



## مطالعه محاسباتی تاثیر بارگذاری پیچشی بر رفتار استنت‌های نایتینولی شریان فموروپالیتال

بهرام اسکینی<sup>۱</sup>، مجتبی ذوالفقاری<sup>۲</sup>، فردین نعمت زاده<sup>۳</sup>، آرین اسکینی<sup>۴</sup><sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، ایران.<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، ایران.<sup>۳</sup> دانشیار پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی.<sup>۴</sup> کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

## چکیده

استنت‌های هوشمند ساخته شده از آلیاژ حافظه‌دار نیتینول به دلیل تغییر شکل وابسته به دما و خاصیت ابرکشسانی در پزشکی محبوب شده‌اند. پیش‌بینی رفتار این استنت‌ها پیش از ساخت می‌تواند ریسک‌های جراحی و درمانی را کاهش دهد و فرآیند درمان را بهبود بخشد. این مطالعه رفتار سه نوع استنت (Smart Flex, Tigris, Viabahn) را با روش تحلیل المان محدود بررسی کرد. تحلیل‌ها تحت بارگذاری پیچشی و در دماهای مناسب برای بررسی خاصیت ابرکشسانی انجام شدند. نتایج مدل Auricchio در نرم‌افزار Abaqus نشان داد که استنت Smart Flex بهترین عملکرد را از نظر کرنش مؤثر (۰٫۰۵۸۸۹)، جابجایی (۰٫۰۴۹۴۳ متر)، تنش (۵۲۸٫۴ پاسکال)، نیروی کم (۲۶۶٫۹ نیوتن)، کسر حجمی مارتنزیت (۰٫۸۰۰۱) و حلقه هیستریزس دارد. این استنت همچنین بیشترین پیچش و گشتاور پیچشی (۴٫۶۵۲ نیوتن‌متر) را نشان داد و از دو مدل دیگر بهتر عمل کرد. مقایسه با داده‌های تجربی نشان داد استنت Tigris بیشترین تطابق (اختلاف ۲۳٫۲۲٪) را دارد، در حالی که Smart Flex و Viabahn تفاوت‌های بیشتری داشتند (۳۴٫۷۸٪ و ۵۷٫۷۱٪). این نتایج، ضمن تأیید دقت روش شبیه‌سازی در پیش‌بینی رفتار استنت‌ها، Smart Flex را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای شرایط پزشکی پیچیده معرفی می‌کند. **کلمات کلیدی:** استنت، ماده هوشمند، روش اجزاء محدود، عروق پا، فموروپالیتال.

## Computational Study of the Effect of Torsional Loading on the Behavior of Nitinol Stents in the Femoropopliteal Artery

Bahram Eskini<sup>1</sup>, Mojtaba Zolfaghari<sup>2</sup>, Fardin Nemat Zadeh<sup>3</sup>, Aryan Eskini<sup>4</sup><sup>1</sup> M.Sc. in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Iran.<sup>2</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Iran.<sup>3</sup> Assoc. Prof., Nanotechnology and Advanced Materials Research Institute, Materials and Energy Research Center.<sup>4</sup> B.Sc. Student of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

## Abstract

Smart stents made from the shape-memory alloy Nitinol are gaining importance in medicine thanks to their temperature-dependent shape change and superelasticity. Predicting their behavior before fabrication can reduce surgical risks and improve treatment outcomes. This study examines three stent types—Smart Flex, Tigris, and Viabahn—using finite element analysis to evaluate their performance under torsional loading at suitable temperatures for superelastic behavior. Using the Auricchio model in Abaqus to describe Nitinol's material properties, the simulations showed that the Smart Flex stent delivered the best overall performance. It exhibited the most favorable effective strain (0.05889), displacement (0.04943 m), stress level (528.4 Pa), low force (266.9 N), high martensite fraction (0.8001), and the widest hysteresis loop in radial and circumferential loading. The Smart Flex model also showed the greatest twist and torsional moment (4.652 Nm), outperforming both Tigris and Viabahn. However, when comparing simulation results to experimental data, the Tigris stent demonstrated the highest accuracy, with a difference of 23.22%. Smart Flex and Viabahn showed larger deviations at 34.78% and 57.71%. Despite these differences, the study confirms the strong predictive value of simulation methods and highlights Smart Flex as the most suitable option for complex medical conditions.

**Keywords:** Stent, smart material, finite element method, vascular, femoropopliteal

## مقدمه

استنت‌گذاری در سال‌های اخیر به عنوان یک روش مؤثر در درمان اختلال‌هایی مختلفی همچون انسداد عروق کرونر، تنگی مجاری صفراوی و مسدود شدن شریان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، استنت‌های مورد استفاده برای حل این مشکل‌ها که معمولاً از جنس آلیاژهای غیرحافظه‌دار هستند، هنگام قرارگیری در رگ‌ها مسائلی نظیر تنگی<sup>۱</sup> مجدد پس از کاشت، قابلیت کم در تاب و پیچ خوردن، الاستیسیته<sup>۲</sup> پایین و موارد مشابه را ایجاد می‌کنند [۱].

استنت‌های نیتینولی به دلیل توانایی خود در حل مشکلاتی مانند رفتار دینامیکی نامناسب، قابلیت پیچ‌خوردن کم و استحکام شعاعی ناکافی که در استنت‌های معمولی مشاهده می‌شود، به عنوان گزینه‌ای مناسب برای استفاده در عروق فمورال شناخته می‌شوند. استفاده از روش اجزای محدود در آنالیز عملکرد استنت‌ها این امکان را فراهم می‌آورد که رفتار مکانیکی دقیق استنت‌ها تحت شرایط مختلف بارگذاری و در آناتومی‌های خاص شبیه‌سازی و پیش‌بینی شود. ارزیابی استنت‌ها با اعمال کرنش شعاعی مطابق استاندارد و با در نظر گرفتن ویژگی‌های متالورژیکی و مکانیکی آنها صورت گرفته است. مدل‌های مختلف ماده برای توصیف خواص استنت‌ها شامل مدل آریشیو (بر اساس انرژی ترمودینامیکی آزاد هلمهولتز<sup>۳</sup>) و مدل لاگوداس<sup>۴</sup> (بر اساس انرژی گیبس<sup>۵</sup>) به کار رفته‌اند. استنت هوشمند با دمای آستنیتی ۳۰ درجه سانتیگراد به دلیل ویژگی‌هایی چون نیروی مناسب اعمالی به رگ، استحکام شعاعی مطلوب، حلقه هیستریزیس کامل وابسته به رفتار ابرکشسانی و تنش کمتر و کرنش بیشتر، عملکرد مکانیکی بهتری از خود نشان می‌دهد. این مطالعه عددی می‌تواند به عنوان روشی کارآمد برای بررسی دقیق‌تر رفتار مکانیکی استنت‌ها در عروق فمورال، با در نظر گرفتن اثرات خواص متالورژیکی و مکانیکی، مورد استفاده قرار گیرد [۱].

با توجه به اهمیت طراحی بهینه استنت‌های محیطی، روش‌های عددی مانند تحلیل اجزاء محدود به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی عملکرد مکانیکی این تجهیزات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ژانگ و همکاران یک مطالعه جامع در

زمینه تحلیل اجزای محدود استنت‌های نیتینولی با هدف بررسی اثرات بارگذاری‌های پیچشی، کششی و شعاعی بر عملکرد استنت‌ها انجام دادند. این تحقیق نشان داد که شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از روش اجزای محدود می‌تواند به طرز دقیق‌تری رفتار استنت‌ها در شرایط مختلف فیزیولوژیکی را پیش‌بینی کرده و عملکرد آن‌ها را تحت شرایط بارگذاری مختلف ارزیابی کند. این مدل‌ها می‌توانند به طراحان کمک کنند تا استنت‌های با عملکرد بهتر و مقاوم‌تر در برابر فشارهای داخلی و خارجی طراحی کنند [۲]. فنگ و همکاران شبیه‌سازی‌های عددی عملکرد مکانیکی استنت‌های نیتینول تحت بارگذاری‌های مختلف به‌ویژه تحت شرایط چرخه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌سازی دقیق رفتار خستگی و پیش‌بینی مشکل‌های ناشی از بارگذاری‌های مکرر می‌تواند در بهبود طراحی استنت‌ها و افزایش طول عمر مفید آنها بسیار مؤثر باشد. این نتایج به‌ویژه در زمینه بهبود طراحی استنت‌ها برای کاربردهای پزشکی اهمیت دارد و می‌تواند به‌عنوان راهکارهایی برای کاهش مشکل‌های بالینی ناشی از استنت‌ها به کار رود [۳]. مطالعه تیان و همکاران بر تحلیل رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی تحت شرایط مختلف بارگذاری تأکید دارد. این پژوهش به‌ویژه در بررسی تأثیر تغییرات هندسی و بارگذاری‌های پیچشی، کششی و شعاعی بر عملکرد استنت‌ها و پیش‌بینی شرایط خستگی آن‌ها اهمیت دارد. نتایج این بررسی نشان داد که شبیه‌سازی‌های عددی قادر به شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار استنت‌های نیتینول در شرایط واقعی و پیش‌بینی رفتار آن‌ها تحت تغییرات دما و فشار در طول زمان هستند. این نتایج می‌تواند مبنای مهمی برای طراحی استنت‌های مقاوم‌تر با عمر مفید بیشتر و عملکرد بهتر در شرایط واقعی باشد [۴].

آناستازیا دسیاتووا<sup>۶</sup> و همکارانش، از کار افتادگی یا گسیختگی‌های با نرخ بالا در سرخرگ فموروپالیتال (FPA) را اغلب به تغییر شکل‌های مکانیکی شدید ناشی از حرکت اعضای بدن نسبت دادند که پیچش سرخرگ فموروپالیتال نقش مهمی را در این موضوع ایفا می‌کند، اما نقش این عامل به خوبی توصیف نشده‌است و نیز تنش‌های داخلی مرتبط با آن

<sup>5</sup> Gibbs

<sup>6</sup> Anastasia Desiatova

<sup>1</sup> Tightness

<sup>2</sup> elasticity

<sup>3</sup> Helmholtz free energy

<sup>4</sup> Lagudodas model

شعاعی بررسی کرده‌اند و تحلیل بارگذاری پیچشی، که به دلیل حرکات دینامیکی شریان فموروپالیتال اهمیت دارد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، این مدل‌های تحلیلی، آنالیز گسترش استنت‌های سیم را در هندسه‌های آناتومیک خاص بیمار به چالش می‌کشند و در توصیف رفتار مکانیکی استنت‌های بافته شده دارای قابلیت جذب بیو و انعطاف‌پذیر ناتوان هستند [۱۳]. استفاده از استنت‌ها در عروق محیطی، به ویژه در عروق فموروپالیتال که به دلیل تغییرات فیزیکی مداوم در طول فعالیت‌های روزمره تحت تأثیر قرار می‌گیرند، با ریسک‌های قابل توجهی همراه است. این ریسک‌ها از آسیب به عروق گرفته تا احتمال شکست استنت‌ها و ایجاد مشکل‌های جدی برای بیماران متغیر هستند؛ بنابراین، ضروری است که پیش از انجام آزمایش‌ها و مطالعه‌های میدانی و تجربی روی مدل‌های تجاری، این استنت‌ها از طریق شبیه‌سازی‌های کامپیوتری مورد ارزیابی قرار گیرند؛ همچنین بیشتر این پژوهش‌ها روی استنت‌های لوله‌ای متمرکز بوده‌اند و بررسی استنت‌های سیمی بافته‌شده در هندسه‌های آناتومیک پیچیده محدود بوده است. علاوه بر این، مدل‌های تحلیلی موجود برای شبیه‌سازی دقیق رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی تحت بارگذاری پیچشی ناکافی بوده و چالش‌های مدل‌سازی هندسی این استنت‌ها با روش‌های کلاسیک CAD همچنان باقی است. با توجه به چالش‌های عملکردی استنت‌های بافته‌شده، از جمله تمایل به تنگی مجدد، ضعف در تحمل بارهای خمشی و پیچشی، و ناتوانی در انطباق با حرکت‌های دینامیکی اندام‌ها به‌ویژه در نواحی فمور و فموروپالیتال، نیاز به تحلیل‌های مکانیکی دقیق و جامع بیش از پیش احساس می‌شود. در این میان، شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته، به‌ویژه تحلیل پیچشی و بارگذاری‌های چندمحوره، به‌عنوان ابزارهایی کارآمد برای ارزیابی عملکرد استنت‌ها در شرایط بالینی واقع‌گرایانه مطرح شده‌اند.

