

تحلیل عددی شریان کرونری استنت گذاری شده: بررسی عملکرد دو استنت با جنس های منیزیمی و فولادی

یاسین تقی زاده، بهمن وحیدی*، بابک اکبری، شیما جلالیان صداقتی

دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۴

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۰۴

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۱۱

کلمات کلیدی:

وراثروسکلروسیس،

کاشت استنت،

گرفتگی مجدد،

درصد کاهش طول،

برگشت پذیری

خلاصه: سازه های کامپوزیتی مشبک به دلیل خواص منحصر بفردشان، یکی از سازه های پر کاربرد در صنایع هوایی، دریایی و خودروسازی می باشد. در دهه های اخیر تحقیقات زیادی برای پیش بینی بار بحرانی کمانش سازه های کامپوزیتی، بدون خرابی یا شکست انجام شده است. یکی از مهم ترین روش های غیرمخرب، روش همبستگی ارتعاشی می باشد. هدف تحقیق حاضر پیش بینی بار بحرانی کمانش ورق های کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از روش همبستگی ارتعاشی می باشد. برای این منظور در ابتدا تحلیل ارتعاشات غیرخطی ورق های کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس و در بارهای فشاری مختلف انجام شد. در مرحله ی بعد با استفاده از نتایج عددی و روش همبستگی ارتعاشی، بار بحرانی کمانش سازه مذکور پیش بینی گردید. در ادامه و برای صحت سنجی نتایج روش همبستگی ارتعاشی، سه ورق تقویت شده کامپوزیتی مشابه و با شرایط یکسان و با استفاده از روش با روش رشته پیچی و لایه چینی دستی ساخته شد و تحت آزمون فشار محوری قرار داده شد. در نهایت بار بحرانی کمانش تجربی به دست آمد. نتایج نشان می دهد که اختلاف بار بحرانی کمانش پیش بینی شده به روش همبستگی ارتعاشی با بار بحرانی کمانش به دست آمده از آزمایش تجربی کمتر از ۵ درصد می باشد که این موضوع دال بر مناسب بودن روش همبستگی ارتعاشی برای پیش بینی بار بحرانی کمانش با دقت بسیار بالا برای ورق های کامپوزیتی تقویت شده می باشد.

۱- مقدمه

این سالیان با وجود تحقیقات فراوان محققان برای بررسی و بهبود عملکرد استنت ها، به دلیل گستردگی مباحث برخی جنبه ها در این حوزه همچنان ناشناخته باقی مانده است.

در سال های اخیر با پیشرفت تکنولوژی، بسیاری از محققان، مدل های عددی مختلفی به منظور جاگذاری استنت در داخل رگ گرفته شده ارائه داده اند و کیفیت عملکرد این روش را بهبود بخشیدند [۱۹-۵]. تحقیقات اولیه در زمینه شبیه سازی عمل انبساط استنت برای بازکردن مسیر جریان خون، با استفاده از روش اجزا محدود توسط تنو و یوان [۸] و دومولین چو و همکاران [۹ و ۱۰] انجام شد. در این تحقیقات، با چشم پوشی از بالون، رگ و پلاک و اثرات متقابل بین آن ها و استنت، از مدل استنت تک، برای شبیه سازی رفتار استنت در داخل رگ استفاده شد. در این مدل سازی، یک استنت تحت تأثیر فشار یکنواخت داخلی قرار گرفته و پس از انبساط آن، به استخراج نتایج پرداخته شده است. این مدل به دلیل ساده سازی های بسیار، رفتار دقیقی از استنت داخل رگ ارائه نمی دهد. به منظور افزایش دقت مدل سازی، تماس بین استنت و سایر اجزاء درگیر توسط چوا

سالانه عده زیادی از مردم در جهان دچار حمله قلبی می شوند که شایع ترین علت آن، اترواسکلروسیس^۱ است. اترواسکلروز، تجمع مواد چربی، داخل و روی دیوار شریان است. انسداد هنگامی آغاز می شود که کلسترول موجود در خون در زیر لایه اندوتلیوم دیواره شریان رسوب کند و در نتیجه تجمع پلاکت ها انسداد شریانی اتفاق می افتد. در سال های اخیر استفاده از استنت های شریانی برای درمان بیماری انسداد شریان کرونری قلب افزایش یافته و مدل های مختلف آن، با هندسه و جنس متفاوت ارائه شده است. استنت های^۲ کرونری، داربست های استوانه ای کوچکی هستند که کاربرد اصلیشان، از بین بردن انسداد شریانی، با جلوگیری از برگشت پذیری^۳ الاستیک شریانی است. کاشت استنت به عنوان یک روش مؤثر برای درمان عارضه گرفتگی شریان های کرونری قلب، بیش از دو دهه است که مورد استفاده قرار می گیرد و با رشد چشمگیری همراه بوده است. در طی

1 Atherosclerosis

2 Stent

3 Recoil

* نویسنده عهده دار مکاتبات: bahman.vahidi@ut.ac.ir



تمامی اجزای درگیر بوده و به فیزیک واقعی مسأله نزدیک تر باشند. برای این منظور از یک مدل استنت تجاری پرکاربرد با هندسه پالماز-اسچاتز و همچنین از دو ماده مختلف در ساخت استنت‌ها یعنی آلیاژ منیزیم^۱ و فولاد ضدزنگ^۲ استفاده شده است و سعی شده تا رفتار استنت‌های منیزیمی به‌همراه انبساط آنها توسط بالن، درون شریان کرونری و عملکرد آنها روی دیواره شریان کرونری با سه نوع مختلف پلاک بررسی شده و نتایج آن‌ها با هم و با استنت‌های فولاد ضدزنگ که از پرکاربردترین استنت‌های دائمی امروزی هستند، مقایسه شود. این مطالعه از آن جهت حائز اهمیت است که می‌توان محدودیت‌های بالقوه‌ای که در عملکرد استنت‌های جذبی منیزیمی وجود دارد را مشخص کرده و به طور متمرکز روی مدل استنت‌های فلزی منیزیمی زیست تخریب‌پذیر هدف‌گذاری کرد. تحلیل رفتار مکانیکی استنت‌های منیزیمی آلیاژ AZ۳۱ روی دیواره شریان و پلاک و مقایسه آن با عملکرد مکانیکی استنت‌های فولادی نوآوری این مقاله محسوب می‌شود.

در این پژوهش شبیه‌سازی عمل انبساط استنت برای بازکردن مسیر جریان خون و تحلیل عددی شریان کرونری استنت‌گذاری شده با دو نوع مختلف استنت با جنس فولاد ضدزنگ و آلیاژ منیزیم انجام شده است و عملکرد این دو استنت با بررسی میزان آسیب سلولی دیواره شریان ناشی از کاشت این دو استنت با جنس‌های مختلف مقایسه شده است. یکی از اصلی‌ترین معیارهایی که در هنگام مقایسه استنت‌های مختلف باید در نظر گرفته شود، بررسی میزان آسیب سلولی وارده به دیواره شریان ناشی از کاشت استنت است که نهایتاً منجر به گرفتگی مجدد می‌شود، این پدیده عمدتاً در اثر صدمه‌های ناشی از استنت‌گذاری روی رگ ایجاد می‌شود [۲۱]. تحقیقات بالینی انجام شده نشان می‌دهد که این مسئله، رابطه‌ای مستقیم با مقدار تنش فون‌مایسز ایجاد شده بر روی رگ و کرنش محیطی اصلی رگ در موضع مورد نظر دارد. به این معنا که هر چه جاگذاری یک استنت، تنش فون‌مایسز بیشتری بر روی رگ ایجاد کند، احتمال آسیب سلولی دیواره رگ و در نتیجه گرفتگی مجدد، بیشتر می‌شود [۲۱] و [۲۲]. از جمله مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این پدیده جنس استنت کاشته شده در موضع مورد نظر است. دلیل انتخاب استنت‌های آلیاژ منیزیم و مقایسه آن با استنت تجاری پرکاربردی مثل استنت فولاد ضدزنگ،

و همکاران در نظر گرفته شد؛ آن‌ها مدل بالن-استنت، که انبساط استنت به طور غیر مستقیم با انبساط بالن صورت می‌پذیرد، را پیشنهاد کردند [۱۱]. در مطالعه دیگری، چوا و همکاران [۱۲] از مدل بالن-استنت به منظور بررسی اثر هندسه استنت پالماز-اسچاتز بر خروجی حاصل از استنت‌گذاری استفاده کردند؛ که با ایجاد تغییراتی در هندسه استنت پالماز-اسچاتز از جمله تغییر طول و تغییر پهناي سلول‌ها، پنج مدل مختلف از این نوع استنت ایجاد و رفتار آن‌ها را در هنگام جاگذاری این نوع مدل بررسی شده است. این مدل توسط محققین دیگری چون وانگ و همکاران [۱۳]، ژیا و همکاران [۱۴]، و جو و همکاران [۱۵] نیز مورد استفاده قرار گرفته است. والکه و همکاران [۱۶] از مدل استنت-رگ برای بررسی تغییرات قطر استنت بر حسب فشار بالن در هنگام بارگذاری استفاده کردند و نتایج بدست آمده را با انجام آزمایش، مورد ارزیابی قرار دادند. اما به علت عدم وجود بالن و پلاک و همچنین شبیه‌سازی رگ با مدل الاستیک خطی، نتایج به دست آمده از این تحقیق تفاوت زیادی با شرایط واقعی دارد. مدل دیگری که توسط لالی و همکاران [۱۷] ارائه شد، مدل استنت-رگ-پلاک است که از این مدل برای مقایسه عملکرد دو استنت در هنگام بارگذاری استفاده کردند. این مدل با وجود نواقصی مثل در نظر نگرفتن بالن و فرض ماده الاستیک خطی بودن استنت است، مبنای کار محققین بعدی شد [۱۸ و ۱۹]. در یکی از مطالعات [۱۸] محققان توانستند نسبت به مدل‌های پیشین، استنت در رگ صاف، مدل استنت گذاری را بهبود بخشند و مدل نزدیک‌تری به شرایط کلینیکی ارائه دهند بدین صورت که بیشینه افتادگی بافت در مدل رگ خمیده 0.079 mm بود که بیشتر از مدل رگ صاف 0.048 mm است و همچنین حداقل سطح لومن رگ از $6/28 \text{ mm}$ در مدل رگ صاف به $6/10 \text{ mm}$ در رگ خمیده کاهش داشت. عده‌ای از محققین نیز مانند کاپلی و همکاران [۱۹] از مدل‌های بالن-استنت-رگ برای شبیه‌سازی استفاده کردند و نتایج به دست آمده را با مطالعات کلینیکی مقایسه کردند. این مدل و مدل‌های مشابه به دلیل در نظر نگرفتن پلاک، کامل محسوب نمی‌شود. در مطالعات اخیر در زمینه شبیه‌سازی شریان‌های کاروتید و کرونری استنت‌گذاری شده، از مدل بالن-استنت-رگ کاپلی، به صورت کامل‌تر استفاده شده است.

در مطالعه حاضر، تلاش شده تا مدل‌های مورد استفاده، شامل

1 MG alloy
2 Stainless steel

به دلیل نوع ساختارشان تغییر نمی‌کند.

طول قطر خارجی و ضخامت استنت به ترتیب برابر با ۱۰، ۳ و ۰/۰۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در اکثر تحقیقات انجام شده [۲۸ و ۲۹] به خاطر شرایط کار تحقیقی انجام شده، ابعاد استنت‌ها را به صورت تقریبی در نظر گرفته‌اند. در این تحقیق نیز به جهت عدم امکانات پردازش تصویر از مدل واقعی و همچنین بسته به شرایط مسئله ابعاد استنت‌های مدل شده به صورت تقریبی در محاسبات لحاظ شده است. برای مدل‌سازی مواد سازنده از مدل کشسان-مومسان دو خطی استفاده شده است که مشخصات مکانیکی این مواد در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مواد استنت‌های ارائه شده [۱ و ۱۱].
Table 1. Mechanical properties of the presented stents [1,11].

استیل ضد زنگ (۳۰۴)	آلیاژ منیزیم (AZ۳۱)
مدول یانگ (GPa)	۱۹۳
تنش تسلیم (MPa)	۲۰۷
مدول مماسی (MPa)	۶۹۲
ضریب پواسون	۰/۳۵

۲-۱-۲. مدل رگ مسدود شده

شریان مدنظر یک رگ ایده‌آل، همگن و همسانگرد و دارای گرفتگی موضعی فرض شده است. برای جنس رگ از مدل غیر خطی هایپرالاستیک مونی-ریولین مرتبه سوم استفاده شده است. با استفاده از مدل هایپرالاستیک برای یک جامد الاستیک همسانگرد غیر قابل تراکم می‌توان تنش کوشی (σ_{ij}) را بر حسب تانسور کوشی-گرین چپ (β_{ij}) به صورت معادله (۱) نوشت [۲۴]:

$$\sigma_{ij} = -p + 2 \frac{\partial \omega}{\partial I_1} \beta_{ij} - 2 \frac{\partial \omega}{\partial I_2} \beta^{-1}_{ij} \quad (1)$$

در معادله بالا ω تابع چگالی انرژی کرنشی و I_1 و I_2 و I_3 ثابت‌های β_{ij} هستند که می‌توان آن‌ها را بر حسب کشیدگی‌های اصلی ماده یعنی λ_1 و λ_2 و λ_3 بیان کرد. مدل هایپرالاستیک مورد استفاده قرار گرفته برای رگ در این تحقیق، دارای تابع چگالی انرژی کرنشی مرتبه سوم است. این مدل برای مواد همسان گرد غیرقابل تراکم مناسب است و به صورت معادله (۲) بیان می‌شود [۲۴] و [۲۵]:

$$w = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{30}(I_1 - 3)^2 \quad (2)$$

ورود اخیر استنت‌های تخریب پذیر فلزی بویژه آلیاژهای منیزیم به حوزه کاربردهای استنت کرونری بوده است. نتایج آزمایشات بالینی کاشت استنت‌های منیزیمی نوید بخش بوده و نشان داده‌اند که نرخ انسداد مجدد استنت‌های منیزیمی در مقایسه با استنت‌های دائمی مثل استنت‌های فولاد ضد زنگ و استنت‌های O-Cr C بسیار پایین‌تر است [۲-۴ و ۲۳]. همچنین مطالعات بالینی ثابت کرده‌اند که این استنت‌ها به دلیل تخریب پذیر بودنشان و جذب شدن تدریجی در بدن، خطر لخته‌زایی^۱ را کاهش می‌دهند. بزرگ‌ترین مشکل این استنت‌ها، پایین بودن استحکام شعاعی آن‌ها به دلیل پایین بودن مدول الاستیک آن‌هاست؛ برای اینکه این استنت‌ها بتوانند تکیه‌گاه دیواره شریانی مناسبی را ایجاد کنند، بایستی از استنت‌هایی با استرات‌های^۲ ضخیم‌تر ساخته شوند [۲ و ۴].

