴
- شکل ۱۳۸- فشار وارد بر سطح طناب نخاعی در دو حالت مختلف قرارگیری بدن..... ۱۴۵
- شکل ۱۳۹- فشار درون فضای زیرعنکبوتیه ی سر در دو حالت مختلف قرارگیری بدن..... ۱۴۶
- شکل ۱۴۰- تغییرات زمانمند سرعت متوسط در سوراخ‌های لوشکا در دو حالت مختلف قرارگیری بدن..... ۱۴۷
- شکل ۱۴۱- تنگی مجرای سیلویس..... ۱۵۱
- شکل ۱۴۲- تومور در بطن چهارم..... ۱۵۱

۱- فصل اول: مقدمه

مایع مغزی نخاعی مایعی بی‌رنگ بوده که اطراف مغز و طناب نخاعی را احاطه کرده است. این مایع توسط شبکه‌های وریدی ساخته می‌شود و از طریق بطن‌ها به فضا زیرعنکبوتیه منتقل می‌گردد و در آنجا از طریق سینوس‌های وریدی به جریان خون منتقل می‌گردد. اختلال در الگوی طبیعی مایع مغز نخاع می‌تواند سبب بیماری‌های متعددی از جمله هیدروسفالوس، سیرنگومیالی و یا بدشکلی کیاری گردد. شبیه‌سازی موردنظر در این پایان‌نامه باهدف فهم بیشتر کمی و کیفی جریان مایع مغزی نخاعی است. با تهیه‌ی هندسه‌ی مربوط به مسیر جریان مایع مغزی نخاعی و اعمال مدل‌های ریاضی به آن می‌توان مقادیر فشار و سرعت را در نقاط مختلف مسیر جریان محاسبه نمود. به‌طور کلی امروزه از دو روش برای سنجش جریان مایع مغزی نخاعی استفاده می‌شود. روش اول که با استفاده از دستگاه‌های تصویربرداری MRI انجام می‌پذیرد معمولاً در حیطه‌ی تحقیقات مربوط به علم رادیولوژی قرار می‌گیرد. در دومین روش که در این پایان‌نامه نیز از آن استفاده‌شده است، استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی است که به‌صورت عددی معادلات حاکم بر جریان حل‌شده تا پارامترهای مربوط به آن محاسبه گردند.

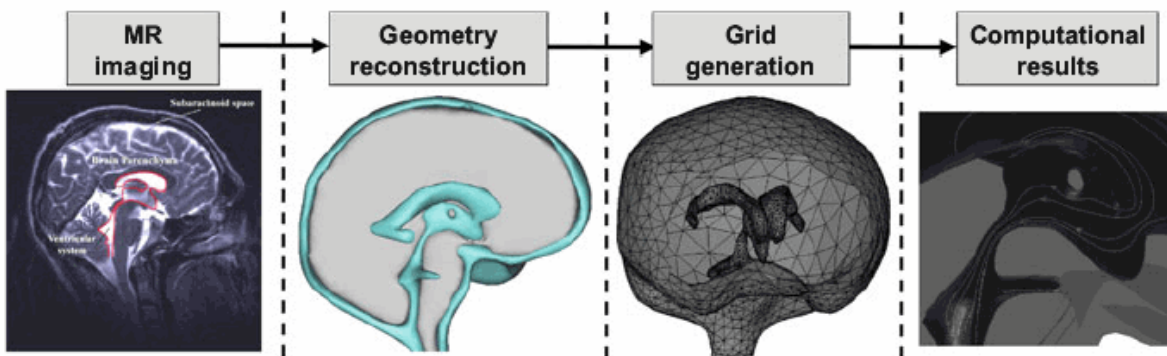
به‌طور مشخص در این پایان‌نامه هدف آن است که با استفاده از اصول فیزیکی حاکم بر جریان سیال، دینامیک حرکت CSF^۱ مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. فرایند نیل به هدف مذکور در سه مرحله‌ی کلی به شرح زیر انجام خواهد پذیرفت:

۱- در مرحله‌ی نخست با استفاده از روش MRI تصاویری، که در ادامه پروتکل‌های نمونه برای آن ارائه خواهد شد، از بخش‌های موردنظر تهیه می‌گردد. علاوه بر آن در صورت امکان، سرعت جریان در بخش‌هایی و در قاب‌های زمانی مختلف جمع‌آوری‌شده تا بدین طریق پروفیل سرعت برحسب زمان به دست آید.

۲- در مرحله‌ی دوم با استفاده از تصاویر دوبعدی به‌دست‌آمده در مرحله‌ی نخست و همچنین استفاده از ابزارهای بازسازی تصاویر در سه بعد، مدل سه‌بعدی از مسیر گردش مایع مغز نخاع در بدن تهیه خواهد شد. گسسته‌سازی فضای گردش مایع به المان‌های حجمی کوچک جهت حل معادلات حاکم نیز در همین مرحله صورت خواهد پذیرفت.