برخلاف بارهای کششی یا فشاری که عمدتاً در راستای طولی یا شعاعی عمل می‌کنند، بار پیچشی (Torsion) مستقیماً بر توانایی استنت در مقابله با حرکت‌های چرخشی طبیعی اندام‌ها، نظیر دوران مفصل زانو یا لگن، تأثیرگذار است. این حرکت‌ها که در فعالیت‌های روزمره افراد به‌طور مکرر رخ

در حال حاضر ناشناخته می‌باشند [۵]. مطالعه‌های انجام شده در ادبیات مهندسی مربوط به آنالیز خواص مکانیکی استنت‌های خود انبساطی نیتینول و تعامل آنها با دیواره رگ بر استنت‌های لوله‌ای متمرکز شده‌اند. در عوض، تعداد مطالعه‌های مجازی (پژوهش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری) مربوط به استنت‌های سیمی<sup>۱</sup> محدود است [۶-۷]. مطالعه‌ای که توسط وانگ و همکاران انجام شد، به توسعه یک مدل عددی برای تحلیل رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی بافته شده پرداخته است. این مدل به‌ویژه به بررسی پاسخ استنت‌ها در برابر بارگذاری‌های مختلف از جمله کشش، فشار و پیچش توجه دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش‌های عددی می‌تواند دقت بالاتری در پیش‌بینی رفتار استنت‌های نیتینولی در شرایط مختلف فیزیولوژیکی داشته باشد و در طراحی استنت‌های مقاوم‌تر و بهینه‌تر نقش کلیدی ایفا کند [۸]. وانگ و راولچندار<sup>۲</sup> [۹-۱۰] یک مدل ریاضی دقیق، بر اساس نظریه میله‌های باریک ارائه کرده‌اند که پاسخ به شرایط بارگذاری داخلی و خارجی یک استنت سیم فلزی بافته شده را توصیف می‌کند و نتایج حاصل با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شدند. علاوه بر این، کانیک و همکاران [۱۱]، به منظور آنالیز خواص مکانیکی دو گرفت استنت فلزی لخت بافته شده (استنت‌های فلزی با ساختار بافته‌شده بدون پوشش) و برای مقایسه آن با نیروهای همودینامیک، یک مطالعه تحلیلی ارائه کردند. لیو و همکاران یک مدل تحلیلی برای ارزیابی رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی توسعه دادند و آن را با نیروهای همودینامیک مقایسه کردند. این مطالعه به‌ویژه به بررسی تعامل استنت‌های خود انبساطی با دیواره رگ و پیش‌بینی تغییرات شکل هندسی آنها تحت بارگذاری‌های مختلف پرداخت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش‌های تحلیلی می‌توانند ابزارهای مفیدی برای بهینه‌سازی طراحی استنت‌ها و افزایش عملکرد آنها در برابر نیروهای همودینامیک باشند [۱۲].

پژوهش‌های پیشین ذکر شده، ضرورت استفاده از مدل‌های تحلیلی پیچیده را برای بررسی رفتار مکانیکی استنت‌های سیم پیچی نشان می‌دهند. پژوهش‌های ذکر شده عمدتاً رفتار استنت‌های نیتینولی را تحت بارگذاری‌های کششی، فشاری و

<sup>1</sup> Wire

<sup>2</sup> Wang and Ravichandar

سه استنت و جدول (۲) مربوط به خواص مواد به صورت زیر برنامه در نرم‌افزار آباکوس است.

بررسی هندسه سه استنت Viabahn, Tigris, Smart Flex

جدول ۱-الف- مشخصه‌های مدل استنت (Smart Flex)

Smart Flex	نمونه‌ها / مشخصه‌ها
6/15-7/50 mm	قطر داخلی استنت
0/25	شعاع انحنا r
4 cm	طول قطعه
0/38 $\mu$ m	قطر سیم
45 درجه	زاویه خمش W
برش با لیزر	نوع
sheet	شکل
140 $\mu$ m	ضخامت
120 $\mu$ m	ارتفاع

جدول ۱-ب- مشخصه‌های مدل استنت (Viabahn)

Viabahn	نمونه‌ها / مشخصه‌ها
6/15-7/50 mm	قطر داخلی استنت
0/25	شعاع انحنا r
4 cm	طول قطعه
0/4 $\mu$ m	قطر سیم
45 درجه	زاویه خمش W
پیچیدن گره زدن جوشکاری	نوع
Piped	شکل
140-135 $\mu$ m	ضخامت
135 $\mu$ m	ارتفاع

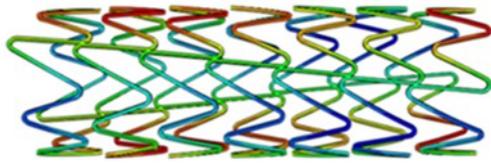
می‌دهند، می‌توانند منجر به ایجاد تنش‌های پیچیده و تغییر شکل‌های غیرخطی شوند که در بارگذاری‌های خطی قابل شناسایی نیستند.

در مطالعه حاضر، تحلیل عددی استنت‌های نیتینولی تحت بار پیچشی نه تنها پارامترهایی مانند گشتاور، توزیع کرنش و تنش، و درصد تبدیل مارتزیتی را بررسی کرده، بلکه نشان داده است استنت‌هایی با انعطاف‌پذیری بالاتر و ظرفیت جذب کرنش بیشتر (مانند مدل Smart Flex) در برابر پیچش‌های مکرر، عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند. نتایج این شبیه‌سازی‌ها، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار مکانیکی و ارتقاء طراحی را پیش از ساخت نمونه‌های فیزیکی فراهم می‌آورند. در مجموع، توسعه مدل‌های عددی دقیق برای تحلیل پیچش، نقشی اساسی در بهینه‌سازی طراحی، افزایش دوام، کاهش خطر گسیختگی و ارتقاء ایمنی بالینی استنت‌های نیتینولی ایفا می‌کند و گامی مهم در راستای بهبود نتایج درمانی بیماران مبتلا به تنگی‌های عروقی در نواحی پرتحرک بدن محسوب می‌شود.

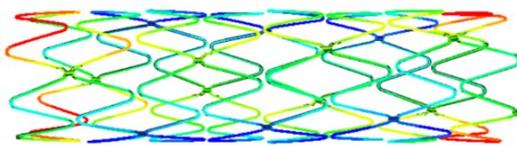
### روش تحقیق

استفاده از نرم‌افزار آباکوس به دلیل برخورداری از مزایای مختلفی چون زیر برنامه‌های متنوع برای تعریف آلیاژهای حافظه‌دار، توانایی حل مسائل به صورت صریح و استاندارد، و قابلیت‌های پیشرفته در زمینه کاربردهای پزشکی مانند استنت‌ها، به عنوان ابزار اصلی پژوهش انتخاب شد. این نرم‌افزار همچنین برای فراخوانی تعریف مواد به صورت زیر برنامه به کار گرفته شده است. به دلیل وابستگی هندسه استنت‌ها به پنت‌های سخت‌گیرانه، نمونه‌های هندسی طراحی شده برای کاربرد در عروق فمورال، با نرم‌افزار SolidWorks و بر اساس کاتالوگ‌ها، مقالات و گزارش‌های کلینیکی تهیه گردیده‌اند.

برای اعتبارسنجی تئوری به کار گرفته شده، ابتدا بر مبنای کارهای آریشیو در زیر برنامه‌های نرم‌افزار آباکوس، پیش از انجام آزمایش‌ها، یک المان ساده از ماده نیتینول در نظر گرفته شد و نتایج حاصل از آن با نتایج تجربی مقایسه گردید (شکل ۴). تحلیل‌های انجام شده نشان داد که مدل آریشیو تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد؛ بنابراین، ادامه پژوهش با استفاده از تعریف مواد به صورت زیر برنامه‌ای بر اساس نظریه آریشیو انجام گرفت. جدول (۱) مربوط به بررسی مشخصه‌های هندسی



شکل ۲- یک نمونه استنت Viabahn برای باز کردن عروق محیطی فمورال با مشخصه‌های هندسی و محل مطالعه مشخص شده



شکل ۳- یک نمونه استنت Tigris برای باز کردن عروق محیطی فمورال با مشخصه‌های هندسی و محل مطالعه مشخص شده

#### مقایسه هندسه سه مدل استنت (Viabahn, Smart Flex, Tigris)

هندسه استنت‌های Tigris، Viabahn و Smart Flex تفاوت‌های مهمی در طراحی دارند که بر عملکردشان تأثیر می‌گذارد. استنت Tigris دارای ساختار سیمی (wire) مانند با الگوی زیگزاگی و موجی است که انعطاف‌پذیری خوبی در عروق دارد. استنت Viabahn با طراحی (piped) لوله‌ای ساختاری پیوسته‌تر و مقاوم‌تر دارد که می‌تواند استحکام بیشتری ارائه دهد. استنت Smart Flex با برش لیزری از ورق فلزی (sheet) ساخته شده‌است که به آن دقت و یکنواختی بیشتری می‌دهد، درعین‌حال نازک‌تر بوده و انعطاف بهتری نسبت به بقیه دارد. این تفاوت‌ها در هندسه، میزان استحکام، انعطاف‌پذیری و تطابق هر استنت با حرکت‌های عروق فموروپالپیتال را تعیین می‌کنند.

