

ترکیب شیمیایی (Mineral Trioxide Aggregate (MTA): مروری بر مقالات

دکتر سعید عسگری^۱ - دکتر محمدجعفر اقبال^۱

۱- استاد گروه آموزشی اندودنتیکس دانشکده دندانپزشکی و مراکز تحقیقاتی اندودنتیکس و علوم دندانپزشکی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

چکیده

زمینه و هدف: در سال ۱۹۹۳ ماده‌ای با نام MTA به رنگ خاکستری به علم دندانپزشکی معرفی شد. بعدها انواع سفید آن نیز ساخته شد. هدف از این مقاله بررسی و مقایسه ساختار شیمیایی انواع MTA می‌باشد.

روشن بررسی: تا کنون بیش از ششصد مقاله درباره خصوصیات MTA منتشر شده که تعداد ۳۳ و ۲۸ مقاله به ترتیب به بررسی خواص شیمیایی و فیزیکی آن پرداخته‌اند. همچنین حدود هشتاد مقاله در مورد شباهتها و یا تفاوت‌های بین MTA و سیمان پرتلند انتشار یافته است. در این مقاله مواردی همچون سابقه ساخت و معرفی ماده، اسناد مالکیت معنوی، انواع تجاری، تفاوتها و تشابهات با سیمان پرتلند، اندازه ذرات در پودر و ماده سخت شده و واکنش هیدراتاسیون MTA بحث خواهد شد.

یافته‌ها: انواع MTA و سیمان پرتلند از ترکیبات مشابهی برخوردار بوده و عمدتاً از اکسید کلسیم و سیلیکا تشکیل شده‌اند. اما MTA اکسید بیسموت (رادایوپکر) نیز دارد. مهمترین تفاوت شیمیایی انواع سفید MTA و سیمان پرتلند نسبت به انواع خاکستری آنها، کاهش برخی از عناصر و خصوصاً اکسید آهن می‌باشد. MTA سفید دارای ذرات و کریستال‌های کوچکتری است. MTA فسفات ندارد ولی در حین هیدراتاسیون یون‌های کلسیم و هیدروکسیل آزاد می‌کند که در ترکیب با فسفات محیط، موجب ساخته شدن هیدروکسی آپاتیت می‌شود.

نتیجه‌گیری: MTA مثل سیمان پرتلند آبدوست است و با توجه به خصوصیات زیست سازگاری منحصر بفرد آن می‌توان از انواع آنها در درمانهای اندودنتیکس استفاده کرد. همچنین هیچ مجوزی برای استفاده کلینیکی از سیمان پرتلند وجود ندارد.

کلید واژه‌ها: MTA - اندازه ذرات - آنالیز شیمیایی - سیمان پرتلند - هیدروکسی آپاتیت.

پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۷/۲۵

اصلاح نهایی: ۱۳۸۸/۶/۲۴

وصول مقاله: ۱۳۸۸/۳/۱۲

نویسنده مسئول: دکتر سعید عسگری، مرکز تحقیقات اندودنتیکس دانشکده دندانپزشکی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی e.mail:saasgary@yahoo.com

مقدمه

پرفوریشن‌های گوناگون و درمان ریشه دندانهای با اپکس باز (وایتال و نان وایتال) بسیار پیچیده بود و در این مورد که چه ماده‌ای بهترین سیل را ایجاد می‌کند توافقی نبود و حتی پیش آگهی درمانها کمتر قابل پیش بینی بود. در دوره پنجم پیشرفت علم اندودنتیکس (چهل سال گذشته) مطالعات و تحقیقات دامنه‌داری صورت پذیرفته تا ترکیب شیمیایی ایده‌آلی از مواد دندانی با خواص مناسب جهت درمانهای اندودنتیکس، توصیف، فرموله و یا ساخته شوند. ۱۶ سال پیش ماده جدیدی با نام Mineral Trioxide Aggregate (MTA) به علم دندانپزشکی معرفی شد که کاربردهای کلینیکی متنوعی دارد.

