

The effect of phase transformation behavior on mechanical and fatigue properties of three Nickel-Titanium rotary endodontic files

Mohaddeseh Sadat Naghibi¹, Hamed Shahmir^{2,*}, Sajjad Omidian³

1- Master's Student, Department of Materials Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Associated Professor, Department of Biomaterials, Faculty of Biomedical Engineering (Center of Excellence), Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

Article Info	Abstract
Article type: Research Article	Background and Aims: The present investigation was conducted on the evaluation of the microstructure, phase transformation behavior, mechanical properties, and fatigue resistance of nickel-titanium rotary endodontic files. The main purpose of this investigation was to find the effect of microstructural parameters on the performance of these files.
Article History: Received: 9 Jun 2024 Accepted: 18 Nov 2024 Published: 25 Nov 2024	Materials and Methods: Three rotary tools with brand names Denco, Edgeendo, and Eighteenth were studied. To evaluate the microstructure and transformation behavior of tools, metallography, X-ray diffraction, and differential scanning calorimetry methods were used. The bending test was used to check the behavior of superelasticity and memory and the microhardness test was used to evaluate the hardness of the samples. Also, cyclic fatigue behavior in a mold containing a simulated tooth canal was investigated and calculated by parametric statistical analysis. The fracture surface of the samples was also studied by scanning electron microscope.
Corresponding Author: Hamed Shahmir Department of Materials Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (Email: shahmir@modares.ac.ir)	Results: Analyses revealed the existence of a high volume fraction of R phase in the microstructure of the Edgeendo file. Rotary files with higher volume fraction of martensitic phase showed higher shape memory effect and fatigue resistance. Denco and Edgeendo rotary files with better surface quality and high volume fraction of martensitic phases in the microstructure showed better fatigue resistance compared with the Eighteenth file. In all the results, the P-value was less than 0.05. Conclusion: Multiphase microstructure containing austenite and martensite together with appropriate phase transformation and hardness of the alloy have key roles on functional properties of rotary files. This study provides dentists with a deeper understanding of the fatigue behavior and mechanical properties of these files, enabling them to make more informed decisions in choosing the appropriate instruments for endodontic treatment. Keywords: Nitinol, Phase transformation, Microstructure engineering, Fatigue resistance, Endodontics, Dental instruments

Cite this article as: Naghibi MS, Shahmir H, Omidian S. The effect of phase transformation behavior on mechanical and fatigue properties of three Nickel-Titanium rotary endodontic files. J Dent Med-TUMS. 2024;37:19.



ارتباط رفتار استحاله فازی با خواص مکانیکی و خستگی سه ابزار چرخشی اندودنتیک نیکل-تیتانیوم

محدثه سادات نقیبی^۱، حامد شاهمیر^{۲*}، سجاد امیدیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزشی مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار گروه آموزشی مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشیار گروه آموزشی بیومتریال، دانشکده مهندسی پزشکی (قطب علمی)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
زمینه و هدف: در این پژوهش ریزساختار، رفتار استحاله فازی، خواص مکانیکی و مقاومت به خستگی سه ابزار چرخشی نیکل-تیتانیومی مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این پژوهش یافتن اثر مؤلفه ریزساختاری بر عملکرد این ابزارها بود. روش بررسی: سه ابزار چرخشی با نام‌های تجاری Denco، Edgeendo و Eighteenth مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی ریزساختار و رفتار استحاله ابزارها از روش‌های متالوگرافی، پراش پرتو ایکس و کالریمتری روبشی افتراقی استفاده شد. از آزمون خمشی برای بررسی رفتار سوپرالاستیسیته و حافظه داری و از ریزسختی سنجی جهت ارزیابی سختی نمونه‌ها بهره گرفته شد. همچنین رفتار خستگی چرخشی در یک قالب حاوی کانال شبیه سازی شده دندان مورد بررسی و توسط آنالیز آماری پارامتریک محاسبه شد. سطح شکست نمونه‌ها نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. یافته‌ها: آنالیز کالریمتری روبشی افتراقی به همراه نتایج پراش پرتو ایکس گواه حضور درصد بالای فاز R در ابزار Edgeendo است. ابزارهای با کسر حجمی بالاتر فاز مارتنزیت سختی کمتر اما میزان حافظه داری و مقاومت به خستگی بهتری از خود نشان دادند. دو ابزار Denco و Edgeendo با کیفیت سطحی مطلوب‌تر و کسر حجمی بالاتر از فاز مارتنزیت در ریزساختار، مقاومت به خستگی چرخشی به نسبت به ابزار Eighteenth نشان دادند. در تمامی نتایج مقادیر P-value کمتر از ۰/۰۵ بود. نتیجه گیری: ریزساختاری حاوی فازهای مارتنزیت و آستنیت به همراه دماهای استحاله و سختی مناسب آلیاژ نقش مهمی بر عملکرد ابزارهای چرخشی دارند. این تحقیق به انتخاب بهینه این ابزارها در درمان ریشه دندان کمک خواهد کرد و امکان دستیابی به نتایج بهتری در درمان را فراهم می‌آورد. کلید واژه‌ها: نایتینول، استحاله مارتنزیتی، مهندسی ریزساختار، مقاومت به خستگی، ریشه دندان، ابزار دندانپزشکی	نوع مقاله: مقاله پژوهشی دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵ نویسنده مسؤول: حامد شاهمیر گروه آموزشی مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (Email: shahmir@modares.ac.ir)

مقدمه

در اوایل دهه ۱۹۹۰ نوآوری‌های متعددی در ابزارهای درمان کانال ریشه دندان معرفی شد. به ویژه، توسعه ابزارهای چرخشی انعطاف پذیر با استفاده از آلیاژ نیکل-تیتانیوم به جای فولاد زنگ نزن، که مدت‌ها استفاده می‌شد، مورد توجه قرار گرفت. معرفی آلیاژ حافظه دار نیکل-تیتانیوم یکی از بزرگترین تغییرات تکاملی در درمان ریشه است، زیرا در کنار بهبود مؤثر کیفیت تمیز کردن و شکل دهی کانال دندان، عوارض و خطاهای حین کار را به طور قابل توجهی کاهش داده است (Civjan, ۱۹۹۲). اولین کسانی بودند که استفاده از آلیاژهای نیکل-تیتانیوم که به نایتنول معروف است را برای تولید ابزارهای درمان کانال ریشه دندان در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد کردند. اولین ابزارهای چرخشی نیکل-تیتانیوم معرفی شده در سال ۱۹۹۲ توسط مک اسپادن طراحی شد (۱). امروزه این آلیاژها به طور گسترده‌ای در ابزارهای درمان کانال ریشه مورد استفاده قرار می‌گیرد و از زمان معرفی تاکنون، تغییرات قابل توجهی را تجربه کرده است. در ابتدا، تمرکز صنعت دندانپزشکی بر گسترش فایل‌ها معطوف به افزایش کارایی برش آن‌ها بود. اما با گذشت زمان و به دلیل وقوع تغییر شکل و شکستگی‌های ناگهانی در حین استفاده، توجه ویژه‌ای به اصلاح و تبدیل آلیاژهای پایه نیکل-تیتانیوم برای تولید ابزارهای چرخشی جلب شد (۴،۵). در واقع، دو ویژگی سوپرالاستیسیته و حافظه داری که در نتیجه استحاله فازی در آلیاژ نیکل-تیتانیوم رخ می‌دهد سبب توجه چشمگیر به این آلیاژ شده است. همچنین، گزارش شده است که فرآیندهای مختلف تولید، روش‌های طراحی و ویژگی‌های فیزیکی آلیاژ بر عملکرد بالینی ابزارهای چرخشی مورد استفاده در درمان ریشه تأثیر می‌گذارد (۴). بنابراین، تمرکز به سمت استفاده از روش‌های مختلف عملیات ترمومکانیکی آلیاژ نیکل-تیتانیوم به منظور مهندسی ریزساختار، بهبود خواص و در نتیجه افزایش انعطاف پذیری ابزارهای چرخشی مورد استفاده در دندانپزشکی معطوف گردید (۶،۷). گزارش شده است که استفاده از عملیات حرارتی مناسب با حفظ ساختار بلوری آلیاژ می‌تواند منتج به انعطاف پذیری بیشتر و متعاقباً مقاومت بیشتر در برابر شکست شود (۸،۹).