۲. مواد و روش‌ها

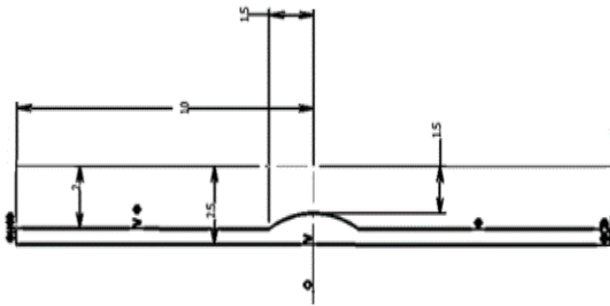
۲-۱. مدل‌های مختلف ارائه شده در این تحقیق

مدل‌های مختلف ارائه شده در اینجا شامل استنت‌های فولاد ضدزنگ و استنت‌های منیزیمی با سه نوع مختلف پلاک کلسیمی^۳، کم‌سلول^۴ و پرسلول^۵ به صورت گرفتگی ساده و با هندسه پایه استنت پالماز-اسچاتز هستند. در ذیل به بررسی هندسه‌ی مدل‌های ایجاد شده، شرایط مرزی تعریف شده و نحوه‌ی تعریف شبکه‌بندی مدل می‌پردازیم. تمامی مدل‌ها در نرم‌افزار کتیا ورژن V۵-۶R۲۰۱۶ ساخته شده‌اند.

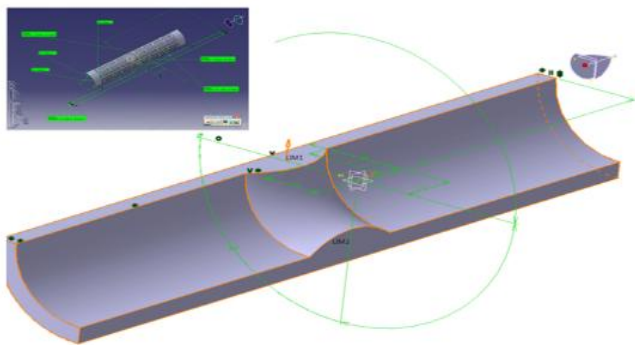
۲-۱-۱. هندسه مدل استنت ایجاد شده و جنس آن

استنت‌های فلزی کرونری مدرن را می‌توان از دید ساختاری به سه گروه استنت‌هایی با ساختار سلول‌باز^۶ مانند استنت چند اتصاله، استنت‌های نسل اول سلول‌بسته^۷ مانند استنت پالماز و استنت‌های با ساختار نسل بعدی سلول‌بسته^۸ مثل استنت‌های نیر تقسیم‌بندی کرد. استنت‌های با ساختار باز شکلشان به ویژه در مناطقی که رشد سلول در آن اتفاق می‌افتد، تغییر می‌کند ولی شکل استنت‌های بسته

- 1 Thrombosis
- 2 Strut
- 3 Calcified
- 4 Hypocellular
- 5 Hypercellular
- 6 Open-cell
- 7 First generation closed cell
- 8 Later generation closed cell



شکل ۱ هندسه دو بعدی پلاک (گرفتگی ساده) ایجاد شده
Fig. 1. 2-D geometry of the plaque (Simple stenosis).



شکل ۲ هندسه محاسباتی پلاک (ساده) ایجاد شده در حضور رگ
Fig. 2. Computational geometry of the plaque (Simple stenosis) with the presence of the artery.

جدول ۴ ابعاد هندسی رگ و پلاک (بر حسب میلی‌متر)
Table 4. Geometric dimensions of the artery and the plaque (mm).

مدل	طول	شعاع داخلی	شعاع خارجی
رگ	۲۰	۲	۲/۵
پلاک (گرفتگی ساده)	۳	۱/۵	۲

۵.۱.۲. مدل و هندسه بالون

بالون مورد استفاده برای منبسط کردن استنت، از جنس لاستیک پلی یورتان با طول ۱۲ میلی‌متر، قطر خارجی ۲/۹ میلی‌متر و ضخامت ۰/۱ میلی‌متر است. بالون در داخل استنت قرار گرفته و با اعمال فشار لازمه بر سطح داخلی آن توسط گازی مخصوص، باد شده و با برقراری ارتباط دو سطح خارجی بالون و داخلی استنت، استنت را منبسط می‌کند [۱۱ و ۳۵]. بمنظور مدل کردن ماده پلی یورتان، مشابه بیشتر مطالعات انجام شده [۱۱ و ۱۴ و ۱۵]، از مدل غیر خطی هایپرلاستیک مونی-ریولین مرتبه اول استفاده شده است. تابع انرژی بکار رفته در این مدل به شکل معادله $W = C_{.1}(I_1 - 3) + C_{.1}(I_2 - 3)$ است که در آن $C_{.1}$ و $C_{.1}$ ثابت تابع چگالی انرژی کرنشی هستند که مقادیر

این فرم معادله که به آن مدل مونی-ریولین می‌گویند در اکثر کدهای اجزای محدود موجود است و می‌توان به سادگی از آن استفاده نمود؛ و در بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته نیز، برای مدل کردن رگ از آن استفاده شده است [۲۸-۱۷]. ضرایب تابع چگالی انرژی کرنشی مورد استفاده برای مدل کردن رگ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: ضرایب تابع چگالی انرژی کرنشی مورد استفاده برای رگ (بر حسب کیلوپاسکال) [۱۷]

Table 2. Coefficients of strain energy density function used for the artery (kPa) [17].

C_{30}	C_{11}	C_{20}	C_{01}	C_{10}
۰	۵۹/۰۴۳	۸۵/۷۲	۲/۷۵	۱۸/۹۰

۳-۱-۲. مدل‌های مختلف پلاک مسدود کننده

با توجه به این که با پیشرفت بیماری اتروسکلروسیس، ترکیب پلاک مسدودکننده رگ تغییر می‌کند، در این مطالعه سعی شده است تا از هر سه نوع ترکیب ممکن برای پلاک مسدود کننده استفاده شود [۳۰-۲۶]. برای سه جنس مختلف پلاک در مدل از مدل غیر خطی هایپرلاستیک مونی-ریولین مرتبه سوم استفاده شده است. در بسیاری از مطالعات انجام شده از این مدل، برای مدل کردن پلاک استفاده شده است [۳۴-۱۷]. ضرایب تابع چگالی انرژی کرنشی مورد استفاده برای مدل کردن پلاک در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: ضرایب تابع انرژی کرنشی پلاک‌های مسدود کننده (بر حسب کیلوپاسکال) [۲۹ و ۲۸]

Table 3. Coefficients of strain energy density function of the plaques initiating stenosis (kPa) [28,29].

C_{30}	C_{20}	C_{11}	C_{10}	C_{01}	
۴۷۳۷/۲۵	۳۶۳۷/۸۰	۱۱۹۳/۵۳	-۵۰۶/۶۱	-۴۹۵/۹۶	کلسیمی
۰	۰	۹۵۵/۳۸۸	۱۶/۹۶۶	۱۶۵/۱۱۱	کم سلول
۰	۰	۱۱۵۷/۶۸	۸۳۱/۶۳۶	-۸۰۲/۷۲۳	پرسلول

۴.۱.۲. هندسه مدل پلاک مسدود کننده در حالت گرفتگی ساده

در شکل ۱ و شکل ۲، هندسه دو بعدی پلاک ایجاد شده و هندسه محاسباتی پلاک ایجاد شده در حضور رگ نشان داده شده است. ابعاد هندسی پلاک در حالت گرفتگی ساده، در جدول ۴ ارائه شده است. درصد گرفتگی در این تحقیق ۲۵ درصد و به صورت گرفتگی متقارن در نظر گرفته شده است.

که فقط آزادی حرکت در راستای شعاعی داشته باشند. پلاک نیز به رگ چسبیده است. برای شبکه بندی مدل‌ها از جزء سه‌بعدی مکعبی^۱ استفاده شده است. برای مدل استنت جزء مورد استفاده از نوع بلوک خطی ۸-گره‌ای^۲ با رویه انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C3D8R) به کار برده شده است. همچنین برای مدل کردن رگ و بالن از جزء بلوک خطی ۸-گره‌ای هیبریدی (C3D8H) استفاده شده است.

۳-۲. بارگذاری و حل

برای حل مسئله در این تحقیق، از روش ضمنی^۳ استفاده شده است. ضریب اصطکاک بین بالن و استنت برای همه مدل‌ها مقدار ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است. بارگذاری مدل‌ها در چهار مرحله صورت می‌پذیرد؛ مرحله اول، بدون در نظر گرفتن وجود بالن و استنت، رگ و پلاک مورد نظر تحت تأثیر یک فشار یکنواخت داخلی برابر ۱۳/۳ کیلوپاسکال که معادل متوسط فشار خون ۱۰۰ میلی‌متر جیوه است، قرار می‌گیرند [۱۷] که موجب منبسط شدن رگ و ایجاد تنش اولیه‌ای در داخل آن می‌شود. این کار باعث خواهد شد تا رگ و پلاک مدل شده به شرایط واقعی فیزیکی مسئله نزدیک‌تر گردند. پس از این مرحله، با حفظ فشار اولیه اعمال شده به رگ و پلاک، به منظور انبساط استنت، در مرحله دوم بر اساس اعمال فشار یکنواخت بر سطح داخلی بالن با نرخ ثابت در ۱/۶۳۵ ثانیه به صورت خطی اعمال می‌شود و مقدار آن بگونه‌ای لحاظ شده است تا امکان مقایسه بین مدل‌ها وجود داشته باشد (مقدار حداکثر بار وارده بر مدل‌ها به اندازه‌ای انتخاب می‌شود که قطر نهایی استنت‌ها با هم برابر شده و این استنت‌ها باعث تغییر قطر یکسانی روی رگ شوند). در مرحله سوم ماکزیمم بار اعمال شده به مدت ۰/۲ ثانیه حفظ شده و سپس در مرحله چهارم بار اعمال شده بصورت خطی در مدت یک ثانیه برداشته می‌شود.

۴-۲. بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی

جهت بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، یک مدل محاسباتی جدید شامل مجموعه اعضای درگیر در مسأله مانند رگ، پلاک، استنت و بالون دقیقاً مشابه مدل اصلی برای مدل ۳۰۴-کلسیمی

آن‌ها به ترتیب برابر با ۷۱۰۹۱۸/۰ مگاپاسکال و ۱/۰۶۸۸۱ مگاپاسکال هستند [۱۴].

۶.۱.۲. معادلات حاکم

روابط تعریف شده بر الاستیک خطی به صورت زیر نوشته می‌شوند [۳۹]:

$$\nabla \cdot \sigma + F = \rho \ddot{u} \quad (\text{قانون دوم نیوتن}): (۳)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (\text{جابه‌جایی}): (۴)$$

که در آنها σ تانسور تنش، ν تانسور جابه‌جایی، F نیرو به ازای واحد حجم، ρ چگالی، ε تانسور کرنش و C تانسور سختی مرتبه چهارم است. در مختصات کارتزین این معادلات را برای فضای سه‌بعدی می‌توان به شکل زیر نوشت [۳۹]:

$$\sigma_{ji,j} = F_i = \rho \partial_{tt} u_i \quad (\text{رابطه حرکت}): (۵)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{j,i} + u_{i,j}) \quad (\text{جابه‌جایی}): (۶)$$

رابطه حاکم بر تنش و کرنش (قانون هوک):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (۷)$$

تانسور سختی دارای ۶ مؤلفه مستقل است. مؤلفه‌های این ماتریس به گونه‌ای هستند که همواره رابطه زیر بین آنها برقرار است:

$$C_{ijkl} = C_{klij} = C_{jikl} = C_{ijlk} \quad (۸)$$

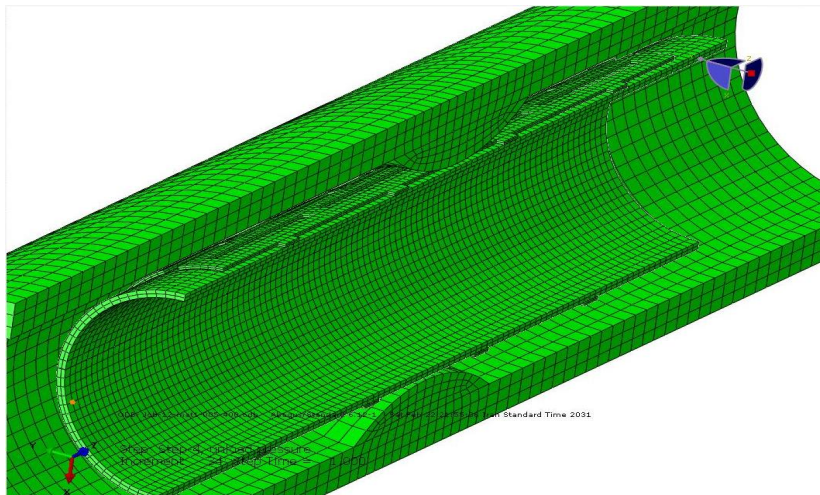
۲-۲. اعمال شرایط مرزی و شبکه‌بندی مدل

به منظور کاهش زمان محاسبات، از تقارن هندسی موجود در مدل‌ها استفاده شده است بطوری که به جای مدل کردن کل استنت، بالون، رگ و پلاک، تنها یک چهارم آن‌ها در مدل استنت پالماز-اسچاتز در نظر گرفته شده است. پس از اعمال تقارن، قیود مرزی مناسب بر نقاطی که روی سطح تقارن قرار دارند، اعمال می‌گردد. این قیود عبارتند از عدم حرکت گره‌ها بر روی سطوح برش داده شده در راستای بردار عمود بر آن سطوح برای همه مدل‌های استنت و رگ و پلاک، بالن نیز در دو طرف مرکز مدل کاملاً تقارن داشته و دو انتهای بالون کاملاً مقید شده است، به این صورت که نقاط گره‌ای عمود در راستای y اجازه حرکت در جهت y را نداشته و همچنین نقاط گره‌ای عمود بر راستای x ، اجازه حرکت در جهت x را نداشته باشند. همچنین گره‌های واقع در دو انتهای رگ طوری مقید شده‌اند