اگرچه بیماریهای پالپ و پری اپیکال و روشهای درمانی آنها تاریخچه و سابقه بسیار طولانی دارند اما به اعتقاد Grossman در دوره چهارم پیشرفت علم اندودنتیکس، یعنی از سال ۱۹۲۶-۱۹۷۶، این علم با سرعت و شتاب بیشتری پیشرفت و توسعه پیدا کرده است. استاندارد شدن وسایل اندودنتیکس، تألیف اولین کتاب مرجع، تأسیس انجمن اندودنتیست‌های امریکا و استفاده از وسایل و ابزارهای جدید در علم اندودنتیکس باعث بهبود روشها، راحتی بیماران و افزایش میزان موفقیت درمانهای اندودنتیکس شده است. اما با این همه تا چند سال پیش برای اکثر دندانپزشکان و اندودنتیست‌ها انجام درمانهای جراحی اندودنتیکس، بستن

تاریخچه

نام تجاری ProRoot MTA (Tulsa dental, Dentsply, Tulsa, OK, USA) تولید و به بازار عرضه شد.

از آنجا که این ماده رنگ خاکستری داشت و پس از استفاده سبب تغییر رنگ دندان خصوصاً در نواحی که زیبایی مدنظر بود می‌شد، کمپانی سازنده در صدد رفع عیب بر آمد و در سال ۲۰۰۲ ترکیب جدیدی از این ماده با رنگ شیری و به نام هم‌رنگ دندان (Tooth-colored ProRoot MTA) را به بازار عرضه کرد. (۲۱)، لازم به ذکر است که MTA سفید برای اولین بار توسط مهرداد لطفی در سال ۲۰۰۰ میلادی ساخته و طی نامه شماره ۷۰/۰۶/۷۳۶۱ مورخ ۷۹/۱۰/۱۰ توسط سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی کشور مورد تأیید قرار گرفت. در سال ۲۰۰۱ میلادی به استناد نامه شماره ۱۹۴۸۵ مورخ ۸۰/۶/۲۱ از وزارت بهداشت درمان و آموزش پزشکی مجوز تولید دریافت کرد و با نام تجاری Root MTA به بازار ایران وارد شد.

هر چند که ماده MTA طی دو ادعا و در دو تاریخ در اداره مالکیت معنوی ایالات متحده آمریکا به ثبت رسیده است اما به علت ثبت نشدن Patent ماده در سازمان ثبت مالکیت معنوی جهانی (WIPO)، کشورهایمانند برزیل، آرژانتین و ایران توانسته‌اند انواع متفاوتی از این ماده را تهیه و به بازار مصرف عرضه نمایند. در حال حاضر انواع گوناگونی از این ماده در بازار مواد دندانپزشکی وجود دارد و قیمت‌های متفاوتی را به خود اختصاص داده است.

اسناد منتشر شده توسط USPTO گویای این مطلب است که MTA از «سیمان پرتلند نوع یک» (به شکل اصلی یا تغییر یافته و با $4000-5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blain number) نشأت گرفته است و مهمترین خاصیت آن توانایی سخت شدن (Setting) در محیط مرطوب به نحوی است که خصوصیات فیزیکی مناسبی را جهت برقراری سیل مؤثر برای جلوگیری از ورود مجدد باکتری‌های بیماری‌زا تأمین نماید. (۱۹-۲۰)

همچنین در این اسناد خصوصیات شیمیایی ماده MTA چنین شرح داده شده است که بیشترین درصد وزنی ماده با میانگین ۶۵٪ (۵۰٪ - ۷۵٪) به اکسید کلسیم و در مرتبه بعدی با ۲۱٪ (۱۵٪ - ۲۵٪) به سیلیکا (دی اکسید سیلیس) تعلق دارد و میانگین مخلوط این دو ترکیب ۸۶٪ (۷۰٪ - ۹۵٪) وزن سیمان را تشکیل می‌دهد. همچنین مقادیری آلومینا (Al_2O_3)، اکسید آهن (Fe_2O_3) و گچ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) در ساخت این سیمان به کار می‌رود.

