



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: <http://jmss.qut.ac.ir/>



Introducing some medical applications of NiTi shape memory alloys

ARTICLE INFO

Article Type

Review paper

Authors

Milad Badr*

Research Center for Advanced Materials, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Mahdiyeh Soltanalipour

Research Center for Advanced Materials, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

Khalil-Allafi

Research Center for Advanced Materials, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

* Correspondence

Milad_badr@ymail.com
Postal Code: 51335-1996.

Article History

Received: 15 Mar, 2025

Accepted: 27 Apr, 2026

ePublished: 04 May, 2026

ABSTRACT

In recent years, the need for more healthcare, increasing life expectancy, and high demand for surgical instruments and implants have significantly increased the importance of smart biomaterials in the medical industry. NiTi alloys belong to a group of smart materials that have shape memory properties and superelasticity. Hence, these alloys are also known as smart-shape memory alloys. NiTi shape memory alloys have a wide range of medical and dental applications due to their ability to recover their original shape during heating or unloading. In addition, a "stress-shielding effect" occurs when the stiffness mismatch between the bone and the fracture fixation implant is significant. Due to the modulus elasticity closer to the bone, NiTi alloys have emerged as the most successful material in biomedical applications, particularly in orthopedics and dentistry. Compared to other implant materials such as 316L stainless steel, NiTi alloys have better mechanical properties, excellent biocompatibility, and modelling hysteresis. These unique properties of NiTi alloys have led to their replacement in some applications in place of Ti-based alloys, 316L stainless steel, and other alloys and metals used in this field.

Keywords: NiTi alloy; Smart material; Biomaterial; Shape memory.

معرفی برخی از کاربردهای پزشکی آلیاژهای حافظه دار

شکلی NiTi

میلاد بدر*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

مهدیه سلطانی پور

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

جعفر خلیل علافی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

هیستریزیس هستند. همین خواص منحصر به فرد آلیاژهای NiTi به جایگزینی آنها در برخی از کاربردها به جای آلیاژهای پایه Ti، فولاد زنگ نزن L۳۱۶ و سایر آلیاژها و فلزات مورد استفاده در این زمینه منجر شده است.

کلید واژه ها

آلیاژ NiTi، مواد هوشمند، زیست مواد، حافظه داری شکلی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۷

* نویسنده مسئول: Milad_badr@gmail.com

۱ مقدمه

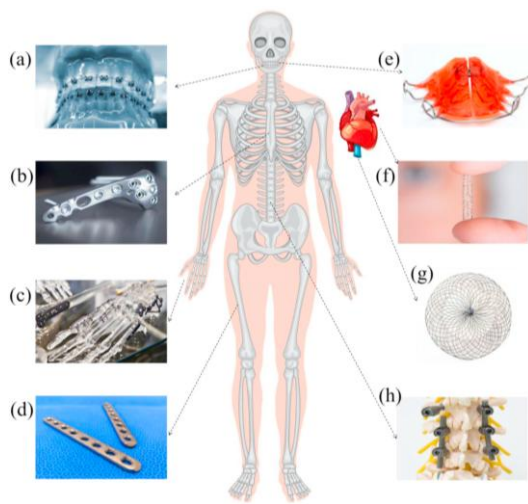
در سال های اخیر، آلیاژهای حافظه دار شکلی (SMA¹) به دلیل اثر حافظه داری شکلی عالی (SME²) و سوپر الاستیسیته به طور گسترده ای در زمینه های هوافضا و زیست پزشکی مورد استفاده قرار گرفته اند [1,2]. آلیاژهای حافظه دار گروهی از مواد هوشمند هستند که می توانند انرژی حرارتی را به کار مکانیکی برای دستیابی به خواص مکانیکی خاصی تبدیل کنند [3]. در میان بسیاری از آلیاژهای حافظه دار مختلف، آلیاژ NiTi به دلیل چگالی پایین و لذا ایجاد ساختارهای سبک تر و مستحکم تر جزو مهمترین و کاربردی ترین آلیاژها در مواد پزشکی و کاشتنی ها بشمار می رود [4,5]. آلیاژهای NiTi (که نایتینول نیز نامیده می شوند) با نسبت اتمی تقریباً مساوی از عناصر نیکل و تیتانیوم است. خاصیت حافظه داری این آلیاژ، اولین بار در سال ۱۹۶۰ میلادی در آزمایشگاه نیروی دریایی آمریکا به طور تصادفی کشف شد [6,7]. در میان انواع آلیاژهای حافظه دار شکلی، آلیاژهای NiTi همواره به عنوان گزینه ای مناسب برای کاربردهای زیست پزشکی شناخته شده اند [8]. این آلیاژها در چند سال اخیر به طور گسترده ای در زمینه های مختلف زیست پزشکی مورد استفاده قرار گرفتند. دلیل