ریزساختار ابزارهای چرخشی نیکل-تیتانیوم می‌تواند متشکل از سه فاز آستنیت B2، فاز مارتنزیت R و فاز مارتنزیت B19 باشد. فاز آستنیت با ساختار بلوری مکعبی، به عنوان فاز دما بالا در آلیاژهای نیکل-تیتانیوم

شناخته می‌شود نکته حائز اهمیت در مورد فاز آستنیت، قابلیت بازیابی تغییر شکل‌های قابل توجهی است که می‌تواند تا ۶ درصد کرنش مهندسی تحت کشش تک محوره باشد. این خاصیت که به "اثر سوپرالاستیسیته" معروف است، به ابزارهای نیکل-تیتانیومی با ریزساختار آستنیتی اجازه می‌دهد تا مقادیر بالایی از گشتاور را در هنگام شکست از خود نشان دهند. همچنین، این ابزارها به دلیل سختی بالای خود، از برندگی بالایی برخوردارند (۱۰،۱۱). در نتیجه این ابزارها برای شکل دادن به کانال‌های دندان با ریشه مستقیم یا کمی خمیده مناسب هستند. فاز مارتنزیت B19 دارای ساختار بلوری مونوکلینیک است که به عنوان فاز دما پایین شناخته می‌شود. این فاز نرم و انعطاف پذیر است و ضریب کشسانی پایینی نسب به بسیاری از آلیاژهای مهندسی از خود نشان می‌دهد. نکته مهم در مورد این فاز، ایجاد امکان قابلیت بازیابی تغییر شکل‌های قابل توجه (تا ۶ درصد کرنش مهندسی تحت کشش تک‌محوره) با حرارت دهی تا دمای پایداری فاز آستنیت است که این خاصیت تحت عنوان اثر حافظه داری شناخته می‌شود (۱۱). ابزارهای مارتنزیتی انعطاف‌پذیرتر هستند و مقاومت در برابر خستگی چرخشی بیشتری دارند (۱۲). شکست ناشی از خستگی چرخشی به احتمال زیاد در کانال‌های ریشه با انحنای شدید رخ می‌دهد. به همین دلیل از ابزارهای با ریزساختار مارتنزیتی برای درمان کانال‌های ریشه منحنی شکل استفاده می‌شود (۱۳). فاز مارتنزیت R با ساختار بلوری تریگونال یک فاز میانی بین آستنیت و مارتنزیت B19 شناخته می‌شود که تحت شرایط خاصی شامل عملیات ترمومکانیکی می‌تواند در آلیاژ تشکیل شود. حضور این فاز می‌تواند نقش مطلوبی بر خواص ابزارهای خمشی داشته باشد (۱۳).

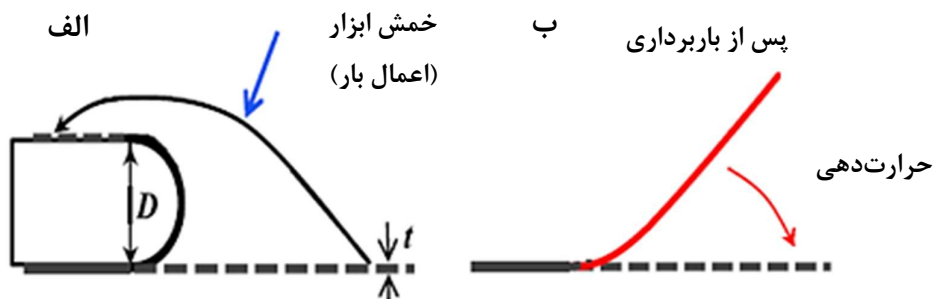
از نظر متالورژیکی، درصد عناصر نیکل و تیتانیوم در آلیاژ نقش اساسی در پایداری هر یک از فازهای یادشده و متعاقباً بروز پدیده سوپرالاستیسیته و حافظه داری ایفا می‌کند. هرچند تاریخچه فرآوری آلیاژ شامل عملیات حرارتی یا عملیات ترمومکانیکی نیز نقش مهمی دارد (۱۴،۱۵). عملیات ترمومکانیکی یک فرآیند متالورژیکی است که شامل ترکیب روش‌های مکانیکی شامل نورد یا کشش و عملیات حرارتی بعدی است (۱۶-۱۸). عملیات ترمو مکانیکی را می‌توان در طول فرآیند تولید آلیاژ و ابزارها اعمال کرد. عملیات حرارتی آلیاژ یک رویکرد مدرن برای مهندسی ریزساختار، تنظیم خواص سوپرالاستیسیته و حافظه داری و

روش بررسی

پژوهش حاضر کار تحقیقاتی دانشگاه تربیت مدرس با همکاری شرکت صنایع پزشکی هامرز است. در این پژوهش ابزارهای چرخشی با نامهای تجاری Denco (چین)، Edgeendo (آمریکا) و Eighteenth (چین) به تعداد ۱۰ نمونه از هر نشان تجاری برای هر یک از آزمونهای خمش و خستگی مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری (OM)، نمونه‌ها پس از سنباده زنی با ذرات SiC از مش ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ و پولیش مکانیکی به کمک سوسپانسیون آلومینا با ابعاد $0.3\mu\text{m}$ ، توسط محلول آب مقطر-هیدروفلوئوریک اسید-اسید نیتریک (به نسبت $1/5-3-1/5$) حکاکی شیمیایی شدند. برای آنالیز حرارتی کالریمتری روبشی افتراقی (DSC)، نمونه‌هایی با وزن 50mg از این ابزارها تهیه شد. برای این آزمون نمونه‌ها با دو سیکل سرمایش و گرمایش در محدوده دمایی $100-1000^\circ\text{C}$ تا 100°C درجه سانتی گراد با نرخ حرارتی 10°C/min تحت گاز خنثی مورد بررسی قرار گرفت. شناسایی فازهای نمونه‌ها توسط دستگاه پراش پرتو ایکس (Philips (XRD مدل X'Pert MPD ساخت کشور هلند) دارای تیوب مس با طول موج 0.154nm و اندازه گام 0.02°s^{-1} در محدوده $35-55^\circ$ با ولتاژ 40kV و جریان 40mA انجام شد.

همچنین درصد فازهای موجود در نمونه‌ها با توجه به نسبت شدت پیک‌های شناسایی شده برای هر فاز محاسبه شد (۲۲). به منظور ارزیابی رفتار خمشی ابزارها، قالب خاصی طراحی گردید که دارای قوسی به شعاع 24mm بود که فایل روی این قوس خوابانده شد تا با توجه به ابعاد سطح مقطع ابزارهای مورد بررسی، کرنش خمشی 3% را اعمال نماید (۲۳). طرح وارده این آزمون در شکل ۱ ارائه شده است.

همچنین بهبود مقاومت در برابر خستگی چرخهای ابزارها است. این فرآیند شامل حرارت دهی تا دمای معین، نگهداری در این دما طی زمان مشخص و سرمایش کنترل شده است (۷، ۱۹). فرآیندهای مدرن مبنی بر توسعه ابزارهای چرخشی مبتنی بر این دانش است. خواص مکانیکی آلیاژ هم اتمی نیکل-تیتانیوم به رفتار استحاله فازی این آلیاژ تحت بار اعمالی بستگی دارد و می‌توان آن را با اعمال تغییرات ریزساختاری طی عملیات ترمومکانیکی کنترل کرد. همچنین تأیید شده است که پدیده‌های متالورژیکی شامل تغییر ترکیب شیمیایی زمینه آلیاژ، رسوب گذاری، بازبایی و تبلور مجدد ریزساختاری حین عملیات حرارتی می‌تواند بر رفتار استحاله و خواص مکانیکی آلیاژهای نیکل-تیتانیوم و متعاقباً عملکرد ابزاری چرخشی ساخته شده از این آلیاژها اثرگذار باشد (۶، ۲۰، ۲۱). هدف این پژوهش بررسی رفتار خستگی و دیگر ویژگی‌های مکانیکی (سختی، رفتار خمشی، الاستیسیته) سه ابزار چرخشی نیکل-تیتانیومی و ارتباط مؤلفه‌های ریزساختاری و فازی آن‌ها با رفتار بیان شده است. بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری ابزارهای چرخشی نیکل-تیتانیومی اهمیت زیادی دارد، زیرا انتخاب مناسب این ابزارها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نتایج درمان دندانپزشکی داشته باشد. یافته‌های این مطالعه به دندانپزشکان کمک می‌کند تا با شناخت دقیق تر ویژگی‌های مختلف ابزارها، از جمله مقاومت به خستگی و رفتار سوپرالاستیسیته، انتخاب بهتری در مورد ابزارهای مورد استفاده خود داشته باشند. این انتخاب مناسب می‌تواند به کاهش عوارض جانبی، افزایش کیفیت و تسهیل فرآیند درمان کمک کند. به علاوه، با توجه به اینکه ابزارهای چرخشی نیکل-تیتانیومی به طور گسترده‌ای در دندانپزشکی استفاده می‌شوند، نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمایی مفیدی برای دندانپزشکان در انتخاب ابزار مناسب در شرایط بالینی ارائه دهد.