1 3 D cubic

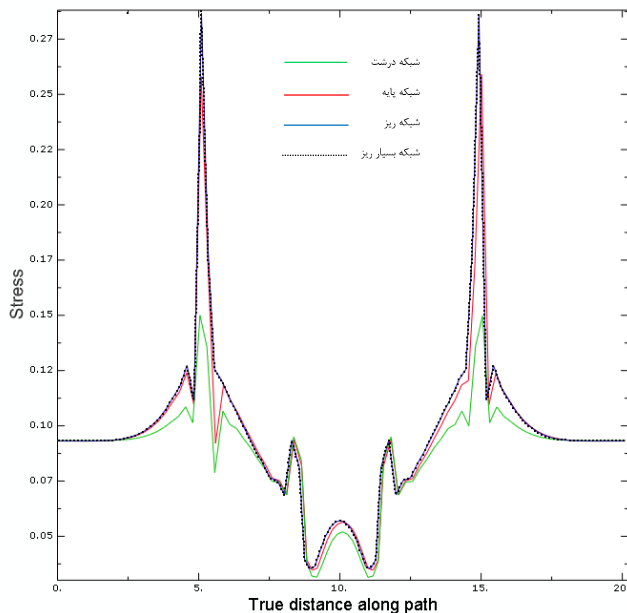
2 8- node linear block

3 Implicit



شکل ۳ شبکه بندی نهایی همه مدل‌های ساخته شده
Fig. 3. Final mesh of the constructed models.

بالای عامل هزینه محاسباتی، می‌توان با صرف نظر کردن از وجود خطای ناچیز محاسباتی، نتایج مدل‌های ارائه شده در این پژوهش را با انتخاب مدلی با ۱۱۲۶۴ جزء و حل آن به دست آورد. تعداد اجزای به کار رفته برای شبکه بندی هر مدل به همراه بیشینه تنش ایجاد شده روی رگ در لحظه بیشینه انبساط استنت در جدول ۵ ارائه شده است.



فون مایسز (مگا پاسکال) بر حسب مکان در طول رگ (بر حسب میلی‌متر)، برای هر سه مدل با اندازه

شکل ۴: نمودار تنش فون مایسز (مگا پاسکال) بر حسب مکان در طول رگ (بر حسب میلی‌متر)، برای هر سه مدل با اندازه شبکه متفاوت.
Fig. 4. von Mises stress (MPa) versus arterial length (mm) for the three models with different mesh sizes.

در نظر گرفته شد. جهت اطمینان از دقت قابل قبول جواب‌ها، چهار شبکه با تعداد اجزای اشاره شده در جدول ۵ در نظر گرفته شد. با ریزتر کردن شبکه، روند کاهش خطا و نزدیک شدن جواب‌ها رصد شد. لذا حل مسأله در این مدل یکبار با استفاده از شبکه مرجع (پایه) برای همه اعضای مدل (استنت، رگ، پلاک و بالن) مشابه اندازه استفاده شده در مدل‌های اصلی، یکبار اندازه شبکه ریزتر از شبکه مرجع، بار دیگر با اندازه شبکه بسیار ریز و یک بار با اندازه شبکه درشت‌تر از شبکه مرجع صورت پذیرفت. بیشینه تنش فون مایسز دیواره شریانی در مدل ۳۰۴- کلسیمی با استنت پالماز-اسچاتز با شبکه مرجع با تعداد ۱۱۲۶۴ المان، مقدار ۰/۲۵۹، برای شبکه ریزتر با تعداد ۱۴۲۹۴ المان، مقدار ۰/۲۷۶، برای شبکه بسیار ریز ۰/۲۷۸ و برای شبکه درشت با تعداد ۸۶۷۲ المان، مقدار ۰/۱۴۹ مگا پاسکال است. همچنین لازم به توضیح است که در آخرین اقدام، در ریزترین شبکه به تعداد ۳۲۴۴۸ المان، تغییرات دو پارامتر بیشینه تنش ایجاد شده در رگ و همچنین میانگین تنش گره‌های واقع در طول در نظر گرفته شده در هندسه مورد بررسی در لحظه ماکزیمم انبساط استنت رصد شد که تغییرات جوابها نسبت به جواب شبکه ریز (۱۴۲۹۴ جزء) به ترتیب کمتر از ۱ درصد و کمتر از ۰/۱ درصد برای این دو پارامتر گزارش می‌شود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد اجزای مدل از ۱۱۲۶۴ به ۱۴۲۹۴ تغییر بسیار کمی در نتایج حاصل می‌شود و این در حالی است که با این افزایش در چگالی شبکه بندی، زمان حل مسأله به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. به همین دلیل و با توجه به تعداد زیاد مدل‌های این مطالعه و اهمیت

جدول ۵ مقایسه مقادیر تنش فون مایسز در دیواره شریان با سه شبکه مختلف
Table 5. Comparison between von Mises stress in the arterial wall with three different meshes.

مشخصات مدل	تعداد اجزا	ماکزیمم تنش ایجاد شده روی رگ (MPa)
کلسیمی PS-۴۰۰-۳۰۴- شبکه درشت	۸۶۷۲	۰/۱۴۹
کلسیمی PS-۴۰۰-۳۰۴- شبکه پایه	۱۱۲۶۴	۰/۲۵۹
کلسیمی -۴۰۰-۳۰۴- شبکه ریز	۱۴۲۹۴	۰/۲۷۶
کلسیمی PS-۴۰۰-۳۰۴- شبکه بسیار ریز	۳۲۴۴۸	۰/۲۷۸

۳. نتایج و بحث

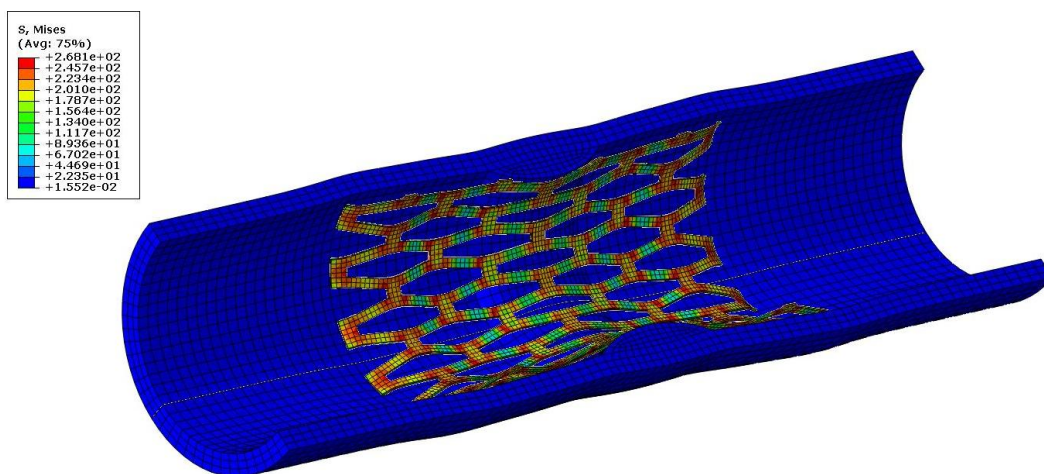
با توجه به وجود دو نوع تقارن چرخشی و صفحه‌ای در مدل، انتظار بر این است که توزیع تنش در استنت، هم دارای تقارن چرخشی نسبت به محور مرکزی آن، و هم دارای تقارن صفحه‌ای باشد که این امر در شکل ۵ مشهود است. تقارن تنش در استنت بیانگر درست تعریف شدن فیزیک مسئله و قیود مرزی مناسب بر روی مدل است. علاوه بر این، می‌توان اثر در نظر گرفتن پلاک را در شکل تغییر شکل یافته استنت مشاهده کرد که این نکته بیانگر اهمیت در نظر گرفتن پلاک در مدل‌سازی استنت است. میزان تنش حداکثر ایجاد شده در استنت در این مقاله، در مقایسه با مقادیر بدست آمده در مدل ارائه شده توسط چوا و همکاران [۱۱]، دارای ۷/۶۷ درصد و همچنین با مدل ارائه شده توسط جوو و همکاران [۱۵]، دارای ۷ درصد اختلاف است. با توجه به این که مدل‌های ارائه شده در این دو تحقیق تا حدود زیادی منطبق بر این مدل بوده و تنها اختلاف آن‌ها، در نظر نگرفتن رگ و پلاک در مدل‌ها است؛ می‌توان به این نتیجه رسید که نتایج به دست آمده از این مدل در محدوده قابل قبولی است و اندک اختلاف موجود نیز ناشی از تفاوت ناچیز مدل‌هاست. توزیع تنش فون مایسز در

در این قسمت، نتایج مدل‌سازی، شامل توزیع تنش‌های اعمالی روی استنت و رگ (برای بررسی احتمال گرفتگی مجدد پس از استنت‌گذاری)، تغییرات قطر خارجی، مقادیر برگشت‌پذیری شعاعی و طولی و درصد کاهش طول استنت‌ها در مدل‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند. همچنین تأثیر ترکیب پلاک روی شدت تنش‌های اعمالی ایجاد شده در دیواره‌ی شریان نیز بررسی شده است.

۳-۱. نتایج حاصل از تحلیل مدل ۳۰۴-کلسیمی-PS

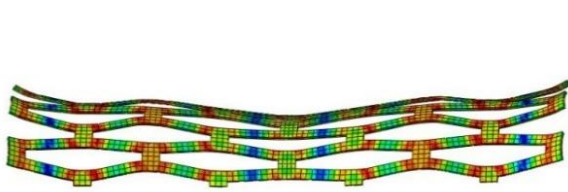
۳-۱-۱. توزیع تنش

ابتدا به بررسی مدل پایه ۳۰۴-کلسیمی با فشار ۰/۴ مگاپاسکال می‌پردازیم. توزیع تنش فون مایسز در استنت این مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نواحی با حداکثر تنش، ۲۵۷/۵ مگاپاسکال، بر روی استنت در چهار گوشه سلول‌ها قرار دارند و احتمال شکست در این نقاط نسبت به دیگر نقاط استنت، بیشتر است.



شکل ۵: توزیع تنش فون مایسز (مگاپاسکال) بر روی استنت در مدل پایه-۳۰۴ کلسیمی به همراه رگ و پلاک

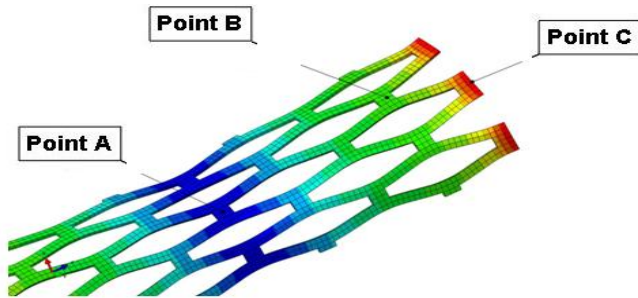
Fig. 5. von Mises stress distribution (MPa) on the stent in the calcified basal 304-model with the presence of the artery and the plaque.



شکل ۸: انحنا ایجاد شده روی استنت به جهت وجود پلاک و اعمال فشار بر میانه استنت- نمای جانبی.

Fig. 8. Resulted curvature on the stent due to presence of the plaque and application of pressure on the middle of the stent-lateral view.

یعنی نقاط A و B مشخص شده در شکل ۹ در نظر گرفته شده است. در شکل ۸ و شکل ۹ نمودار تغییرات شعاع خارجی استنت، در نقاطی غیر از دو انتهای آن ارائه شده است.



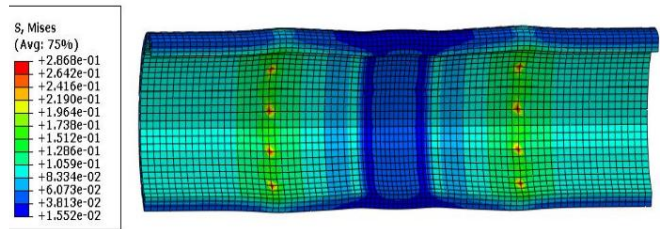
شکل ۹: نقاط مشخص شده در روی استنت برای بررسی نتایج.

Fig. 9. Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point A.

یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی عملکرد استنت، مقدار افزایش شعاع استنت در طی عمل بارگذاری، RG، است که بصورت معادله $R_{expansion} = RG = R_{expansion} - R$ تعریف می‌شود. در اینجا $R_{expansion}$ بیانگر شعاع خارجی استنت در انتهای مرحله بارگذاری و R بیانگر شعاع خارجی اولیه استنت، قبل از اعمال بار است که در وسط استنت (نقطه A) اندازه‌گیری می‌شوند. برای یک استنت مطلوب است که به ازای یک فشار ورودی خاص، مقدار RG بزرگ‌تری داشته باشد. مقدار RG برای استنت در این مدل برابر 0.281 میلی‌متر است.