چکیده

در سال های اخیر، نیاز به مراقبت های بهداشتی بیشتر، افزایش امید به زندگی، تقاضای بالای ابزارهای جراحی و کاشتنی ها، به طور قابل توجهی اهمیت زیست مواد هوشمند را در صنعت پزشکی افزایش داده است. آلیاژهای NiTi متعلق به گروهی از مواد هوشمند هستند که خاصیت حافظه داری شکلی و سوپر الاستیسیته را دارند. از این رو، این آلیاژها به عنوان آلیاژهای حافظه دار شکلی هوشمند نیز شناخته می شوند. آلیاژهای حافظه دار شکلی NiTi به دلیل توانایی در بازیابی شکل اولیه خود هنگام گرم شدن و باربرداری، طیف گسترده ای از کاربردهای پزشکی و دندان پزشکی را دارند. علاوه بر این، زمانی که عدم تطابق سفتی بین استخوان و کاشتنی تثبیت شکستگی قابل توجه باشد، "اثر حفاظتی تنش" رخ می دهد. آلیاژهای NiTi با توجه به مدول الاستیسیته نزدیک به استخوان، به عنوان موفق ترین ماده در کاربردهای زیست پزشکی، به ویژه در ارتوپدی و دندان پزشکی ظاهر شده اند. در مقایسه با سایر مواد کاشتنی نظیر فولاد زنگ نزن L۳۱۶، آلیاژهای NiTi دارای خواص مکانیکی بهتر، زیست سازگاری عالی و مدل سازی

² SME: Shape Memory Effect

¹ SMA: Shape Memory Alloy



شکل ۱- کاربردهای پزشکی آلیاژ هوشمند NiTi، (a) سیم و براکت ارتودنسی، (b) کاشتنی قفسه سینه، (c) منگنه‌ها و پیچ‌های سوپراالاستیک ارتوپدی، (d) صفحات استخوانی حافظه‌دار، (e) منبسط‌کننده سقف دهان، (f) استنت قلبی-عروقی، (g) دستگاه انسداد سیتوم دهلیزی و (h) فاصله‌انداز در ستون فقرات [17].

در حالت ایده‌آل، مواد زیستی، باید غیرسمی، غیرحساسیت‌زا و غیرسرطان‌زا باشند. یک ماده زیستی زمانی می‌تواند سمیت خود را نشان دهد که یون‌های سمی را در محلول آزاد کند. مقادیر نیکل بالا در آلیاژهای نایتینول، نگرانی اصلی در زیست‌سازگاری آن‌ها برای کاربردهای پزشکی طولانی مدت است [1,10]. اولین لایه‌ی روئین در سطح آلیاژ NiTi اساساً TiO_2 است. به طور کلی، آزاد شدن یون‌های نیکل توسط این لایه‌ی متراکم و محافظ روئین، جلوگیری می‌شود [1]. اما اصلاح سطح این آلیاژها برای بهبود خاصیت زیست‌سازگاری و زیست‌فعالی در کاربردهای پزشکی طولانی مدت، ضروری است [14]. شکل ۲ نمودارهای تنش-کرنش برای آلیاژ NiTi، فولاد زنگ‌زن، استخوان، تاندون و موی انسان را نشان می‌دهد. در این شکل، رفتار مکانیکی آلیاژ نایتینول با یکی از کاشتنی‌های مرسوم در بدن (فولاد زنگ‌زن) با برخی از اندام‌ها همچون استخوان به خوبی مقایسه شده است. نایتینول

