دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

عنوان

تحلیل اجزای محدود اثرات هندسه و رفتارهای مکانیکی مختلف استنت‌های شریانی در هنگام و بعد از جاگذاری

استاد راهنما: دکتر محمد حسن حجتی
استاد مشاور: دکتر علی معظمی گودرزی

نگارش: سید میثاق ایمانی

بهمن ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

عنوان

تحلیل اجزای محدود اثرات هندسه و رفتارهای مکانیکی مختلف استنت‌های شریانی در هنگام و بعد از جاگذاری

استاد راهنما: دکتر محمد حسن حجتی
استاد مشاور: دکتر علی معظمی گودرزی

نگارش: سید میثاق ایمانی

بهمن ماه ۱۳۹۰

تقدیم به:

پدر و مادر مهربان و فداکارم

که همواره مشوق و امیدبخش زندگی‌ام بودند.

سپاسگزاری:

سپاس خداوند متعال را که به من فرصت آموختن عطا فرمود و این شور و هیجان را در من ایجاد نمود که بتوانم بیاموزم، بخوانم، یاد بگیرم و از تلاش کردن باز نایستم.

مراتب سپاس و قدردانی خود را از راهنمایی‌های عالمانه و ارزشمند استاد ارجمند و گرامی، جناب آقای دکتر محمد حسن حجتی اعلام می‌دارم. همچنین بر خود لازم می‌دانم که از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر علی معظمی گودرزی که با دقت، سعه‌صدر و گشاده‌رویی در کلیه مراحل تدوین این پایان‌نامه مرا مرهون ارشاد و راهنمایی‌های فراوان خویش قرار دادند، تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

یکی از اصلی‌ترین روش‌ها برای درمان بیماری انسداد شریان‌های کرونری قلب، استفاده از وسیله‌ای به نام استنت می‌باشد. به خاطر کارآیی این روش درمانی، در سال‌های اخیر استفاده از این وسیله افزایش چشمگیری یافته و مدل‌های متنوعی از آن به بازار عرضه شده است. برای انتخاب بهترین مدل استنت از میان مدل‌های موجود، باید عملکرد آنها به دقت تحلیل شده و رفتار مکانیکی مدل‌های مختلف آن مورد مقایسه قرار گیرد. در تحقیق حاضر، عملکرد یک استنت شریانی در هنگام جاگذاری در داخل یک رگ مسدود شده به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، از مدلی شامل سه بخش بالون، استنت و رگ همراه با پلاک مسدودکننده، استفاده شده است و در آن استنت با استفاده از مدل کشسان- مومسان دو خطی و بالون، رگ و پلاک مسدودکننده نیز با استفاده از مدل غیرخطی هایپرالاستیک مدل شده‌اند. ضمناً فشار خون نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل ارائه شده، هر سه مرحله جاگذاری استنت در داخل رگ شامل بارگذاری، تثبیت و باربرداری شبیه‌سازی شده است. در بخش دیگری از این تحقیق، تأثیر هندسه و جنس استنت بر عملکرد آن بررسی شده است. بدین منظور چهار مدل استنت تجاری شامل استنت‌های پالماز- اسچاتز، ان آی آر، مولتی- لینک و اس سون مدل‌سازی شده و عملکرد آنها در هنگام جاگذاری مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج ارائه شده در هر مورد شامل توزیع تنش بر روی استنت و رگ، تغییرات قطر خارجی استنت، خمش ایجاد شده در لبه‌های استنت و درصد کاهش طول استنت می‌باشد. همچنین با مقایسه مقدار تنش ایجاد شده بر روی رگ، تأثیر هندسه و جنس استنت بر گرفتگی مجدد پس از استنت‌گذاری مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس یافته‌های این تحقیق، از بین استنت‌های بررسی شده، احتمال گرفتگی مجدد پس از استفاده از استنت اس سون کمتر از بقیه مدل‌هاست. همچنین از بین مواد بررسی شده نیز، ماده فولاد ضد زنگ ۳۰۴ مناسب‌ترین ماده برای ساخت استنت می‌باشد. نتایج بدست آمده از این تحقیق، مطابقت خوبی با یافته‌های کلینیکی و عددی ارائه شده در این زمینه دارند.