۳-۱-۳. درصد کاهش طول استنت و برگشت‌پذیری نقاط A و B برای مدل ۳۰۴-کلسیمی-PS

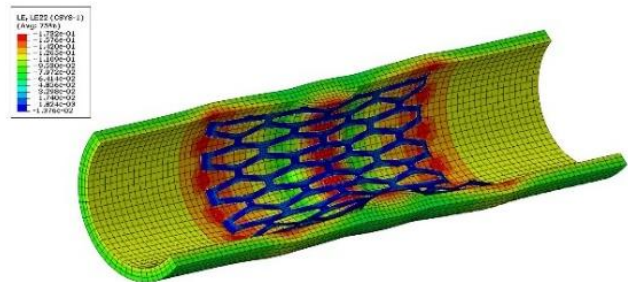
برگشت‌پذیری شعاعی، میزان برگشت‌پذیری قطر استنت بعد از باربرداری نسبت به لحظه‌ی ماکزیمم انبساط استنت، در فشار اعمالی مربوطه است. برگشت‌پذیری شعاعی بصورت معادله (۹) تعریف می‌شود [۳ و ۹].



شکل ۶: توزیع تنش فون مایسز (مگاپاسکال) بر روی رگ مسدود شده در مدل پایه ۳۰۴-کلسیمی

Fig. 6. von Mises stress distribution (MPa) on the stenosed artery in the calcified basal 304-model.

رگ مسدود شده در شکل ۶ نشان داده شده است. نواحی با حداکثر تنش روی رگ در نقاطی است که در آن حداکثر تغییر در قطر استنت اتفاق می‌افتد که مقدار حداکثر تنش فون مایسز ایجاد شده روی رگ در اینجا برابر با 0.287 مگاپاسکال است. هر چقدر مقدار این حداکثر تنش بیشتر باشد، میزان صدمه‌ای که استنت به رگ بیشتر شده و در نتیجه احتمال گرفتگی مجدد رگ پس از استنت‌گذاری افزایش می‌یابد. علاوه بر این همان طور که در شکل ۶ مشخص است، گرادیان تنش زیادی بین سطح داخلی رگ و سطح خارجی آن وجود دارد. این بدان معنی است که نقاط حساس و آسیب‌پذیر رگ، بر روی سطح داخلی آن و در نقاطی قرار دارند که حداکثر تغییر در قطر استنت روی می‌دهد. کرنش محیطی رگ و پلاک در انبساط ماکزیمم برای این مدل نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.

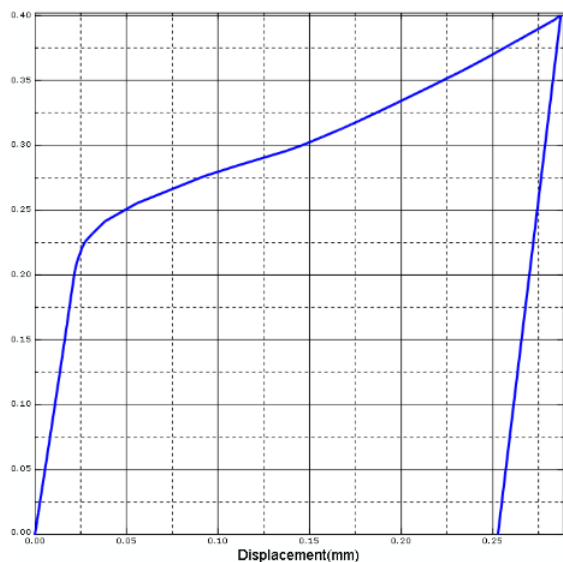


شکل ۷: کرنش محیطی رگ و پلاک در انبساط ماکزیمم در مدل پایه ۳۰۴-کلسیمی

Fig. 7. Circumferential strain of the artery and the plaque at the maximum expansion in the calcified basal 304-model.

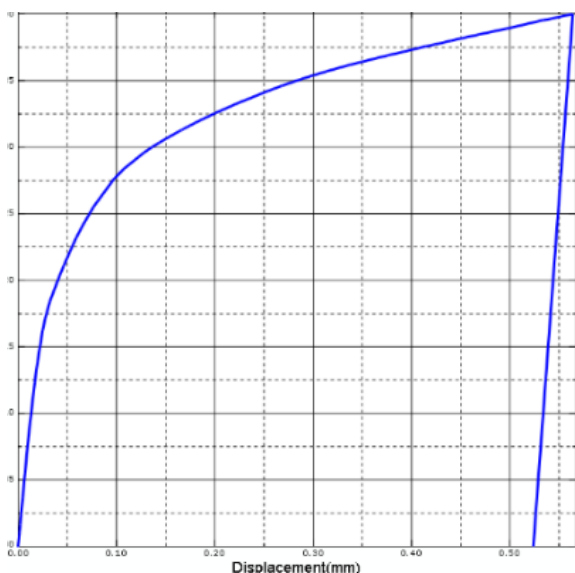
۳-۱-۲. تغییرات شعاع خارجی استنت مدل ۳۰۴-کلسیمی-PS

همان طور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، شکل نهایی استنت به علت وجود پلاک و اعمال فشار از روی آن بر میانه استنت، دارای انحنا است. بنابراین استنت در نقاط مختلف دارای قطرهای متفاوتی است. از این رو، برای ارزیابی تغییرات قطر خارجی استنت، دو نقطه



شکل ۱۲. نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت پذیری شعاعی نقطه A در استنت.

Fig. 12. Relation between pressure (MPa) and radial recoil at the point A.

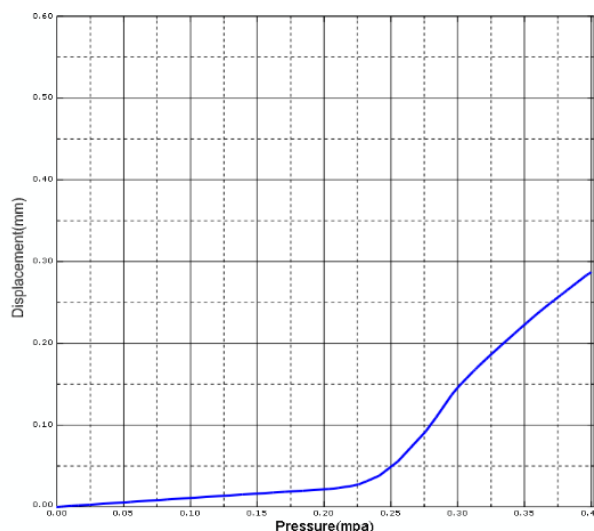


شکل ۱۳. نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت پذیری شعاعی نقطه B در استنت.

Fig. 13. Relation between pressure (MPa) and radial recoil at the point B.

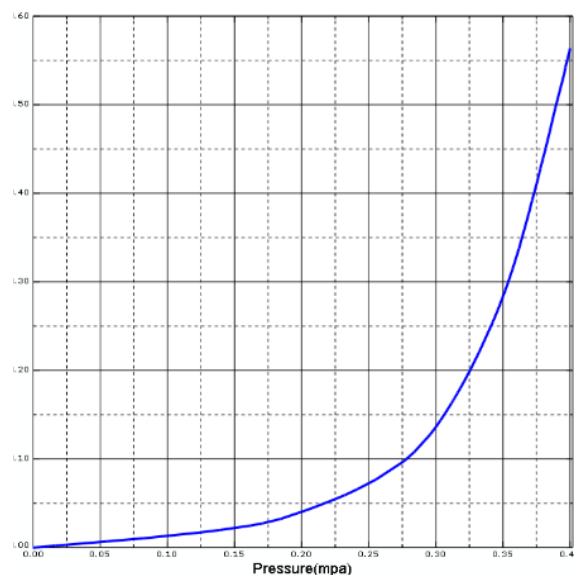
و B رسم شده است. نمودار برگشت پذیری نقاط A و B، بصورت جابه جایی شعاعی بر حسب فشار نیز در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ آورده شده است.

درصد کاهش طول استنت، به تغییر نهایی طول استنت در ماکزیمم لحظه بارگذاری نسبت به طول اولیه را گویند. مقدار کاهش طول و برگشت پذیری طولی استنت بصورت معادلات (۱۰) و (۱۱) تعریف می شوند [۳ و ۹].



شکل ۱۰. نمودار رابطه بین جابه جایی شعاعی نقطه A در استنت و فشار انبساط (مگاپاسکال).

Fig. 10. Relation between radial displacement of point A of the stent and expansion pressure (MPa).



شکل ۱۱. نمودار رابطه بین جابه جایی شعاعی (میلیمتر) نقطه B در استنت و فشار انبساط (مگاپاسکال)

Fig. 11. Relation between radial displacement of point B of the stent and expansion pressure (MPa).

$$\text{برگشت پذیری شعاعی} = \frac{R_{(load)} - R_{(unload)}}{R_{(load)}} \quad (9)$$

شکل نهایی استنت به علت وجود پلاک و اعمال فشار از روی آن بر میانه استنت، دارای انحناء است بنابراین استنت در نقاط مختلف دارای قطرهای متفاوت و مقادیر برگشت پذیری شعاعی متفاوتی است. به همین دلیل، برای ارزیابی مقدار برگشت پذیری مدل‌ها برای نقطه A و B، نمودار آن‌ها بصورت جابه جایی شعاعی در دو نقطه A

۳-۳. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های مختلف

در جدول ۶ مشاهده می‌شود که هر شش مدل، مقدار تقریبی افزایش شعاع استنت برابری را در نقطه B برای بررسی تنش‌های اعمالی القاء شده روی دیواره‌ی شریان داشته‌اند، ضمن اینکه مقدار افزایش شعاع استنت در طی عمل بارگذاری (RG) برای همه مدل‌ها بصورت دو به دو یعنی برای مدل‌های ۳۰۴ و AZ۳۱ با پلاک کلسیمی و این دو مدل با پلاک کم‌سلول و همچنین این دو مدل با پلاک پرسلول، تقریباً یکسان است پس در نتیجه قابل مقایسه‌اند. مقایسه این مدل‌ها نشان می‌دهد که برای ایجاد یک تغییر مشخص در قطر رگ، استنت‌های ۳۰۴ در مقایسه با استنت‌های منیزیمی، تنش بیشتری را روی رگ ایجاد می‌کنند (شکل ۱۵ و شکل ۱۶). نتایج نشان می‌دهند که استفاده از استنت‌های آلیاژ منیزیم AZ۳۱

$$Foreshortening = \frac{L_0 - L_{(load)}}{L_0} \quad (10)$$

$$recoil = \frac{L_{(load)} - L_{(unload)}}{L_{(load)}} \quad (11)$$

۳-۲. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های دیگر

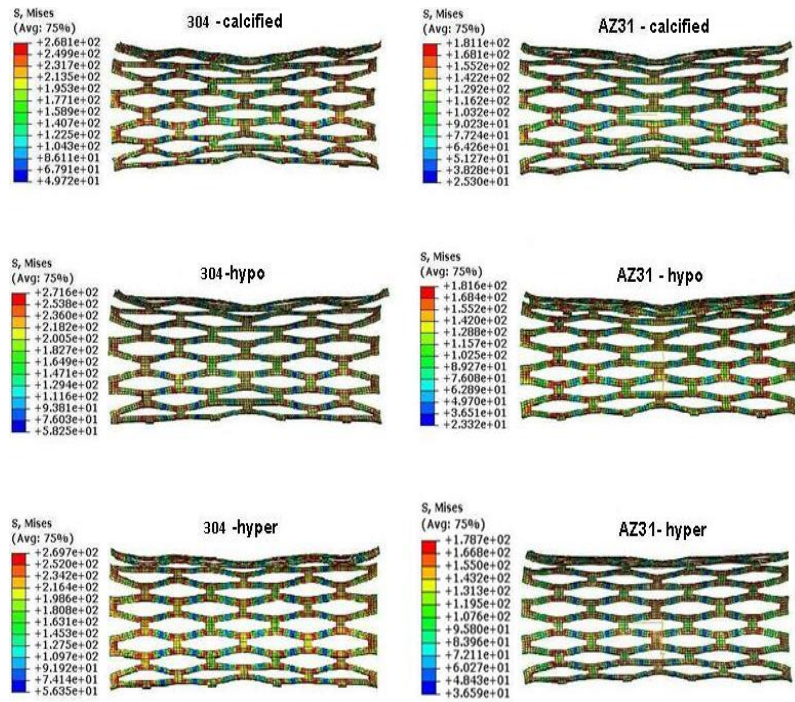
ذکر این نکته ضروری است که تفاوت همه این مدل‌ها در جنس استنت و مقدار حداکثر بار وارده است و با توجه به اینکه هندسه استنت در تمامی مدل‌ها یکسان است، شکل کلی توزیع تنش بر روی استنت و رگ، مکان تنش حداکثر ایجاد شده و همچنین شکل کلی نمودار تغییر قطر خارجی استنت، در مدل‌های دو به دو مشابه است و تفاوت تنها در مقادیر است. مقادیر مربوط به مدل‌ها، در جداول زیر و همچنین تصاویر و نمودارهای مربوطه در ادامه آورده شده است.

جدول ۶: جدول اول نتایج ارائه شده برای مدل
Table 6. First table of the model results.