اصلی این کاربرد گسترده، خواص عملکردی عالی و منحصر به فرد آلیاژهای نایتینول مانند سوپراالاستیسیته، رفتار حافظه‌داری شکلی، کرنش برگشت‌پذیر بالا، مقاومت خوردگی و زیست‌سازگاری بالا است [9,10]. اما از بین خواص اشاره شده، دو ویژگی مهم اثر حافظه‌داری شکلی و رفتار سوپراالاستیسیته، آلیاژهای NiTi را به عنوان یک ماده هوشمند، معرفی می‌کند. سوپراالاستیسیته‌ی بالای این مواد ناشی از استحاله‌ی برگشت‌پذیر بین فازهای آستنیت و مارتنزیت است [11,12]. همچنین این آلیاژها مدول الاستیک نزدیک به استخوان طبیعی، استحکام فشاری بالاتر از استخوان طبیعی، زیست‌سازگاری مناسب، و مقاومت خوردگی عالی در محلول‌های فیزیولوژیکی دارند [13]. این ویژگی‌های آلیاژهای نایتینول به تحقیقات گسترده در استفاده از آن‌ها برای کاربردهای زیستی منجر شده است. کاربردهای زیستی شامل کاشتنی‌های ارتودنسی، استنت‌های قلبی عروقی، دریچه‌های قلب مصنوعی، پروتزها و ارتزها، منگنه‌های ارتوپدی^۳ و سیم‌های راهنما و همچنین چندین ابزار جراحی و دندان‌پزشکی می‌باشد [10,14,15]. کاربردهای ارتودنسی آلیاژ NiTi را می‌توان به مته‌های دندان‌ی^۴، سیم‌های قوسی^۵ و نگهدارنده‌های طبقه‌بندی کرد. در جراحی ارتوپدی، برای درمان ستون فقرات آسیب دیده در بیماری اسکولیوز^۶ (انحنای ستون فقرات)، رفتار حافظه‌داری آلیاژ NiTi با بهره‌مندی از توانایی حفظ شکل خود در طول انتقال، می‌تواند فشار زیادی در حدود ۷۰۰ MPa برای اتصال به استخوان آسیب دیده ایجاد کند [13,16]. قابلیت بازیابی شکلی به آلیاژ NiTi اجازه می‌دهد تا به عنوان استنت قلبی عروقی، فیلتر لخته خون و آندوسکوپ فعال استفاده شود. شکل ۱ برخی از کاربردهای زیست پزشکی آلیاژ هوشمند NiTi را نشان می‌دهد [17].

⁶ Fixators

⁷ Scoliosis

³ Orthopedic staples

⁴ Dental drills

⁵ Archwires

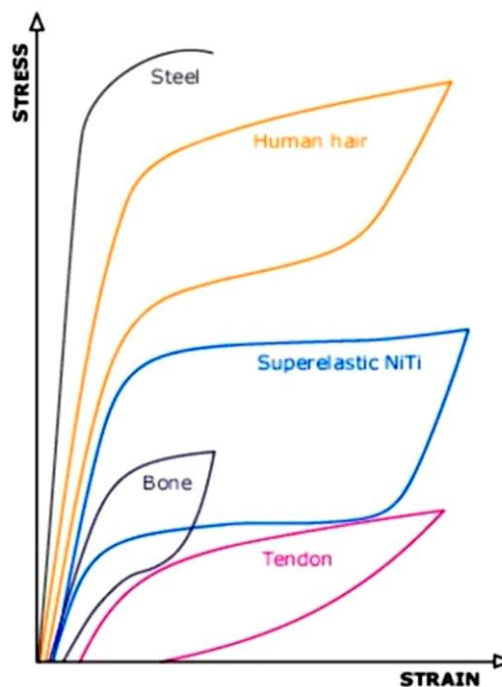
۲ انواع کاربردهای پزشکی آلیاژهای NiTi

ویژگی‌های مطلوب آلیاژهای NiTi در مقایسه با سایر مواد کاشتنی، آن‌ها را برای کاربردهای مختلف ارتوپدی مانند صفحات استخوانی، فیکساتورهای داخلی و خارجی، اصلاح‌کننده‌های ستون فقرات، فاصله‌اندازهای مهره‌ای، پروتز، ارتز و غیره مناسب می‌کند. آلیاژ نایتینول به دلیل خاصیت زیست‌سازگاری عالی، مقاومت خوردگی خوب و مقاومت در برابر پیچ‌خوردگی کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های پزشکی مخصوصاً در ارتودنسی، سیستم‌های دارورسانی، استنت‌های خود منبسط شونده، ابزارهای کاشتنی، ابزارهای انسداد دهلیزی و چشم پزشکی دارد [17,20]. در ادامه به معرفی بخشی از این کاربردها پرداخته شده است:

۱-۲ پروتز

با ورود سیم‌های NiTi در زمینه پروتزها، مشکلات و نقاط ضعف سیستم تحریک تا حد زیادی برطرف شده است. محرک‌های هوشمند باید دقیق، سبک و قادر به اعمال نیرو به اندازه کافی بزرگ باشند. موردی که NiTi را در زمینه پروتز مناسب می‌کند این است که با عبور جریان الکتریسیته از آن‌ها، سیم‌های NiTi شل شده و اندام مصنوعی حرکت می‌کند. هنگامی که جریان الکتریکی قطع می‌شود، سیم‌های NiTi شروع به حفظ شکل از پیش تعریف شده خود می‌کنند. تمام این حرکات بدون هیچ موتور یا هر گونه تحریک‌کننده دیگری انجام می‌شود. بیشتر مطالعات بر روی کاربرد سیم نایتینول، در دستگاه‌های پروتز دست و محرک متمرکز شده، و مطالعه‌ی کمتری روی استفاده از نایتینول برای پروتز سایر اندام‌ها انجام شده است [20]. تاریخچه پروتز NiTi به سال ۱۹۸۴ برمی‌گردد، زمانی که سیم‌های این آلیاژ به عنوان ماهیچه‌های مصنوعی برای ساخت یک پروتز چهار انگشتی دست استفاده شدند. با گذشت زمان، تلاش شد تا پروتزها از نظر شکل،

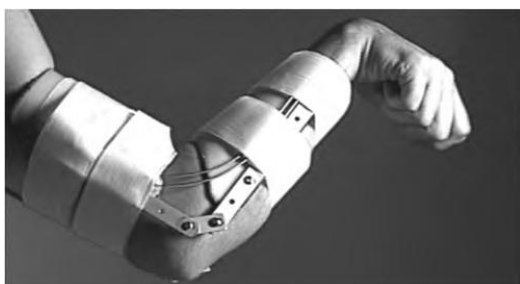
هنگام بارگذاری و باربرداری، رفتار مکانیکی تنش-کرنش منحصر به فردی از خود نشان می‌دهد. بیشتر بافت‌های بدن نیز رفتار مکانیکی مشابه با نایتینول را نشان می‌دهند که باعث می‌شود این آلیاژ هنگام استفاده به عنوان کاشتنی در استخوان‌ها یا بافت نرم، زیست‌سازگار باشد [18]. در بین آلیاژهای مختلفی که به عنوان کاشتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند، آلیاژ NiTi مدول یانگ پایین و نزدیک به استخوان طبیعی انسان دارد. اما به دلیل بیشتر بودن مدول یانگ نایتینول نسبت به استخوان، لازم است که با افزایش تخلخل، مدول یانگ آن کاهش یابد [9,19].



شکل ۲- نمودارهای تنش-کرنش برای آلیاژ NiTi، استخوان، تاندون، موی انسان و فولاد زنگ نزن [18].

در این مقاله، برخی از کاربردهای پزشکی مختلف آلیاژهای NiTi معرفی شده است.

دو پوسته ترموپلاستیک تشکیل شده که توسط یک لولای چند مرکزی در هر طرف مفصل آرنج به هم متصل شده است. مشاهده شد که EDGES می‌تواند وضعیت آرنج را بدون محدود کردن حرکات بهبود بخشیده و در نتیجه از هر گونه درد برای بیمار جلوگیری کند [20,22].



شکل ۵- یک ارتز تشکیل شده از دو پوسته ترموپلاستیک که توسط یک لولا چند مرکزی به هم متصل شده است [20].

اسکلت بیرونی توسط Copaci و همکاران برای توانبخشی پوشیدنی مفصل آرنج طراحی شده است. از آلیاژ NiTi، برای به حرکت درآوردن اسکلت بیرونی استفاده شده است و طراحی به گونه‌ای بود که دو درجه آزادی را فراهم می‌کرد [23].

۲-۳ ارتز مچ پا

AFO⁹های فعال، دستگاه‌های دینامیکی هستند که از چند لولا، نقاط خم‌شونده، فنر و محرک‌هایی تشکیل شده و نیروی مورد نیاز برای جبران ضعف مچ پا را فراهم می‌کنند (شکل ۶) [20]. در این ارتزها، مفصل مچ پا قفل نمی‌شود، بنابراین آزادی و ثبات بیشتری به مفصل مچ پا می‌دهد. برخلاف AFOهای پویا، AFOهای غیرفعال که مدل‌های معمولی هستند، تحرک زیادی به مچ پا نمی‌دهند. زیرا هیچ مفصلی در طراحی آن وجود ندارد و به یک الگوی راه رفتن سفت و سخت منجر می‌شود که ممکن است باعث پیچش مچ پا و ضربه‌های سخت بعدی به زانو شود [20].

