

مشخصه‌یابی و ارزیابی ریزساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی آمالگام‌های دندانی رایج در کشور

زهرا محمدی^{۱*}، عبدالرضا شیخ‌مهدی مسگر^{۱*}، سعیدرضا رحمدار^۲، الهام فرهنگی^۳

^۱ استادیار بیومتریال، آزمایشگاه بیوسرامیک و ایمپلنت، گروه مهندسی علوم زیستی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، ایران

^۲ پزشک، اوزان، بلوار کریمخان زند، خیابان نجات‌الهی، شماره ۲۷۷، تهران، ایران

^۳ دکتری شیمی، اوزان، بلوار کریمخان زند، خیابان نجات‌الهی، شماره ۲۷۷، تهران، ایران

تاریخ ارائه مقاله: ۹۷/۹/۳ - تاریخ پذیرش: ۹۸/۱/۲۶

Microstructural Characterization and Physical and Mechanical Evaluation of Relevant Amalgams in Iran Dental Materials Market

Zahra Mohammadi^{1*}, Abdorreza S. Mesgar^{1*}, Saeedreza Rahmdar², Elham Farhangi³

¹ Assistant Professor of Biomaterials, Bioceramics and Implants Laboratory, Department of Life Sciences Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

² MD, OWZAN, Karimkhanzand Blvd., Nejatollahi St., Tehran, Iran

³ PhD in chemistry, OWZAN, Karimkhanzand Blvd., Nejatollahi St., Tehran, Iran

Received: 24 November 2018; Accepted: 15 April 2019

Introduction: Dental amalgam is considered as the most tolerable restorative dental material due to its proper physical and mechanical properties, cost-effectiveness, and long term clinical performance. In this study, the physical and mechanical properties of nine relevant amalgams in Iranian dental material market were investigated based on ISO 24234: 2015. Moreover, the morphological characterization of dental amalgam alloy was evaluated using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM).

Materials and Methods: An amalgamator was utilized to mix the amalgam alloy powder with mercury. In addition, the investigation of the microstructure of dental amalgam was conducted using FE-SEM equipped with an Energy Dispersive Spectroscopy system to analyze the composition of the elements. The required samples for the evaluation of compressive strength, creep, and dimensional changes during hardening were prepared using the recommended standard template based on the suggested program. The data were analyzed using one-way ANOVA and Tukey's test. *P*-value less than 0.05 was considered statistically significant.

Results: The evaluation of morphological characteristics of amalgams showed that amalgams, namely "GK-110" and "110 Plus" were prepared from lath cut particles. In addition, amalgams, such as "Cinasilver", "Solaloy", and "World Work" were composed of spheroid-like particles. However, alloys, including ANA 2000, Contour, SDI GS-80, and Cinalux showed mixed morphologies of spherical (or spheroid-like) and lath cut particles. Regarding the mixed alloys, "Contour Regular Kerr" and "SDI GS-80 Regular Set" contained more spherical particles. However, higher levels of lath cut particles were observed in "ANA 2000" and "Cinalux". The homogenous and fine-grained microstructures were observed in spherical and spheroid-like particles. All studied dental amalgams comply with the requirements for creep according to the standard ISO 24234: 2015. The results of one-way ANOVA revealed that one-hour compressive strength of Cinasilver amalgam was significantly higher than that of the other amalgams ($P < 0.05$). According to Tukey Post Hoc analysis, there was no significant difference regarding one-hour compressive strength in Contour, Cinalux, and Cinasilver ($P > 0.05$). Out of all studied amalgams, SDI gs-80 showed the lowest coefficient of variation regarding compressive strength. In terms of the number of specimens with higher strength more than the minimum strength requirement of the standard, Cinasilver amalgam completely met the standard requirements for one hour and one day. Except for 110 Plus amalgam, the other amalgams met the requirement regarding the dimensional changes during the hardening within the specified standard range.

Conclusion: The results indicated that amalgam "Cinasilver" met the standard requirements of ISO 24234: 2015 regarding creep, dimensional changes, and compressive strength in one hour and a day. However, amalgams, namely Cinalux, Contour, and SDI gs-80 may be considered as appropriate amalgams.

Key words: Alloy morphology, Compressive strength, Creep, Dental amalgam, Dimensional changes during hardening.

*Corresponding Author: mohamadiz@ut.ac.ir, asmesgar@ut.ac.ir

J Mash Dent Sch 2019; 43(2): 155-66.

چکیده

مقدمه: آمالگام دندان به دلیل برخورداری از خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، مقرون به صرفه بودن و عملکرد بلندمدت بالینی می‌تواند به عنوان بادوام‌ترین مواد دندان ترمیمی در نظر گرفته شود. در این پژوهش، خواص فیزیکی و مکانیکی ۹ آمالگام دندان رایج در بازار مواد دندان کشور بر اساس استاندارد جدید ISO 24234: 2015 ارزیابی شده است. افزون بر این، مورفولوژی آلیاژ آنها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی (FE-SEM) مطالعه گردیده است.

مواد و روش‌ها: اختلاط پودر آلیاژ و جیوه در همه آمالگام‌ها به کمک یک نوع آمالگاماتور صورت پذیرفت. ارزیابی ریزساختار آمالگام توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی-گسیل میدانی (FE-SEM) همراه با EDS به منظور بررسی ترکیب عناصر انجام شد. نمونه‌های لازم برای انجام آزمون‌های استحکام فشاری، خزش و تغییرات ابعادی حین سفت شدن به کمک قالب توصیه شده در استاندارد بر مبنای برنامه توصیه شده تهیه گردید. آنالیز واریانس یک طرفه و آزمون توکی در سطح ۰/۰۵ در تحلیل داده‌ها استفاده شد.