مشخصات مدل	فشار (Mpa)	جابه‌جایی شعاعی نقطه A (mm)	جابه‌جایی شعاعی نقطه B (mm)	جابه‌جایی شعاعی طولی نقطه C (mm)	تنش استنت (Mpa)	تنش رگ (Mpa)	تنش پلاک (Mpa)	جابه‌جایی شعاعی نقطه A بعد از برگشت پذیری	جابه‌جایی شعاعی نقطه B بعد از برگشت پذیری	جابه‌جایی شعاعی نقطه C بعد از برگشت پذیری
PS پایه هندسه کلسیمی-304	۰/۴۲	۰/۲۸۱	۰/۵۶۴	-۰/۱۴۷	۲۶۸	۰/۲۸۶	۱/۱۲	۰/۲۵۱	-۰/۵۲۴	-۰/۱۲۸
PS پایه هندسه کلسیمی-AZ31	۰/۳۲۴	۰/۲۶۸	۰/۵۶۹	-۰/۱۱۷	۱۸۱	۰/۱۲۸	۱	۰/۱۷۹	۰/۴۶۵	-۰/۰۸۲
PS پایه هندسه کم‌سلول-304	۰/۴	۰/۳۵۰	۰/۵۶۹	-۰/۱۴۰	۲۷۱	۰/۲۹۴	۰/۶۱	۰/۳۱۸	-۰/۵۳۱	-۰/۱۲۲
PS پایه هندسه کم‌سلول-AZ31	۰/۳۲۳	۰/۳۱۷	۰/۵۶۸	-۰/۱۱۶	۱۸۱	۰/۱۲۹	۰/۵۹	۰/۲۱۲	۰/۴۶۴	-۰/۰۸۲
PS پایه هندسه پرسلول-304	۰/۳۹۸	۰/۴۴۵	۰/۵۶۹	-۰/۱۴۰	۲۶۹	۰/۳۴۱	۰/۵۵	۰/۴۱۲	-۰/۵۳۳	-۰/۱۲۲
PS پایه هندسه پرسلول-AZ31	۰/۳۲۲	۰/۴۱۰	۰/۵۷	-۰/۱۰۹	۱۷۸	۰/۱۳۴	۰/۴۱	۰/۳۱۴	۰/۴۶۶	-۰/۰۷۶

جدول ۷: جدول دوم نتایج ارائه شده برای مدل
Table 7. Second table of the model results.

مشخصات مدل	recoil شعاعی (%) مرکزی استنت (A)	recoil شعاعی (%) استنت در نقطه (B)	Foreshortening (%) استنت	recoil طولی (%) استنت
PS پایه هندسه کلسیمی-304	۱/۶۸۴	۱/۹۳۳	۲/۹۴	۰/۷۸۳
PS پایه هندسه کلسیمی-AZ31	۵/۰۳۳	۵/۰۲۶	۲/۳۴	۱/۴۳۳
PS پایه هندسه کم‌سلول-304	۱/۷۲۹	۱/۸۳۶	۲/۸۰	۰/۷۴
PS پایه هندسه کم‌سلول-AZ31	۵/۷۷۸	۵/۲۹	۲/۳۲	۱/۳۹۲
PS پایه هندسه پرسلول-304	۱/۶۹۶	۱/۷۳۹	۲/۸	۰/۷۴
PS پایه هندسه پرسلول-AZ31	۵/۰۲۶	۵/۰۲۴	۲/۱۸	۱/۳۴۹

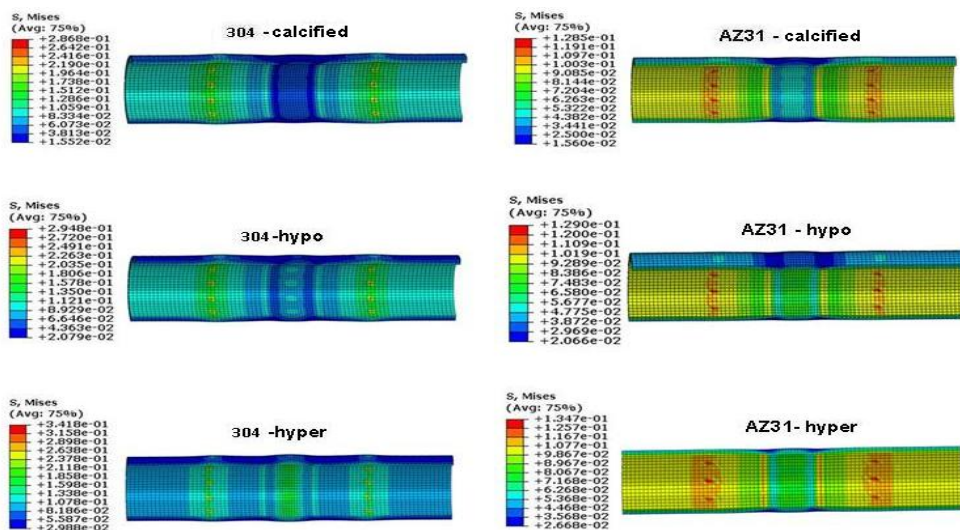


شکل ۱۴. توزیع تنش فون مایسز (مگاپاسکال) بر روی استنت در حالت انبساط ماکزیمم.
Fig. 14. von Mises stress distribution (MPa) on the stent at the maximum expansion.

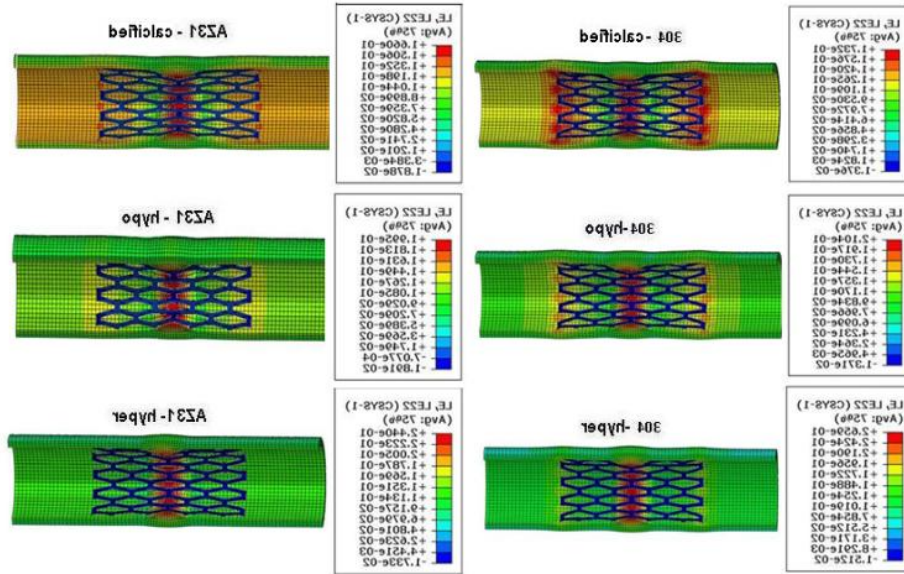
استنت‌های منبسط شونده توسط بالن بر پایه‌ی تغییر شکل پلاستیک و دائم در راستای شعاعی استوار است، داشتن تنش تسلیم پایین برای ماده استنت سبب می‌شود که قطعه زودتر و با مقدار فشار کمتری وارد فاز پلاستیک شود.

همچنین با بررسی نتایج جدول بالا و نمودارهای مربوط به مدل، می‌توان دریافت که استنت‌های منیزیمی برای هر سه مدل با پلاک‌های مختلف، در مقایسه با استنت‌های فولادی، درصد

در مقایسه با استنت‌های فولادی ضد زنگ، منجر به ایجاد تنش‌های کمتری روی رگ می‌شود (شکل ۱۴). از طرفی همانگونه که انتظار می‌رود با توجه به اینکه تنش تنها تابع هندسه قطعه و نیروهای وارده بر آن است و به جنس مواد وابسته نیست، شکل کلی توزیع تنش روی استنت و رگ و همچنین محل تمرکز تنش در مدل‌ها یکسان است. ضمناً می‌توان استنباط کرد که در ساخت استنت‌ها باید از موادی با تنش تسلیم پایین استفاده شود. با توجه به اینکه اساس کار

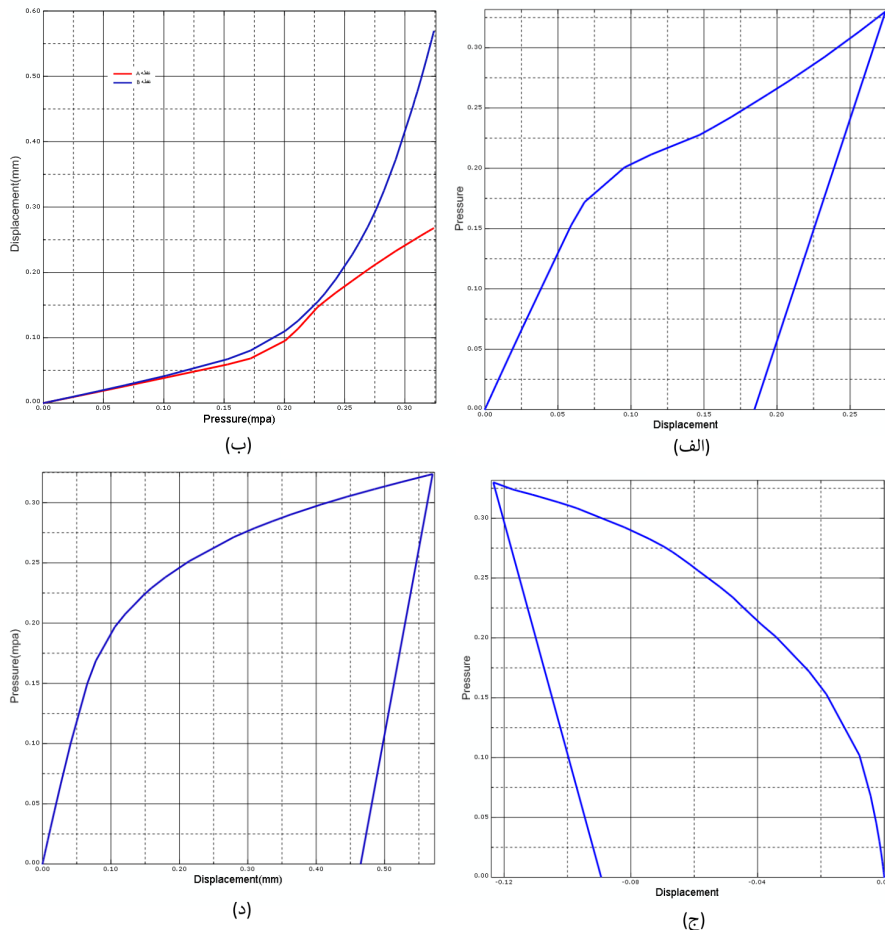


شکل ۱۵. توزیع تنش فون مایسز (مگاپاسکال) بر روی رگ مسدود شده در حالت انبساط ماکزیمم.
Fig. 15. von Mises stress distribution (MPa) on the stenosed artery at the maximum expansion.



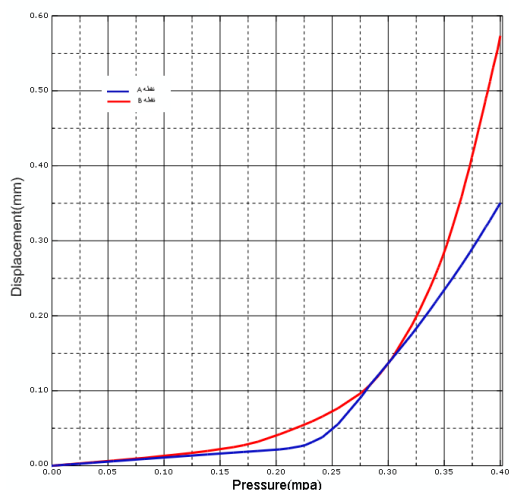
شکل ۱۶. کرنش محیطی رگ و پلاک در حضور استنت در انبساط ماکزیمم.

Fig. 16. Circumferential strain of the artery and the plaque with the presence of the stent at the maximum expansion.

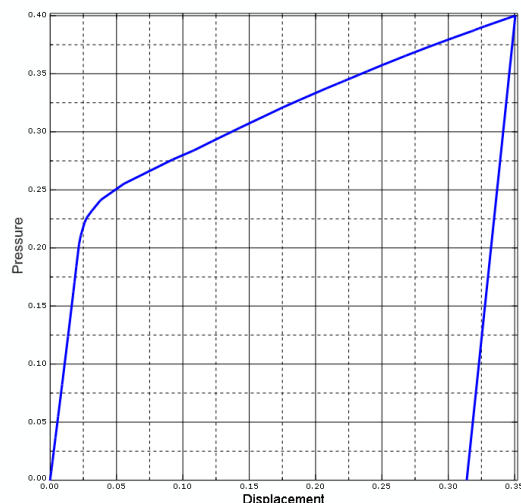


شکل ۱۷. الف) نمودار رابطه بین جابه‌جایی شعاعی نقاط A و B در استنت مدل AZ31-کلسیمی و فشار انبساط (مگاپاسکال). ب) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه A در استنت. ج) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه B در استنت. د) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه C در استنت.

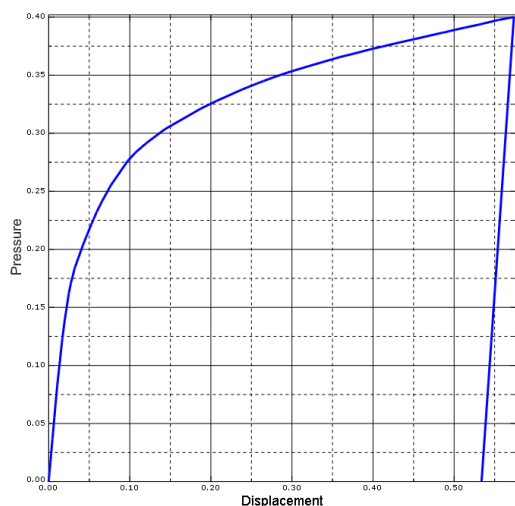
Fig. 17. a) Relation between radial displacement of points A and B of the stent, AZ31-calcified model and expansion pressure (MPa); b) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point A of the stent; c) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point B of the stent; d) Relation between pressure (MPa) and longitudinal recoiling at point C of the stent.