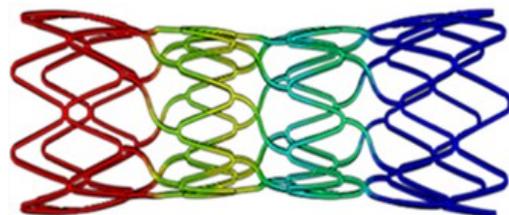
#### روش بررسی شباهت داده‌های شبیه‌سازی و تجربی

برای سنجش اختلاف کلی بین داده‌های حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی، از شاخص درصد تفاوت مجموع کل استفاده شد. در این روش، مجموع مقادیر هر دو مجموعه محاسبه و اختلاف آن‌ها نسبت به مجموعه مبنا به صورت درصدی بیان گردید.

جدول ۱-ج- مشخصه‌های سه مدل استنت (Tigris)

Tigris	نمونه‌ها / مشخصه‌ها
6/15-7/50 mm	قطر داخلی استنت
0/25	شعاع انحنا r
4 cm	طول قطعه
0/15 $\mu$ m	قطر سیم
45 درجه	زاویه خمش W
پیچیدن گره زدن جوشکاری	نوع
wire	شکل
140 $\mu$ m	ضخامت
130 $\mu$ m	ارتفاع

هندسه استنت‌ها نقش کلیدی در عملکرد آنها در عروق فموروپالپیتال دارد، زیرا این عروق تحت حرکت‌های پیچیده‌ای مانند کشش، فشردگی و خم‌شدگی و پیچشی قرار می‌گیرند. طراحی استنت می‌تواند بر میزان انعطاف‌پذیری، استحکام و تطابق آن با دینامیک عروق تأثیر بگذارد. در ادامه، هندسه سه استنت Tigris، Viabahn و Smart Flex بررسی می‌شود تا تفاوت‌های ساختاری و اثرات آن بر عملکرد هر مدل در بارگذاری پیچشی مشخص گردد.



شکل ۱- یک نمونه استنت Smart flex برای باز کردن عروق محیطی فمورال با مشخصه‌های هندسی و محل مطالعه مشخص شده

فرمول محاسبه به صورت  $100 \times \left( \frac{|\sum x_2 - \sum x_1|}{\sum x_1} \right)$  تعریف می‌شود که در آن  $\sum x_1$  مجموع مقادیر مجموعه اول و  $\sum x_2$  مجموع مقادیر مجموعه دوم است. این شاخص، معیاری برای ارزیابی اختلاف در مقیاس کلی داده‌ها ارائه می‌دهد و برای تحلیل‌هایی که تمرکز بر مجموع کل دارند، مناسب است.

جدول ۲- لیست پارامترهای مربوط به خواص ماده نایتینول جهت عروق فمورال بر اساس مدل آریشیو [۱۴-۱۵]

خواص ماده	پارامترهای توصیف خواص ماده
35877 MPa	مدول الاستیسیته آستنیت
0/33	ضریب پواسون آستنیت
24462 MPa	مدول الاستیسیته مارتنزیت
0/33	ضریب پواسون مارتنزیت
0/055	کرنش تغییرحالت
$6/7 \text{ MPa} \cdot \text{T}^{-1}$	تغییرات تنش به دما در حال بارگذاری
489 MPa	شروع تنش تغییرحالت بارگذاری
572 MPa	پایان تنش تغییرحالت بارگذاری
22 °C	دمای مرجع
$6/7 \text{ MPa} \cdot \text{T}^{-1}$	تغییرات تنش به دما در حال بار برداری
230 MPa	شروع تنش تغییرحالت بار برداری
147 MPa	پایان تنش تغییرحالت بار برداری
0	کرنش حجمی تغییرحالت

برای شبیه‌سازی رفتار آلیاژ حافظه‌دار نایتینول، از مدل آریشیو (Auricchio) استفاده شد که به صورت یک زیر برنامه‌ی کاربر (UMAT) در آباکوس پیاده‌سازی گردید. جهت اطمینان از صحت مدل‌سازی، رفتار کششی یک نمونه ساده از ماده نیتینول شبیه‌سازی و با داده‌های تجربی مقایسه شد (شکل ۴). پارامترهای مورد استفاده در مدل، شامل مدول‌های الاستیسیته، ضریب پواسون، تنش‌های شروع و پایان تغییر فاز، دمای مرجع و کرنش‌های تغییر فاز، در جدول ۲ آورده شده‌اند.

### نقش دما در شبیه‌سازی استنت‌های نیتینولی

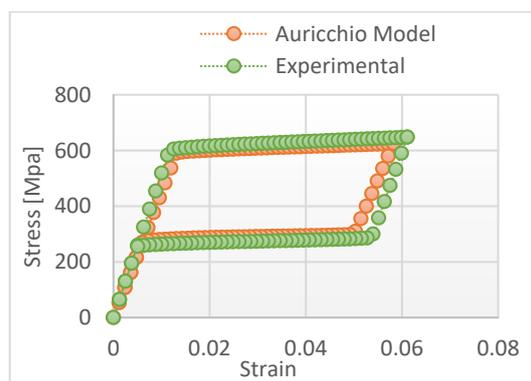
در این مطالعه، تأثیر دما بر رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی با استفاده از مدل آریشیو و در قالب یک تحلیل ترمومکانیکی در نرم‌افزار Abaqus بررسی شده‌است. دمای مرجع در مدل‌سازی  $22^\circ\text{C}$  و دمای تکمیل آستنیت  $30^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شده و ضریب تغییر تنش نسبت به دما نیز برابر با  $6/7 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$  تنظیم شده است (جدول ۲). با توجه به وابستگی شدید خواص حافظه‌داری و ابرکشسانی آلیاژ نایتینول به دما، لحاظ کردن این پارامتر در شبیه‌سازی از اهمیت بالایی برخوردار است. در واقع، افزایش دما منجر به کاهش کسر حجمی فاز مارتنزیت و فعال شدن رفتار ابرکشسانی می‌شود، بنابراین برای دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد، عملکرد استنت در شرایط واقعی دمای بدن (نزدیک به  $37^\circ\text{C}$ ) باید به‌درستی مدل‌سازی شود.

### فرآیند شبیه‌سازی بارگذاری و شرایط مرزی

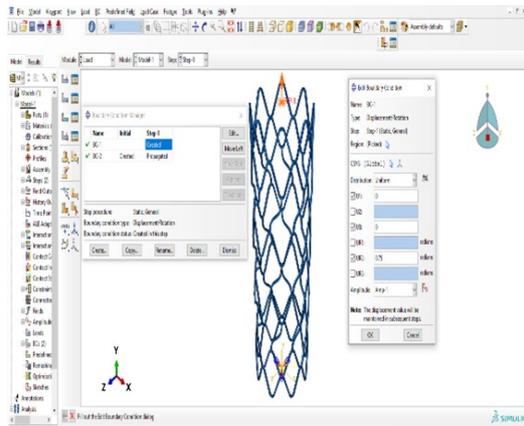
تست پیچش یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ارزیابی عملکرد مکانیکی استنت‌ها محسوب می‌شود، زیرا می‌تواند شرایط واقعی بارگذاری، به‌ویژه در حین کاشت و مراحل جراحی، را شبیه‌سازی کند.

در روش اجزاء محدود، قیدها برای:

- تثبیت موقعیت جسم،
- اعمال نیرو یا تغییر شکل دلخواه،
- جلوگیری از حرکات یا چرخش‌های ناخواسته
- دوران پیچشی
- ثابت نگه‌داشتن سر دیگر استنت
- جلوگیری از جابه‌جایی غیرضروری



شکل ۴- مقایسه رفتار کششی یک المان ساده از نایتینول بر مبنای خواص ماده ذکر شده در جدول (۲) بر مبنای تئوری‌های آریشیو



شکل ۵- نحوه بارگذاری شرایط مرزی

### المان بندی مربوط به استنت ها

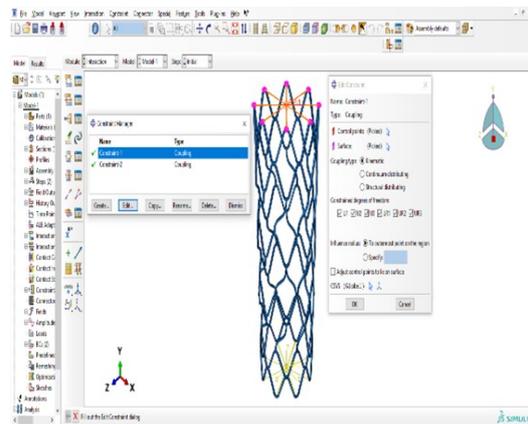
در شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر روش اجزای محدود، مش‌بندی نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت و پایداری نتایج ایفا می‌کند. جدول ارائه‌شده مشخصات مش‌بندی سه نوع استنت مختلف (Smart Flex, Tigris, Viabahn) را در آزمایش پیچش نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی‌ها، برای هر سه مدل از المان‌های C3D8I با ویژگی مکعبی و قابلیت تحمل تغییر شکل‌های غیرخطی استفاده شده و اندازه مش‌ها به صورت تقریبی ۰٫۰۵ تا ۰٫۰۷ میلی‌متر تنظیم شده‌اند. انتخاب نوع مش، اندازه آن، و تعداد المان‌ها و گره‌ها به‌طور مستقیم با هندسه استنت و هدف تحلیل مرتبط است (جدول ۳).

جدول ۳- ویژگی‌های المان و گره، شامل نوع و تعداد آن‌ها در آزمایش پیچش

تعداد گره	تعداد المان	نوع شبکه	اندازه تقریبی	Stent
145608	87408	C3D8I	0/05	Smart Flex
124476	71403	C3D8I	0/05	Viabahn
186003	156841	C3D8I	0/07	Tigris

در این شبیه‌سازی، ابتدا مدل هندسی استنت از نرم‌افزار SolidWorks وارد محیط تحلیل می‌شود، خواص مکانیکی ماده تعریف شده و مونتاژ قطعه در ماژول Assembly انجام می‌گیرد. سپس در بخش Step نوع تحلیل، Static General یا شبه‌استاتیکی (برای پایداری در بارگذاری پیچشی)، زمان‌بندی و تابع Amplitude برای مدل‌سازی رفتار ابرکشسان تنظیم می‌شود. با استفاده از قید Coupling در ماژول Interaction، وابستگی بین یک نقطه مرجع و سطح استنت برقرار می‌شود. در واقع یک نوع قید میان سطح و یک نقطه مرجع هست که حرکات نقطه مرجع رو به کل سطح منتقل می‌کند. این روش برای اعمال گشتاور پیچشی به کل مقطع استنت استفاده شده است.

در ماژول Load، شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف می‌شوند که در مرحله Step، درجه‌های آزادی U1، U2 و U3 در دو سر استنت آزاد و سایر DOF‌ها مقید باشند. نیروی پیچشی در راستای UR2 اعمال می‌گردد و در مرحله Initial، تمامی درجات آزادی آزاد در نظر گرفته می‌شوند. مش‌بندی مدل با المان‌های C3D8I انجام می‌شود که به دلیل ساختار مکعبی خود، پایداری و دقت مناسبی در تحلیل رفتار پیچشی استنت ارائه می‌دهند. این فرآیند امکان ارزیابی دقیق پاسخ مکانیکی استنت در برابر بار پیچشی را فراهم می‌سازد.