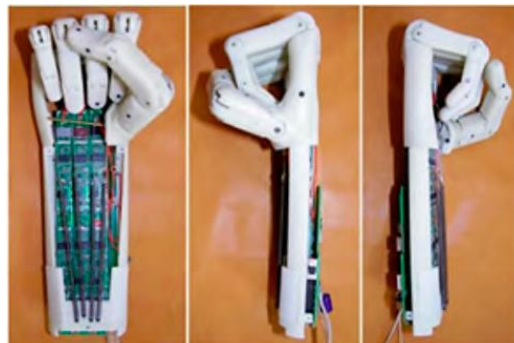
⁹ AFO: Ankle Foot Orthoses

اندازه و درجات آزادی بسیار شبیه آناتومی انسان باشند [20,21]. با اصلاحات بعدی، پروتزها قادر به انجام برخی فعالیت‌های حرکتی مشابه اندام واقعی انسان، مانند برداشتن، نگه داشتن یک شی در دست، باز و بسته کردن دست بودند (شکل ۳) [20].



شکل ۳- حالت‌های مختلف دست واقعی انسان در مقابل دست مصنوعی [20].

شکل ۴ پروتز دست طراحی شده توسط Andrianesis و همکاران را نشان می‌دهد. آن‌ها فنرهای پیش‌تنیده را به دست جدید طراحی شده، معرفی می‌کنند که موقعیت بسته را در زمان استراحت تسهیل کرده و در صورت نیاز با اعمال جریان باز می‌شود. در نهایت فنرها دست را به حالت اولیه خود بر می‌گردانند [20].

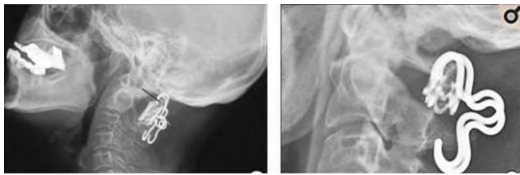


شکل ۴- یک پروتز دستی چهار انگشتی اصلاح شده [20].

۲-۲ ارتز آرنج

آلیاژهای EDGES یک ارتز پشت‌بند دینامیکی سازگار^۸ است (شکل ۵) که با استفاده از NiTi سوپرالاستیک، ساخته شده است. EDGES یکی از اولین ارتزها برای آرام‌سازی آرنج بود. این ارتز، از

⁸ Compliant dynamic brace orthosis



شکل ۷- حلقه از جنس آلیاژ حافظه دار NiTi برای درمان ناپایداری آتلانتواکسیال [20].

فاصله انداز مهره های ستون فقرات، یکی دیگر از کاربردهای NiTi در ارتوپدی برای درمان اسکولیوز است. این فاصله اندازها بین دو مهره (مطابق شکل ۸) قرار می گیرند تا ستون فقرات را تقویت کرده و تحرک ستون فقرات را در طول فرآیند بهبودی محدود کنند. با توجه به رفتار سوپرالاستیک فاصله انداز NiTi، نیرویی پایدار بدون توجه به موقعیت بیمار، با درجاتی از حرکت اعمال می شود [20].



شکل ۸- فاصله انداز ستون فقرات از جنس NiTi [20].

در برخی موارد که اسکولیوز بسیار شدید است (مخصوصاً در افراد جوان)، لازم است از میله NiTi برای تثبیت بخشی از مهره ها و

Amerinatanzi و همکاران از فنرهای سوپرالاستیک NiTi به جای فنرهای فولادی زنگ نزن معمولی برای بهبود عملکرد و انعطاف پذیری AFOها استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از فنرهای سوپرالاستیک NiTi منجر به افزایش خم شدن کف پا، افزایش زاویه دورسی فلکشن^{۱۰} و ارتفاع پا در مقایسه با طرح های معمولی می شود [24].



شکل ۶- یک محرک دوار NiTi برای ارتز مچ پا [20].

۴-۲ حلقه و فاصله انداز ارتوپدی NiTi

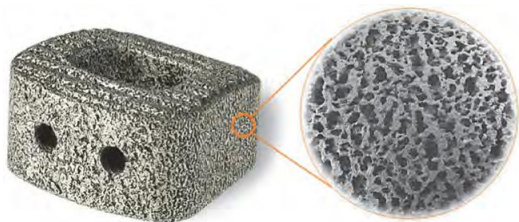
نایتینول همچنین برای درمان مشکلات ستون فقرات مانند انحرافات غیرطبیعی یا هر آسیب یا تغییر شکل ستون فقرات استفاده می شود. به عنوان مثال، شلی عضلات و رباط های اطراف ستون فقرات گردن یکی از شایع ترین دلایلی است که می تواند منجر به بی ثباتی آتلانتواکسیال^{۱۱} شود که حرکت غیرطبیعی در مفصل بین اطلس (C1) و محور (C2) است. برای غلبه بر این مشکل، کیم و همکاران تثبیت C1 خلفی در ۱۴ بیمار مبتلا را با حلقه NiTi انجام دادند (شکل ۷). نتایج نشان داد که این تکنیک تثبیت، درمانی مطمئن تر و موثرتر برای ناپایداری آتلانتواکسیال در مقایسه با روش های تثبیت پیچ و میله مرسوم است [20].