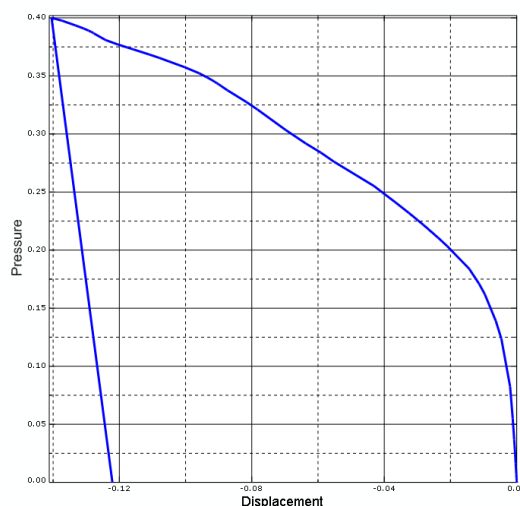
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۸. الف) نمودار رابطه بین جابه‌جایی شعاعی نقاط A و B در استنت مدل ۳۰۴-کم سلول و فشار انبساط (مگاپاسکال). ب) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه A در استنت. ج) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه B در استنت. د) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری طولی نقطه C در استنت.

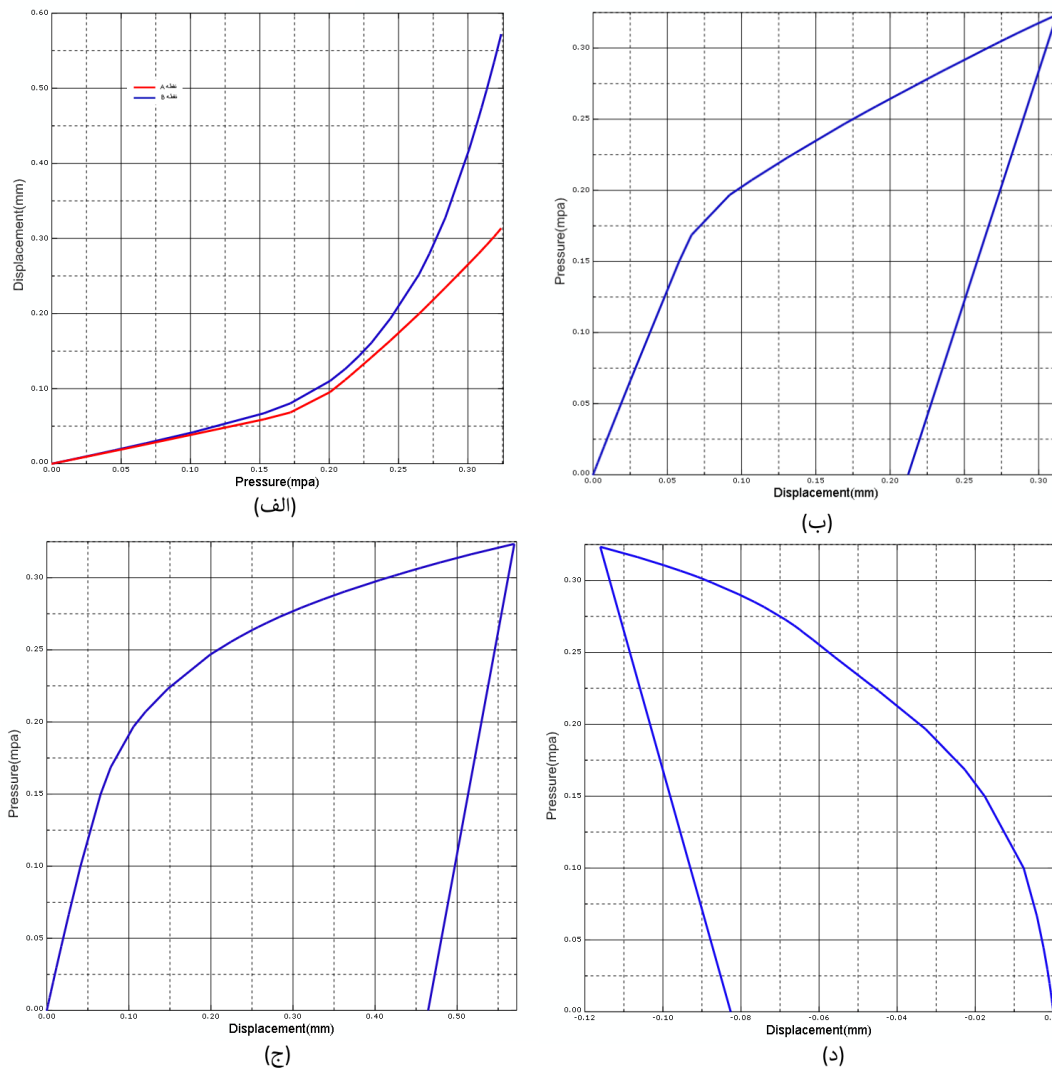
Fig. 18. a) Relation between radial displacement of points A and B of the stent, 304-low cell model and expansion pressure (MPa); b) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point A of the stent; c) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point B of the stent; d) Relation between pressure (MPa) and longitudinal recoiling at point C of the stent.

برگشت‌پذیری شعاعی و برگشت‌پذیری طولی بالاتری دارند که به جهت استحکام شعاعی ضعیف و تنش تسلیم پایین و کرنش سختی پایین استنت‌های منیزیمی در مقایسه با استنت‌های فولادی است. که تنها نقطه ضعف اساسی آن‌ها به شمار می‌رود. نتایج نشان می‌دهد که استنت‌های منیزیمی در مقایسه با استنت‌های فولادی درصد کاهش طول کمتری دارند.

برگشت‌پذیری شعاعی B و برگشت‌پذیری طولی نقطه C، به ترتیب در شکل ۱۷ برای مدل AZ ۳۱-کلسیمی و همچنین نمودار جابه‌جایی شعاعی نقطه A و B، برگشت‌پذیری شعاعی A، برگشت‌پذیری شعاعی B و برگشت‌پذیری طولی نقطه C، به ترتیب در نمودارهای شکل ۱۸، برای مدل ۳۰۴-کم سلول و نمودار جابه‌جایی شعاعی نقطه A و B، برگشت‌پذیری شعاعی A، برگشت‌پذیری شعاعی B و برگشت‌پذیری طولی نقطه C، به ترتیب در نمودارهای شکل ۱۹، برای مدل AZ ۳۱-کم سلول نشان داده شده است.

۴-۴. نمودار مدل‌های مختلف این نوع گرفتگی

نمودار جابه‌جایی شعاعی نقطه A و B، برگشت‌پذیری شعاعی A،



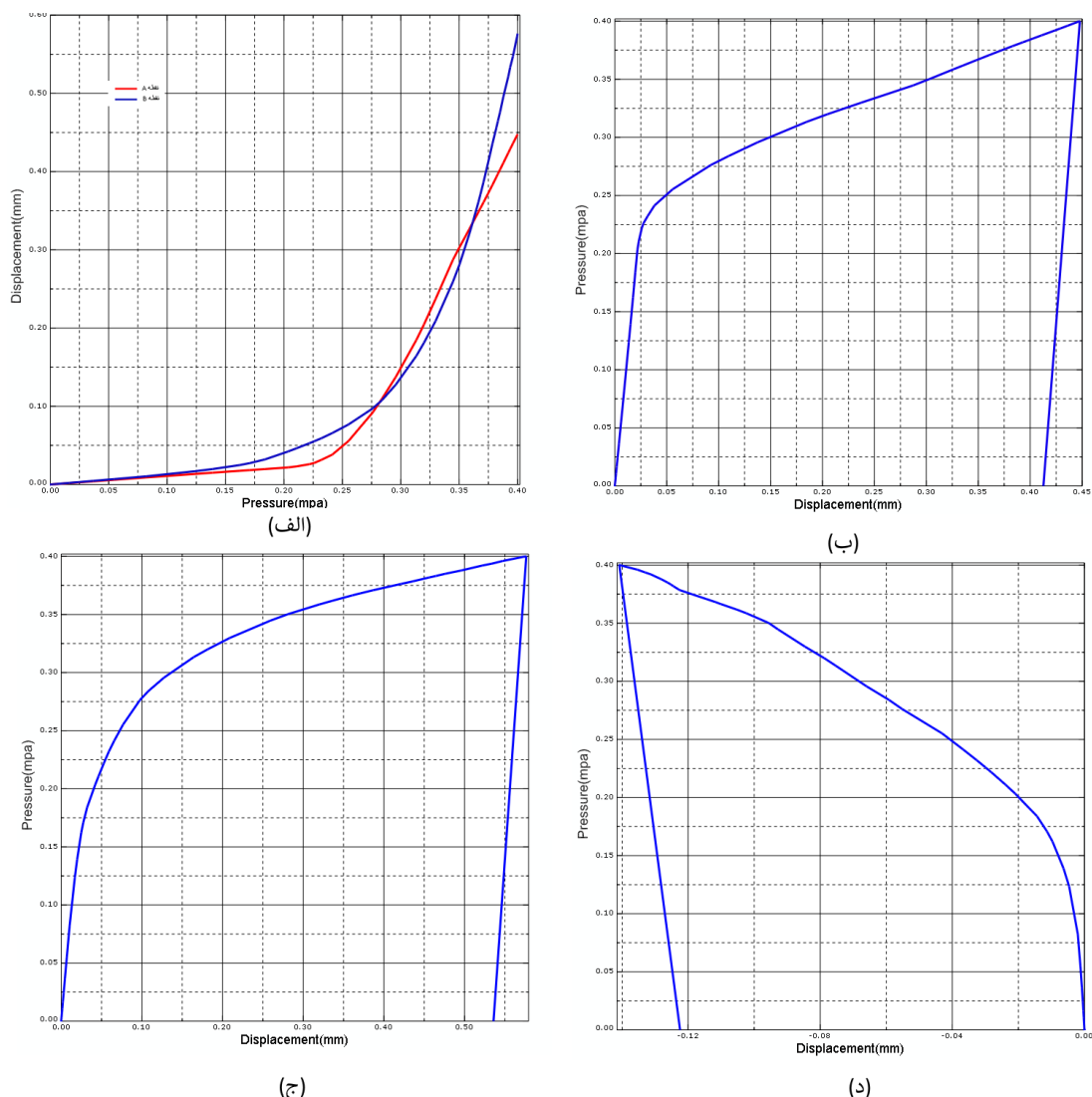
شکل ۱۹. الف) نمودار رابطه بین جابه‌جایی شعاعی نقاط A و B در استنت مدل AZ ۳۱ کم سلول و فشار انبساط (مگاپاسکال). ب) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه A در استنت. ج) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه B در استنت. د) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه C در استنت.

Fig. 19. a) Relation between radial displacement of points A and B of the stent, AZ31-low cell model and expansion pressure (MPa); b) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point A of the stent; c) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point B of the stent; d) Relation between pressure (MPa) and longitudinal recoiling at point C of the stent.

اتروسکلروسیس بطور وسیعی تغییر می‌کند و البته این خواص با استفاده از تکنیک‌های تصویربرداری تعیین می‌شوند [۲۷ و ۲۹ و ۳۸]. پلاک‌ها را می‌توان از دید هیستولوژی به سه دسته پلاک‌های پرسلول، کم سلول و کلسیمی طبقه بندی کرد [۳۸]. این پلاک‌ها سختی فشرده‌گی شعاعی متفاوتی دارند. پلاک پرسلول در مقایسه با پلاک‌های کم سلول و کلسیمی سختی بسیار کمتری دارد. سختی پلاک کم سلول به‌طور متوسط دو برابر پلاک‌های پرسلول است [۳۲-۲۹]. نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که پلاک‌های مختلف ممکن است پاسخ متفاوتی به همان پروسه استنت‌گذاری نشان بدهند. همچنین اشاره شده است که سطح زخم ایجاد شده در دیواره شریان در طی

نمودار جابه‌جایی شعاعی نقطه A و B، برگشت‌پذیری شعاعی A، برگشت‌پذیری شعاعی B و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه C به ترتیب در نمودارهای شکل ۲۰ برای مدل ۳۰۴-پرسلول و نمودار جابه‌جایی شعاعی نقطه A و B، برگشت‌پذیری شعاعی A، برگشت‌پذیری شعاعی B و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه C، به ترتیب در نمودارهای شکل ۲۱، برای مدل AZ ۳۱-پرسلول ترسیم گردیده است.