## نتایج و بحث

برای بررسی کارآمدی و عکس‌العمل سه استنت معرفی شده برای رگ فمورال، استنت‌ها در شرایط بارگذاری هندسی و دمایی یکسان قرار گرفتند. سه استنت (Smart flex, Tigris, Viabahn) دارای اندازه‌های یکسان و هندسه‌های متفاوتی می‌باشند که تحت پیشی قرار گرفته و دو ویژگی ابرکشسانی و حافظه‌داری مکانیکی، در سه مدل استنت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های در حالت ابرکشسانی نشان می‌دهند که استنت‌ها در شرایط بارگذاری با تنش‌های بالاتر فعال می‌شوند و این نوع استنت‌ها برای عروق پا (فموروپالیتال) مناسب هستند. با توجه به ویژگی‌های ابرکشسانی، اثر حافظه‌دار و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های نیرو-کرنش، نیرو-جابجایی، تنش-کرنش و کسر حجمی مارتنزیت که تحت بارگذاری‌های مختلف قرار گرفته‌اند، نتایج نشان می‌دهند که در میان سه نوع استنت، نوعی که بیشترین انعطاف‌پذیری، تنش کم-کرنش، جابجایی زیاد، نیروی کم و حلقه هیستریزیس بزرگ (در نیروهای شعاعی و محیطی) و تشکیل مارتنزیت را دارد، برای استفاده هنگام دوییدن مفید است و در کاربردهای معمولی نیز مشکلی ایجاد نمی‌کند. استنت‌های هوشمند نیتینولی با ویژگی‌هایی مانند حلقه هیستریزیس مکانیکی (ابرکشسانی) کامل، استحکام مکانیکی مناسب شعاعی جهت باز کردن عروق فمورال (Chronic Outward Force: COF)، بالاترین استحکام مکانیکی مقاومت‌کننده پیشی جهت باز کردن عروق فمورال (Compression Resistive Force: RRF)، کرنش بالا برای تغییر شکل، تنش کمتر در نقاط بحرانی استنت، کرنش بالا (طول منطقه تغییر شکل ابرکشسان زیاد)، جابجایی حداکثر، تشکیل کسر حجمی بالای مارتنزیت در ساختار استنت و عدم قرار گرفتن استنت در محدوده الاستیک و همچنین در محدوده ایمن بودن استنت در برابر شکست، دارای کاربرد مکانیکی و بالینی مطلوبی خواهند بود [۱۴-۱۶].

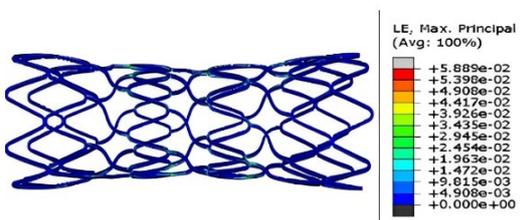
استنت‌های نیتینولی طراحی شده برای کاربرد در عروق فمورال در شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) و با خواص مواد ذکر شده در جدول (۴) در بخش روش پژوهش مشخص شده‌اند. سه مدل استنت با توجه به شاخصه‌های ارزیابی شامل کرنش و جابجایی بیشتر، تنش کم، نیروی کم، حلقه هیستریزیس بزرگ

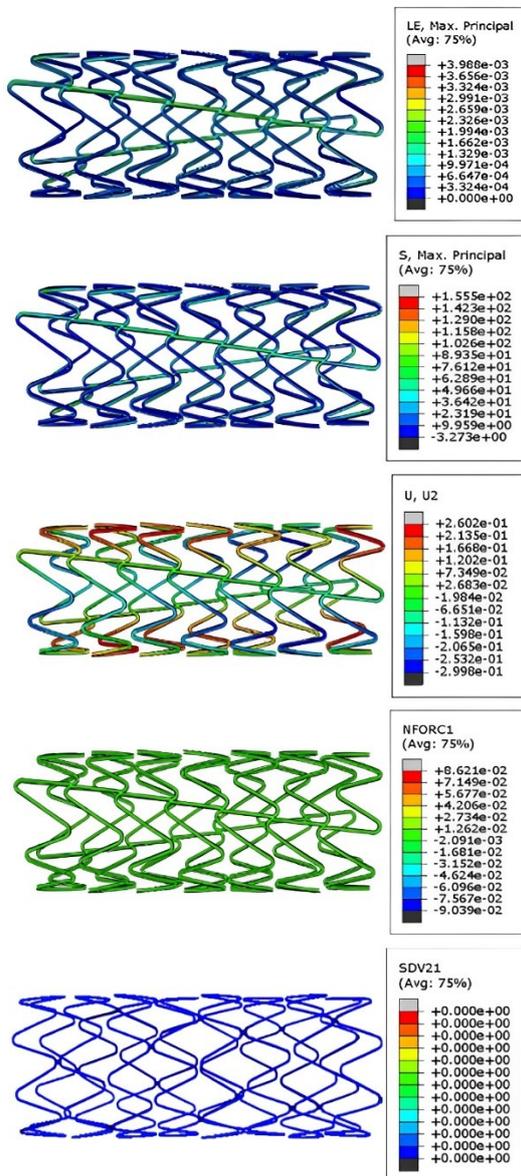
(نیروی شعاعی و محیطی) و تشکیل مارتنزیت، در مقایسه با جدول ۳ انتخاب شده‌اند.

کمترین تنش در منحنی درونی نمونه استنت (Tigris) کمتر از دو نمونه استنت دیگر بوده است؛ همچنین، حداکثر کرنش در منحنی درونی نمونه استنت (Smart Flex) بیشتر از دو نمونه استنت دیگر است. کمترین نیرو در منحنی درونی نمونه استنت (Smart Flex) نیز کمتر از دو نمونه استنت دیگر بوده است. در مقابل، حداکثر جابجایی در منحنی درونی نمونه استنت (Tigris) بیشتر از دو نمونه استنت دیگر بوده و مارتنزیت تشکیل شده تنها برای استنت (Smart Flex) مشاهده شده است، در حالی که برای دو مدل استنت دیگر (Viabahn) و (Tigris) چنین فازی تشکیل نشده است.

با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه با شاخصه‌های ارزیابی، به ترتیب بهترین استنت (Smart Flex)، سپس استنت (Viabahn) و در نهایت استنت (Tigris) است که از نظر مکانیکی برای کاربرد در عروق فمورال ترجیح داده می‌شود. مطابق با مطالعات پیشین، استنت‌های نیتینولی باید در منحنی تنش و کرنش خود ناحیه مارتنزیت تحت تنش را نشان دهند تا رفتار ابرکشسان خود را نمایان کنند [۱۱]. مطابق شکل (۲)، هر دو نمونه استنت رفتار ابرکشسان متأثر از استحاله مارتنزیت تحت تنش را در منحنی تنش و کرنش ارائه دادند؛ بنابراین، این استنت‌ها برای کاربرد در عروق فمورال مناسب هستند. علاوه بر این، مطابق با استانداردهای ارزیابی، استنت‌های نیتینولی در برابر بارگذاری‌های مکانیکی ایمن هستند که این موضوع با نتایج تحقیقاتی محقق‌های پیشین نیز همخوانی دارد [۱۴، ۱۶، ۱۷].

## نتایج

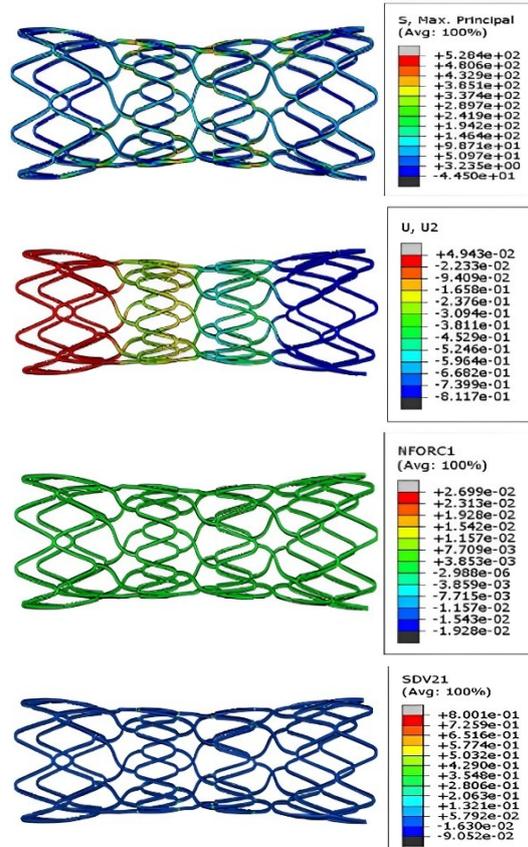




شکل ۷- کانتورهای ماکزیمم تنش- کرنش، نیرو-جابجایی و کرنش\_مارتنزیت بدست آمده در پیچش انجام شده روی نمونه های استنت Viabahn (شکل ۱-ب) و برای خواص ماده (جدول ۲)

### نتایج حاصل از شبیه سازی عددی استنت Viabahn

همان طور که در شکل های (۴)، (۹)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۳-ب) نشان داده شده است، نتایج عددی به دست آمده از استنت Viabahn در بارگذاری پیچشی نشان دهنده نتایج متفاوتی



شکل ۶- کانتورهای ماکزیمم تنش- کرنش، نیرو-جابجایی و کرنش\_مارتنزیت بدست آمده در پیچش انجام شده روی نمونه های استنت Smart flex و برای خواص ماده (جدول ۲)

### نتایج حاصل از شبیه سازی عددی استنت Smart flex

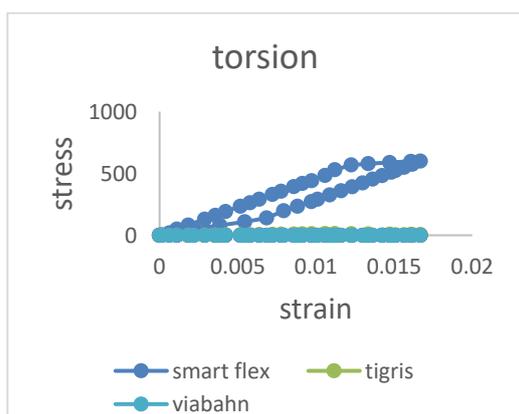
همان طور که در شکل های (۴)، (۹)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۳-الف) نشان داده شده است، نتایج عددی به دست آمده از استنت Smart Flex در بارگذاری پیچشی نشان دهنده نتایج متفاوتی است. این آزمایش عملکرد یک استنت را برای جایگذاری در رگ فموروپاپیتال تعیین می کنند. نتایج به دست آمده، بر اساس شاخص های ارزیابی استفاده شده برای تعیین استنت ایده آل، شامل تنش (528/4Pa)، کرنش (0/05889)، نیرو (0/02699N)، جابه جایی (0/05889m) و کسر حجمی مارتنزیت تشکیل شده در استنت Smart flex با مقدار (0/8001) برای این مدل استنت است.

### نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی استنت Tigris

همان‌طور که در شکل‌های (۴)، (۹)، (۱۰)، (۱۱)، (۱۳-پ) نشان داده شده‌است، نتایج عددی به‌دست‌آمده از استنت Tigris در بارگذاری پیچشی نشان‌دهنده نتایج متفاوتی است. این آزمایش تمام عملکرد یک استنت را برای جایگذاری در رگ فموروپالیتال مشخص می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده، بر اساس شاخص‌های ارزیابی استفاده‌شده برای تعیین استنت ایده‌آل، شامل تنش (153/3 Pa)، کرنش (0/004272)، نیرو (0/05986N)، جابه‌جایی (2/716m) و کسر حجمی مارتنزیت تشکیل‌شده در استنت Tigris با مقدار (0) برای این مدل استنت است.

### بررسی نتایج و بحث

بررسی و مقایسه تنش\_کرنش در بارگذاری پیچشی:

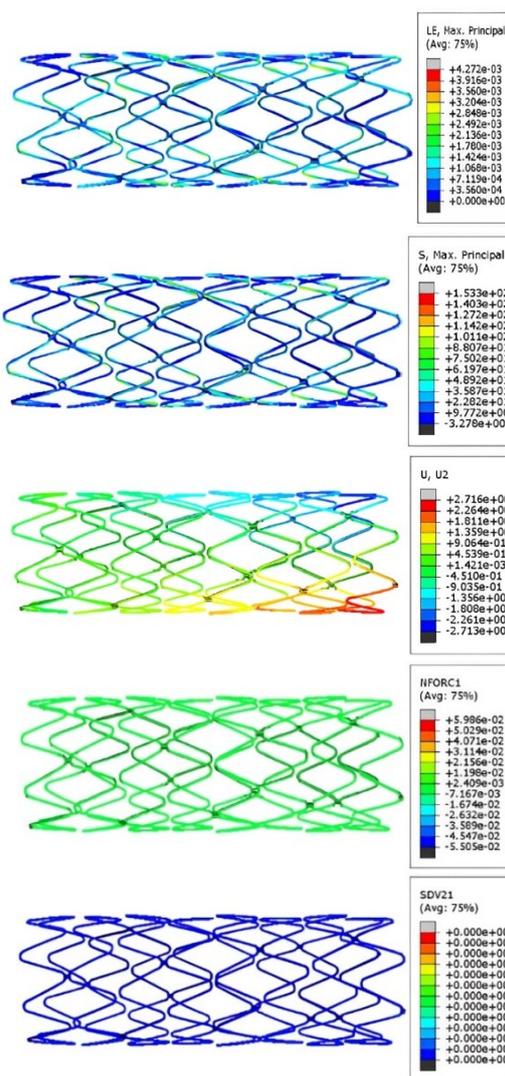


شکل ۹ - منحنی تنش\_کرنش به‌دست آمده در کشش استنت‌های Smart flex، Tigris و Viabahn در عروق فمورال بر اساس خواص ماده (جدول ۲)

نتایج تنش\_کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی استنت‌های Smart Flex، Tigris و Viabahn، بیانگر تفاوت‌های کلیدی در رفتار مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری پیچشی در شریان فموروپالیتال است.

در مقایسه تنش\_کرنش سه استنت هوشمند، استنت Smart Flex بالاترین مقدار کرنش (0/05889) و تنش (529/4 Pa) را نشان می‌دهد که با در نظر داشتن رفتار غیرخطی این استنت به دلیل وجود فاز مارتنزیت، نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری و تغییر

است. این آزمایش عملکرد یک استنت را برای جایگذاری در رگ فموروپالیتال مشخص می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده، بر اساس شاخص‌های ارزیابی استفاده‌شده برای تعیین استنت ایده‌آل، شامل تنش (155/5Pa)، کرنش (0/003988)، نیرو (0/08621N)، جابه‌جایی (0/2602m) و کسر حجمی مارتنزیت تشکیل‌شده در استنت Vabahn با مقدار (0) برای این مدل استنت است.



شکل ۸ - کانتورهای ماکزیمم تنش\_کرنش، نیرو-جابه‌جایی و کرنش\_مارتنزیت به‌دست آمده در پیچش انجام شده روی نمونه‌های استنت Tigris (شکل ۱\_پ) و برای خواص ماده (جدول ۲)

در مقایسه نیروی-جابجایی سه مدل استنت، استنت Smart Flex با بیشترین جابجایی (0/04943 m) و کمترین نیروی وارد شده (0/02669 N) نشان می‌دهد. این رفتار ناشی از خاصیت ابرکشسانی آن است که اجازه می‌دهد تحت نیروهای خارجی، تغییر شکل زیادی بدون نیاز به اعمال نیروی زیاد داشته باشد. در مقابل، استنت Tigris با نیروی بیشتری نسبت به Viabahn تغییر شکل می‌یابد که نشان‌دهنده سختی محوری بالاتر آن است (شکل ۱۰).

استنت Smart Flex با انعطاف‌پذیری بالا، امکان تحمل تغییر شکل‌های بزرگ را با نیروی کم فراهم می‌کند که آن را برای شرایط نیازمند انطباق‌پذیری بالا مناسب می‌سازد، هرچند ممکن است از نظر استحکام شعاعی محدودیت‌هایی داشته باشد. در مقابل، استنت Tigris با سختی محوری بالاتر و مقاومت مکانیکی بیشتر نسبت به Viabahn، برای حفظ باز بودن شریان در شرایط تنش بالا مناسب‌تر است. استنت Viabahn تعادلی بین انعطاف‌پذیری و استحکام ارائه می‌دهد، اما انعطاف‌پذیری کمتر آن ممکن است در برابر حرکت‌های شدید شریان محدودیت‌هایی ایجاد کند. این ویژگی‌ها انتخاب استنت را برای شرایط بالینی خاص، مانند شدت انسداد یا میزان تحرک شریان، هدایت می‌کنند.

### بررسی و مقایسه کرنش-مارتنزیت در بارگذاری پیچشی:

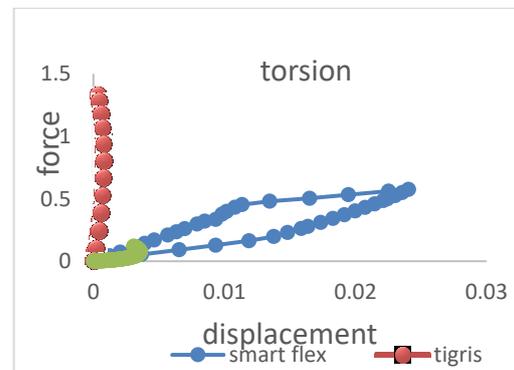
رفتار ابرکشسان آلیاژ نیتینول که حاصل تغییر فاز برگشت‌پذیر بین آستنیت و مارتنزیت تحت بارگذاری مکانیکی است، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد استنت‌های به‌کاررفته در عروق فمورال دارد. این تغییر فاز در دماهای بالاتر از Af و در پاسخ به تنش‌های موضعی، باعث ایجاد کرنش‌های ابرکشسان قابل‌بازیافت می‌شود؛ عاملی که به استنت اجازه می‌دهد تا بدون تغییر شکل دائمی، با انحنای متناوب و گشتاورهای پیچشی ناشی از حرکت‌های اندام تحتانی تطبیق یابد.

در شرایط بارگذاری پیچشی، استنت‌ها نه‌تنها با تغییر شکل‌های چندمحوره روبه‌رو هستند، بلکه باید به‌طور مداوم تغییر فاز تنشی را تجربه کنند تا از تمرکز تنش و آسیب در بافت عروقی جلوگیری شود. اهمیت این پدیده در شبیه‌سازی‌های عددی نیز بسیار بالاست؛ چرا که در مدل‌سازی

شکل بالا بدون شکست و ایجاد ترک است و نشان‌دهنده عملکرد بهینه آن در شرایط مختلف است. استنت Viabahn و Tigris به ترتیب کرنش و تنش کمتری دارند که نشان‌دهنده سفت‌تر بودن آن‌ها و مناسب بودن در شرایطی با نیاز به انعطاف‌پذیری کمتر است؛ بنابراین، Smart Flex به دلیل ویژگی‌های ابرکشسانی، بهترین گزینه برای شرایط پیچیده پزشکی است (شکل ۹).

استنت SmartFlex با تنش و کرنش بالاتر، انعطاف‌پذیری بیشتری از خود نشان می‌دهد که برای تحمل تغییر شکل‌های قابل‌توجه در محیط دینامیکی شریان که تحت حرکت‌های مکرر پیچش قرار دارد، بسیار مناسب است. این ویژگی خطر شکست ساختاری یا آسیب به دیواره شریان را کاهش می‌دهد. در مقابل، استنت‌های Viabahn و Tigris با مقادیر تنش و کرنش پایین‌تر، سفتی ساختاری بیشتری ارائه می‌دهند که پایداری بهتری در برابر بارهای پیچشی فراهم می‌کند، اما ممکن است در پاسخ به حرکت‌های شدید شریان محدودیت داشته باشند.

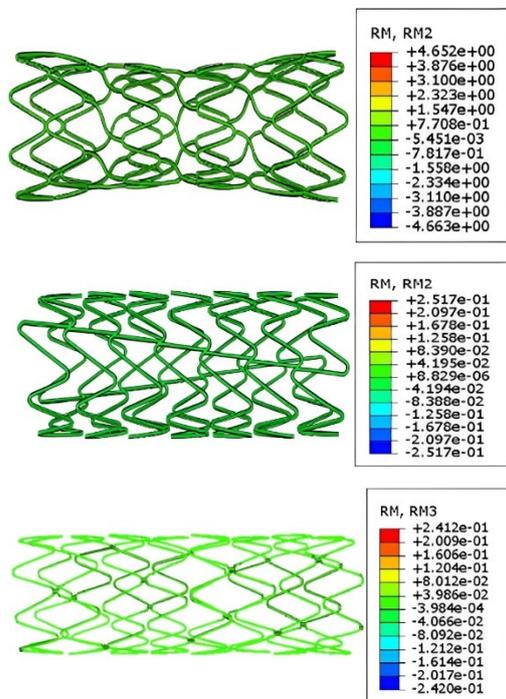
### بررسی و مقایسه نیرو-جابجایی در بارگذاری پیچشی:



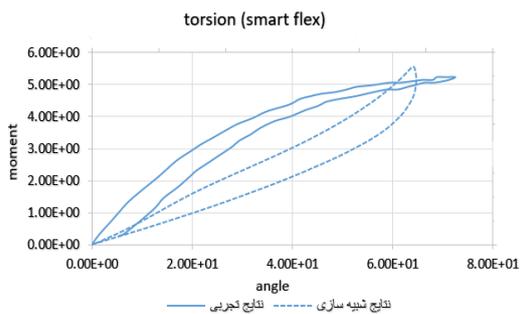
شکل ۱۰- نیرو-جابجایی بدست آمده در کشش استنت‌های Smart flex، Viabahn و Tigris در عروق فمورال بر اساس خواص ماده (جدول ۲)

رفتار نیرو-جابجایی استنت‌های Smart Flex، Viabahn و Tigris تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر عملکرد آن‌ها در شریان فموروپاپلیتال دارد که تحت بارهای دینامیکی پیچیده ناشی از حرکات بدن قرار می‌گیرد.