Lee، منصف و ترابی‌نژاد در در ماه نوامبر سال ۱۹۹۳ میلادی مقاله‌ای منتشر کردند که به معرفی توانایی سیل مناسب ماده دندانی جدیدی که به صورت آزمایشگاهی توسط محمود ترابی‌نژاد تولید شده و MTA نام گرفته بود به عنوان پرکننده پرفوریشن‌های ناحیه فورکیشن پرداخت. (۱)، دومین مقاله که در ماه دسامبر توسط ترابی‌نژاد، Watson و Pitt Ford منتشر گردید به توصیف خاصیت سیل مناسب این ماده به عنوان پرکننده انتهای ریشه در جراحی‌های پری رادیکولار و در قیاس با سایر مواد رایج در دندانپزشکی آن روز اشاره داشت. (۲)

مهمترین دلیل کاربرد MTA به عنوان یک ماده پرکننده انتهای ریشه این بود که این سیمان با بیس آب بوده و برخلاف مواد رایج در دندانپزشکی ماده‌ای آبدوست تلقی شده و بنابراین در تماس با رطوبت و یا خون در حین انجام جراحی‌های انتهای ریشه آسیبی به خصوصیات آن وارد نمی‌شود. تنها مقاله منتشر شده توسط ترابی‌نژاد و همکارانش در سال ۱۹۹۴ میلادی در جهت اثبات این مدعی مهم منتشر شده است. (۳)

در طی سه سال یعنی از سال ۱۹۹۵-۱۹۹۷ به ترتیب در هر سال ده، سه و دو مقاله علمی (مجموعاً ۱۵ مقاله) در مورد خصوصیات گوناگون MTA توسط ترابی‌نژاد و یاهمکارانش در مجلات معتبر علمی به چاپ رسیده است. (۴-۱۸)

ثبت Patent، حق مالکیت معنوی و تأیید FDA

در سال ۱۹۹۳ همزمان با انتشار نتایج تحقیقات، درخواست ثبت حق مالکیت معنوی MTA تحت عنوان «ماده پرکننده دندان و روش استفاده از آن» (Tooth filling material and method of use) به اداره مالکیت معنوی ایالات متحده آمریکا (USPTO) ارایه گردید و پس از تأیید آن در سال ۱۹۹۵ منتشر شد. (۱۹)، در همین سال درخواست مجدد ثبت حق مالکیت معنوی با ادعای «آماده‌سازی ماده پرکننده حفرات دندانی توسط سیمان پرتلند» به USPTO ارایه شد. این درخواست نیز در سال ۱۹۹۸ توسط USPTO مورد قبول و به صورت رسمی منتشر شده است. (۲۰)

تولید و استفاده از هر ماده دندانپزشکی در ایالات متحده آمریکا منوط به تأیید اداره دارو و غذای آن کشور (FDA) می‌باشد. MTA در سال ۱۹۹۸ میلادی پس از تأیید FDA با

دارند، (۲۴) این موضوع که به شکل خلاصه مقاله در سال ۱۹۹۹ میلادی به چاپ رسیده بود بعدها، مکرر توسط سایر پژوهشگران (۲۵-۲۷) به تأیید رسید. تنها تفاوت شیمیایی مهم بین این دو ترکیب، وجود ذرات اکسید بیسموت به اندازه ۵-۳۰ میکرون به عنوان ماده رادیوپاک در MTA می‌باشد. (۲۴-۲۷)

عسگری و همکاران در سال ۲۰۰۴ به بررسی ترکیب شیمیایی و اندازه ذرات سیمان پرتلند سفید و MTA سفید پرداختند. (۲۸)، آنها نشان دادند که اگر چه مقادیر اکسید کلسیم و سیلیکا در هر دو نوع ماده به عنوان ترکیبات اصلی از مشابهت زیادی برخوردار بودند، اما اندازه کریستال‌های مشاهده شده در MTA به مراتب کوچکتر از سیمان پرتلند می‌باشد. تفاوت دیگر، وجود اکسید بیسموت در MTA سفید بود که در گزارش مذکور به آن اشاره شده است. این نتایج مکرر در مقالات محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته (تا کنون ۱۱ بار) و نیز مجدداً توسط سایر محققان به تأیید رسیده است. (۲۲، ۲۷-۲۸)، علی‌رغم گزارش وجود فسفات در کریستال‌های MTA (۷)، در آنالیز ترکیب شیمیایی انواع MTA سفید یا خاکستری و با نامهای تجاری گوناگون، فسفات در هیچ کدام از مواد یافت نشده است. (۲۶-۲۹)