واژه‌های کلیدی: بیماری انسداد شریان‌های کرونری قلب؛ روش اجزای محدود؛ بالون؛ استنت شریانی؛ رگ؛ پلاک؛ گرفتگی مجدد

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ه

فهرست مطالب و

فهرست اشکال ک

فهرست جداول ع

فهرست علائم ف

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- بیماری‌های قلبی عروقی و تصلب شریان ۵

۱-۳- روش‌های درمان ۸

۱-۳-۱- جراحی قلب باز ۹

۱-۳-۲- آنژیوپلاستی با بالون ۱۰

۱-۳-۳- کاشت استنت ۱۲

۱-۴- هدف پایان‌نامه ۱۴

۱-۵- چارچوب کلی تحقیق ۱۶

فصل دوم: بررسی ادبیات موضوع ۱۸

۲-۱- مقدمه ۱۹

۲-۲- رگ ۱۹

۲-۲-۱- ساختار رگ ۲۰

۲-۲-۲- بیان ریاضی رفتار مکانیکی دیواره رگ ۲۱

۲-۲-۲-۱- مدل هایپرالاستیک ۲۲

۲-۳- پلاک ۲۶

۲-۴- استنت ۲۷

۲-۴-۱- دسته‌بندی استنت‌ها ۲۸

۲-۴-۲- شکل هندسی استنت‌ها ۲۹

۲-۴-۳- جنس استنت‌ها ۳۱

۲-۵- بالون ۳۲

۲-۶- تاریخچه تحقیق ۳۳

۲-۷- جمع‌بندی ۴۱

فصل سوم: مدل‌سازی ۴۳

۳-۱- مقدمه ۴۴

۳-۲- مراحل مدل‌سازی ۴۴

۳-۲-۱- مدل هندسی ۴۵

۳-۲-۱-۱- استنت ۴۵

۳-۲-۱-۲- بالون ۵۲

۳-۲-۱-۳- رگ و پلاک مسدود کننده ۵۳

۳-۲-۲- جنس مواد ۵۳

۳-۲-۲-۱- استنت ۵۳

۳-۲-۲-۲- بالون ۵۴

۳-۲-۲-۳- رگ و پلاک مسدود کننده ۵۵

۳-۲-۳- استفاده از تقارن هندسی در مدل کردن ۵۶

۳-۲-۴- شبکه‌بندی مدل ۵۷
۳-۲-۵- بارگذاری ۶۲
۳-۲-۶- اعمال شرایط مرزی ۶۴
۳-۲-۷- برهمکنش سطوح ۶۴
۳-۳- تعریف مدل‌ها ۶۵
۳-۴- پارامترهای خروجی ۶۸
۳-۵- جمع‌بندی ۷۰

فصل چهارم: ارائه و تفسیر نتایج ۷۱
۴-۱- مقدمه ۷۲
۴-۲- نتایج حاصل از تحلیل مدل اول ۷۲
۴-۲-۱- توزیع تنش ۷۲
۴-۲-۲- تغییرات قطر خارجی ۸۱
۴-۲-۳- میزان خمش ایجاد شده در دو انتهای استنت ۸۳
۴-۲-۴- درصد کاهش طول استنت ۸۴
۴-۳- نتایج حاصل از تحلیل مدل دوم ۸۵
۴-۳-۱- توزیع تنش ۸۶
۴-۳-۲- تغییرات قطر خارجی ۸۷
۴-۳-۳- میزان خمش ایجاد شده در دو انتهای استنت ۸۸
۴-۳-۴- درصد کاهش طول استنت ۸۹
۴-۳-۵- مقایسه نتایج بدست آمده با سایر تحقیقات ۹۰
۴-۴- نتایج حاصل از تحلیل مدل سوم ۹۱
۴-۴-۱- توزیع تنش ۹۱
۴-۴-۲- تغییرات قطر خارجی ۹۵