شکل ۱- طرح وارده آزمون خمشی برای سنجش میزان اثر سوپرالاستیسیته و حافظه داری ابزارهای چرخشی مورد مطالعه. الف- اعمال نیرو و خمش فایل به دور قالب و ب- اعمال حرارت و بازبایی فایل به شکل اولیه

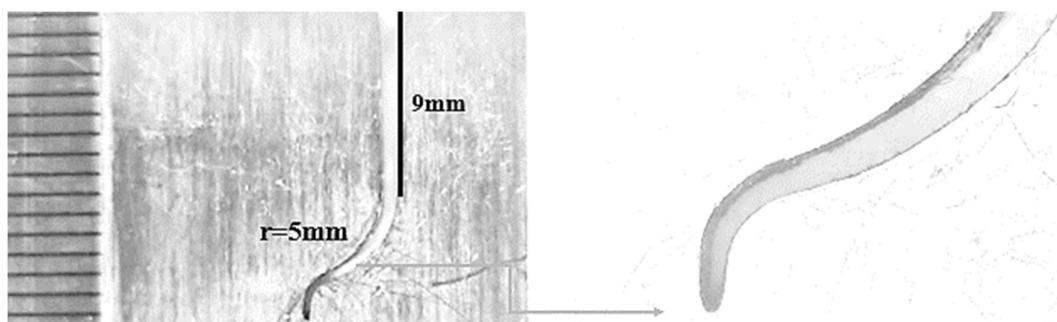
آزمایش به دست آید. هر ابزار آزادانه در داخل کانال می‌چرخید تا زمانی که شکست رخ دهد و زمان بین فعال شدن ابزار و بروز شکست با استفاده از یک کرنومتر دیجیتال با حساسیت $0.1/0$ ثانیه ثبت شد و سپس تعداد چرخه‌های منتهی به شکست (NCF) محاسبه شد (۲۵). شایان ذکر است که آزمایش فوق برای هر یک از ابزارها از هر نشان تجاری به تعداد ۱۰ بار تکرار شد. تعداد چرخه‌های منتهی به شکست ابزارها به همراه مقادیر میانگین و انحراف معیار هر گروه توسط آنالیز آماری پارامتریک محاسبه شد. بررسی سطوح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) Tescan مدل MIRA3 انجام گرفت.

یافته‌ها

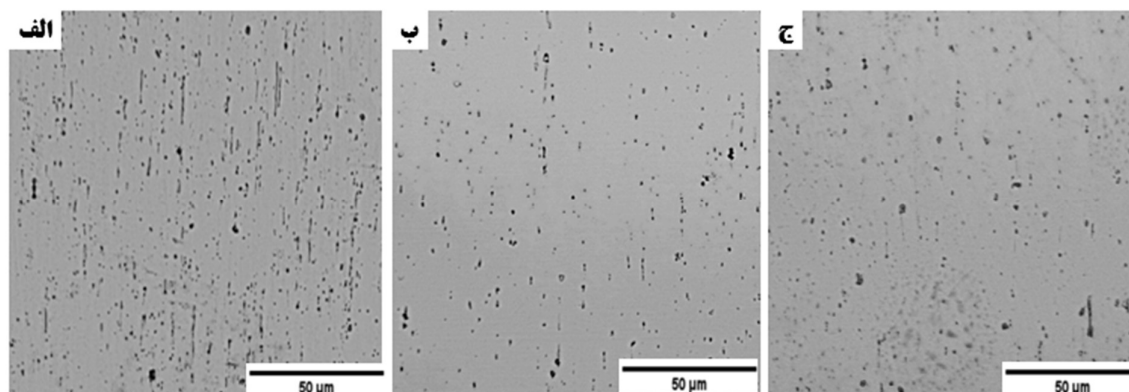
تصاویر میکروسکوپ نوری برای نمونه‌های Denco، Edgeendo و Eighteenth در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تصاویر ذرات پراکنده فاز ثانویه در زمینه مشاهده می‌شود. بررسی آنالیز ذرات توسط EDS نشان می‌دهد که این ذرات اکسیدهای پیچیده‌ای حاوی نیکل و تیتانیوم هستند. بررسی ریزساختار گواه آن است که اندازه میانگین ذرات برای سه نمونه Denco، Edgeendo و Eighteenth به ترتیب $2/8$ ، $1/8$ و $1/4$ میکرون و کسر حجمی رسوبات به ترتیب $2/1$ ، $1/2$ ، $1/7$ درصد اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است این اندازه‌گیری‌ها توسط نرم افزار ImageJ روی تصاویر به‌دست آمده از نواحی مختلف انجام گرفت.

در این آزمون، پس از تثبیت ابزار در قالب با اعمال نیرو، ابزار روی قوس خوابانده شد و به این صورت کرنش خمشی اعمال گردید. پس از باربرداری، بازیابی شکلی توسط ابزار مؤید میزان کرنش الاستیک و سوپرالاستیک آن است. با قراردادی ابزار به همراه قالب روی صفحه‌ای با حرارت 70° درجه سانتی گراد، بازیابی شکل تحت حرارت که مؤید رفتار حافظه داری است، سنجیده شد.

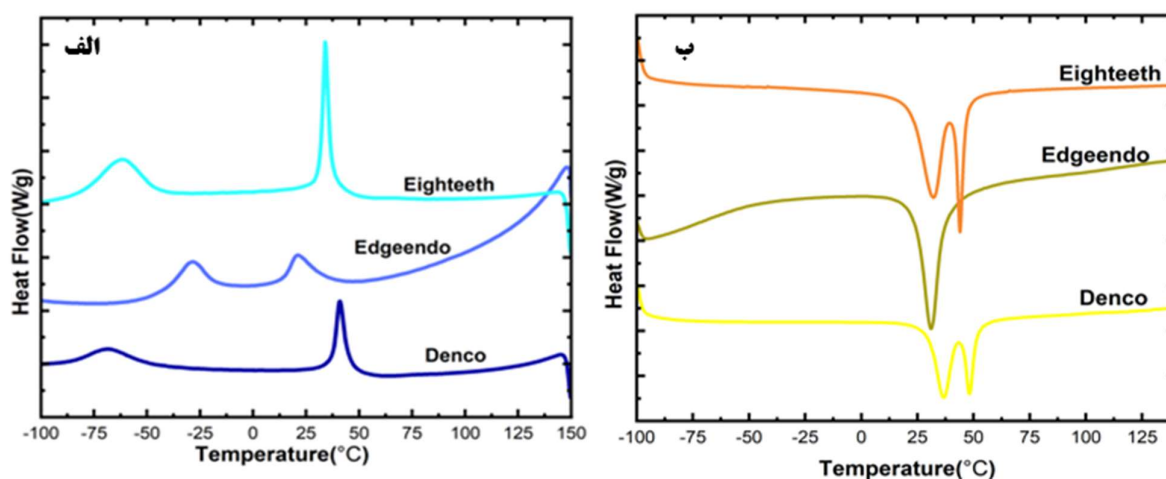
ریزسختی سنجی (Microhardness Measurement) ابزارها توسط دستگاه ریزسختی‌سنجی ویکرز تحت بارگذاری 100 گرم نیرو به مدت 10 ثانیه با میانگین گیری از حداقل ۳ نقطه اثر، انجام شد. بررسی توپوگرافی سطحی و سطح مقطع ابزارها، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) Tescan مدل MIRA3 مجهز به طیف‌سنج پرتو ایکس پراکنده انرژی (EDS) ساخته کشور چک استفاده شد. رفتار مکانیکی ابزارها تحت بارگذاری خمشی متناوب در یک کانال دندان شبیه سازی و ساخته شده از فولاد زنگ نزن شامل کانال مخروطی 9 میلی متری با شعاع انحنا 5 میلی متر انجام شد (۲۴). قالب ساخته شده برای این آزمون در شکل ۲ نشان داده شده است. آزمون فوق با سرعت چرخش ابزار 300 دور در دقیقه توسط یک اندوموتور (مدل E-Connect ساخت شرکت Eighteenth چین)، که امکان ثبت لحظه‌ای (0.1 ثانیه) گشتاور با حساسیت 0.05 N.cm را فراهم می‌کند، انجام شد. لازم به ذکر است نوک تمام ابزارها در انتهای کانال و در یک نقطه در فاصله 5 میلی متری از انتهای بلوک قرار گرفتند تا تکرارپذیری



شکل ۲- کانال دندان شبیه سازی شده مورد استفاده در آزمون خستگی



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های (الف) Denco، (ب) Edgeendo و (ج) Eighteeth