در اکثر تحقیقات انجام شده علی‌رغم وجود مشابهت زیاد ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند و MTA، به وجود برخی تفاوتها اشاره شده است که علاوه بر موضوع ماده رادیو اپک کننده می‌توان به وجود بیش از دو برابری سولفات کلسیم در اشکال گوناگون در سیمان پرتلند نسبت به MTA اشاره کرد. (۳۰)، اضافه کردن گچ به سیمان پرتلند در کارخانه‌های ساخت سیمان در جهت تسریع واکنش سخت شدن اولیه آن است. نشان داده شده است که افزودن ۱۰٪ گچ به MTA خاکستری باعث کاسته شدن زمان سخت شدن از شش ساعت به ۴۵ دقیقه می‌شود اما در عوض استحکام فشاری آن را ۲۱ مگاپاسکال کاهش می‌دهد. (۳۱)، بنابراین هر چند یکی از معایب MTA، زمانی طولانی ست شدن آن است اما اضافه کردن بیش از ۵٪ سولفات کلسیم برای رفع این ایراد، به آن توصیه نمی‌شود.

در سند مالکیت معنوی وجود ۵٪ اکسیدهای قلیایی Na_2O و K_2O (که جز مهمی از سیمان پرتلند تلقی می‌شوند) ذکر شده است اما در MTA سفید بر خلاف دو نوع سیمان پرتلند ایرانی و استرالیایی این مواد یافت نشدند. (۲۸)

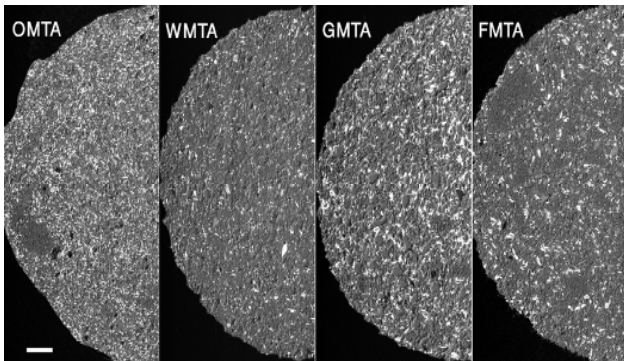
پودر فرآورده نهایی عمدتاً شامل چهار ترکیب تری کلسیم سیلیکات ($3CaO.SiO_2$)، دی‌کلسیم سیلیکات ($2CaO.SiO_2$)، تری‌کلسیم آلومینات ($3CaO.Al_2O_3$) و تتراکلسیم آلومینوفرات ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) می‌باشد که مهمترین اجزای همه آنها اکسید کلسیم است.

طبق ادعای سازندگان این ماده، برای ایجاد رادیوپاسیتی در این سیمان از اکسید بیسموت (Bi_2O_3) با نسبت یک به چهار استفاده شده است. (۱۹-۲۰)، همچنین از آنجا که جهت آماده‌سازی این سیمان باید از آب استفاده کرد. میزان آب مورد استفاده بین ۱۰٪-۴۰٪ وزن سیمان پیشنهاد شده است، اما بهترین درصد وزنی آب را ۲۵٪ (یعنی مخلوط پودر به مایع برابر سه به یک) توصیه کرده‌اند. (۱۹-۲۰)، پودر سیمان MTA با افزودن آب هیدراته می‌شود و ژل کلونیدالی را می‌سازد که در مدت زمان حدود چهار ساعت سخت می‌شود. (۷)