یافته‌ها: ارزیابی مورفولوژی آلیاژها نشان داد آمالگام‌های "GK-110" و "110 Plus" کاملاً از ذرات تراشه‌ای و آمالگام‌های Cinasilver، Solaloy و World Work از ذرات شبه‌کروی تشکیل شده بودند. از طرف دیگر، آلیاژهای ANA 2000، Contour، SDI GS-80 و Cinalux از مورفولوژی مخلوط کروی (شبه‌کروی) / تراشه‌ای برخوردار بودند به طوری که به صورت مقایسه‌ای، در دو نوع Contour و SDI GS-80، ذرات کروی و در آمالگام‌های ANA 2000 و Cinalux ذرات تراشه‌ای، بیشتر مشاهده شد. ذرات کروی و شبه‌کروی از ریزساختار ریزدانه برخوردار بودند. درصد خزش همه آمالگام‌های بررسی شده از الزامات استاندارد ایزو تبعیت می‌کرد. نتایج آزمون آنالیز واریانس یک سویه نشان داد استحکام فشاری یک ساعته آمالگام Cinasilver به طور معناداری بیشتر از دیگر آمالگام‌ها بود ($P < 0/05$). بر اساس نتایج آزمون توکی اختلاف معناداری بین استحکام فشاری یک روزه Cinalux، Contour و Cinalux مشاهده نشد ($P > 0/05$). کمترین ضریب تغییر استحکام فشاری در بین آمالگام‌های مورد بررسی به آمالگام SDI gs-80 تعلق داشت. از لحاظ تعداد نمونه‌های دارای استحکام بالاتر از حداقل مقدار الزام استاندارد در بین ۱۰ نمونه آزمون، فقط آمالگام Cinasilver به طور کامل شرایط لازم را برای استحکام فشاری یک ساعته و یک روزه برآورده نمود. به غیر از 110 Plus، بقیه آمالگام‌ها دارای تغییرات ابعادی در حین سفت شدن مطابق با محدوده توصیه شده در استاندارد بودند.

نتیجه‌گیری: از بین آمالگام‌های مورد بررسی آمالگام Cinasilver الزامات استاندارد ISO 24234: 2015 را از لحاظ استحکام فشاری یک ساعته و یک روزه، تغییرات ابعادی و خزش به طور کامل برآورده نمود. هر چند که آمالگام‌های Cinalux، Contour و SDI gs-80 را می‌توان جزو آمالگام‌های پذیرفتنی پس از Cinasilver معرفی کرد.

کلمات کلیدی: آمالگام دندان، مورفولوژی آلیاژ، استحکام فشاری، خزش، تغییرات ابعادی حین سفت شدن.
مجله دانشکده دندانپزشکی مشهد / سال ۱۳۹۸ دوره ۴۳ / شماره ۲: ۶۶-۱۵۵.

مقدمه

دلیل برخورداری از ویژگی مومسانی می‌تواند حفره آماده-شده دندان را به طرز مناسبی پر نماید. آمالگام دندان از جمله مواد دندان به شمار می‌آید که از قدمت و مقبولیت بالایی برخوردار بوده و پژوهش‌های گسترده مهندسی و کلینیکی را پشت سر گذاشته است و امروزه همچنان به عنوان یک پرکننده با استحکام بالا و ارزان قیمت مورد توجه است.

آلیاژهای آمالگام دندان به شیوه‌های گوناگونی دسته‌بندی شده‌اند. در مرسوم‌ترین روش دسته‌بندی، این آلیاژها به دو گروه؛ آلیاژهای کم‌مس (کمتر از ۶ درصد وزنی) و پرمس (بیشتر از ۶ درصد وزنی) تقسیم‌بندی شده است.^(۳)

آمالگام دندان از جمله مواد ترمیمی دندان به شمار می‌رود که از نقطه نظر کاربرد در دندانپزشکی از قدمت قابل توجهی برخوردار بوده و با وجود حضور مواد رقیب در این حوزه کاربردی، همچنان جایگاه خود را در بازار حفظ نموده است.^(۱) این ماده، آلیاژی متشکل از جیوه به همراه پودر آلیاژ آمالگام است. پودر آلیاژ آمالگام از سه جزء اصلی؛ نقره (۶۰-۴۰ درصد)، قلع (۳۰-۲۵ درصد) و مس (۳۰-۱۵ درصد) تشکیل شده است.^(۲) حاصل اختلاط جیوه و پودر آلیاژ، در حقیقت کامپوزیتی چندفازی است که به-

پذیرفت. استحکام فشاری یک‌ساعته و یک‌روزه و همچنین، تغییرات ابعادی و خزش یک‌هفته‌ای آمالگام‌ها نیز براساس استاندارد ISO 24234: 2015 اندازه‌گیری گردید.^(۴)

اختلاط پودر آلیاژ و جیوه توسط آمالگاماتور باید در شرایط مناسب صورت پذیرد. تولیدکننده‌ها در برشور خود شرایط لازم همچون نوع آمالگاماتور و در نتیجه، فرکانس آن و همچنین زمان اختلاط را ارائه می‌نمایند. تمام آمالگام‌های مورد پژوهش از نوع کپسولی بود. از آنجایی که در این مطالعه از آمالگاماتور کارخانه شهید دکتر فقیهی نوع: RPM 4500 استفاده شد از این‌رو، برای یافتن زمان مناسب یعنی پیدا کردن زمان مطلوب اختلاط توسط این آمالگاماتور به- منظور دستیابی به مخلوطی همگن با توام مناسب جهت پر کردن حفره دندانی (در اینجا هدف پر کردن قالب آماده- سازی نمونه است). بر اساس ارقام توصیه‌شده شرکت‌های تولیدکننده، آزمایش‌هایی توسط یک اپراتور معین و با تجربه صورت گرفت و زمان مناسب برای هر آمالگام به دست آمد.

آلیاژهای پرمس که از دهه ۱۹۶۰ میلادی از نقطه‌نظر کاربردی مورد توجه بوده‌اند معمولاً به دو گروه تک‌جزئی و مخلوط دسته‌بندی می‌شوند. این نوع دسته‌بندی مبتنی بر مورفولوژی پودر آلیاژ آمالگام صورت گرفته است. آلیاژهای پرمس بر اساس مخلوط شکل‌های مختلف پودر به دو دسته: آلیاژهای مخلوط و آمالگام‌های تک‌جزئی دسته‌بندی می‌شوند.