بررسی و مقایسه گشتاور پیچشی و زاویه پیچشی در بارگذاری پیچشی:

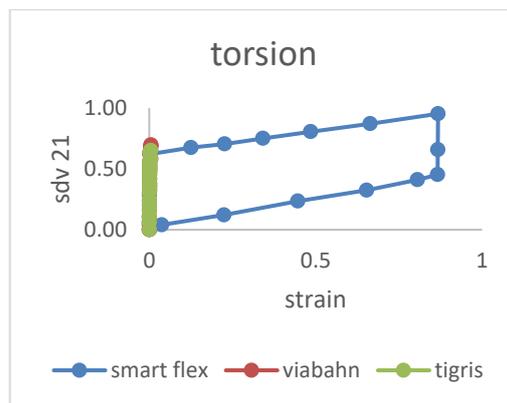


شکل ۱۲- کانتورهای (گشتاور پیچشی و زاویه پیچشی) نتایج شبیه‌سازی بدست آمده با نتایج تجربی انجام شده در تست پیچش برای سه مدل استنت، در خواص ماده (جدول ۲)



شکل ۱۳\_الف- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی (گشتاور پیچشی و زاویه پیچشی) در بارگذاری انجام شده روی مدل Smart flex در شکل (۸) و برای خواص ماده (جدول ۲)

دقیق رفتار مکانیکی استنت‌ها با روش المان محدود (FEM)، لحاظ کردن خواص ترمومکانیکی وابسته به تغییر فاز آستنیت-مارتنزیت و مدل‌سازی هیستریزس حاصل، برای پیش‌بینی صحیح توزیع تنش، کرنش و گشتاور ضروری است. از این رو نتایج حاصل از بارگذاری پیچشی در این موضوع در تعیین رفتار استنت‌های به کار رفته در عروق فمورال دارای نقشی کلیدی هستند.



شکل ۱۱- منحنی کسر حجمی کرنش\_مارتنزیت بدست آمده در کشش استنت های Smart flex، Viabahn و Tigris در عروق فمورال بر اساس خواص ماده (جدول ۲)

این نتایج (شکل ۱۱) بر اساس مقایسه سه نوع استنت هوشمند نیتینولی (Smart Flex، Viabahn و Tigris) نشان می‌دهد که استنت Smart Flex به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود مانند بالاترین مقدار کرنش، کمترین تنش، بیشترین جابجایی، تشکیل مارتنزیت و حلقه هیستریزس بزرگ‌تر، بهترین عملکرد را در شرایط پیچشی و ابرکشسانی از خود نشان داده است. این ویژگی‌ها، به ویژه تشکیل فاز مارتنزیت در Smart Flex، آن را به گزینه‌ای بسیار مناسب برای کاربرد در شرایط پیچیده پزشکی، به‌ویژه در عروق فمورال، تبدیل می‌کند. در مقابل استنت‌های Viabahn و Tigris، فاقد مارتنزیت هستند و انعطاف‌پذیری کمتری در برابر تغییرات پیچشی دارند. به‌طور کلی نتایج این مطالعه تأکید می‌کنند که استنت‌های نیتینولی با خاصیت ابرکشسانی و حافظه‌دار خود، عملکرد برتری در برابر استنت‌های معمولی دارند و می‌توانند به عنوان انتخابی مؤثر در درمان‌های پزشکی پیچیده استفاده شوند.

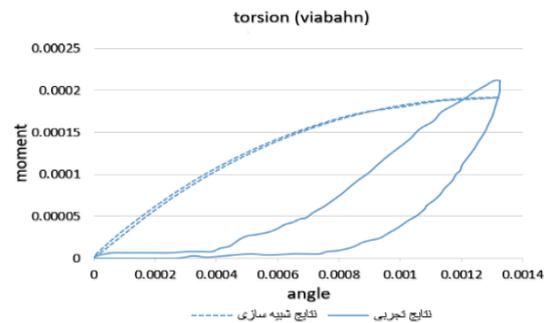
که این مدل‌ها در برابر پیچش کمتر مقاوم هستند و قادر به تحمل تغییرات پیچشی کمتری می‌باشند.

استنت Smart Flex با توانایی تحمل گشتاور و زاویه‌ی پیچشی بالا، انعطاف‌پذیری پیچشی ممتازی را ارائه می‌دهد که برای شریان‌هایی با حرکت‌های دینامیکی شدید مناسب است. در مقابل، استنت‌های Viabahn و Tigris با گشتاور و زاویه‌ی پیچشی پایین‌تر، رفتار مقاوم‌تری در برابر تغییر شکل‌های پیچشی از خود نشان می‌دهند که می‌تواند برای حفظ ساختار شریان در شرایط تنش بالا سودمند باشد. تفاوت‌های مشاهده‌شده در رفتار گشتاور پیچشی و زاویه‌ی پیچشی این استنت‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب استنت مناسب برای کاربردهای بالینی در شریان فموروپاپلیتال دارد. انعطاف‌پذیری پیچشی بالای Smart Flex آن را برای بیماری‌های Viabahn با تحرک شریانی بالا مناسب می‌سازد، در حالی که Tigris و Viabahn با مقاومت پیچشی کمتر، برای شرایطی که نیاز به استحکام مکانیکی و پایداری ساختاری بیشتری است، گزینه‌های بهتری هستند. این ویژگی‌ها بر انتخاب استنت بر اساس نیازهای خاص بیمار، مانند شدت انسداد شریان یا میزان حرکت‌های دینامیکی، تأثیر مستقیم دارند و بر کارایی و طول عمر استنت در محیط‌های بالینی اثر می‌گذارند.

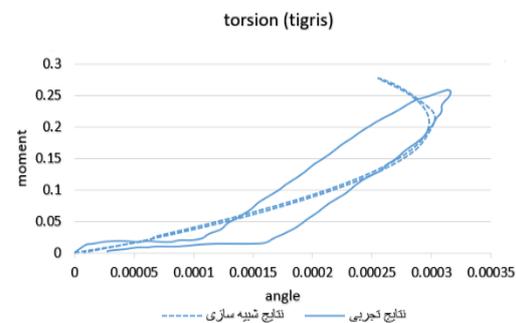
### مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی

در نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌های مقایسه‌ای بین استنت‌های Smart Flex، Viabahn و Tigris، به طور کلی استنت Flex Smart به دلیل ویژگی‌های ابرکشسانی و انعطاف‌پذیری بیشتری که دارد، در بیشتر شرایط پیچیده پزشکی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها، به ویژه توانایی تغییر شکل بیشتر تحت بارهای پیچشی، آن را برای کاربردهایی که نیاز به انعطاف‌پذیری بالا دارند، مناسب‌تر می‌کند [۱۸].

با این حال، در برخی از آزمون‌ها، Viabahn و Tigris ممکن است در آزمایش‌های خاصی مانند تنش-کرنش و نیرو-جابجایی عملکرد بهتری نسبت به Flex Smart از خود نشان دهند. استنت‌های Viabahn و Tigris به دلیل ویژگی‌های خاص خود، ممکن است برای کاربردهایی که نیاز به استحکام بیشتر و تغییر شکل کمتر دارند، مناسب‌تر باشند.



شکل ۱۳-ب- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی (گشتاور پیچشی و زاویه‌ی پیچشی) در بارگذاری پیچشی انجام شده روی مدل Viabahn در شکل (۸) و برای خواص ماده (جدول ۲)



شکل ۱۳-پ- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی (گشتاور پیچشی و زاویه‌ی پیچشی) در بارگذاری انجام شده روی مدل Tigris در شکل (۸) و برای خواص ماده (جدول ۲)

بررسی عددی رفتار گشتاور پیچشی و زاویه‌ی پیچشی استنت‌های Smart Flex، Viabahn و Tigris نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی در عملکرد آن‌ها تحت بارهای پیچشی در شریان فموروپاپلیتال است.

در مقایسه گشتاور پیچشی و زاویه‌ی پیچشی سه استنت هوشمند (شکل ۱۳)، استنت Smart Flex بالاترین مقدار گشتاور پیچشی (4/652 N.m) و بیشترین زاویه‌ی پیچشی (8/001rad/m) را در مقایسه با دو مدل دیگر نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها به دلیل خاصیت ابرکشسانی نیتینول در Smart Flex است که به آن امکان می‌دهد تا تغییرات پیچشی زیادی را تحمل کند. در حالی که استنت‌های Viabahn و Tigris گشتاور پیچشی و زاویه‌ی پیچشی کمتری دارند، به این معنی

برای استفاده در شرایط پیچیده پزشکی و در عروق فمورال بسیار مفید است [۱۸].

از طرف دیگر، استنت‌های Viabahn و Tigris در مقایسه با Smart Flex کمتر انعطاف‌پذیر هستند. این دو استنت در آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی کرنش و تنش کمتری داشتند، که نشان می‌دهد سفتی بیشتری دارند و در مقابل تغییرات پیچشی انعطاف کمتری از خود نشان می‌دهند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که این استنت‌ها برای شرایطی که به استحکام بیشتری نیاز دارند، مناسب‌تر باشند؛ همچنین، این استنت‌ها فاقد ویژگی ایجاد فاز مارتنزیت هستند و قادر به تحمل تغییرات پیچشی کمتری هستند [۱۸].

در نهایت، در مقایسه گشتاور پیچشی و زاویه پیچشی، Smart Flex باز هم بهترین عملکرد را نشان داد. این استنت بیشترین گشتاور پیچشی و بزرگترین زاویه پیچشی را داشت، که به خوبی نشان‌دهنده توانایی بالای آن در تحمل تغییرات پیچشی است [۱۸].

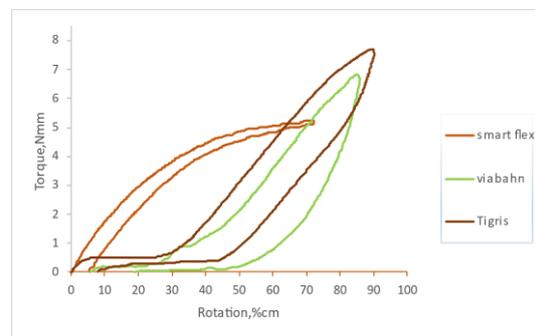
در مجموع، می‌توان گفت که استنت Smart Flex به دلیل انعطاف‌پذیری و ویژگی‌های ابرکشسانی خود، بهترین گزینه برای شرایط پیچیده پزشکی است که نیاز به تغییر شکل زیاد دارند. در حالی که استنت‌های Viabahn و Tigris برای شرایطی که به استحکام و مقاومت بیشتر نیاز دارند، انتخاب‌های بهتری خواهند بود.