شکل ۴- نمودارهای DSC برای نمونه‌های Denco، Eighteeth و Edgeendo در سیکل (الف) سرمایش، (ب) گرمایش قله‌های به سمت بالا گواه بروز استحاله گرمازا و قله‌های به سمت پایین گواه بروز استحاله گرماگیر هستند

جدول ۱- دماهای استحاله فازی آستنیت-R- مارتنزیت برای نمونه‌های Denco، Eighteeth و Edgeendo

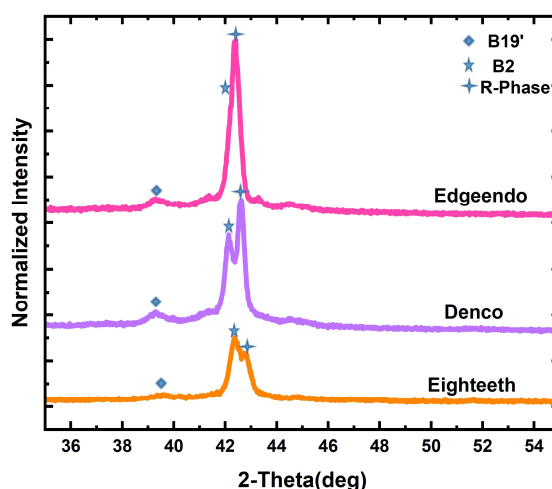
ابزار	سطح شکست نهایی (%)	اندازه دیمپل (μm)	فاصله میان خطوط خستگی در مرحله رشد (μm)	تعداد چرخه تا شکست (NCF)
Denco	۶۱	$2/7 \pm 1/3$	$2/4$	$528 \pm 0/25$
Edgeendo	۶۴	$2/6 \pm 1/2$	$1/9$	$513 \pm 0/15$
Eighteeth	۵۷	$3/4 \pm 1/7$	$1/0$	$297 \pm 0/15$

قله استحاله رفت و برگشت را نشان می‌دهد. در سیکل سرمایش سه نمونه، استحاله مارتنزیتی دو مرحله‌ای مشاهده می‌شود. در سیکل گرمایش، در دو ابزار Denco و Eighteeth، استحاله فازی دو مرحله‌ای B2 → R → B19' است، اما در مورد ابزار Edgeendo تنها یک قله مشخصه استحاله فازی تک‌مرحله‌ای B2 → B19' مشاهده می‌شود. دمای اتاق برای تمام نمونه‌ها بیش از دمای شروع استحاله مارتنزیتی

شکل ۴ الف و ب نتایج آزمون کالریمتری روبشی افتراقی به ترتیب طی سرمایش و گرمایش را نشان می‌دهد. ظهور قله‌های گرمازا در سیکل سرمایش و گرماگیر در سیکل گرمایش به ترتیب مؤید بروز استحاله آستنیت به مارتنزیت و استحاله برگشتی در نمونه‌ها است. دماهای استحاله در جدول ۱ آورده شده است. دماهای شروع، قله و پایان استحاله به ترتیب با زیروندهای s، p و f نشان داده شده است و Δ اختلاف دمای

(M_s) و کمتر از دمای شروع استحاله آستنیتی (A_t) است.

الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های مختلف مورد بررسی در شکل ۵ آمده است و درصد فازهای محاسبه شده نیز در جدول ۲ آورده شده است. بررسی‌ها گواه آن است که ریزساختار هر سه ابزار حاوی فازهای B2، B19' و R است. بررسی دقیق‌تر این نتایج نشان می‌دهد که شدت پیک‌های مشخصه فاز مارتنزیتی R در ابزارهای Edgeendo و Denco بیشتر است. این در حالی است که در مورد ابزار Eighteenth پیک غالب مربوط به فاز آستنیت است.



شکل ۵- نتایج پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های Edgeendo، Denco و Eighteenth

مقادیر کرنش خمشی بازیابی شده با باربرداری و حرارت دهی که به ترتیب مؤید بروز اثر سوپرالاستیسیته و حافظه داری است در جدول ۳ آورده شده است. لازم به ذکر است که تمامی نمونه‌ها کرنش اعمالی را کامل بازیابی کردند و تغییر شکل دائمی در هیچ یک از نمونه‌ها مشاهده نگردید. لازم به ذکر است که هر یک از نتایج مندرج در جدول برای هر نمونه حاصل از سنجش سه ابزار و سه بار تکرار برای هر ابزار است. نتایج گواه آن است ابزار Edgeendo بالاترین میزان حافظه داری و ابزار Eighteenth بالاترین میزان سوپرالاستیسیته را در میان ابزارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج آزمون ANOVA نشان داد که تفاوت معنی داری بین گروه‌های مختلف ابزارهای دندان‌ی در مورد کرنش بازیابی شده با حرارت و باربرداری وجود دارد که طی آن P-value کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد که ابزارهای Denco، Edgeendo و Eighteenth از نظر آماری تفاوت قابل توجهی در رفتار حافظه داری و سوپرالاستیسیته دارند. این تفاوت‌ها نمی‌توانند به‌طور تصادفی اتفاق افتاده باشند. بنابراین، انتخاب ابزار بر اساس این ویژگی‌ها ممکن است تأثیر بسزایی در عملکرد بالینی داشته باشد.

ریزسختی‌سنجی ابزارهای Denco، Edgeendo و Eighteenth به ترتیب اعداد 263 ± 7 ، 242 ± 6 و 268 ± 6 ویکرز را نشان می‌دهد. این نتایج مؤید سختی بالاتر ابزار Eighteenth در مقایسه با سایر ابزارهای مورد ارزیابی است.

جدول ۲- درصد عناصر برای نمونه‌های Edgeendo، Denco و Eighteenth

ابزارها	میزان فازهای موجود (%)		
	فاز آستنیتی B2	فاز مارتنزیتی R	فاز مارتنزیتی B19'
Denco	۴۱	۵۰	۹
Edgeendo	۳۰	۶۴	۶
Eighteenth	۵۸	۳۲	۱۰

جدول ۳- مقادیر کرنش خمشی اندازه‌گیری شده برای ابزارهای مورد مطالعه ($P < 0.05$)

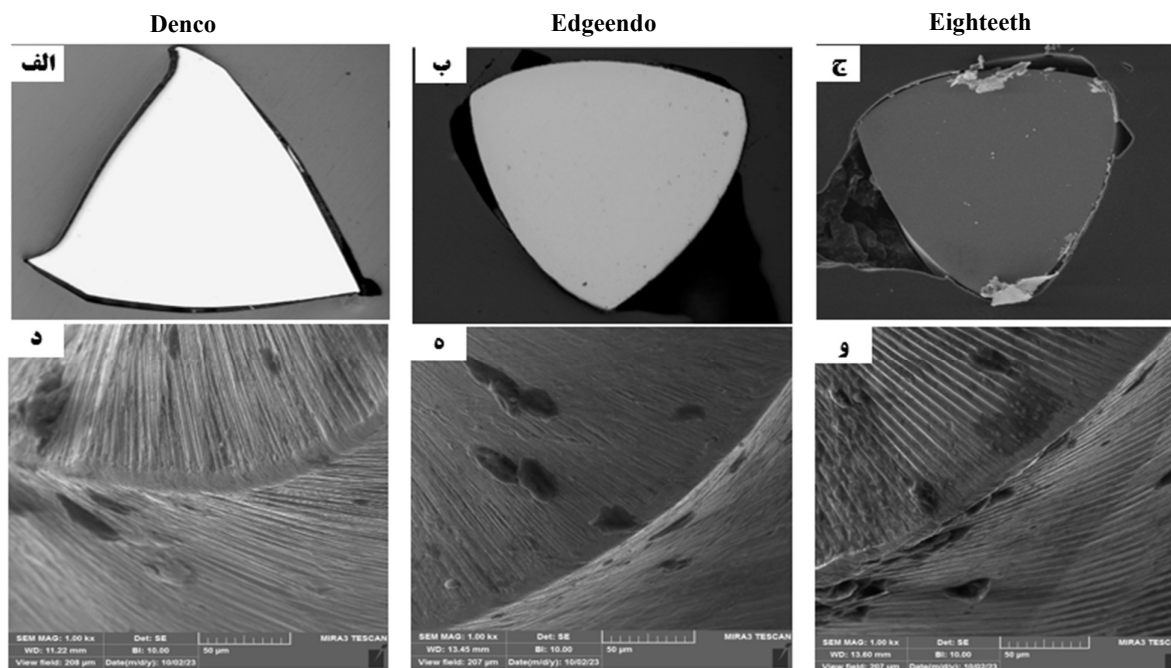
ابزارها	کرنش بازیابی شده با حرارت (%)	کرنش بازیابی شده با باربرداری (%)
Denco	$1/38 \pm 0.5$	$1/62 \pm 0.5$
Edgeendo	$1/41 \pm 0.5$	$1/59 \pm 0.5$
Eighteenth	$1/09 \pm 0.5$	$1/91 \pm 0.5$