¹¹ Atlantoaxial instability

¹⁰ Dorsiflexion angle

۵-۲ سایر کاربردهای NiTi

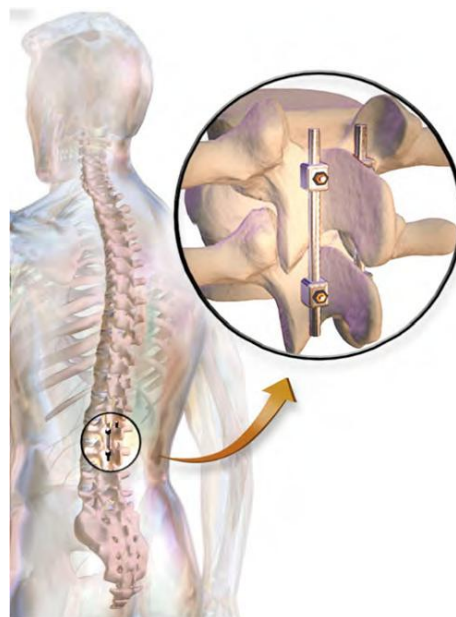
یکی از مهمترین مسائل NiTi در کاربردهای ارتوپدی، یکپارچگی رابط بین استخوان و کاشتنی است. از آنجایی که تشکیل استخوان و بافت فیبری در سطح مشترک کاشتنی استخوان به آرامی انجام می‌شود، انجام برخی تغییرات سطحی برای ایجاد یک لایه زیست‌فعال روی سطح NiTi می‌تواند مفید باشد. در غیر این صورت، لق شدن کاشتنی در مدت زمان کوتاهی اتفاق می‌افتد. گزارش شده است که ایجاد لایه هیدروکسی آپاتیت روی NiTi منجر به تشکیل سریع‌تر استخوان جدید در تماس با استخوان میزبان می‌شود. علاوه بر این، زیست‌مواد متخلخل نیز در زمینه کاشتنی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. آلیاژهای متخلخل NiTi در مقایسه با کاشتنی‌های متراکم NiTi، فولاد زنگ نزن و تیتانیوم، زیست‌سازگاری بهتری دارند. هدف اصلی معرفی تخلخل در آلیاژهای NiTi، اولاً کاهش مدول الاستیک مؤثر (به منظور سازگاری بهتر و بیشتر با استخوان‌های انسان) و ثانیاً ایجاد شرایط بهتر برای رشد استخوان/بافت در اطراف کاشتنی‌ها است که روند بهبودی را افزایش می‌دهد (شکل ۱۰). لازم به ذکر است که آلیاژهای کاملاً متخلخل NiTi نیز در چند سال گذشته در کاربردهای ارتوپدی به کار گرفته شده‌اند [20,25].



شکل ۱۰- آلیاژ NiTi متخلخل برای همجوشی بین مهره‌ای گردن [20]

با این حال، باید توجه داشت که با افزایش تخلخل، استحکام مکانیکی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، به دلیل افزایش سطح در معرض، مسئله رهایش یون نیکل چالش برانگیزتر خواهد بود. این

اصلاح تراز ستون فقرات استفاده شود (شکل ۹). در طی جراحی همجوشی ستون فقرات، هنگامی که میله‌ی NiTi در بدن قرار می‌گیرد، می‌تواند پس از انجام عملیات حرارتی، شکل از پیش تعریف شده‌ی خود را بازیابی کند. میله‌ی NiTi برای اتصال پیچ‌های وارد شده به مهره مجاور اعمال می‌شود که هر گونه حرکت بیش از حد را مهار می‌کند. یک مطالعه بالینی بر روی ۲۳ بیمار مبتلا به اسکولیوز ایدیوپاتیک^{۱۲} نوجوان نشان داد که عملکرد میله‌های NiTi از نظر اصلاح نهایی و ترازبندی بسیار بهتر از میله‌های Ti معمولی است. مزایای دیگری مانند سهولت استفاده و کاهش شکست پیچ‌ها نیز برای میله‌های NiTi گزارش شده است [20].