۴-۵. تأثیر ترکیب پلاک بر تنش‌های اعمال شده روی دیواره‌ی شریان، ناشی از فرآیند استنت‌گذاری ترکیب و خواص مکانیکی پلاک‌ها با پیشرفت بیماری

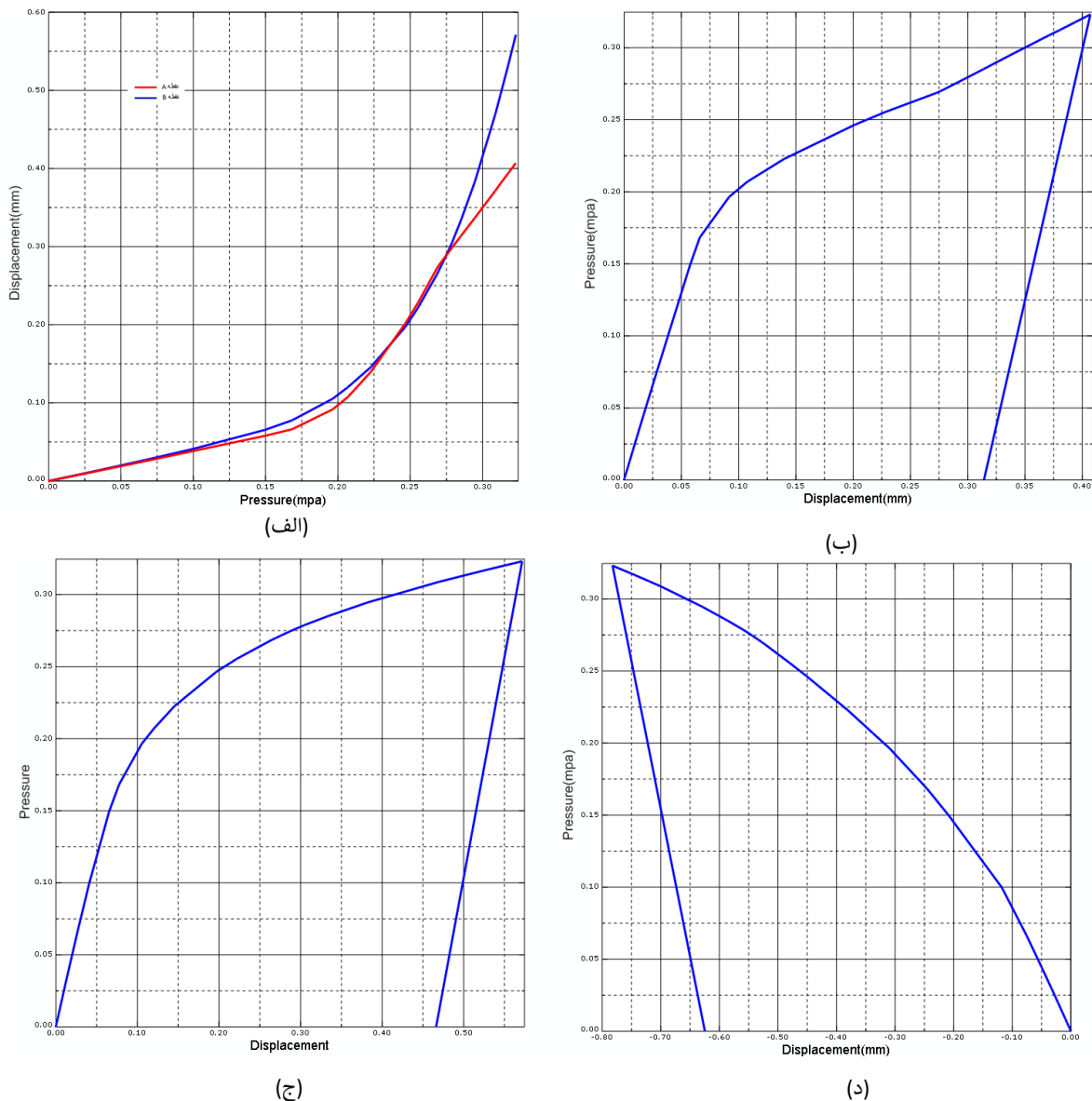


شکل ۲۰. الف) نمودار رابطه بین جابه‌جایی شعاعی نقاط A و B در استنت مدل ۳۰۴-پرسلول و فشار انبساط (مگاپاسکال). ب) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه A در استنت. ج) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه B در استنت. د) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری طولی نقطه C در استنت.

Fig. 20. a) Relation between radial displacement of points A and B of the stent, 304-full cell model and expansion pressure (MPa); b) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point A of the stent; c) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point B of the stent; d) Relation between pressure (MPa) and longitudinal recoiling at point C of the stent.

استنت هستند. در مدل‌های فولاد ضدزنگ ۳۰۴، همانطور که در شکل ۲۲ مشخص شده است توزیع تنش فون مایسز درون دیواره شریانی، نه فقط بستگی به میزان فشار اعمالی بلکه همچنین شدیداً به جنس پلاک وابسته است. تنش‌های القا شده روی دیواره شریان در پلاک‌های کم‌سلول و کلسیمی در مقایسه با پلاک پرسلول بسیار کمتر است. همچنین پلاک کلسیمی در مقایسه با پلاک کم‌سلول به دلیل سختی بیشتر آن در این فشار اعمالی، تنش کمتری روی دیواره شریان القا می‌کند. تعبیری مطابق آنچه که در مورد مدل‌های ۳۰۴ در بالا بیان شد را برای مدل‌های AZ ۳۱ نیز می‌توان ارائه داد، با این تفاوت که در اینجا میزان فشار اعمالی به‌طور میانگین برابر با

استنت‌گذاری ممکن است وابسته به ترکیب پلاک باشد و اینکه نتایج بلند مدت استنت‌گذاری، وابسته به نوع ضایعه مورد نظر است [۳۰-۳۲]. نتایج بدست آمده از مقایسه مدل‌های مختلف ۳۰۴ با سه نوع پلاک متفاوت با فشار اعمالی معادل تقریباً ۰/۴ مگاپاسکال و همچنین مقایسه مدل‌های AZ ۳۱ با سه نوع مختلف پلاک در این پژوهش نیز، نشان می‌دهند که جدا از میزان فشار اعمالی، ترکیب پلاک نیز بر روی تنش‌های القا شده روی دیواره شریان و سطح زخم ایجاد شده به‌موجب آن مؤثر است. همانطور که از شکل ۲۲ مشخص است، بطور متوسط تنش‌های روی پلاک، بطور برجسته‌ای بالاتر از تنش‌های القا شده روی دیواره شریان برای همان شرایط انبساط

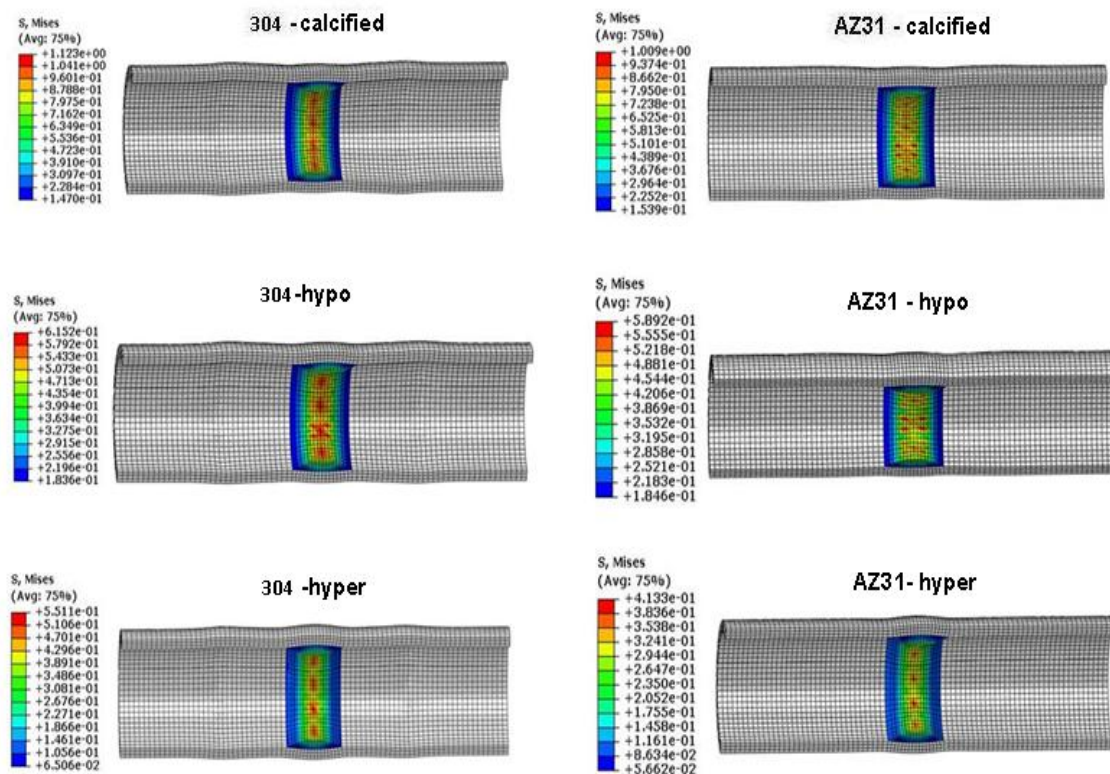


شکل ۲۱. الف) نمودار رابطه بین جابه‌جایی شعاعی نقاط A و B در استنت مدل AZ ۳۱ پرسلول و فشار انبساط (مگاپاسکال). ب) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه A در استنت. ج) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری شعاعی نقطه B در استنت. د) نمودار رابطه بین فشار (مگاپاسکال) و برگشت‌پذیری طولی نقطه C در استنت.

Fig. 21. a) Relation between radial displacement of points A and B of the stent, AZ31-full cell model and expansion pressure (MPa); b) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point A of the stent; c) Relation between pressure (MPa) and radial recoiling at point B of the stent; d) Relation between pressure (MPa) and longitudinal recoiling at point C of the stent.

از نتایج ایجاد شده در مدل‌های فوق با وجود ساده‌سازی‌های انجام شده در زمینه بار نوسانی و با فرض اینکه خستگی تحت بار نوسانی کمتر از تنش ایجاد شده بر اثر فشار اعمالی بر پارگی و لخته‌زایی اثر دارد، می‌توان پیش‌بینی کرد که خطر آسیب شریانی و پارگی پلاک و لخته‌زایی برای استنت‌های فولاد ضدزنگ در مقایسه با استنت‌های منیزیمی به مراتب بیشتر است؛ نکته‌ای که مطالعات بالینی نیز آن را تصدیق می‌کنند [۲ و ۱۸ و ۳۰]. ذکر این نکته ضروری است که اطلاعات شکست و پارگی در دسترس [۲۸ و ۲۹]، برای انواع پلاک

۰/۳۲۳ مگاپاسکال است. نتایج مدل‌های AZ ۳۱ در جدول ۷ آورده شده است. همچنین توزیع تنش فون مایسز در پلاک‌های مختلف برای مدل‌های ۳۰۴ و AZ ۳۱ در شکل ۲۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود حداکثر تنش ایجاد شده در پلاک کلسیمی مدل AZ ۳۱ در مقایسه با مدل ۳۰۴-کلسیمی بسیار کمتر است. همچنین برای پلاک‌های کم‌سلول و پرسلول در مدل‌های AZ ۳۱ در مقایسه با مدل ۳۰۴ در فشار اعمالی مربوطه جهت انبساط بیشینه استنت، تنش‌های کمتری ایجاد شده است.



شکل ۲۲. توزیع تنش فون میسز (مگاپاسکال) بر روی پلاکهای مختلف مسدود کننده، در حالت انبساط ماکزیمم.
 Fig. 22. von Mises stress distribution (MPa) in the different plaques initiating stenosis at the maximum expansion.

از پارامترهای عملکردی دو جنس استنت خاص رایج در محیطهای کلینیکی می باشد که با توجه به بررسی نویسندگان، تا کنون پژوهشی با این هدف منتشر نشده است. در نتایج ارائه شده سعی شده است با توجه به ساده سازی های ذکر شده، پارامترهایی مورد بررسی قرار گیرند که تاثیرات کمتری ناشی از این ساده سازی ها بپذیرند و تفاوت زیادی در قیاس پذیری دو جنس مختلف استنت ایجاد نکنند. علاوه بر آن، ملحوظ نمودن تمامی پیچیدگی ها در فرضیات، باعث آن می شود که در بعد حل پذیری در بسیاری از مدلها مشکل به وجود آید و حجم زیاد داده هایی که جهت قیاس مدل های مختلف از اهداف اساسی این پژوهش بوده است، محقق نشود. لذا، رویکردی در پیش گرفته شد که به طور متعارف در پژوهشهای بیومکانیکی در این حوزه معمول است. در ادامه این پژوهش، بنا است که گام به گام پیچیدگی ها در فرضیات اعم از هندسه، خواص مکانیکی و شرایط واقعی برهمکنش سیال-سازه در نظر گرفته شود. برای نزدیک تر کردن مدل به حالت واقعی در بررسی های آتی می توان از گرفتگی های پیچیده تری استفاده کرد و همچنین برای بهتر کردن عملکرد استنت می توان با استفاده از ابزارهای رادیولوژی (مانند ام-آر-آی یا سی تی اسکن) از هندسه های

نشان می دهند که پارگی پلاک در دامنه ی وسیعی از مقادیر تنشی اتفاق می افتد. طبق این اطلاعات، دامنه تنش بحرانی برای ماکزیمم و مینیمم درصد حجم بافت پلاک که ممکن است دچار پارگی و متعاقباً ایجاد لخته به دلیل تجمع پلاکت ها بشود. برای پلاک پرسلول بین ۳۰۰ تا ۴۶۰ کیلو پاسکال، برای پلاک کلسیمی بین ۱۶۰ تا ۷۰۰ کیلو پاسکال و برای پلاک کم سلول فقط مقدار شکست ۵۵۰ کیلو پاسکال گزارش شده است. با استفاده از اطلاعات فوق و با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش، مشخص است که مقدار درصد حجمی از بافت پلاک که دچار پارگی می شود، برای هر سه نوع مختلف پلاک مدل ۳۱ AZ، کمتر از مدل ۳۰۴ است و همین موضوع مطابقت خوبی با یافته های بالینی در رابطه با استنت های منیزیمی نسبت به بقیه استنت ها دارد [۲ و ۴ و ۲۸]. البته ذکر این نکته ضروری است که نمی توان ارتباط دقیقی بین اعداد بدست آمده از تحقیقات بالینی و نتایج عددی برقرار کرد. دلیل این امر آن است که نتایج بالینی بدست آمده، به شدت به شرایط آزمایشگاهی وابسته است. در این تحقیق به تحلیل عددی استنت گذاری شریان با گرفتگی ساده پرداخته شد. هدف اساسی این تحقیق، مقایسه طیف وسیعی

داخل رگ مسدود شده ارائه شده‌اند، شامل سه بخش بالون، استنت و رگ همراه با پلاک مسدود کننده می‌باشند. ضمناً جهت نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، فشار خون نیز بصورت اعمال یک فشار ثابت بر سطح داخلی رگ و پلاک نیز دیده شده است. همچنین برای بررسی جامع استنت‌های منیزیمی و مقایسه آن با استنت‌های تجاری پر کاربردی مثل استنت‌های فولاد ضدزنگ، در مدل‌های ارائه شده از سه نوع مختلف پلاک یعنی پلاک کم‌سلول، پرسلول و کلسیمی استفاده شده است. ضمناً برای بررسی تأثیر تغییرات ابعادی هندسه استنت پالماز-اسچانز از لحاظ عملکرد مکانیکی و توزیع تنش ایجاد شده روی رگ از دو استنت با ابعاد ضخامت سطح مقطع ۱/۴ و ۱/۸ برابر، برای مدل‌های منیزیمی نیز استفاده شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با وجود اعمال تغییر قطر یکسان روی رگ در همه مدل‌ها، در حالت گرفتگی ساده حداکثر تنش ایجاد شده توسط استنت‌های منیزیمی AZ ۳۱ در مقایسه با استنت‌های فولاد ضدزنگ ۳۰۴ بسیار کمتر است. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که استفاده از استنت‌های AZ ۳۱ منجر به ایجاد آسیب کمتری روی دیواره سلولی شریان شده و در نتیجه احتمال گرفتگی مجدد پس از استنت‌گذاری کاهش می‌یابد. همچنین استنت‌های منیزیمی با هندسه ضخیم‌تر در مقایسه با استنت‌های

بهینه‌تری برای شبیه‌سازی استفاده کرد. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن نقش سیال (خون) در محاسبات عددی و شبیه‌سازی مدل‌های ارائه شده در این پژوهش، اثر تنش‌های برشی اعمال شده بر دیواره شریان و نرخ انسداد مجدد را نیز بررسی کرد.