۴-۴-۳- میزان خمش ایجاد شده در دو انتهای استنت ۹۶
۴-۴-۴- درصد کاهش طول استنت ۹۶
۴-۵- نتایج حاصل از تحلیل مدل چهارم ۹۷
۴-۵-۱- توزیع تنش ۹۷
۴-۵-۲- تغییرات قطر خارجی ۱۰۰
۴-۵-۳- میزان خمش ایجاد شده در دو انتهای استنت ۱۰۱
۴-۵-۴- درصد کاهش طول استنت ۱۰۲
۴-۶- نتایج حاصل از تحلیل مدل پنجم ۱۰۳
۴-۶-۱- توزیع تنش ۱۰۴
۴-۶-۲- تغییرات قطر خارجی ۱۰۶
۴-۶-۳- میزان خمش ایجاد شده در دو انتهای استنت ۱۰۷
۴-۶-۴- درصد کاهش طول استنت ۱۰۸
۴-۷- نتایج حاصل از تحلیل مدل ششم ۱۰۹
۴-۸- نتایج حاصل از تحلیل مدل هفتم ۱۱۰
۴-۹- نتایج حاصل از تحلیل مدل هشتم ۱۱۱
۴-۱۰- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل مدل‌های مختلف ۱۱۲
۴-۱۰-۱- مقایسه از نظر هندسه استنت ۱۱۲
۴-۱۰-۲- مقایسه از نظر جنس استنت ۱۱۵
۴-۱۱- مقایسه نتایج بدست آمده با یافته‌های کلینیکی ۱۱۶
۴-۱۲- اعتبارسنجی نتایج بدست آمده ۱۱۹
۴-۱۳- جمع‌بندی ۱۲۰

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۲
۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۳

۵-۲- پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۲۶

مراجع ۱۲۹

چکیده انگلیسی

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱): (الف) یک رگ سالم با جریان خون طبیعی و (ب) رگ مسدود شده [۶] ۶

شکل (۱-۲): تصویری از شریان کرونری مسدود شده [۸] ۸

شکل (۱-۳): تصویری شماتیک از جراحی قلب باز [۱۰] ۹

شکل (۱-۴): تصویری از (الف) آنژیوپلاستی با بالون و (ب) استنت‌گذاری در یک رگ مسدود شده [۱۰] ۱۱

شکل (۲-۱): شکل ساده شده مقطع دیواره شریان [۱۶] ۲۰

شکل (۲-۲): استنت لوله‌ی شیاردار [۱] ۳۰

شکل (۲-۳): استنت لوله‌ی مارپیچ [۱] ۳۰

شکل (۳-۱): استنت پالماز- اسچاتز در نمای سه‌بعدی ۴۶

شکل (۳-۲): مشخصات هندسی استنت پالماز- اسچاتز (ابعاد به میلی‌متر) ۴۷

شکل (۳-۳): شکل واقعی استنت ان آی آر [۵۷] ۴۸

شکل (۳-۴): استنت ان آی آر در نمای سه‌بعدی ۴۹

شکل (۳-۵): (الف) شکل واقعی استنت مولتی- لینک و (ب) مقطع استنت [۵۷] ۵۰

شکل (۳-۶): استنت مولتی- لینک در نمای سه‌بعدی ۵۱

شکل (۳-۷): شکل واقعی استنت اس سون [۵۷] ۵۱

شکل (۳-۸): استنت اس سون در نمای سه‌بعدی ۵۲

شکل (۳-۹): رگ گرفته شده [۱] ۵۳

شکل (۳-۱۰): نمودار تنش- کرنش ماده مومسان- کشسان دوخطی [۴۷] ۵۴

شکل (۳-۱۱): (الف) طرح شماتیکی از یک استوانه که دارای تقارن طولی و محوری است و (ب) جزء کوچک تکرار شونده ۵۷