شکل ۹- میله نخاعی NiTi برای درمان اسکولیوز [20]

¹² Idiopathic scoliosis

منابع

- [1] M. Badr, A. Mohammadzadeh, J. Khalil-Allafi, M. Khoshghadam-Pireyousefan, A. Mostafaei, In-situ formation of TiN-TiO₂ composite layer on NiTi shape memory alloy via fluidized bed reactor, *Ceram. Int.* 46 (2020) 21097–21106. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.184>.
- [2] M. Soltanalipour, J. Khalil-Allafi, A. Mehrvarz, A. Kahaie Khosrowshahi, Effect of sputtering rate on morphological alterations, corrosion resistance, and endothelial biocompatibility by deposited tantalum oxide coatings on NiTi using magnetron sputtering technique, *J. Mater. Res. Technol.* 29 (2024) 3279–3290. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.098>.
- [3] J. Khalil-Allafi, A. Dlouhy, G. Eggeler, Ni₄Ti₃-precipitation during aging of NiTi shape memory alloys and its influence on martensitic phase transformations, *Acta Mater.* 50 (2002) 4255–4274. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00257-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00257-4).
- [4] Z. Mohammadi, M.K. Soltani, S. Shalavi, S. Asgary, A review of the various surface treatments of NiTi instruments, *Iran. Endod. J.* 9 (2014) 235–240.
- [5] Z.X. Khoo, Y. Liu, J. An, C.K. Chua, Y.F. Shen, C.N. Kuo, A review of selective laser melted NiTi shape memory alloy, *Materials (Basel)*. 11 (2018) 11–17. <https://doi.org/10.3390/ma11040519>.
- [6] S.K. Patel, B. Behera, B. Swain, R. Roshan, D. Sahoo, A. Behera, A review on NiTi alloys for biomedical applications and their biocompatibility, *Mater. Today Proc.* 33 (2020) 5548–5551. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.538>.
- [7] M. Soltanalipour, J. Khalil-Allafi, A. Mehrvarz, Study of tantalum-based coatings magnetron sputtered on NiTi alloy in argon and argon/nitrogen atmosphere, *Ceram. Int.* 50 (2024) 4994–5006. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.11.242>.
- [8] E. Farber, J.N. Zhu, A. Popovich, V. Popovich, A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing, *Mater. Today Proc.* 30 (2019) 761–767. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.563>.
- [9] Y. Zhang, S. Attarilar, L. Wang, W. Lu, J. Yang, Y.

امر محققین را بر آن داشت تا ساختارهای متخلخل شیب دار جدیدی به نام NiTi GPS و همچنین عملیات‌های اصلاح سطحی جدید نظیر بازپخت حرارتی، کاشت یون غوطه‌ور در پلاسمای اکسیژن و پوشش‌های هیدروکسی آپاتیت طراحی کنند [26]. علاوه بر کاربردهای ذکر شده، کاربردهای دیگری که از رفتار سوپرالاستیک آلیاژ NiTi بهره می‌برد، عینک‌های فلزی انعطاف‌پذیر هستند که می‌توانند بدون شکستن، خم شوند. نمونه‌ای از این عینک‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است [6].



شکل ۱۱- فریم‌های شیشه‌ای ساخته شده از آلیاژ NiTi سوپرالاستیک [6].

۳ نتیجه

آلیاژهای NiTi به دلیل ویژگی‌های خاصی که دارند در سال‌های اخیر طیف وسیعی از کاربردهای پزشکی و دندان پزشکی را داشته‌اند. در این مقاله به برخی از کاربردهای پزشکی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی NiTi پرداخته شده است. از جمله این کاربردها پروتزها، ارتزها، حلقه‌ها و فاصله‌اندازهای ستون فقرات، میله‌های نخاعی و آلیاژ متخلخل NiTi است که هر یک برای بیماری خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴ تقدیر و تشکر

نویسندگان از "دانشگاه صنعتی سهند" برای حمایت مالی در پژوهش، تقدیر و قدردانی می‌کنند.