داده‌های مربوط به نتایج آزمون خستگی به همراه مؤلفه‌های به دست آمده از شکست نگاری ابزارها در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۷ نیز تصاویر سطوح شکست هر سه ابزار آزمایش شده را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است تعداد چرخه شکست پایین ابزارها، نشان‌دهنده بروز شکست خستگی کم چرخه در ابزارها تحت شرایط آزمون بوده است. نتایج گواه آن است که ابزارهای Denco، Edgeendo و Eighteenth به ترتیب تعداد چرخه شکست ۵۲۸، ۵۱۳ و ۲۹۷ را تحمل کرده‌اند که در این بین دو ابزار اول نسبت به ابزار Eighteenth مقاومت بیش از ۱/۷ برابر را نشان می‌دهند. در تحلیل آماری انجام‌شده، ابتدا با استفاده از آزمون ANOVA، تفاوت معنی دار بین سه گروه ابزارهای Denco، Eighteenth و Edgeendo مشاهده شد ($P=0/0016$).

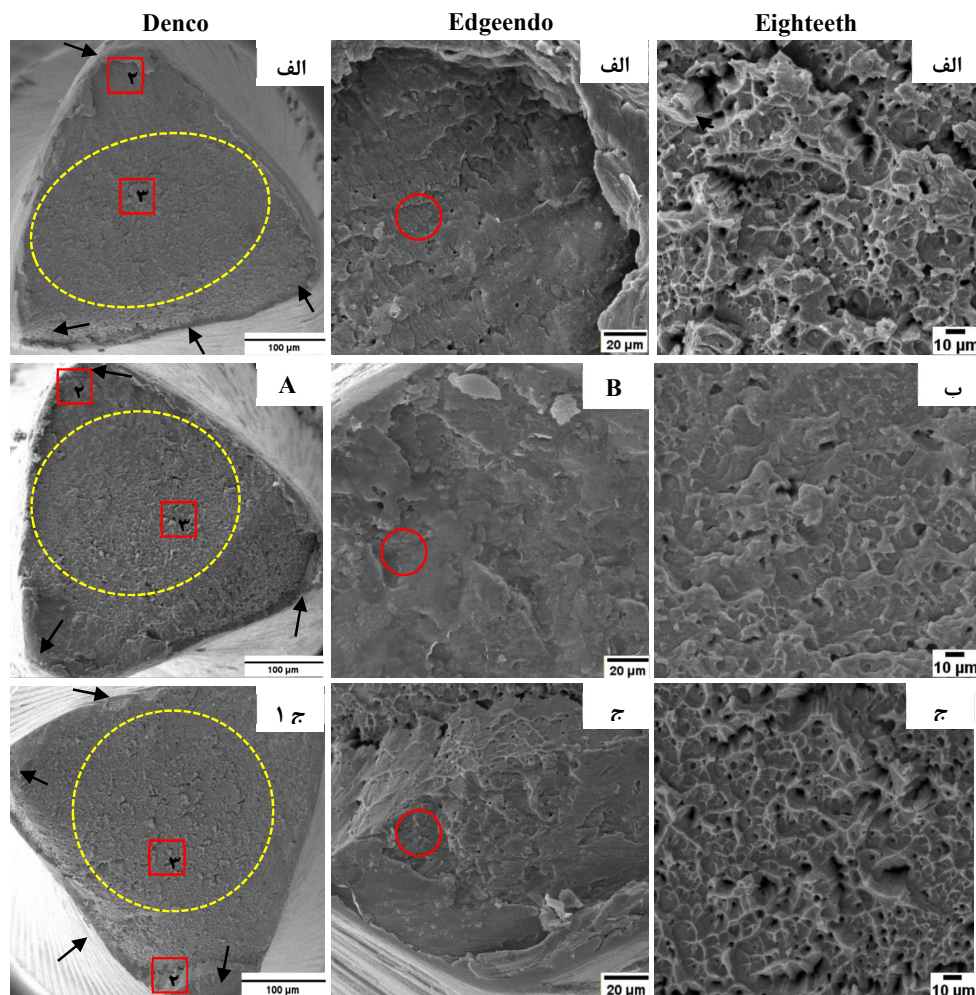
تصاویر سطح مقطع فایل‌ها به همراه توپوگرافی لبه برش سه ابزار Denco، Edgeendo و Eighteenth توسط SEM در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج گواه تفاوت عمده طراحی ابزار Denco نسبت به دو ابزار دیگر است. فاصله بین خطوط ماشین‌کاری برای ابزارهای Denco، Edgeendo و Eighteenth به ترتیب برابر است با ۲/۷، ۲/۰ و ۵/۵ میکرون، که در این میان بیشترین فاصله بین خطوط متعلق به ابزار Eighteenth است. این اعداد می‌تواند معیاری از کیفیت ماشین‌کاری سطحی باشد به گونه‌ای که ابزارهای Edgeendo و Eighteenth به ترتیب بهترین و بدترین سطح ماشین‌کاری را دارند. لازم به ذکر است که طراحی ابزار و کیفیت سطوح ماشین‌کاری می‌تواند نقش به سزایی بر مقاومت به خستگی ابزارهای یاد شده داشته باشد.

جدول ۴- نتایج آزمون خستگی خمشی - چرخشی و مؤلفه‌های به دست آمده از شکست نگاری ابزارهای مورد مطالعه

دماهای استحاله (درجه سانتی گراد)											ابزار
T_R	ΔT	A_f	A_p	A_s	M_f	M_p	M_s	R_f	R_p	R_s	
۴۷	۱۰۴	۴۳	۳۶	۲۹	-۸۶	-۶۸	-۴۹	۳۷	۴۰	۴۵	Denco
۳۸	۵۹	۳۷	۳۱	۲۳	-۴۲	-۲۸	-۱۶	۱۴	۲۱	۳۴	Edgeendo
۳۶	۱۰۴	۴۶	۴۳	۴۱	-۸۱	-۶۱	-۴۴	۳۱	۳۴	۳۷	Eighteenth



شکل ۶- تصاویر به ترتیب سطح مقطع و لبه‌های برش ابزارهای الف و د Denco، ب و ه Edgeendo و ج و و Eighteenth



شکل ۷- تصاویر SEM از سطوح شکست ابزارهای (الف Denco، ب Edgeendo و ج Eighteenth؛ مناطق مشخص شده با شماره‌های ۲ و ۳ با بزرگ‌نمایی بیشتر در کنار تصاویر نشان داده شده‌اند. پیکان‌های مشکی رنگ محل‌های شروع ترک، خط‌چین‌های زرد رنگ حدود نواحی شکست نهایی و دایره قرمز رنگ نواحی خطوط خستگی در مرحله دوم رشد ترک خستگی را نشان می‌دهند.

بحث و نتیجه‌گیری

پیش‌تر، اهمیت انعطاف‌پذیری بالا و مقاومت به خستگی مناسب برای ابزارهای درمان ریشه مطرح شد. این نیازمندی‌ها عمدتاً از طریق مهندسی ریزساختار و عملیات کارسرد و آنیل بهبود می‌یابند. حضور فازهای مختلف آستنیت B2، مارتنزیت B19' و فاز میانی مارتنزیتی R در ریزساختار به همراه مؤلفه‌های متالورژیکی نظیر میزان عیوب ریزساختاری موجود، اندازه دانه و حضور رسوبات نانومتری Ni_4Ti_3 نقش تعیین‌کننده‌ای بر رفتار حافظه داری و سوپرالاستیسیت این ابزارها و مقاومت به خستگی آن‌ها ایفا می‌کند (۲۶). طراحی و شرایط سطحی

این تفاوت‌ها نمی‌توانند به طور تصادفی اتفاق افتاده باشند و بنابراین ویژگی‌های مربوط به هر گروه تأثیر مشخصی بر تعداد چرخه‌های منتهی به شکست دارند. در ادامه نتایج آزمون t-test نشان داد که تفاوت آماری معنی‌داری بین Eighteenth و Denco ($P=0/0026$) و همچنین بین Eighteenth و Edgeendo ($P=0/0013$) وجود دارد، اما بین Denco و Edgeendo تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ($P=0/8282$). این نتایج نشان می‌دهند که ابزارهای Eighteenth از لحاظ تعداد چرخه‌های منتهی به شکست به طور معنی‌داری با دو ابزار دیگر متفاوت است، در حالی که Denco و Edgeendo عملکرد نسبتاً مشابهی دارند.