هدف از انجام این تحقیق، مشخص نمودن مورفولوژی ذرات پودر آلیاژ و ارزیابی استحکام فشاری، خزش و تغییرات ابعادی چندین محصول تجاری رایج موجود در بازار کشور بر اساس استاندارد جدید ایزو ISO 24234: 2015 بود.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، ۹ برند رایج آمالگام دندانی انتخاب شد (جدول ۱). مورفولوژی پودر آلیاژ آمالگام توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مجهز به EDS برای ارزیابی نیمه‌کمی اجزاء (FE-SEM; Tescan) انجام

جدول ۱: آمالگام‌های دندانی مورد استفاده در این تحقیق به همراه زمان مناسب اختلاط توسط آمالگاماتور FD-5000 و ترکیب شیمیایی پودرهای آلیاژ بر حسب درصد وزنی سه عنصر اصلی که توسط تولیدکننده در برشور محصول خود ادعا کرده است.

برند آمالگام	تولیدکننده	زمان مناسب اختلاط (ثانیه) توسط آمالگاماتور FD-5000	Cu	Sn	Ag
110Plus	HANGZHOU YINYA NEW MATERIALS, China	۱۵	۲۵	۳۰	۴۵
ANA2000	Nordiska Dental, Sweden	۹	۲۶/۱	۳۰/۸	۴۳/۱
Contour	Kerr Corporation, USA	۱۰	۲۸	۳۱	۴۱
GK-110	AT & M Biomaterials Co, China	۱۴	۲۵	۳۲	۴۳
SDI GS-80	SDI limited, Australia	۹	۲۸/۷	۳۱/۳	۴۰
Cinalux	Shahid Faghihi Co, Iran	۱۳	۲۰	۳۱	۴۹
Cinasilver	Shahid Faghihi Co, Iran	۱۰	۱۴	۲۶	۶۰
Solaloy	Trent Dent, England	۱۵	۲۴	۳۱	۴۵
World Work	World Work Srl, Italy	۷	۲۵/۵	۳۰	۴۴/۵

سرعت تیغه دستگاه (crosshead speed) ۰/۵ mm/min مورد آزمون قرار گرفت. استحکام فشاری طبق رابطه ۱ به دست آمد:

$$\sigma = 4F/\pi d^2 \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن؛ F نیروی اعمالی به N، d قطر نمونه به mm و σ استحکام فشاری به MPa است.

پس از ارزیابی همسانی واریانس داده‌های استحکام فشاری، از آزمون آنالیز واریانس یک سویه (One-way ANOVA) جهت مقایسه آمالگام‌ها استفاده شد. به منظور مقایسه دو به دو محصولات از آزمون Tukey Post-Hoc استفاده شد.

جهت بررسی تغییرات ابعادی، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ایزو به روش قبل تهیه شد.^(۴) اعمال فشار در دو مرحله بر آمالگام صورت پذیرفت تا استوانه‌ای با ابعاد تعیین شده در استاندارد تهیه شود. سپس نمونه در دستگاه میکروکاتور (Johansson Mikrokator, Sweden) که در آن 37°C قرار داشت جایگذاری گردید. تغییرات طول نمونه، در حالی که در زیر دستگاه میکروکاتور در دمای 37°C واقع شده بود پس از مدت زمان‌های ۵ دقیقه و ۲۴ ساعت ثبت گردید. سپس تغییرات ابعادی از رابطه ۲ محاسبه شد:^(۴)

$$\frac{\Delta l_d}{l_d} \times 100 = \varepsilon_d (\%) \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن؛ Δl_d تغییرات ابعادی بین ۵ دقیقه و ۲۴ ساعت، l_d طول نمونه پس از ۲۴ ساعت و ε_d درصد تغییرات ابعادی است. آزمون تغییرات ابعادی برای هر برند بر اساس استاندارد ایزو ۵ دفعه تکرار شد. تغییرات ابعادی اندازه‌گیری شده باید در محدوده توصیه شده توسط استاندارد باشد. به طور خلاصه هنگامی که نمونه در زیر سوزن میکروکاتور قرار می‌گیرد به دلیل انبساط یا انقباض

آماده‌سازی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ISO 24234: 2015 انجام شد. بدین منظور از یک وسیله با مشخصات استاندارد برای پرس کردن آمالگام استفاده شد. همچنین بخش‌های مختلف آماده‌سازی نمونه باید در دوره‌های زمانی تعیین شده در استاندارد انجام شود. دستگاه مورد نظر که به صورت قالب خاصی طراحی شده و در این مطالعه مورد بهره‌برداری قرار گرفته در تصویر ۱ قابل مشاهده است.



تصویر ۱: قالب استفاده شده در تهیه نمونه‌های آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی بر اساس الزامات استاندارد ISO 24234: 2015

از دستگاه آزمون مکانیکی (SANTAM:STM-20, Tehran, Iran) به منظور اعمال فشار و انجام آزمون اندازه‌گیری استحکام فشاری استفاده شد. اعمال فشار توسط دستگاه بر سمبه قالب در دو مرحله بر اساس استاندارد وارد شد به طوری که، در هر دو مرحله فشار ۱۴MPa اعمال گردید. در مورد هر برند تعداد ۱۰ نمونه تحت آزمون قرار گرفت. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در دمای 37°C در دو بازه زمانی یک‌ساعت و ۲۴ ساعت در انکوباتور نگهداری شدند. پس از گذشت زمان‌های فوق، دو سطح فوقانی و تحتانی نمونه توسط کاغذ سمباده ۱۲۰۰ پرداخت شد و سپس توسط سوسپانسیون آلومینا پولیش گردید. نمونه آماده‌شده توسط دستگاه آزمون مکانیکی با