- <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2022.100429>.
- [18] A. Szold, Nitinol: shape-memory and super-elastic materials in surgery, *Surg. Endosc.* 20 (2006) 1493–1496. <https://doi.org/10.1007/s00464-005-0867-1>.
- [19] M. Guo, B. Qi, J. Li, X. Shi, H. Ni, H. Shi, J. Ren, X. Zhou, T. Ye, L. Yao, Y. Xu, M. Zhang, C. Li, Mechanical properties evaluation of metacarpophalangeal joint prosthesis with new titanium-nickel memory alloy: a cadaver study, *BMC Musculoskelet. Disord.* 24 (2023) 738. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06859-z>.
- [20] F. Asgarinia, S. Parvizi, Biomedical applications of NiTi alloys, in: *Nickel-Titanium Smart Hybrid Mater.*, Elsevier, 2022: pp. 297–325. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91173-3.00010-9>.
- [21] M. Nematollahi, K.S. Baghbaderani, A. Amerinatanzi, H. Zamanian, M. Elahinia, Application of NiTi in Assistive and Rehabilitation Devices: A Review, *Bioengineering* 6 (2019) 37. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6020037>.
- [22] S. Viscuso, S. Pittaccio, M. Caimmi, G. Gasperini, S. Pirovano, E. Villa, S. Besseghini, F. Molteni, Pseudoelastic nitinol-based device for relaxation of spastic elbow in stroke patients, *J. Mater. Eng. Perform.* 18 (2009) 805–813. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9418-6>.
- [23] D. Copaci, A. Flores, F. Rueda, I. Alguacil, D. Blanco, L. Moreno, Wearable elbow exoskeleton actuated with shape memory alloy, *Biosyst. Biorobotics* 15 (2017) 477–481. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46669-9_79.
- [24] A. Amerinatanzi, H. Zamanian, N. Shayesteh Moghaddam, H. Ibrahim, M.S. Hefzy, M. Elahinia, On the Advantages of Superelastic NiTi in Ankle Foot Orthoses, in: *Vol. 2 Model. Simul. Control. Bio-Inspired Smart Mater. Syst. Energy Harvest.*, American Society of Mechanical Engineers, 2016. <https://doi.org/10.1115/SMASIS2016-9267>.
- [25] A. Bansiddhi, T.D. Sargeant, S.I. Stupp, D.C. Dunand, Porous NiTi for bone implants: A review, *Acta Biomater.* 4 (2008) 773–782. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.02.009>.
- [26] S. Parvizi, S.M. Hashemi, F. Asgarinia, M. Nematollahi, M. Elahinia, Effective parameters Fu, A Review on Design and Mechanical Properties of Additively Manufactured NiTi Implants for Orthopedic Applications, *Int. J. Bioprinting* 7 (2021) 15–42. <https://doi.org/10.18063/IJB.V7I2.340>.
- [10] M. Soltanalipour, J. Khalil-Allafi, A. Motallebzadeh, Influence of sputtering atmosphere on the structural, biological, and electrochemical properties of tantalum-containing coatings on the NiTi alloy, *Surf. Coatings Technol.* 481 (2024) 130675. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130675>.
- [11] J. Khalil Allafi, X. Ren, G. Eggeler, The mechanism of multistage martensitic transformations in aged Ni-rich NiTi shape memory alloys, *Acta Mater.* 50 (2002) 793–803. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00385-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00385-8).
- [12] A. Dlouhy, J. Khalil-Allafi, G. Eggeler, Multiple-step martensitic transformations in Ni-rich NiTi alloys - An in-situ transmission electron microscopy investigation, *Philos. Mag.* 83 (2003) 339–363. <https://doi.org/10.1080/0141861021000034531>.
- [13] S. MOHAMMED, M. KÖK, I.N. QADER, M. COŞKUN, A Review Study on Biocompatible Improvements of NiTi-based Shape Memory Alloys, *Int. J. Innov. Eng. Appl.* 5 (2021) 125–130. <https://doi.org/10.46460/ijiea.957722>.
- [14] M. Soltanalipour, J. Khalil-Allafi, Preparation of tantalum-containing coatings on NiTi shape memory alloys with enhanced in vitro cytocompatibility and antibacterial effectiveness, *J. Mater. Res. Technol.* 30 (2024) 8419–8432. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.211>.
- [15] N.M. Grande, R. Castagnola, I. Minciocchi, L. Marigo, G. Plotino, A review of the latest developments in rotary NiTi technology and root canal preparation, *Aust. Dent. J.* 68 (2023) S24–S38. <https://doi.org/10.1111/adj.12998>.
- [16] A. Nespoli, F. Passaretti, E. Placidi, M. Cassetta, R.Y. Yada, D.H. Farrar, K. V Tian, Microstructure and Thermo-Mechanics to Application, (2022) 1–16.
- [17] M.S. Safavi, A. Bordbar-Khiabani, F.C. Walsh, M. Mozafari, J. Khalil-Allafi, Surface modified NiTi smart biomaterials: Surface engineering and biological compatibility, *Curr. Opin. Biomed. Eng.* 25 (2023) 100429.

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100739>.

on the final properties of NiTi-based alloys manufactured by powder metallurgy methods: A review, Prog. Mater. Sci. 117 (2021) 100739.