۵. نتیجه گیری

بیش از دو دهه است که کاشت استنت به‌عنوان یک روش جدید، برای درمان عارضه گرفتگی شریان‌های کرونری قلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طی این مدت با توجه به کارایی مثبت این روش درمانی، استفاده از این وسیله مکانیکی با رشد چشم‌گیری همراه بوده است. همزمان با این رشد، تحقیقات زیادی به منظور بررسی و بهبود عملکرد استنت‌ها انجام شده است. اما این تحقیقات، با توجه به گستردگی مباحث مطرح در این زمینه کافی به نظر نمی‌رسد و هنوز جنبه‌های زیادی در این حوزه ناشناخته باقی مانده است. علاوه بر این، بسیاری از پژوهش‌های مرتبط انجام شده در سال‌های اخیر، مطالعات بالینی می‌باشند. مطالعات بالینی با وجود تمام مزیت‌هایشان، دارای معایبی نیز هستند. به عنوان مثال در اکثر این مطالعات به دلیل هزینه‌های تحقیقاتی بالا، تنها دو مدل استنت مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. ضمن اینکه نتایج بدست آمده از این مطالعات تنها برای همان دو استنت خاص قابل، استناد است و نتایج یک آزمایش بالینی با آزمایش بالینی دیگر، حتی برای یک مدل خاص استنت، قابل مقایسه نمی‌باشد (به دلیل روش‌های مختلف مورد استفاده، شرایط محیطی مختلف، تفاوت در شرایط عمومی بیماران و غیره). در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی تأثیر جنس استنت بر عملکرد آن پرداخته شود. این روش علاوه بر اینکه بسیار کم هزینه است، بسیاری از محدودیت‌های مطالعات آزمایشگاهی را نیز ندارد. دو جنس استنت مدل شده در این پژوهش، مدل آلیاژ منیزیم AZ ۳۱ و مدل فولادی ۳۰۴ است. دلیل انتخاب استنت آلیاژ منیزیم، مطالعات بالینی فراوان اخیر در حوزه استنت‌های فلزی جذبی، خصوصاً آلیاژ منیزیم و نتایج نوید بخش مطالعات بالینی این استنت‌ها و همچنین پرداختن بصورت بسیار محدود و ضعیف در حوزه کارهای شبیه سازی و تحلیلی انجام شده درباره استنت‌های فلزی جذبی، به ویژه استنت‌های منیزیمی بوده است. مدل‌هایی که در این مقاله برای شبیه سازی و تحلیل عددی عمل انبساط استنت‌ها در

σ تانسور تنش

v تانسور جابه‌جایی

F نیرو به ازای واحد حجم

ρ چگالی

ϵ تانسور کرنش

C تانسور سختی مرتبه چهارم

σ_{ij} تنش کوشی

β_{ij} کوشی-گرین چپ

ω تابع چگالی انرژی کرنشی

I_1 و I_2 و I_3 ثابت‌های β_{ij}

λ_1 و λ_2 و λ_3 کشیدگی‌های اصلی ماده

C_{10} و C_{01} و C_{20} و C_{11} و C_{30} ضرایب تابع چگالی انرژی کرنشی

R شعاع استنت

R شعاع خارجی اولیه استنت

$R_{expansion}$ شعاع خارجی استنت در انتهای مرحله بارگذاری

RG افزایش شعاع استنت در طی عمل بارگذاری

L طول استنت

stent with the Palmaz-Schatz stent for narrowings in native coronary arteries. *American Journal of Cardiology* 87(2), 157-162. 2001.

- [8] Teo EC, Yuan Q, and Yeo JH. Design optimization of coronary stent using finite element analysis. *ASAIO Journal* 46(2), 201 A. 2000.
- [9] Dumoulin C, and Cochelin B. Mechanical behaviour modelling of Balloon expandable stents. *Journal of Biomechanics* 23(11), 1461-1470. 2000.
- [10] Chua SND, Mac Donald BJ, and Hashmi MSJ. Finite-element simulation of stent expansion. *Journal of Material Processing Technology* 120[1-3], 335-340. 2002.
- [11] Chua SND, Mac Donald BJ, and Hashmi MSJ. Finite element simulation of stent and balloon interaction. *Journal of Material Processing Technology* (143-144), 591-597. 2003.
- [12] Chua SND, Mac Donald BJ, and Hashmi MSJ. Effects of varying slotted tube (stent) geometry on its expansion behavior using finite element method. *Journal of Material Processing Technology* (155-156), 1764-1771. 2004.
- [13] Wang WQ, Liang DK, Yang DZ, and Qi M. Analysis of the transient expansion behavior and design optimization of coronary stents by finite element method. *Journal of Biomechanics* 39[1], 21-32. 2006.
- [14] Xia Z, Ju F, and Sasaki K. A general finite element analysis method for balloon expandable stents based on repeated unit cell (RUC) model. *Finite Elements in Analysis and Design* 43[8], 649-658. 2007.
- [15] Ju F, Xia Z, and Sasaki K. On the finite element modelling of Balloon expandable stents. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 1[1], 86-95. 2008.
- [16] Walke W, Paszenda Z, and Filipiak J. Experimental and numerical biomechanical analysis of vascular stent. *Journal of Material Processing Technology* (164-165), 1263-1268. 2005.
- [17] Lally C, Dolan F, and Prendergast PJ. Cardiovascular stent design and vessel stresses: a finite element analysis. *Journal of Biomechanics* 38[8], 1574-

فولادی با هندسه پایه تنش بسیار کمتری به دیواره رگ وارد می‌کنند. در نتیجه در همه حالت‌ها، عملکرد بهتری در مقایسه با استنت‌های فولادی دارند. البته مشکل عمده استنت‌های منیزیمی در مقایسه با استنت‌های دائمی، پایین بودن استحکام شعاعی آنان و همچنین درصد برگشت‌پذیری بالای آن‌هاست و همین مسئله نقطه ضعف اساسی این استنت‌ها به شمار می‌رود. در نهایت ذکر این نکته ضروری است که برقراری ارتباطی دقیق، بین مدل یک استنت (هندسه و جنس آن) با عملکرد آن، با استفاده از نتایج تحلیل‌هایی مشابه تحقیق حاضر بسیار دشوار است. نتایج چنین پژوهشی، هنگامی که در کنار یافته‌های آزمایشگاهی قرار گیرند، می‌توانند تبدیل به ابزاری توانمند برای پیش‌بینی رفتار استنت‌ها شوند.

فهرست علائم

مراجع

- [1] Grogan JA, Leen SB, and Mchugh PE. comparing coronary stent material performance on a common geometric platform through simulated bench testing. *journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 12, 129-138. 2012.
- [2] Hermawan H, Dube D, and Mantovani D. developments in metallic biodegradable stents. *Acta biomaterialia* 6, 1693-1697. 2010.
- [3] Garg S, and Serruys PW. Coronary stents. *journal of the American college of cardiology* 56[10], 43-78. 2010.
- [4] Mani G, Feldman MD, Patel D, Agrawal CM. Coronary stents: A materials perspective. *Biomaterials* 28, 1689-1710. 2007.
- [5] De Bock S, Iannaccone F, De Santis G, et al. Virtual evaluation of stent graft deployment: A validated modeling and simulation study. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 13, 129-139. 2012.
- [6] Stoeckel D, Bonsignore C, and Duda S. A survey of stent designs. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 11(4), 137-147. 2002.
- [7] Baim DS, Cutlip DE, Midei M, Linnemeier TJ, Schreiber T, Cox D, et al. Final results of a randomized trial comparing the MULTI-LINK

- mechanical behavior of fibrous caps from human atherosclerotic plaques. *Circulation* 83[5], 1764-70. 1991.
- [28] Pericevic I, Lally C, Toner D, and Kelly DJ. The influence of plaque composition on underlying arterial wall stress during stent expansion: The case of lesion-specific stents. *Medical Engineering & Physics* 31[4], 428-433. 2009.
- [29] Loree HM, Grodzinsky AJ, Park SY, Gibson LJ, and Lee RT. Static and circumferential tangential modulus of human atherosclerotic tissue. *J Biomech* 27, 195-204. 1994.
- [30] Salunke NV, Topoleski LDT, Humphrey JD, and Mergner WJ. Compressive stress-relaxation of human atherosclerotic plaque. *J Biomed Mater Res* 55, 236-41. 2001.
- [31] Holzapfel GA, Stadler M, Gasser TC. Changes in the mechanical environment of stenotic arteries during interaction with stents: computational assessment of parametric stent designs. *ASME J Biomech Eng* 127, 166-80. 2005.
- [32] Holzapfel GA, Sommer G, and Regitnig P. Anisotropic mechanical properties of tissue components in human atherosclerotic plaques. *J Biomech Eng* 126[5], 657-65. 2004.
- [33] Lally C, Reid AJ, and Prendergast PJ. Elastic behaviour of porcine coronary artery tissue under uniaxial and equibiaxial tension. *Ann Biomed Eng* 32, 1355-64. 2004.
- [34] Maurel W, Wu Y, Magnenat N, and Thalmann D. *Biomechanical models for soft tissue simulation*. Berlin: Springer, 1998.
- [35] Rogers C, Tseng DY, Squire JC, et al. Balloon-artery interactions during stent placement: a finite element analysis approach to pressure, compliance, and stent design as contributors to vascular injury. *Circulation* 84, 378-383. 1999.
- [36] Baim DS, Cutlip DE, O'Shaughnessy CD, Hermiller JB, Kereiakes DJ, Giambartolomei A, et al. Final results of a randomized trial comparing the NIR stent to the Palmaz-Schatz stent for narrowings in native coronary arteries. *The American Journal of Cardiology* 87[2], 152-156. 2001.
1581. 2005.
- [18] Wu W, Wang WQ, Yang DZ, and Qi M. Stent expansion in curved vessel and their interactions: A finite element analysis. *Journal of Biomechanics* 40[11], 2580-2585. 2007.
- [19] Capelli C, Gervaso F, Petrini L, Dubini G, and Migliavacca F. Assessment of tissue prolapse after balloon-expandable stenting: Influence of stent cell geometry. *Medical Engineering & Physics* 31[4], 441-447. 2009.
- [20] Altenbach Jo. Book review: Martin h. sadd, elasticity-theory, applications, and numerics. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* 85[12], 907-908. 2005.
- [21] Dehlaghi V, Najarian S, and Tafazzoli Shadpour M. The effect of flow divider on restenosis in stented human coronary artery with modeling. *The Journal of Qazvin University of Medical Sciences* 12[2], 7-12. 2008.
- [22] Gu L, Zhao S, Muttyam AK, and Hammel JM. The relation between the arterial stress and restenosis rate after coronary stenting. *Journal of Medical Devices* 4[3], 031005(7 pages). 2010.
- [23] Serruys PW, and Kutryk MJ B. *Handbook of coronary stents*. Third Edition, London: Martin Dunitz Ltd, 2000.
- [24] Green AE, and Zerna W. *Theoretical elasticity*. Oxford: Clarendon Press, 1968.
- [25] Kastrati A, Dirschinger J, Boekstegers P, Elezi S, Schühlen H, Pache J, et al. Influence of stent design on 1-year outcome after coronary stent placement: A randomized comparison of five stent types in 1147 unselected patients. *Catheterization and Cardiovascular Interventions* 50[3], 290-297. 2000.
- [26] de Weert TT, TOuhlous M, Zondervan PE, Hendriks JM, Dippel DW, van Sambeek MR, et al. In vitro characterization of atherosclerotic carotid plaque with multidetector computed tomography and histopathological correlation. *European Radiology* 15[9], 1906-14. 2005.
- [27] Lee RT, Grodzinsky AJ, Frank EH, Kamm RD, and Schoen FJ. Structure- dependent dynamic

- [39] Altenbach Jo. Book review: Martin h. sadd, elasticity – theory, applications, and numerics. ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik 85[12], 907–908. 2005.
- [37] Colombo A, Stankovic G, and Moses JW. Selection of coronary stents. J Am Coll Cardiol 40, 1021-33. 2002.
- [38] Nair A, Kuban BD, Tuzcu EM, Schoenhagen P, Nissen SE, and Vince DG. Coronary plaque classification with intravascular ultrasound radiofrequency data analysis. Circulation 106, 2200-6. 2002.