سه مورفولوژی؛ تراشه‌ای، تراشه‌ای/کروی (شبه‌کروی) و کروی / شبه‌کروی تشکیل شده‌اند. دو نمونه 110 Plus و GK-110 از ذرات صرفاً تراشه‌ای تشکیل یافته‌اند. در مقابل، آمالگام‌های Cinasilver، Solaloy و World Work دارای مورفولوژی تقریباً مشابه به صورت شبه‌کروی هستند. آلیاژهای ANA 2000، Contour، SDI GS-80 و Cinalux از مورفولوژی مخلوط کروی (شبه‌کروی) / تراشه‌ای تشکیل شده‌اند. همان‌طور که در تصویر ۲ مشاهده می‌شود در آمالگام‌های مخلوط، دو نوع Contour و SDI GS-80 دارای ذرات کروی بیشتر بوده و آمالگام‌های ANA 2000 و Cinalux از ذرات تراشه‌ای بیشتری (در مقایسه با نوع کروی یا شبه‌کروی) تشکیل شده‌اند. قطر ذرات کروی معمولاً کمتر از ۴۰ میکرون و طول ذرات تراشه‌ای تا ۱۴۰ میکرون بود. ذرات کروی و شبه‌کروی، ریزساختار بسیار ریزدانه و کاملاً هموزن از خود نشان دادند (تصویر ۳). ارزیابی ذرات به کمک EDS مؤید آن است که ذرات تراشه‌ای از دو فاز غنی از Ag-Sn (فاز روشن) و Cu-Sn (فاز تیره) تشکیل شده‌اند (تصویر ۴). چنین فازهایی در خصوص ذرات کروی یا شبه‌کروی هم وجود داشت هر چند که فازها به‌طور بسیار ریز در کنار هم قرار گرفته بودند. در شکل ۵ آنالیز MAP از ذرات آلیاژ آمالگام Cinasilver به عنوان نمونه نشان داده شده است. در این تصویر، توزیع عناصر Ag، Cu و Sn در ذرات شبه‌کروی مشاهده می‌شود.

طول نمونه دچار تغییر می‌گردد. طول نمونه با دقت $0.5 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد.

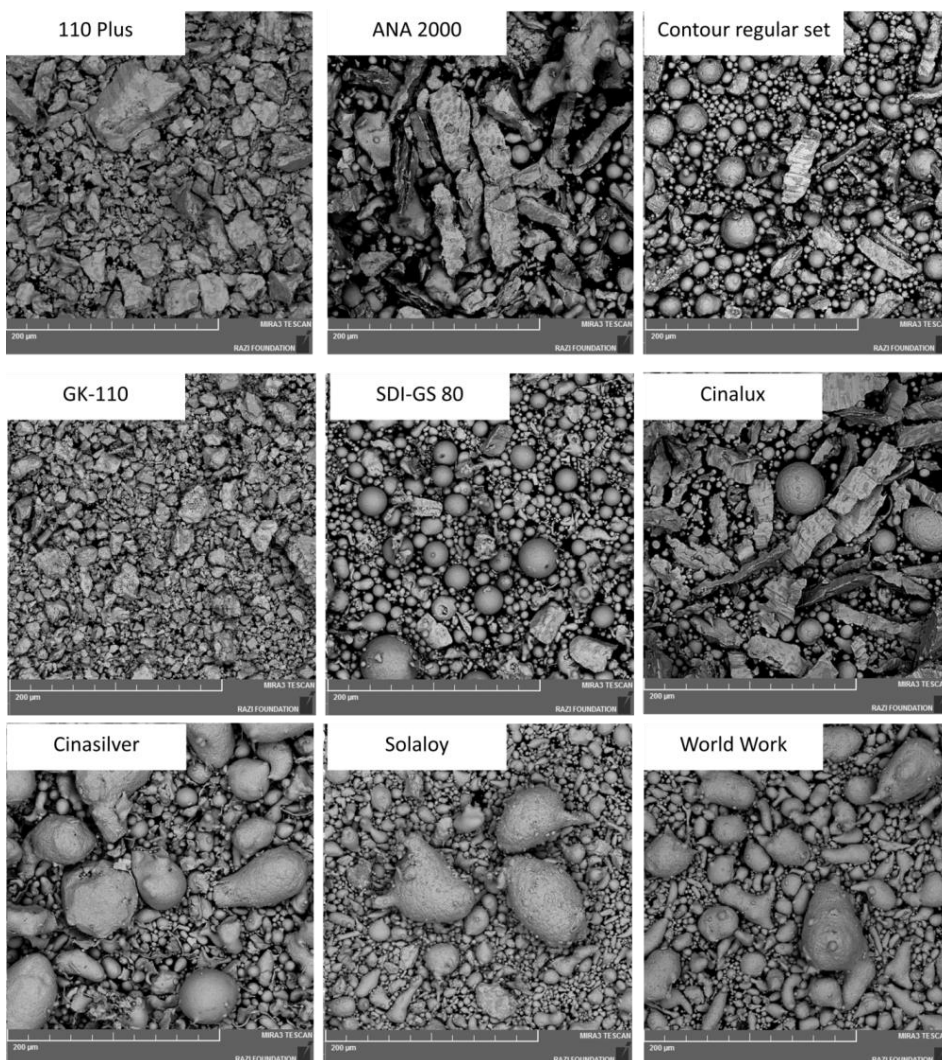
بر اساس استاندارد ایزو، نمونه‌های خزش همانند نمونه‌های استحکام تهیه شد.^(۴) سپس به مدت یک هفته در دمای 37°C قرار داده شد. پس از اندازه‌گیری طول، نمونه تحت تنش 36MPa به مدت یک ساعت قرار گرفت و طول نمونه اندازه‌گیری شد. بعد از آن، برای مدت زمان ۳ ساعت دیگر همین میزان تنش بر نمونه اعمال گردید و مجدداً طول آن ثبت شد. درصد کرنش خزش از رابطه ۳ به دست آمد^(۴):

$$\frac{\Delta l}{l_0} \times 100 = \varepsilon_c (\%) \quad (\text{رابطه ۳})$$

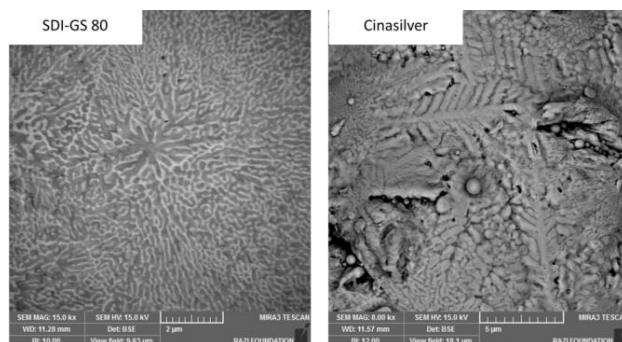
که در آن: Δl : تغییر طول نمونه بین یک ساعت و ۴ ساعت، l_0 طول اولیه نمونه و ε_c درصد کرنش خزش است. آزمون خزش برای هر نوع آمالگام سه بار تکرار شد. بر اساس استاندارد ایزو باید در هر سه دفعه، نتیجه آزمون الزامات درصد خزش را برآورده نماید. طول با دقت 0.1 mm اندازه‌گیری شد. داده‌ها به وسیله آزمون آنالیز واریانس یک طرفه و مقایسه‌های دو به دو، آزمون توکی انجام شد. سطح معنی داری 0.05 در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