^۱ - Cerebrospinal fluid

۳- در مرحله‌ی سوم مکانیک سیالات محاسباتی (CFD) وارد عمل شده و معادلات حاکم بر جریان را در فضای پرشده از مایع مغز نخاع و برای هر سلول از فضای محاسباتی حل خواهد نمود که در نتیجه‌ی آن تمامی خواص جریان در طول مسیر گردش CSF نظیر، فشار جریان در کل مسیر، سرعت در آن و سایر پارامترهای دیگر به دست خواهد آمد.



شکل ۱- مراحل اصلی انجام شبیه‌سازی CFD مایع مغز نخاع [۱]

در نهایت می‌توان در صورت امکان با مقایسه نتایج به دست آمده از حل معادلات جریان و داده‌های MRI در رابطه با سرعت جریان در مقطع و یا بخش خاصی از مسیر گردش مایع مغز نخاع، به اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از تحلیل CFD پرداخت و از آن جهت اهداف آتی در این رابطه استفاده نمود. در واقع فهم مکانیسم و دینامیک حرکت مایع مغز نخاع می‌تواند گامی مهم در طراحی روش‌های دارورسانی (Drug delivery) به سیستم عصبی مرکزی و تشخیص و درمان بسیاری از بیماری‌های مرتبط با آن، باشد.

۲-۱- دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات نام یکی از شاخه‌های بسیار پرکاربرد و وسیع مکانیک سیالات است. موضوع مورد مطالعه در این زمینه از علوم چگونگی رفتار مایعات و گازها به هنگام حرکت تحت اثر عوامل گوناگون است. مطالعه‌ی رفتار سیالات (در حرکت و در سکون) را باید از مهم‌ترین بخش‌های مکانیک قدیم (مکانیک کلاسیک)، فیزیک، ریاضیات کاربردی، و علوم و فنون مهندسی

به حساب آورد. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۱ یکی از بزرگ‌ترین زمینه‌هایی است که مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی آن در نیمهٔ دوّم قرن بیستم و در سدهٔ جدید میلادی وصل می‌کند. دینامیک سیالات محاسباتی علم پیش‌بینی جریان سیال، انتقال حرارت، انتقال جرم، واکنش‌های شیمیایی، و پدیده‌های وابسته به آن به‌وسیله حل معادلات ریاضی، که قوانین فیزیکی را بیان می‌کنند، با استفاده از یک فرآیند عددی است. این معادلات شامل، پایستاری جرم، مومنتم، انرژی، ذرات و غیره است در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. با تقسیم ناحیه موردنظر برای تحلیل به المان‌های کوچک‌تر و اعمال شرایط مرزی برای گره‌های مرزی با اعمال تقریب‌هایی یک دستگاه معادلات خطی به دست می‌آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه موردنظر به دست می‌آید. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از حل معادلات می‌توان برآیند نیروهای وارد بر سطوح، ضرایب برا و پسا و ضریب انتقال حرارت را محاسبه نمود. فلوئنت یک نرم‌افزار کامپیوتری دینامیک سیالات محاسباتی چندمنظوره برای شبیه‌سازی عددی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی است. با توجه به محیط مناسب نرم‌افزار جهت تعریف مسئله و شرایط پیچیده، تعریف شرایط مرزی گوناگون و حل مسائل پیچیده شامل تأثیر پدیده‌های مختلف به کمک این نرم‌افزار قابل حل است. این نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی با زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می‌برد. نتیجتاً فلوئنت با استفاده از حافظه دینامیک، ساختار مناسب داده‌ها و اطلاعات و کنترل انعطاف‌پذیر، محاسبات را ممکن می‌سازد. مدل‌سازی جریان‌های دائم و غیر دائم، جریان لزج و غیر لزج، احتراق، جریان مغشوش، حرکت ذرات جامد و قطرات مایع در یک‌فاز پیوسته و ده‌ها قابلیت دیگر Fluent را تبدیل به یک نرم‌افزار بسیار قوی و مشهور در دینامیک سیالات محاسباتی نموده است. اکنون روش دینامیک محاسباتی سیالات جای خود را در میان روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی برای تحلیل مسائل سیالات و انتقال حرارت باز کرده است و استفاده از این روش‌ها برای انجام تحلیل‌های مهندسی امری عادی شده است. در واقع تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی مکمل آزمایش‌ها و تجربیات بوده و مجموع تلاش‌ها و هزینه‌های موردنیاز در آزمایشگاه را کاهش می‌دهد. دینامیک محاسباتی سیالات به‌صورت گسترده در زمینه‌های مختلف صنعتی مرتبط با سیالات، انتقال حرارت و انتقال

^۱ - Computational Fluid Dynamics