شکل (۳-۱۲): نمودار نتایج بدست آمده برای جابجایی شعاعی نقطه میانی استنت پالماز- اسچاتز با استفاده از تعداد المان‌های مختلف ۵۹

شکل (۳-۱۳): مدل شبکه‌بندی شده استنت‌های (الف) پالماز- اسچاتز، (ب) ان آی آر، (ج) مولتی- لینک و (د) اس سون ۶۰

شکل (۳-۱۴): مدل نهایی بالون- استنت- رگ- پلاک برای استنت پالماز- اسچاتز ۶۲

شکل (۳-۱۵): منحنی اعمال بار در جاگذاری یک استنت شریانی ۶۳

شکل (۴-۱): تصویر استنت، رگ و پلاک در لحظه ۱/۶۳۵ ثانیه در مدل اول ۷۳

شکل (۴-۲): توزیع تنش وان مایسز بر روی استنت در لحظه ۱/۶۳۵ ثانیه در مدل اول ۷۴

شکل (۴-۳): نمای جانبی از استنت در لحظه ۱/۶۳۵ ثانیه در مدل اول ۷۴

شکل (۴-۴): چگونگی توزیع تنش وان مایسز بر روی رگ در لحظه ۱/۶۳۵ ثانیه در مدل اول ۷۵