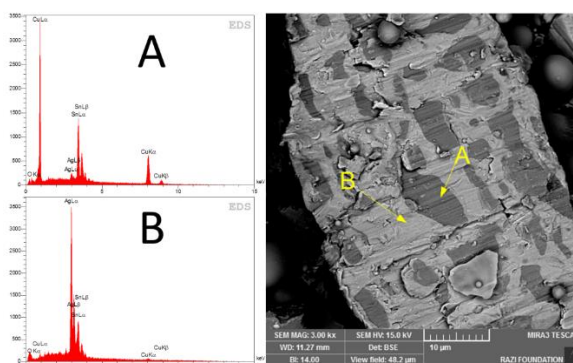
در جدول ۱، زمان مناسب به دست آمده جهت اختلاط هر یک از آمالگام‌ها توسط یک آمالگاماتور مشابه نشان داده شده است. در تصویر ۲، میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آلیاژهای مورد مطالعه قابل مشاهده است. ملاحظه می‌شود آمالگام‌های مورد بررسی از



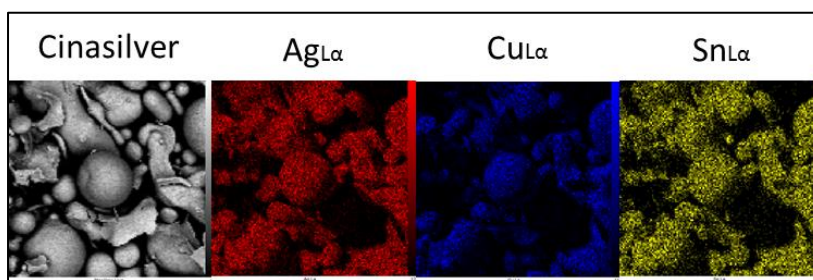
تصویر ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از ذرات آلیاژ آمالگام (بزرگنمایی همه تصاویر یکسان و پانصد برابر، $500\times$ است).



تصویر ۳: ریزساختار ریزدانه ذرات کروی آلیاژ آمالگام (SDI GS-80) و آلیاژ آمالگام شبه‌کروی (Cinasilver)



تصویر ۴: میکروگراف FE-SEM از ذره تراشهای آلیاژ آمالگام Cinalux به همراه طیف EDS از فازهای غنی از Sn-Cu و Ag-Sn



تصویر ۵: آنالیز MAP ذرات شبه کروی آلیاژ آمالگام Cinasilver و توزیع عناصر Ag، Cu و Sn

اختلاف آماری معناداری بین استحکام فشاری یک روزه Cinasilver با دیگر آمالگام‌ها وجود داشت. بیشترین استحکام فشاری یک روزه به آمالگام Cinasilver تعلق داشت. به علاوه اختلاف آماری معناداری بین استحکام فشاری یک روزه آمالگام‌های 110Plus، ANA 2000، GK-، ANA 110، Solaloy و World work مشاهده نشد. بیشترین استحکام فشاری یک روزه به آمالگام‌های Contour، Cinalux و Cinasilver تعلق داشت. اختلاف آماری معناداری بین این سه نمونه مشاهده نشد.

نتایج اندازه‌گیری استحکام فشاری پس از یک ساعت و یک روز در جدول ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در تمام آمالگام‌های مورد بررسی با گذشت زمان از یک ساعت به ۲۴ ساعت، متوسط استحکام فشاری با افزایش روبرو شده است (نتایج تحلیل آماری تغییرات استحکام با گذشت زمان و مقایسه آنها در مرجع (۲) آورده شده است). در جدول‌های ۲ و ۳ نتایج آزمون توکی به ترتیب برای استحکام فشاری یک ساعته و یک روزه ارائه شده است.

جدول ۲: خواص فیزیکی و مکانیکی اندازه‌گیری شده محصولات بر اساس استاندارد ISO 24234: 2015

تغییر ابعادی حین سفت شدن (%)	خزش (%)	خواص						آمالگام
		استحکام فشاری در ۲۴ ساعت (MPa)			استحکام فشاری در یک ساعت (MPa)			
		انحراف معیار ± میانگین	(x)	درصد تغییرات (%)	انحراف معیار ± میانگین	(x)	درصد تغییرات (%)	
۰/۲ - ۰/۳	-۰/۱۷ تا +۰/۰۹	۱۲/۰	۷۲/۲±۸/۷	(۰)	۱۴/۶	۱۸۸/۶±۱۴/۶	(۰)	110Plus
۰/۱ - ۰/۳	+۰/۰۱ تا +۰/۰۳	۹/۶	۱۰۱/۵±۹/۷	(۸)	۱۶/۹	۱۹۴/۹±۳۲/۹	(۰)	ANA2000
۰/۱ - ۰/۳	+۰/۰۳ تا +۰/۰۶	۱۳/۲	۷۸/۱±۱۰/۳	(۰)	۲۲/۹	۴۰۵/۶±۹۳/۰	(۷)	Contour
۰/۱ - ۰/۳	+۰/۰۳ تا +۰/۰۸	۲۴/۱	۵۶/۵±۱۳/۶	(۰)	۱۶/۲	۲۲۶/۲±۳۶/۵	(۰)	GK-110
۰/۱ - ۰/۳	+۰/۰۱ تا +۰/۰۴	۷/۴	۱۴۷/۱±۱۰/۹	(۱۰)	۴/۸	۳۲۰/۴±۱۵/۵	(۰)	SDI GS-80
۰/۲ - ۰/۳	+۰/۰۲ تا +۰/۰۳	۸/۹	۱۷۶/۵±۱۵/۷	(۱۰)	۱۵/۸	۳۸۲/۹±۶۰/۷	(۷)	Cinalux
۰/۳ - ۰/۴	+۰/۰۷ تا +۰/۰۸	۱۸/۴	۱۶۶/۱±۳۰/۵	(۱۰)	۶/۴	۴۵۶/۳±۲۹/۲	(۱۰)	Cinasilver
۰/۱ - ۱/۰	+۰/۰۱ تا +۰/۰۴	۸/۹	۸۴/۴±۷/۵	(۰)	۸/۳	۲۰۵/۴±۱۷/۰	(۰)	Solaloy
۰/۱ - ۰/۲	+۰/۰۱ تا +۰/۰۲	۸/۳	۱۲۵/۶±۱۰/۴	(۱۰)	۲۱/۲	۲۳۴/۱±۴۹/۵	(۰)	World Work