### بررسی تفاوت نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی

اختلاف اصلی میان نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی به چند عامل کلیدی بازمی‌گردد، از جمله ساده‌سازی بیش از حد مدل عددی، استفاده از شرایط مرزی ایده‌آل شده و غیرواقعی، نادیده گرفتن اثرات خستگی و بارگذاری چرخه‌ای، به‌کارگیری هندسه ایده‌آل شده استنت‌ها، مدل ماده ناقص یا پارامترهای تخمینی، و عدم شبیه‌سازی دقیق شرایط محیطی فیزیولوژیکی. این اختلاف‌ها نباید به عنوان ضعف ذاتی مدل تلقی شود، بلکه ناشی از فرض‌های ساده‌سازی شده‌ای است که برای کاهش هزینه‌های محاسباتی یا محدودیت‌های نرم‌افزاری در مدل‌سازی عددی به کار رفته‌اند.

با وجود اختلاف قابل توجهی که در برخی موارد، مانند استنت Viabahn با اختلاف % 57/71 بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی مشاهده می‌شود، روند صحت‌سنجی انجام‌شده

در نهایت، انتخاب بین این استنت‌ها بستگی به شرایط خاص بالینی و نیازهای هر بیمار دارد. به طور کلی، Flex Smart به دلیل توانایی تحمل تغییرات پیچشی زیاد و انعطاف‌پذیری بالای خود، برای شرایط پیچیده پزشکی و مناطقی که نیاز به انعطاف‌پذیری و تغییر شکل بیشتری دارند، گزینه بهتری به نظر می‌آید. در حالی که Viabahn و Tigris نیز در شرایط خاص می‌توانند عملکرد بهتری داشته باشند؛ بنابراین، برای انتخاب مناسب‌ترین استنت باید به ویژگی‌ها و نیازهای خاص هر وضعیت بالینی توجه شود [۱۸].



شکل ۱۴- نتایج تجربی گشتاور پیچشی حاصل از بارگذاری پیچشی بر سه مدل استنت Tigris, Viabahn, Smart Flex [18]

در ارزیابی نتایج شبیه‌سازی و تحلیل‌های مقایسه‌ای بین استنت‌های Tigris، Smart Flex و Viabahn در بارگذاری پیچشی، استنت Tigris با اختلافی معادل 23/22 درصد بالاترین تطابق را با نتایج تجربی نشان داده است. این امر به‌ویژه حاکی از دقت بالاتر مدل شبیه‌سازی در پیش‌بینی رفتار پیچشی این استنت است. در مقابل، استنت‌های Smart Flex و Viabahn به ترتیب با اختلاف‌هایی معادل 34/78 و 57/71 درصد، تطابق کمتری با داده‌های تجربی داشته‌اند.

استنت Smart Flex با ویژگی‌های ابرکشسانی خود، عملکرد بسیار خوبی در برابر تغییرات پیچشی نشان داد. نتایج تجربی و شبیه‌سازی هر دو تأکید دارند که این استنت بالاترین مقدار کرنش و کمترین تنش را دارد که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالای آن است. این ویژگی‌ها به Smart Flex اجازه می‌دهند که تحت فشارهای پیچشی زیاد تغییر شکل زیادی پیدا کند، بدون اینکه نیروی زیادی وارد کند. علاوه بر این، Smart Flex قادر به ایجاد فاز مارتنزیت در شرایط پیچشی است که به‌ویژه

است که با هدف بررسی اثر جریان خون بر فشار تماس و تنش‌های دیواره رگ صورت گرفته است [۱۹]. در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل خستگی سه نوع استنت تحت بارگذاری‌های فشاری، پیچشی و ترکیبی انجام شده و برای ارزیابی عمر خستگی، از نمودار گودمن استفاده شده است [۲۰]؛ همچنین تأثیر هندسه استنت بر پاسخ مکانیکی رگ تحت پیچش، در مقایسه‌ای میان دو طراحی Navalis و Zilver بررسی شده است [۲۱]. در نهایت، مدلی عددی برای تحلیل برهم‌کنش استنت و دیواره رگ فمورال با حضور پلاک توسعه یافته که شامل تحلیل غیرخطی فشار تماس، گشتاور و اثر سختی پلاک است [۲۲].

### تحلیل مقایسه‌ای با مطالعات پیشین

به‌منظور ارزیابی صحت و نوآوری نتایج این پژوهش، مقایسه‌ای بین یافته‌های عددی حاضر و مطالعات مشابه در زمینه تحلیل استنت‌های نایتینولی تحت بارگذاری پیچشی صورت گرفته است.

مطالعه کیم و همکاران با بررسی استنت‌های مختلف تحت بارگذاری‌های محوری، خمشی و پیچشی، نشان داد که پیچش می‌تواند سهم قابل توجهی در افزایش تنش‌های موضعی ایفا کند. یافته‌های این مطالعه نیز با تأکید بر اهمیت طراحی هندسی استنت در برابر پیچش، نتایج آن را تأیید می‌نماید؛ به‌گونه‌ای که استنت Tigris با ساختار هندسی شبکه‌ای توانسته است توزیع تنش یکنواخت‌تر و کرنش برگشت‌پذیر بیشتری نشان دهد [۲۳].

مدل‌سازی ترمومکانیکی ماده نایتینول در این مطالعه، مبتنی بر مدل Auricchio بوده است؛ مشابه پژوهش آریکیو و همکاران که نشان دادند این مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رفتارهای حافظه‌دار نایتینول به‌ویژه در حضور بارگذاری ترکیبی دارد. در پژوهش حاضر، پیاده‌سازی این مدل از طریق UMAT منجر به پیش‌بینی مناسب توزیع کسر حجمی مارتنزیت و رفتار برگشت‌پذیر ماده گردیده است [۲۴].

مطالعه رهی و همکاران با تمرکز بر تحلیل عددی شکست استنت‌ها در شریان‌های فموروپاپلیتال، به اهمیت نوع المان و اندازه مش در افزایش دقت شبیه‌سازی اشاره داشته است. استفاده از المان‌های C3D8I در این پژوهش نیز، در راستای

در این پژوهش همچنان از اعتبار علمی مناسبی برخوردار است؛ به شرط آنکه هدف شبیه‌سازی به درستی تبیین شود. صحت‌سنجی در این مطالعه با مقایسه مستقیم پارامترهای مکانیکی مانند گشتاور پیچشی، کرنش، جابه‌جایی و کسر حجمی مارتنزیت بین خروجی مدل عددی و داده‌های تجربی واقعی صورت گرفته است. میزان اختلاف نسبی یا درصد خطا برای استنت Tigris حدود 23/22% و برای Flex Smart حدود 34/78% گزارش شده است. در ادبیات مهندسی، گرچه خطاهای کمتر از 10-15% به عنوان معیار صحت‌سنجی بسیار خوب در نظر گرفته می‌شوند، اما در حوزه بیومکانیک و طراحی تجهیزات پزشکی، خطاهای تا حدود 30% با وجود ساده‌سازی‌های شناخته‌شده قابل قبول هستند. همچنین، یک المان ساده نیتینول به عنوان آزمون اولیه برای اعتبارسنجی مدل ماده (آریشیو) به کار رفته (شکل 4) که پایه‌ای قابل قبول برای استفاده از مدل در استنت‌ها فراهم می‌آورد؛ بنابراین، هرچند صحت‌سنجی ایده‌آل نیست، اما با توجه به نوع بارگذاری و پیچیدگی رفتار فیزیکی استنت‌ها، در سطح مهندسی قابل قبول و علمی به شمار می‌آید. این میزان خطا در مطالعه‌های مشابه نیز گزارش شده است و دامنه خطاهای 20 تا 40 درصد در مدل‌سازی‌های بیومکانیکی استنت‌ها به طور معمول دیده می‌شود و با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

### محدودیت‌ها

با وجود تلاش‌های صورت‌گرفته برای توسعه یک مدل عددی دقیق به منظور پیش‌بینی رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها مواجه است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به عدم لحاظ تماس با بافت زیستی، استفاده از هندسه ایده‌آل، صرف‌نظر از شرایط بارگذاری چرخه‌ای و وابسته به زمان، و بهره‌گیری از داده‌های استاندارد برای ویژگی‌های ماده اشاره کرد. چنین عواملی می‌توانند دقت نتایج شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار داده و موجب کاهش تطابق آن‌ها با داده‌های تجربی شوند؛ بنابراین لازم است این موارد در مطالعه‌های آتی مورد بازنگری و بهبود قرار گیرند.

در راستای توسعه شبیه‌سازی‌های مکانیکی استنت‌های نیتینولی، مطالعه‌های متعددی در سال‌های اخیر انجام شده است. یکی از این پژوهش‌ها شامل تحلیل برهم‌کنش سیال-سخت (FSI) در فرآیند فشرده‌سازی و گسترش استنت بوده

همان توصیه‌ها بوده و به دقت بالای نتایج در نواحی بحرانی کمک کرده است [۲۵].

همچنین لالی و همکاران با تحلیل هندسه‌های مختلف استنت، گزارش کردند که بارگذاری پیچشی به مراتب نقش مهم‌تری در کاهش عمر خستگی نسبت به بارگذاری خمشی دارد. این موضوع نیز با مشاهده نتایج کرنش‌های پلاستیک بالا در استنت Viabahn در این تحقیق هم‌راستا است [۲۶].

در جدول ۴، مقایسه‌ای اجمالی بین این مطالعه و پژوهش‌های کلیدی پیشین ارائه شده است:

جدول ۴- مقایسه بین مطالعه حاضر و مطالعات پیشین

مقاله	Kim et al.	Auricchio et al.	Rhee et al.	Lally et al.
ویژگی	حاضر	محدود	ضمنی	بله
تحلیل پیچش	بله	بله	×	×
نایتینول UMAT	×	بله	×	×
تمرکز برهندسه	بالا	بالا	متوسط	بالا
تحلیل FPA واقع	بله	×	×	متوسط
ی تطابق تجربی	محدود	×	بله	محدود

### نتیجه‌گیری

بررسی عددی رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی Smart Flex، Viabahn و Tigris تحت بارگذاری‌های پیچشی و نیروی-جابجایی اهمیت ویژه‌ای در انتخاب استنت مناسب برای شریان فموروپالپیتال دارد، چرا که این شریان در معرض حرکت‌های دینامیکی پیچیده بدن و تنش‌های چندگانه قرار می‌گیرد. استنت Smart Flex با انعطاف‌پذیری پیچشی بالا، گشتاور قابل توجه و قابلیت تحمل تغییر شکل‌های بزرگ با نیروی کم، ناشی از تشکیل فاز مارتنزیت و خواص ابرکشسانی آلیاژ نیتینول، برای کاربردهای بالینی با حرکت‌های شریانی شدید مناسب است. این استنت در مقایسه با دو مدل دیگر عملکرد برتری در شاخصه‌های مختلف از جمله کرنش (0/05889)، جابجایی (0/04943 m)، تنش (528/4Pa) ، نیروی کم (266/9 N) و کسر حجمی مارتنزیت (0/8001) از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این استنت Smart Flex با بیشترین مقدار پیچش و گشتاور پیچشی (4/652 N.m) در مقایسه با

Viabahn و Tigris دارد و به دلیل تشکیل مارتنزیت، ویژگی‌های ابرکشسانی و حافظه‌دار آن برجسته می‌شود. این ویژگی‌ها سبب می‌شود که Smart Flex به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای پزشکی پیچیده، به‌ویژه در عروق فمورال، تبدیل شود. در مقابل، استنت‌های Viabahn و Tigris با مقاومت مکانیکی بالاتر و جابه‌جایی بیشتر، گزینه بهتری برای شرایطی هستند که نیاز به استحکام ساختاری و پایداری در برابر تنش‌های بالا دارند، هرچند انعطاف‌پذیری پیچشی کمتری ارائه می‌دهند. این تفاوت‌ها، که از طریق شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با مدل‌های آریشیو و گیسس تحلیل شده‌اند، تأثیر مستقیمی بر انتخاب استنت متناسب با نیازهای بالینی مختلف دارند.