ابزار بر رفتار خستگی این ابزارها تأثیر می‌گذارد. ابزارهای چرخان داخل کانال دندان تحت نیروهای مختلفی مانند برش، پیچش، خم شدن، کشش و فشار آپیکال قرار می‌گیرند. این نیروها منجر به تشکیل ریزترک‌هایی در سطح تیغه‌های سطحی ابزار می‌شود که می‌تواند جوانه زنی ترک (تشکیل ترک اولیه) خستگی را به همراه داشته باشد. تمرکز تنش در عیوب نیز می‌تواند باعث انتشار ترک به ناحیه مجاور و در نهایت منجر به شکستگی شود. بنابراین، عیوب سطحی می‌تواند تشکیل ترک خستگی را ترغیب نماید.

با توجه به آن که عیوب ریزساختاری نظیر حضور آخال‌ها (ناخالصی‌ها یا ذرات ناخواسته) می‌تواند عمر خستگی را بکاهد. در بررسی ریزساختاری ابزارهای مورد مطالعه (شکل ۳) در کنار آنالیز عنصری توسط EDS، ریزساختار شامل ذرات فاز ثانویه کروی در زمینه است. این رسوبات می‌تواند اکسیدهای پیچیده نیکل-تیتانیوم (Ti_2Ni_2O) باشد. منشأ این رسوبات اکسیدی، اکسیژنی است که در ماده اولیه وجود داشته و یا حین فرآیند وارد ماده می‌شود. به‌طور کلی، کسر حجمی کمتر و اندازه رسوبات اکسیدی ریزتر مؤید بروز خواص مکانیکی بهتر و نشانی از کیفیت آلیاژ نیکل-تیتانیوم مورد استفاده است (۲۷). اساساً اعمال بارهای خمشی و پیچشی حین عملکرد این ابزارها در کانال ریشه شرایط کاری دشواری را سبب می‌شود که به بروز خستگی کم چرخه و شکست این ابزارها می‌انجامد. توجه به این نکته ضروری است که در خستگی کم چرخه، عامل کنترل کننده، رشد ترک خستگی و نه جوانه زنی ترک است. در بحث رشد ترک خستگی نیز شرایط ریزساختاری عامل کلیدی در کنترل عمر خستگی است. انتظار می‌رود ساختارهای چندفازی به دلیل استحکام بالاتر و درصد بالای مارتنزیت به دلیل تأمین انعطاف پذیری بیشتر مقاومت به خستگی بهتری داشته باشند. بنابراین، از جمله نیازمندی‌های اساسی این ابزارها، انعطاف پذیری بالا به همراه مقاومت به خستگی مناسب است.

نتایج آزمون‌های DSC و XRD نشان‌دهنده ساختارهای پیچیده چند فازی است. لازم به ذکر است، حین عملیات حرارتی و سرمایش بعدی، آلیاژ در سیکل سرمایش آزمون DSC قرار می‌گیرد و بعد تا دمای اتاق می‌تواند بر اساس سیکل گرمایش عمل کند. دمای اتاق برای تمام ابزارهای مورد مطالعه بیش از دمای شروع استحاله مارتنزیتی (M_s) و کمتر از دمای شروع استحاله آستنیتی (A_f) است. با توجه به نتایج به

نظر می‌رسد ریزساختار در دمای اتاق پس از عملیات حرارتی حاوی فاز R و آستنیت باشد. آنالیز ریزساختاری به کمک پراش پرتو ایکس مؤید این مطلب است. نتایج آزمون‌های DSC و XRD تأیید می‌کند که ابزارها دارای ساختارهای چند فازی هستند. به‌ویژه، ابزار Edgeendo بالاترین دمای پایان استحاله R را در سیکل سرمایش نشان می‌دهد که نشان‌دهنده درصد بالای فاز R در این ابزار است. دمای اتاق برای ابزارهای دیگر در سیکل سرمایش به گونه‌ای است که مقادیری فاز آستنیت نیز وجود خواهد داشت. با توجه به کارکرد ابزار در دهان و با دمای حدودی ۳۷ درجه سانتی‌گراد، می‌توان فاز غالب در ابزارها را با دنبال کردن سیکل گرمایش پیش بینی کرد. توجه به این نکته ضروری است که این نتایج تحت شرایط کنترل شده با نرخ سرمایش و گرمایش ثابت ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه به دست آمده است. بنابراین، انتظار می‌رود با توجه به تاریخچه فرآوری ابزارها، اندکی انحراف از دماهای مندرج در جدول ۱ وجود داشته باشد. بررسی پسماند حرارتی (Hysteresis) از نتایج نشان می‌دهد که ابزار Edgeendo هیستریزس کمتری دارد. به طور کلی، در ابزارهای چرخشی، هیستریزس‌های کوچک‌تر به عنوان ویژگی مطلوب شناخته می‌شوند، زیرا این ویژگی نشان‌دهنده ثبات و دقت بالاتر در عملکرد ابزار است (۱۴). شناسایی فازها در نمونه‌ها با استفاده از پراش اشعه ایکس نشان‌دهنده وجود دو فاز اصلی، شامل آستنیت با دمای بالا و مارتنزیت با دمای پایین، به همراه یک فاز میانی R است (شکل ۵ و جدول ۲). همچنین، عملیات حرارتی می‌تواند پایداری این فازها را در دمای محیط حفظ کند (۲۸). نتایج آزمون‌های DSC و XRD نشان‌دهنده حضور ساختارهای پیچیده چندفازی در هر سه فایل بود و هم‌پوشانی خوبی بین آن‌ها مشاهده شد.

شکل ۵ و جدول ۳ نتایج آزمون حافظه داری برای نمونه‌های Denco، Edgeendo و Eighteenth در شرایط مشابه آزمون را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن نتایج DSC می‌توان انتظار داشت که در دمای انتخابی برای آزمون حافظه داری (۷۰ درجه سانتی‌گراد)، استحاله کامل فاز آستنیت حاصل شود و بازیابی کرنشی به صورت کامل به دست آید. لازم به ذکر است که میزان بازیابی با باربرداری معیاری از میزان حضور فاز آستنیت و میزان بازیابی با حرارت معیاری از میزان حضور فازهای مارتنزیتی B19 و R است. همچنین، بروز تغییر شکل دائمی گواه بروز لغزش و استحکام پایین آلیاژ است. اساساً از اهداف اصلی عملیات

ترمو مکانیکی در آلیاژهای نیکل - تیتانیوم افزایش استحکام جهت اجتناب از بروز لغزش به عنوان یک تغییر شکل برگشت ناپذیر است تا بتوان از مزیت‌های حافظه داری و سوپرالاستیسیته آلیاژ بهره برد (۲۹،۳۰). با توجه به نتایج XRD و DSC در تمام ابزارها، فاز پایدار فاز R به همراه آستنیت و مقادیر اندکی فاز مارتنزیت است، بنابراین، انتظار می‌رود ترکیبی از خواص حافظه داری و سوپرالاستیسیته در ابزارها مشاهده شود که نتایج به دست آمده از آزمون خمش این ادعا را تأیید می‌کند. تفاوت در رفتار مکانیکی این سه ابزار می‌تواند نشأت گرفته از ترکیب شیمیایی متفاوت، تفاوت در تاریخچه عملیات ترمو مکانیکی و همچنین تفاوت در هندسه آن‌ها باشد. نتایج آزمون‌های مختلف صورت گرفته در این پژوهش، به خوبی این تفاوت‌ها را نشان می‌دهد. نتایج گواه آن است که ابزار Edgeendo بهترین عملکرد را از منظر حافظه داری از خود نشان می‌دهد. درصد بالاتر فاز مارتنزیت و R در این آلیاژ می‌تواند علت این امر باشد. در الگوهای XRD درصد فاز R در دو ابزار Edgeendo و Denco بیشتر از Eighteenth است. یکی از ویژگی‌های وجود فاز R، مقاومت به خستگی بیشتر است. درصد بالاتر فاز مارتنزیتی در آلیاژ نیکل - تیتانیوم نیز باعث افزایش شکل پذیری و متعاقباً مقاومت بیشتر در برابر خستگی کم چرخه خواهد شد. علاوه بر این، استحاله فازی مارتنزیتی می‌تواند به اتلاف متفاوت انرژی مورد نیاز برای تشکیل ترک و یا انتشار در طول آزمون خستگی چرخه‌ای کمک کند (۳۱). نتایج ریزسختی سنجی گواه آن است که سختی ابزارها نزدیک به یکدیگر است. لازم به ذکر است سختی فاز آستنیت بیش از فاز مارتنزیت و R است (۱۱). بنابراین، انتظار می‌رود ابزار با سختی کمتر حاوی فاز آستنیت کمتری باشد. البته توجه به این نکته ضروری است که تاریخچه عملیات ترمو مکانیکی نیز نقش مهمی در میزان سختی این آلیاژها ایفا می‌کند. مطابق نتایج شکست نگاری، سطوح شکست ابزارها به وضوح دارای ویژگی‌های شکست خستگی شامل مناطق جوانه زنی ترک (تشکیل ترک اولیه)، رشد ترک (دارای مؤلفه‌های شکست ترد) و نهایتاً ناحیه شکست نهایی (دارای مؤلفه‌های شکست نرم) است. خطوط خستگی (Striation marks) که مشخصه مرحله دوم رشد ترک خستگی است، در سطح شکست نمونه‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود. ریزحفره‌ها (Dimples) در سطح مقطع‌های شکسته شده همه ابزارهای ارزیابی شده مشاهده شد. ریزحفره‌ها در قسمت‌های مرکزی ابزار و در