(x): تعداد نمونه‌های دارای استحکام بالاتر از حداقل مقدار الزام استاندارد در بین ۱۰ نمونه آزمون

جدول ۳: مقایسه دو به دوی آمالگام‌ها برای استحکام فشاری یک ساعته بر اساس آزمون توکی (اعداد ردیف اول نشان‌دهنده میانگین اختلاف و

اعداد داخل پرانتز ارزش P را نشان می‌دهد. اختلاف آماری معنادار توسط علامت * نشان داده شده است.)

110 Plus	ANA 2000	Contour	GK-110	SDI gs-80	Cinalux	Cinasilver	Solaloy	World Work
۲۹/۳	۵/۹	۱۵/۷	۷۴/۹	۱۰۴/۳	۹۳/۰	۱۲/۲	۵۳/۴	
110 Plus	(۰/۰۰۰۸)*	(۰/۹۹۲۲)	(۰/۲۹۶۶)	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(۰/۶۳۷۶)	(<۰/۰۰۰۱)*
		۲۳/۴	-۴۵/۰	۴۵/۶	۷۵/۰	۶۴/۶	-۱۷/۱	۲۴/۱
	ANA 2000	(۰/۰۱۶۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(۰/۱۹۵۸)	(۰/۰۱۱۶)*
			-۲۱/۶	۶۹/۰	۹۸/۴	۸۸/۰	۶/۳	۴۷/۵
		Contour	(۰/۰۳۶۰)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(۰/۹۸۸۰)	(<۰/۰۰۰۱)*
				۹۰/۶	۱۲۰/۰	۱۰۹/۶	۲۷/۹	۶۹/۱
			GK-110	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	(۰/۰۰۱۷)*	(<۰/۰۰۰۱)*
				۲۹/۴	۱۹/۰	-۶۲/۷	-۲۱/۵	
			SDI gs-80	(۰/۰۰۰۷)*	(۰/۱۰۲۰)	(<۰/۰۰۰۱)*	(۰/۰۳۷۶)*	
					-۱۰/۴	-۹۲/۱	-۵۰/۹	
					Cinalux	(۰/۸۰۶۵)	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*
						-۸۱/۷	-۴۰/۵	
					Cinasilver	(<۰/۰۰۰۱)*	(<۰/۰۰۰۱)*	
							۴۱/۲	
						Solaloy	(<۰/۰۰۰۱)*	
							World Work	

جدول ۴: مقایسه دو به دوی آمالگام‌ها بر اساس آزمون توکی برای استحکام فشاری ۲۴ ساعت (اعداد ردیف اول نشان‌دهنده میانگین اختلاف و اعداد داخل پرانتز ارزش P را نشان می‌دهد. اختلاف آماری معنادار توسط علامت * نشان داده شده است.)

110 Plus	ANA 2000	Contour	GK-110	SDI gs-80	Cinalux	Cinasilver	Solaloy	World Work
6/3	217/3	37/6	131/8	194/3	267/7	16/8	45/5	
110 Plus	(1/0000)	(<0/0001)*	(0/6730)	(<0/0001)*	(<0/0001)*	(<0/0001)*	(0/9962)	(0/4188)
		210/7	31/3	125/5	188/0	261/4	10/5	39/2
	ANA 2000	(<0/0001)*	(<0/8478)	(<0/0001)*	(<0/0001)*	(<0/0001)*	(0/9999)	(0/6217)
			-179/4	-85/2	-22/7	50/7	-200/2	-171/5
		Contour	(<0/0001)*	(<0/0029)*	(<0/9734)	(0/2743)	(<0/0001)*	(<0/0001)*
				94/2	156/7	230/1	-20/8	7/9
			GK-110	(<0/0006)*	(<0/0001)*	(<0/0001)*	(0/9845)	(1/0000)
					62/5	135/9	-115/0	-87/3
				SDI gs-80	(0/0784)	(<0/0001)*	(<0/0001)*	(0/0024)*
						73/4	-177/5	-148/8
					Cinalux	(0/0182)*	(<0/0001)*	(<0/0001)*
							-250/9	-222/2
						Cinasilver	(<0/0001)*	(<0/0001)*
								28/7
						Solaloy		(<0/9006)
								World Work

2015: 24234 ارائه شده است. در این استاندارد جدید در مقایسه با استاندارد سال ۲۰۰۴، حداقل استحکام فشاری یک ساعته و یک روزه به ترتیب از ۸۰ به ۱۰۰ و از ۳۰۰ به ۳۵۰ مگاپاسکال افزایش پیدا کرده است. بر اساس استاندارد جدید، برای اندازه‌گیری استحکام فشاری باید تعداد ۱۰ نمونه مورد آزمون قرار گرفته و از بین این ۱۰ نمونه باید حداقل ۸ نمونه دارای استحکام فشاری بزرگتر از حداقل استحکام توصیه‌شده در استاندارد باشد. در جدول ۲ تعداد نمونه‌های دارای استحکام بزرگتر از حد استاندارد به صورت (x) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در بین آمالگام‌های مورد بررسی چهار آمالگام ANA 2000، Cinalux، Cinasilver و World work این الزام را برآورده

در جدول ۲، تغییرات ابعادی آمالگام‌های مورد بررسی پس از سفت شدن نشان داده شده است. در این جدول نتایج اندازه‌گیری خزش آمالگام‌ها نیز نشان داده شده است. نتیجه آزمون اندازه‌گیری خزش، درصد کرنش است. مشاهده می‌شود که در تمام آمالگام‌های مورد بررسی درصد کرنش (خزش) کمتر از ۰/۵ درصد بوده است.