نتایج تحلیل اجزای محدود، به‌ویژه برای مدل Smart Flex، نشان‌دهنده رفتار سازگار با ویژگی‌های فیزیکی مواد ابرکشسان است. کرنش 0/05889 در محدوده نرمال آلیاژ نیتینول قرار داشته و توانایی تغییر شکل بدون شکست را نشان می‌دهد. کسر حجمی فاز مارتنزیت 0/8001 به درستی تحول فازی را بازتاب می‌دهد و گشتاور پیچشی 4/652 N.m بیانگر انعطاف‌پذیری استنت است. با این حال، تنش گزارش شده 528/4 Pa غیرمعمول پایین است که احتمالاً ناشی از مشکل‌های مقیاس‌بندی یا ساده‌سازی مدل ماده است. همچنین جابه‌جایی 0/04943 m نسبت به طول استنت‌ها زیاد بوده و نیازمند تطبیق با هندسه واقعی است. با وجود این موارد، سطح اطمینان کلی نتایج در حد متوسط تا بالا است و با توجه به نوع بارگذاری و پیچیدگی رفتار استنت‌ها، قابل قبول محسوب می‌شود. برای افزایش دقت، استفاده از داده‌های تجربی دقیق‌تر و بهینه‌سازی شرایط مرزی توصیه می‌شود.

نتایج این مطالعه بر اهمیت شبیه‌سازی‌های عددی دقیق و تحلیل‌های جامع در ارتقاء فهم رفتار مکانیکی استنت‌های نیتینولی تأکید می‌کند. این رویکردها نه تنها ابزاری ارزشمند در انتخاب و طراحی استنت‌های با کارایی بهینه برای شرایط بالینی پیچیده به شمار می‌آیند، بلکه زمینه‌ساز پیشرفت‌های چشمگیر در بهبود اثربخشی درمان‌های عروقی و کاهش احتمال بروز عوارض مکانیکی می‌باشند؛ لذا، ادامه مطالعه‌ها با تمرکز بر مدل‌سازی‌های پیشرفته و داده‌های تجربی دقیق، نقشی کلیدی در تضمین ایمنی و دوام استنت‌ها در کاربردهای پزشکی خواهد داشت.

- [9] Wang, R., Ravi-Chandar, K., 2004. "Mechanical response of a metallic aortic stent – Part I: Pressure diameter relationship". *J Appl Mech*, 71, pp. 697–705.
- [10] Wang, R., Ravi-Chandar, K., 2004. "Mechanical response of a metallic aortic stent – Part II: A beam on elastic foundation model". *J Appl Mech*, 71, pp. 706–712.
- [11] Canic, S., Ravi-Chandar, K. 2005. "Mathematical model analysis of Wallstent and AneuRx – dynamic responses of bare-metal endoprosthesis compared with those of stent-graft". *Tex Heart I J*, 32 (4), pp. 502–506.
- [12] Liu, Y., Wang, Z., & Chen, X. (2018). Analytical model for evaluating the mechanical behavior of nitinol stents and comparison with hemodynamic forces. *Journal of Biomechanics*, 72, 112-119.
- [13] Nuutinen, J., Clerc, C., 2003. "Theoretical and experimental evaluation of the radial force of self-expanding braided bioabsorbable stents". *J Biomater Sci Polym Ed*, 14 (7), pp. 677–687.
- [14] Stoeckel, D., Pelton, A., 2004. "Self-expanding Nitinol stents: material and design considerations". *Eur. Radio*, 14, pp. 292–301.
- [15] Gong, X., Duerig, T., 2003. "Finite element analysis and experimental evaluation of superelastic Nitinol stents". In *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technology Conference – SMST*. pp. 417–423
- [16] Nematzadeh, F., Sadrnezhad, S., 2012. "Effects of Material Properties on Mechanical Performance of Nitinol Stent Designed for Femoral Artery: Finite Element Analysis". *Sci. Ir*, 19(6), pp. 1564–1571.
- [17] Kleinstreuer, C., Li, Z., 2008. "Computational mechanics of Nitinol stent grafts". *J. Biomech*, 41, pp. 2370–2378.
- [18] Maleckis, K., Deegan, P., Poulson, W., Sievers, C., Desyatova, A., MacTaggart, J., & Kamenskiy, A. (2017). Comparison of femoropopliteal artery stents under axial and radial compression, axial tension, bending, and torsion deformations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 75, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.07.011>
- [19] Zhang, X., Li, Y., 2019. "Computational analysis of Nitinol stent-graft for EVAR". *Biomed Eng Online*, 18, pp. 1–12.
- [20] Kim, J., Park, S., 2024. "Fatigue analysis of canine tracheal stents under multiaxial loading". *J Mech Behav Biomed Mater*, 155, pp. 105–115.
- [21] Moradi, H., Tavakoli, M., 2021. "Determination effect of two NiTi stents on mechanical response of artery under torsion". *Mater Today Proc*, 45, pp. 3221–3227.

در ادامه، چند پیشنهاد مشخص و هدفمند برای پژوهش‌های آینده و بهبود مدل‌سازی در زمینه تحلیل استنت‌های نایتینولی تحت بارگذاری پیچشی ارائه شده است. پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده:

۱. مدل‌سازی اندرکنش با دیواره عروق واقعی
۲. بررسی اثر بارگذاری چندمحوره (ترکیبی)
۳. تحلیل خستگی و عمر عملکردی استنت‌ها
۴. اعتبارسنجی تجربی نتایج عددی
۵. استفاده از مدل‌های مواد وابسته به دما و نرخ کرنش
۶. شبیه‌سازی تماس دیواره استنت با رگ

### منابع

- [۱] بررسی رفتار مکانیکی استنت‌های هوشمند جهت استفاده در عروق بیست و ششمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۴ تا ۶ اردیبهشت ۱۳۹۷ ISME2018
- [2] Nematzadeh, F., & Farahani, M. (2021). Computational evaluation of the effect of geometric parameters on the mechanical performance of shape memory alloy stents for use in the breathing systems. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 8(7), 52-65. [in Persian]. Retrieved from [www.smeir.org](http://www.smeir.org)
- [3] Feng, Z., Zhang, L., & Liu, Q. (2019). Numerical simulation of mechanical performance of nitinol stents under various loading conditions, especially cyclic loading. *Journal of Biomechanics*, 94, 134-143.
- [4] Tian, Z., Liu, Y., & Zhang, J. (2020). Finite element analysis of the mechanical behavior of nitinol stents under various loading conditions. *Materials Science and Engineering: C*, 112, 110854.
- [5] Limb flexion-induced twist and associated intramural stresses in the human femoropopliteal artery, Received: 15 January 2017 Accepted: 24 February 2017 Associate Editor Estefani'a Pen' a oversaw the review of this article. *Journal of the Royal Society Interface*.
- [6] Morgan, R., Adam, A., 2001. "Use of metallic stents and balloons in the esophagus and gastrointestinal tract". *J J Vasc Interv Radiol*, 12 (3), pp. 283–297.
- [7] Resnick, S., Rome, V., 2006. "Use of a partially deployed wallstent to act as an inferior vena cava filtration device during coil embolization of a high-flow arteriovenous fistula". *J Vasc Interv Radiol*, 17 (2), pp. 369–372.
- [8] Wang, H., Liu, Z., & Zhang, Q. (2019). Development of a numerical model for mechanical behavior analysis of braided nitinol stents. *Journal of Biomechanics*, 89, 92-101.

علائم و اختصارات

نماد	تشریح نماد	واحد
$E_A$	مدول الاستیسیته آستنیت	MPa
$v_A$	ضریب پواسون آستنیت	-
$E_M$	مدول الاستیسیته مارتنزیت	MPa
$v_M$	ضریب پواسون مارتنزیت	-
$\varepsilon^L$	کرنش تغییرحالت	-
$(\delta\sigma/\delta T)_L$	تغییرات تنش به دما در حال بارگذاری	MPa T <sup>-1</sup>
$\sigma_L^S$	شروع تنش تغییرحالت بارگذاری	MPa
$\sigma_L^E$	پایان تنش تغییرحالت بارگذاری	MPa
$(\delta\sigma/\delta T)_U$	تغییرات تنش به دما در حال باربرداری	MPa T <sup>-1</sup>
$\sigma_U^S$	شروع تنش تغییرحالت باربرداری	MPa
$\sigma_U^E$	پایان تنش تغییرحالت باربرداری	MPa
$\sigma_{CL}^S$	شروع تنش فشاری تغییرحالت باربرداری	MPa
$\varepsilon_V^L$	کرنش حجمی تغییرحالت	-
$\varepsilon_{max}$	کرنش ماکزیمم	-
$A_f$	دمای پایان آستنیتی	K
$T_0$	دمای مرجع	K

- [22] Liu, D., Huang, W., (2023). "Nitinol stents: Interaction with vessel wall in presence of plaque – A nonlinear finite element approach". *Comput Biol Med*, 165, pp. 107–117.
- [23] Kim et al. (2010): Kim, J. H., Choi, H., & Park, J. B. (2010). Finite element analysis of self-expanding nitinol stents under different loading conditions. *Journal of Biomechanical Engineering*, 132(10), 101012. <https://doi.org/10.1115/1.4002153>
- [24] Auricchio et al. (2011): Auricchio, F., Conti, M., De Beule, M., De Santis, G., & Verheghe, B. (2011). Carotid artery stenting simulation: From patient-specific images to finite element analysis. *Medical Engineering & Physics*, 33(3), 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.10.010>
- [25] Rhee et al. (2007): Rhee, T. M., Kim, S. M., Baek, J. H., & Kim, D. K. (2007). Numerical prediction of stent failure in superficial femoral arteries. *Journal of Endovascular Therapy*, 14(3), 356–365. <https://doi.org/10.1583/06-2132.1>
- [26] Lally et al. (2005): Lally, C., Dolan, F., & Prendergast, P. J. (2005). Cardiovascular stent design and vessel stresses: a finite element analysis. *Journal of Biomechanics*, 38(8), 1574–1581. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.07.023>