مرحله نهایی شکست مشاهده شدند (۲۵). با توجه به نوع بارگذاری حین آزمون خستگی که از نوع خمشی و با تمرکز تنش و سطوح تنش بالا است، وجود چندین نقطه برای جوانه زنی ترک و ناحیه شکست نهایی در مرکز دور از انتظار نیست. رگه‌هایی در سطح شکست که محل برخورد ترک‌های پیش رونده است و از نقاط مختلفی شروع شدند، نیز در سطوح شکست قابل رؤیت است. ریز حفره‌های کشیده در مقاطع ابزار نشان می‌دهد که نیروهای پارگی و برشی مسئول شکست در مرحله نهایی است. نتایج حاصل از آزمون حافظه داری و سختی‌سنجی نیز هم راستا با نتایج آزمون مقاومت به خستگی ابزارها است. به این صورت که دو ابزار Edgeendo و Denco حافظه داری مطلوب‌تر و سختی کمتری نسبت به ابزار Eighteenth از خود نشان داده‌اند. به نظر می‌رسد ابزار Eighteenth با درصد فاز آستنیت بیشتر و سختی بالاتر، رشد ترک سریع‌تری را نیز به همراه داشته است. شکست نگاری ابزارها گواه آن است که مکانیزم شکست ابزارها یکسان است. با این حال، تفاوت در محل و تعداد شروع ترک خستگی و رشد آن مسئول بروز رفتار متفاوت در میان ابزارهای موجود است.

جدول ۵ مقایسه‌ای را از مقادیر به دست آمده از تعداد چرخه‌های منتهی به شکست (NCF) نمونه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر با نتایج به دست آمده از سایر مطالعات را نشان می‌دهد (۳۲،۳۳). توجه به این نکته ضروری است که طراحی فایل و شرایط آزمون اثر قابل توجهی بر رفتار خستگی دارند. لذا امکان مقایسه دقیق تحت شرایط آزمون یا طراحی متفاوت دشوار است.

هدف این مطالعه بررسی ارتباط بین استحاله فازی و خواص مکانیکی به ویژه خستگی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که درصد بالای فاز R با افزایش سختی و مقاومت به خستگی مرتبط است. به ویژه، ابزار Edgeendo با درصد بالاتر فاز R و مشخصات سطحی و متالورژیکی بهبود یافته، عملکرد بهتری در آزمون‌های خستگی و دیگر خواص از خود نشان داد. در نتیجه، بر اساس نتایج تحلیلی، ابزار Edgeendo برتر از بقیه ابزارها است، زیرا دارای مقاومت به خستگی بالاتر و سختی کمتر (اما در محدوده قابل قبول) است. در فاصله خیلی کم فایل Denco قرار می‌گیرد که خواص مشابه Edgeendo ارائه داد. بررسی‌ها حاکی از آن است که فایل Eighteenth در مقایسه با Denco و Edgeendo دارای مقاومت به خستگی و کیفیت سطحی کمتری بود،

جدول ۵- تعداد چرخه تا شکست تعدادی از ابزار چرخشی ساخته شده از آلیاژ نیکل- تیتانیوم

ابزار چرخشی	تعداد چرخه تا شکست (NCF)	زاویه کانال	سرعت چرخش (rpm)	مرجع
AF Rotary	۶۰۵	۹۰°	۵۰۰	(۳۴)
WaveOne MT	۵۵۰	۴۵°	۳۰۰	(۳۵)
ER	۸۶۱	۹۰°	۵۰۰	(۳۶)
Reciproc Convén	۸۴۴	۶۰°	۳۰۰	(۳۷)
Protaper Gold	۷۳۹	۶۰°	۳۰۰	(۳۷)
TRUshape	۷۶۸	۶۰°	۳۰۰	(۳۷)
Mani silk	۶۲۶	۴۵°	۵۰۰	(۳۸)
R25(Group A4)	۸۰۶	۶۰°	۳۰۰	(۳۹)
i3G-f	۳۷۹	۶۰°	۳۵۰	(۳۲)
MiniScope	۴۵۴	۶۰°	۳۵۰	(۴۰)
Neoendo Flex	۴۹۰	۶۰°	۴۰۰	(۴۱)
Denco	۵۲۸	۴۵°	۳۰۰	پژوهش حاضر
Edgeendo	۵۱۳	۴۵°	۳۰۰	
Eighteenth	۲۹۷	۴۵°	۳۰۰	

در ابزار چرخشی Edgeendo دارد. حضور کسر حجمی بالای فازهای مارتنزیتی در این ابزار چرخشی، سختی پایین تر را سبب شده است.

- همه ابزارهای چرخشی مورد مطالعه خواص حافظه داری و سوپرالاستیسیته را نشان می دهند، اما Edgeendo دارای بالاترین میزان حافظه داری است. رفتار خستگی نشان دهنده بروز خستگی کم چرخه است که به دلیل کسر حجمی پایین رسوبات ثانویه و درصد بالای حافظه داری در Edgeendo و Denco است.

- ابزار Edgeendo به دلیل ویژگی های متالورژیکی بهبود یافته، به ویژه درصد بالای فاز R، به عنوان ابزاری با عملکرد برتر در انتخاب ابزارهای بالینی توصیه می شود.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل پایان نامه دانشجویی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس به شماره ۲۳۰۸۷۰۰۷ می باشد. همچنین این پژوهش با همکاری و حمایت شرکت صنایع پزشکی هامرز به انجام رسیده است.

که به فازهای موجود در این ابزار در نتیجه عملیات حرارتی برمی گردد و می تواند بر روی کارایی آن در شرایط بالینی تأثیرگذار باشد. این یافته ها به دندانپزشکان کمک می کند تا انتخاب بهتری در ابزارهای مورد استفاده خود داشته باشند و در نتیجه کارایی و ایمنی درمان های ریشه دندان را افزایش دهند.

در این پژوهش ریزساختار، رفتار استحاله، خواص مکانیکی و رفتار خستگی ابزارهای چرخشی با نام های تجاری Denco، Edgeendo و Eighteenth مورد مطالعه قرار گرفت. دستاوردهای این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آورده شده است:

- با ارزیابی توپوگرافی سطح، ابزار Edgeendo به خاطر کیفیت سطحی بالاتر و سطح صاف تر، از مقاومت به خستگی بهتری نسبت به ابزارهای دیگر برخوردار است. در مقابل، ابزار Eighteenth با کیفیت سطحی پایین تر و خطوط ماشین کاری واضح، عمر خستگی کمتری دارد. - نتایج متالوگرافی نشان داد که اندازه و کسر حجمی فاز ثانویه اکسیدی در هر سه ابزار کمتر از ۵ درصد و مشابه است. آنالیز کالریمتری روبشی افتراقی به همراه پراش پرتو ایکس دلالت بر میزان بالای فاز R

References:

- 1- Gavini G, Santos Md, Caldeira CL, Machado ME dL, Freire LG, Iglecias EF, et al. Nickel–titanium instruments in endodontics: a concise review of the state of the art. *Brazilian Oral Research*. 2018;32:e67.
- 2- Jovanović-Medojević M, Zdravković A, Medojević M, Stratimirović Đ. Evaluation of surface characteristics of new rotary nickel-titanium instruments-SEM-EDS analysis. *Stomatoloski glasnik Srbije*. 2021;68(1):19-30.
- 3- Civjan S, Huget EF, DeSimon LB. Potential applications of certain nickel-titanium (nitinol) alloys. *J Dent Res*. 1975;54(1):89-96.
- 4- Haapasalo M, Shen Y. Evolution of nickel–titanium instruments: from past to future. *Endodontic topics*. 2013;29(1):3-17.
- 5- Thompson S. An overview of nickel–titanium alloys used in dentistry. *I Int End J*. 2000;33(4):297-310.
- 6- Hamdy TM, Galal M, Ismail AG, Abdelraouf RM. Evaluation of flexibility, microstructure and elemental analysis of some contemporary nickel-titanium rotary instruments. *Open Access Maced J Med Sci*. 2019;7(21):3647.
- 7- Srivastava S, Alghadouni M, Alotheem H. Current strategies in metallurgical advances of rotary NiTi instruments: A review. *J Dent Health Oral Disord Ther*. 2018;9(1):00333.
- 8- Tabassum S, Zafar K, Umer F. Nickel-titanium rotary file systems: What's new? *Eur Endod J*. 2019;4(3):111.
- 9- Gambarini G, Cicconetti A, Di Nardo D, Miccoli G, Zanza A, Testarelli L, et al. Influence of different heat treatments on torsional and cyclic fatigue resistance of nickel–titanium rotary files: a comparative study. *Applied Sciences*. 2020;10(16):5604.
- 10- Keerthi M, Sridevi E, Sankar AS, Nagesh B, Pranitha K, Sankar KS. Evaluation of the stress generated during biomechanical preparation with nickel–titanium rotary endodontic file using finite element analysis. *Saudi Endod J*. 2024;14(1):63-8.
- 11- Zhou H, Peng B, Zheng YF. An overview of the mechanical properties of nickel–titanium endodontic instruments. *Endodontic topics*. 2013;29(1):42-54.
- 12- Zhang J, Wang S, Hu P, Zhang Y, Ding H, Huang Y. A novel strategy for fabricating phase transforming NiTi shape memory alloy via multiple processes of severe plastic deformation. *Materials Letters*. 2024;355:135439.
- 13- Bellizzi R, Cruse WP. A historic review of endodontics, 1689-1963, part 3. *J Endodo*. 1980;6(5): 576-80.
- 14- Živković S, Nešković J, Popović Bajić M, Jovanović-Medojević M. Nickel-titanium files in endodontics: development, improvement, and modifications of nickel-titanium alloy. *Vojnosanitetski preglod*. 2022;80(00): 57-57.
- 15- Shim K-S, Oh S, Kum K, Kim Y-C, Jee K-K, Chang SW. Mechanical and metallurgical properties of various nickel-titanium rotary instruments. *Biomed Res Int*. 2017;2017:4528601.
- 16- Jovanović-Medojević M, Dragičević A, Milanović I, Matija L, Živković S. Opto-magnetic imaging spectroscopy in analyzing rotary NiTi endodontic instruments. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2023;141:105789.
- 17- Ounsi HF, Nassif W, Grandini S, Salameh Z, Neelakantan P, Anil S. Evolution of Nickel-titanium Alloys in Endodontics. *J Contemp Dent Pract*. 2017;18(11):1090-6.
- 18- Lin JH-H, Karabucak B, Lee S-M. Effect of sodium hypochlorite on conventional and heat-treated nickel-titanium endodontic rotary instruments—an in vitro study. *J Dent Sci*. 2021;16(2):738-43.
- 19- Palekar A, Vajpayee A, Biradar B. Recent advances in metallurgy and design of rotary endodontic instruments: a review. *Int J Dent Mater*. 2020;2(2):52-9.
- 20- Shen Y, Zhou H-m, Zheng Y-f, Campbell L, Peng B, Haapasalo M. Metallurgical characterization of controlled memory wire nickel-titanium rotary instruments. *J Endod*. 2011;37(11):1566-71.
- 21- Chen X, Ophus C, Song C, Ciston J, Das S, Song Y, et al. Origins of the transformability of Nickel-Titanium shape memory alloys. *Physical Review Materials*. 2020;4(10):103611.
- 22- Cullity BD, Smoluchowski R. Elements of X-ray Diffraction. *Physics Today*. 1957;10(3):50.
- 23- Yang Q, Wang S, Chen J, Zhou T, Peng H, Wen Y. Strong heating rate-dependent deterioration of shape memory effect in up/step quenched Cu-based alloys: A ductile CuAlMn alloy as an example. *Acta Materialia*. 2016;111:348-56.
- 24- Almohareb RA, Barakat RM, Algahtani FN, Alkadi MF. Cyclic fatigue resistance of EdgeTaper Platinum, Protaper Gold, and TruNatomy Prime rotary files before and after autoclave sterilization. *Peer J*. 2023;11:e14656.
- 25- Zanza A, Russo P, Di Matteo P, Reda R, Di Nardo D, Gambarini G, et al. Mechanical properties and metallurgical features of two similar endodontic rotary instruments with different heat treatments (FireWire™ and Gold). *Science progress*. 2022;105(2): 00368504221103763.
- 26- Samal S, Zeman J, Kopeček J, Šittner P. Thermal plasma spraying of NiTi powder for thick coating of shape memory alloy. *J Alloys and Compounds*. 2024;984:173962.
- 27- Liu Y, Blanc M, Tan G, Kim J, Miyazaki S. Effect of ageing on the transformation behaviour of Ti–49.5 at.% Ni. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;438: 617-21.
- 28- Uchil J, Fernandes FB, Mahesh K. X-ray diffraction study of the phase transformations in NiTi shape memory alloy. *Materials characterization*. 2007;58(3):243-8.
- 29- Mukunda S. Influence of Heat-Treatment on Structure and Properties of Nickel Titanium Alloy: National

Institute of Technology Karnataka, Surathkal; 2021.

30- Atli KC, Karaman I, Noebe RD, Gaydos D. The effect of training on two-way shape memory effect of binary NiTi and NiTi based ternary high temperature shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2013;560:653-66.

31- Alcalde M, Duarte MAH, Silva PAA, Calefi PHS, Silva E, Duque J, et al. Mechanical properties of ProTaper gold, EdgeTaper platinum, flex gold and pro-T rotary systems. *European Endodontic J*. 2020;5(3):205.

32- Sandino-Lacayo KL, Vega-González M, Soza-Bolaños AI, Herrera-Alaniz LC, Al Omari T, Domínguez-Pérez RA. Cyclic fatigue resistance of two pediatric rotary files manufactured with different heat treatments: an in-vitro study. *J Clin Pediatr Dent*. 2024;48(5):102-9.

33- Diaconu CT, Diaconu AE, Tuculina MJ, Mihai LL, Gheorghita M, Gheorghita LM, et al. Assessment of the Cyclic Fatigue Performance of the Novel Protaper Ultimate File System Used in Different Kinematics: An In Vitro Study. *J Func Biomat*. 2024;15(4):85.

34- Seracchiani M, Donfrancesco O, Relucenti M, Reda R, Zanza A, Gambarini G, Testarelli. In vitro evaluation of a recently developed rotary file: AF rotary. *Brazilian Dent Sci*. 2021;24(4).

35- Kim E, Ha J-H, Dorn SO, Shen Y, Kim H-C, Kwak SW. Effect of heat treatment on mechanical properties of

nickel-titanium instruments. *J Endod*. 2024;50(2):213-9.

36- Hong J, Kwak SW, Ha J-H, Sigurdsson A, Shen Y, Kim H-C. Effect of Different Heat Treatments and Surface Treatments on the Mechanical Properties of Nickel-Titanium Rotary Files. *Metals*. 2023;13(10):1769.

37- Aranguren J, Oliveros-Porras F, Ramírez-Muñoz A, Pérez I, Salamanca-Ramos M, Aazzouzi-Raiss K, Pérez AR. Comparative Analysis of NiTi Instruments with Different Alloy Treatments. *Materials*. 2024;17(19):4817.

38- Geeth D, Arunajatesan S, Mensudar R, Rajachandrasekaran Y, Vasantharajan J. Comparison of cyclic fatigue resistance of three different rotary NiTi systems—An in-vitro study. *SRM J Res in Dent Sci*. 2022;13(1):13-6.

39- Elozairy AM, Mohamed DAA, Sharaan ME. Effect of different kinematics on the cyclic fatigue resistance of Reciproc Blue file in different canal curvatures. *Dent Sci Updates*. 2024;5(1):151-66.

40- Surme K, Akman H, Özkan HB, Er K. Comparison of cyclic fatigue resistance of four pediatric rotary file systems at body temperature: an in vitro study. *BMC Oral Health*. 2024;24(1):992.

41- Vashisht A, Dave N, Singh N. Comparative Analysis of Cyclic Fatigue Resistance of NeoEndo Flex Vs Protaper Gold Rotary Files: An In-Vitro Study. *SVOA Dentistry*. 2024;5:3,73-7.