بحث

استحکام فشاری آمالگام توسط دستگاه پرس توصیه‌شده توسط استاندارد ایزو اندازه‌گیری می‌شود. فشار دومرحله‌ای به کار رفته در این آزمون به دلیل خروج جیوه واکنش نکرده در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، الزامات خواص آمالگام‌های دندانی بر اساس استاندارد ISO

بر اساس استاندارد قدیمی ایزو می‌توان ادعا نمود که از بین ۱۰ نمونه، ۸ نمونه آمالگام SDI معیار اشاره شده را برآورده می‌سازند.

استحکام فشاری آمالگام به مورفولوژی پودر آلیاژ آمالگام وابسته است.^(۵) ذرات تراش‌های علت خواص مکانیکی پایین آمالگام‌های 110 Plus و GK-110 هستند. از سوی دیگر، درخصوص آمالگام‌های با مورفولوژی آلیاژ کروی/شبه‌کروی یعنی Cinasilver، Solaloy و World Work تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مقادیر استحکام مشاهده می‌شود. با بررسی ترکیب آلیاژ آنها (جدول ۲) ملاحظه می‌گردد، Cinasilver از مقادیر بالایی نقره در ترکیب خود برخوردار است. لازم به ذکر است در بین فازهای تشکیل‌دهنده آمالگام پس از ترکیب با جیوه، فاز Ag₃Sn باقیمانده از پودر آلیاژ، مستحکم‌ترین فاز بوده و پس از آن، Ag-Hg و Sn-Hg^(۶-۷) قرار دارند. آمالگام Cinasilver از بالاترین مقدار نقره در بین آمالگام‌های مورد بررسی برخوردار است. آمالگام Cinalux نیز در بین آمالگام‌های با مورفولوژی دوگانه تراش‌های/کروی از بالاترین مقدار نقره برخوردار است. آمالگام Contour از جمله آمالگام‌های با بالاترین استحکام فشاری ۲۴ ساعته بود که علت آن را می‌توان به ذرات کروی آلیاژ و همچنین اندازه کوچک ذرات آن نسبت داد.

می‌کنند. این در حالی است که برای استحکام فشاری یک روزه فقط آمالگام Cinasilver معیار فوق را تأمین می‌نماید. شایان ذکر است که آمالگام‌های Contour و Cinalux در رتبه بعد با ۷ نمونه موفق از ۱۰ نمونه قرار دارند هر چند که هر دو نوع آمالگام مورد اشاره دارای متوسط استحکام بالاتر از ۳۵۰ MPa بوده و اختلاف آماری معناداری با Cinasilver نشان ندادند. بنابر این به قطعیت نمی‌توان دو آمالگام Contour و Cinalux را ناموفق از لحاظ استاندارد معرفی کرد. خطای آماده‌سازی و در نتیجه به دست آوردن نتایج نادرست می‌تواند در این مورد محتمل باشد. با بررسی جدول‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود آمالگام SDI اختلاف معناداری را با گروه آمالگام‌های با استحکام پایین نشان می‌دهد هر چند که در مقایسه با آمالگام‌های با استحکام بالا نیز اختلاف معنادار قابل مشاهده است. این آمالگام معیار تعداد نمونه‌های دارای حداقل استحکام یک ساعته بر اساس استاندارد را به طور کامل برآورده می‌سازد هر چند که در خصوص استحکام فشاری یک ساعته به دلیل برخورداری از استحکام فشاری نزدیک به ۳۵۰ MPa اما کوچکتر از آن نتوانست معیار فوق را برآورده نماید. با اعمال معیار استحکام یک روزه حداقل ۳۵۰ MPa در استاندارد جدید ایزو هیچیک از نمونه‌های استحکام آمالگام SDI نتوانستند معیار فوق را برآورده نمایند. شایان توجه است که با در نظر گرفتن معیار ۳۰۰MPa برای استحکام فشاری یک روزه

جدول ۵: الزامات خواص آمالگام دندان‌ی بر اساس استاندارد ISO 24234: 2015

حداقل استحکام فشاری در ۲۴ ساعت (MPa)	حداقل استحکام فشاری در یک ساعت (MPa)	تغییر ابعادی مجاز حین سفت شدن (%)	حداکثر خزش (%)
۳۵۰	۱۰۰	۰/۱۰- تا ۰/۱۵+	۲/۰

از استاندارد نشده است. این ویژگی، از جمله خواص با اهمیت آمالگام بوده و در استاندارد ایزو، الزام مؤکد برای اندازه‌گیری آن وجود دارد. نشت لبه‌ای به تغییرات ابعادی وابسته است.^(۱۱) اعتقاد بر این است آمالگام‌های تشکیل شده از ذرات تراشه‌ای آلیاژ به دلیل میزان بالاتر استفاده از جیوه در تهیه آمالگام دارای تغییرات ابعادی بیشتری هستند.^(۱۱) صحت این موضوع را می‌توان با مقایسه تغییرات ابعادی 110Plus و GK-110 با مقادیر سایر آمالگام‌ها تأیید نمود (جدول ۲).

بر اساس استاندارد ایزو درصد خزش آمالگام باید حداکثر ۲ درصد باشد. نتایج به دست آمده نشان داد تمام آمالگام‌ها از لحاظ مقادیر کرنش خزشی از الزام استاندارد ایزو تبعیت می‌نمایند. صحت لبه‌ای (Marginal integrity) به خزش وابسته است.^(۱۲) اعتقاد بر این است خزش آمالگام با افزایش نسبت جیوه به آلیاژ افزایش یافته و با افزایش کسر حجمی فازهای Ag-Hg و Cu-Sn (۱) کاهش می‌یابد.^(۱۳) آمالگام‌های مستعد خزش بالا آمالگام‌های دارای فاز Sn-Hg (γ_2) هستند زیرا این فاز دارای خاصیت پلاستیسیته بوده و به فاز Ag-Hg اجازه لغزش می‌دهد. شایان ذکر است در دمای دهان انسان دو فاز Ag-Hg و خود قرار دارند؛ در نتیجه لغزش دانه‌های درشت Ag-Hg می‌تواند رخ دهد.^(۱۴) بر مبنای ادعای تولیدکننده‌ها هیچ کدام از آمالگام‌های مورد بررسی در این پژوهش حاوی فاز Sn-Hg (γ_2) نیستند. به طور کلی آلیاژهای پرمس به دلیل جلوگیری از تشکیل فاز Sn-Hg (γ_2) خزش را کاهش می‌دهند. در حقیقت حضور فاز Cu-Sn (۱) باعث قفل شدن و جلوگیری از لغزش در مرز دانه‌های فاز Ag-Hg می‌شود.^(۱۵و۱۶)