شکل (۴-۵): توزیع تنش وان مایسز بر روی استنت در لحظه ۸/۲۷ ثانیه در مدل اول. ۷۶

شکل (۴-۶): چگونگی توزیع تنش وان مایسز بر روی رگ در لحظه ۸/۲۷ ثانیه در مدل اول ۷۸

شکل (۴-۷): تغییرات تنش وان مایسز و تنش در سه راستا برای جزء ۱۶۶۴ از استنت ۷۹

شکل (۴-۸): مقایسه نتایج بدست آمده در (الف) این پایان‌نامه و در (ب) مقاله [۴۸] ۸۱

شکل (۴-۹): نمودار تغییرات قطر خارجی استنت در دو نقطه B_1 و C_1 در مدل اول ۸۳

شکل (۴-۱۰): نمودار تغییرات میزان خمش در دو انتهای استنت در مدل اول ۸۴

شکل (۴-۱۱): نمودار تغییرات درصد کاهش طول استنت در مدل اول ۸۵

شکل (۴-۱۲): توزیع تنش وان مایسز بر روی استنت در مدل دوم ۸۶

شکل (۴-۱۳): چگونگی توزیع تنش وان مایسز بر روی رگ در مدل دوم ۸۷

شکل (۴-۱۴): نمودار تغییرات قطر خارجی استنت در دو نقطه B_2 و C_2 در مدل دوم ۸۸

شکل (۴-۱۵): نمودار تغییرات میزان خمش در دو انتهای استنت در مدل دوم ۸۹

شکل (۴-۱۶): نمودار تغییرات درصد کاهش طول استنت در مدل دوم ۹۰

شکل (۴-۱۷): تصویر استنت، رگ و پلاک پس از اعمال بار در مدل سوم ۹۲

شکل (۴-۱۸): توزیع تنش وان مایسز بر روی استنت در مدل سوم ۹۳

شکل (۴-۱۹): نمای جانبی از استنت در انتهای بارگذاری در مدل سوم ۹۳

شکل (۴-۲۰): چگونگی توزیع تنش وان مایسز بر روی رگ در مدل سوم ۹۴

شکل (۴-۲۱): نمودار تغییرات قطر خارجی استنت در دو نقطه B_3 و C_3 در مدل سوم ۹۵

شکل (۴-۲۲): نمودار تغییرات میزان خمش در دو انتهای استنت در مدل سوم ۹۶

شکل (۴-۲۳): نمودار تغییرات درصد کاهش طول استنت در مدل سوم ۹۷

شکل (۴-۲۴): تصویر استنت، رگ و پلاک پس از اعمال بار در مدل چهارم ۹۸

شکل (۴-۲۵): توزیع تنش وان مایسز بر روی استنت در مدل چهارم ۹۹

شکل (۴-۲۶): چگونگی توزیع تنش وان مایسز بر روی رگ در مدل چهارم ۱۰۰

شکل (۴-۲۷): نمودار تغییرات قطر خارجی استنت در دو نقطه B_4 و C_4 در مدل چهارم ۱۰۱

شکل (۴-۲۸): نمودار تغییرات میزان خمش در دو انتهای استنت در مدل چهارم ۱۰۲

شکل (۴-۲۹): نمودار تغییرات درصد کاهش طول استنت در مدل چهارم ۱۰۳

شکل (۴-۳۰): تصویر استنت، رگ و پلاک پس از اعمال بار در مدل پنجم ۱۰۴

شکل (۴-۳۱): توزیع تنش وان مایسز بر روی استنت در مدل پنجم ۱۰۵

شکل (۴-۳۲): نمای جانبی از استنت در انتهای بارگذاری در مدل پنجم ۱۰۵

شکل (۴-۳۳): چگونگی توزیع تنش وان مایسز بر روی رگ در مدل پنجم ۱۰۶

شکل (۴-۳۴): نمودار تغییرات قطر خارجی استنت در دو نقطه B_5 و C_5 در مدل پنجم ۱۰۷

شکل (۴-۳۵): نمودار تغییرات میزان خمش در دو انتهای استنت در مدل پنجم ۱۰۸

شکل (۴-۳۶): نمودار تغییرات درصد کاهش طول استنت در مدل پنجم ۱۰۹

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱): مشخصات مکانیکی مواد بکار رفته برای ساخت استنت ۵۴

جدول (۳-۲): ثابت‌های تابع چگالی انرژی کرنشی بکار رفته برای رگ و پلاک مسدود کننده ۵۵

جدول (۳-۳): تعداد المان‌های بکار رفته برای شبکه‌بندی مدل‌ها ۵۸

جدول (۳-۴): تعریف مدل‌ها ۶۷

جدول (۴-۱): مقایسه نتایج بدست آمده از مدل دوم این پایان‌نامه و سایر تحقیقات ۹۰

جدول (۴-۲): مقایسه نتایج بدست آمده برای هندسه‌های مختلف ۱۱۳

جدول (۴-۳): مقایسه نتایج بدست آمده برای جنس‌های مختلف ۱۱۶

فهرست علائم

عنوان	علامت
تغییر ناپذیرهای تانسور کرنش	I_1, I_2, I_3
ضرایب کشیدگی ماده در سه راستای اصلی	$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$
تابع چگالی انرژی کرنشی (J/m^3)	W
ثابت‌های ماده اوگن	μ_i, α_i
ثابت‌های هایپرالاستیک	C_{ijk}
متر	m
میلی‌متر	mm
میلی‌متر جیوه	$mmHg$
تنش	σ
تنش حد تسلیم	σ_y
کرنش	ε
کیلو پاسکال	KPa
مگا پاسکال	MPa
گیگا پاسکال	GPa

کیلوگرم	Kg
ثانیه	sec
زمان بارگذاری	t_l
زمان تثبیت	t_s
زمان باربرداری	t_u
حداکثر فشار وارده بر بالون (فشار جاگذاری)	P_{max}
افزایش شعاع استنت در طی عمل بارگذاری	RG
شعاع خارجی اولیه استنت	R_0
شعاع خارجی استنت در انتهای مرحله بارگذاری	$R_{expansion}$
شعاع خارجی نقطه میانی استنت در انتهای مرحله بارگذاری	$R_{central}$
شعاع خارجی لبه‌های استنت در انتهای مرحله بارگذاری	R_{distal}
میزان خمش ایجاد شده در هر یک از لبه‌های استنت	$dogboning_{distal}$
میزان خمش ایجاد شده در دو انتهای استنت	$dogboning$
طول اولیه استنت	L_0
طول نهایی استنت	L
درصد کاهش طول استنت	$foreshortening$

فصل اول

مقدمه