در جدول ۲، ضریب تغییر (Coefficient of Variation; CV) ذکر شده است که حاصل تقسیم انحراف معیار (Standard Deviation) به متوسط استحکام می‌باشد. با اینکه این مفهوم در استاندارد ایزو برای ارقام استحکام استفاده نشده است اما محاسبه آن می‌تواند نگرش اولیه و ابتدایی در خصوص پراکندگی ارقام استحکام حول مقدار متوسط ارائه نماید و به عنوان فاکتور مناسبی برای تکرارپذیری ارقام استحکام مطرح باشد به طوری که، هر چه این مقدار کوچکتر باشد پراکندگی ارقام کمتر بوده است. با مقایسه ضریب تغییر استحکام یک‌ساعته ملاحظه می‌شود که آمالگام‌های GK-110 و Cinasilver دارای ضریب تغییر بالایی هستند. این در حالی است که آمالگام Cinasilver از لحاظ ضریب تغییر استحکام فشاری یک روزه در بین آمالگام‌های با کمترین ضریب تغییر قرار دارد. مقایسه ضرایب تغییر استحکام فشاری یک ساعته و یک روزه نشان می‌دهد در بین آمالگام‌های مورد بررسی آمالگام SDI را می‌توان در مجموع به عنوان آمالگام با کمترین ضریب تغییر استحکام فشاری معرفی نمود. با اینکه آمالگام Contour همچون SDI دارای آلیاژ با مورفولوژی کروی است اما ضریب تغییر استحکام فشاری یک روزه آن بالاترین مقدار در بین آمالگام‌هاست. بر این اساس مقادیر پایین ضریب تغییر آمالگام SDI را نمی‌توان به مورفولوژی کروی شکل آلیاژ آن نسبت داد.

بر اساس استاندارد ایزو ISO 24234: 2015 تغییرات ابعادی مجاز حین سفت شدن آمالگام باید در محدوده $-0/10$ تا $+0/15$ درصد قرار داشته باشد. ملاحظه می‌شود تغییرات ابعادی تمام آمالگام‌ها به جز 110Plus در محدوده توصیه شده توسط استاندارد قرار دارند. در خصوص تغییرات ابعادی، ارقام ارائه شده از سوی تولیدکننده آمالگام 110 Plus حاکی از آن است که اصلاً ادعایی مبنی بر تبعیت

نتیجه‌گیری

تمام الزامات استحکام فشاری استاندارد ایزو را برآورده نمود. از نقطه نظر خزش، تمام آمالگام‌های مورد مطالعه در این پژوهش از حداکثر خزش کمتر از ۲ درصد برخوردار بوده و الزامات استاندارد ایزو را برآورده کردند. به جز آمالگام 110Plus همه آمالگام‌های مورد مطالعه در این پژوهش الزامات ایزو در خصوص تغییرات ابعادی مجاز حین سفت شده را برآورده کردند.

نتایج این پژوهش نشان داد در بین آمالگام‌های مورد بررسی، آمالگام Cinasilver از بیشترین استحکام فشاری یک ساعته برخوردار است. بیشترین استحکام فشاری یک روزه به آمالگام‌های Contour، Cinalux و Cinasilver تعلق داشت. اختلاف آماری معناداری بین این سه نمونه مشاهده نشد. در بین آمالگام‌های مورد بررسی آمالگام Cinasilver

منابع

1. Sakaguchi RL. Craig's restorative dental materials. 4thed. New York: Mosby; 2018.
2. Mohammadi Z, Mesgar AS, Rahmdar SR, Farhangi E. Effect of setting time and artificial saliva on the strength evaluated by different methods of dental silver amalgam: a comparative study. *Material wissenschaft Werkstofftechnik* 2018; 48(2):1-8.
3. Black J, Hastings G. Handbook of biomaterial properties. Berlin: Springer Science & Business Media; 2016.
4. International Organization for Standardization. Dentistry-dental amalgam, ISO 24234. Geneva: International Organization for Standardization; 2015.
5. Chen KI, Ju CP, Lin JH. Effect of particle configuration on structure and properties of dispersed Pd-containing dental amalgam. *Biomaterials* 1999; 20:1851-66.
6. Daxies EH, KuhAT. The morphological characterization of dental amalgam alloy powders. *Biomaterials* 1984; 5(6):314-7.
7. Vrijhoef A, Driessens FC. Long-term phase changes in dental amalgam after setting. *J Biomed Mater Res* 1974; 8(6):435-42.
8. Joska L, Bystriansky J, Novak P. Dental amalgam-the effect of the technology of alloy powder preparation on the corrosion behaviour and the release of mercury. *Materials Corrosion* 2003; 54(3):152-6.
9. Suchatlampong C, Goto S, Ogura H. Early compressive strength and phase-formation of dental amalgam. *Dent Mater J* 1995; 14(2):143-51.
10. Paffenbarger GC, Rupp NW, Patel PR. Dimensional change of dental amalgam and a suggested correlation between marginal integrity and creep. *J Am Dent Assoc* 1979; 99(1):31-7.
11. Powers JM, Wataha JC. Dental Materials-e-book: properties and manipulation. New York: Elsevier Health Sciences; 2017.
12. Von Fraunhofer JA. Dental materials at a glance. New Jersey: John Wiley & Sons; 2013.
13. Espevik S, Sörensen SE. Creep of dental amalgam. *Scand J Dent Res* 1975; 83(1):245-53.
14. Mahler DB, Adey JD. Factors influencing the creep of dental amalgam. *J Dent Res* 1991; 70(11):1394-400.
15. Al-Deen HJ, Haleem AH, Tuma MS. Improvement of dental amalgam properties by increasing copper content. *Int J SciEng Res* 2014; 5:730-7.
16. Razavi SH, Mirdamadi S, Hormozi MM. Investigating the physical and mechanical properties of high-copper and silver dental-filling amalgam alloys. *Iran J Materials SciEng* 2011; 8(1):40-7.