رنگ MTA و تفاوت ترکیب شیمیایی ماده با رنگهای مختلف نمونه آزمایشگاهی MTA اولیه که توسط ترابی‌نژاد معرفی شد و همچنین اولین MTA تجاری آمریکایی (ProRoot) و نوع برزیلی (Angelus) به رنگ خاکستری بودند اما نسل دوم MTA آمریکایی و برزیلی و انواع دیگری که در ایران و آرژانتین ساخته شده‌اند به رنگ شیری هستند و اصطلاحاً MTA سفید نامیده می‌شوند. در سال ۲۰۰۵ میلادی عسگری و همکارانش با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) و به روش میکروآنالیز الکترون پروب (EPMA) تفاوت ترکیبات شیمیایی دو نوع MTA سفید و خاکستری را گزارش کردند. (۲۱)، نتایج این مطالعه نشان داد که مهمترین تفاوت شیمیایی MTA سفید نسبت به نوع خاکستری کاهش ۱۲۲ درصدی آلومینا، صد و سی درصدی اکسید منیزیم و از همه مهمتر بیش از هزار درصدی اکسید آهن در آن است. این نتایج بارها توسط سایر محققان در مقالات علمی مورد استناد قرار گرفته (تا کنون ۳۶ مرتبه) و همچنین در سایر تحقیقات مجدداً به تأیید رسیده است. (۲۲-۲۳)

MTA و سیمان پرتلند

سیمان پرتلند خاکستری و MTA خاکستری در نمای ظاهری، میکروسکوپی و آنالیز تفرق اشعه ایکس به یکدیگر شباهت



شکل ۱: نمای میکروسکوپ الکترونی انواع MTA نشان دهنده تفاوت سطحی آنهاست (O: نوع اولیه آزمایشگاهی، W: سفید آمریکایی، G: خاکستری آمریکایی، F: سریع سخت شونده برزیلی). در همه انواع MTA یک ماده آمورف زمینه‌ای در برگزیده کریستال‌هایی با اندازه‌های گوناگون و نیز ذرات سفیدرنگ (اکسیدبیس‌موت) که به صورت غیر همگن توزیع شده‌اند می‌باشد (بار برابر با ۰/۱ میلی‌متر است).

هیدراتاسیون و محصولات آن

وقتی پودر MTA با مقدار مناسبی آب مخلوط شود واکنش هیدراتاسیون که یک پدیده شیمیایی حرارت زا و غیر قابل بازگشت است آغاز می‌گردد. در این حالت ماده به ذرات بسیار ریزی تجزیه شده و جسم کریستاله موسوم به ژل کلئوئیدال را ایجاد می‌کند که به صورت ظاهری خمیری نرم است. گیرش و سخت شدن این خمیر، نتیجه یک سلسله واکنش‌های شیمیایی همزمان و پی در پی بین آب و اجزای تشکیل دهنده MTA است. این ژل طی مدت چهار ساعت حالت پلاستیسیته خود را از دست می‌دهد و به جسم سختی تبدیل می‌شود. (۷)، مقدار آبی که برای هیدراتاسیون کامل MTA لازم است ۲۵٪ وزن آن است. (۲۰)

در پدیده هیدراتاسیون واکنش شیمیایی اصلی در MTA، بین تری کلسیم سیلیکات و دی کلسیم سیلیکات با آب، به تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته، که به طور ناچیزی کریستالیزه است، و نیز کلسیم هیدروکسید منجر می‌شود. (۳۵)، در برخی مقالات ساخته شدن کلسیم هیدروکسید را در فرایند هیدراتاسیون، ناشی از واکنش آب با اکسید کلسیم موجود در MTA نسبت می‌دهند (۳۶) که موضوع صحیحی نیست. همان طور که قبلاً اشاره شده است در سند مالکیت معنوی MTA آنالیز شیمیایی ماده (که در آن عناصر را به

بنابراین نکته مهمی که باید مورد یادآوری قرار گیرد این است که اگر چه ترکیب شیمیایی عناصر اصلی MTA با سیمان پرتلند مشابهت دارند اما باید دانست که اولاً عناصر مورد استفاده در این دو ماده یکسان نیستند و در مواردی که عناصر یکسان در این مواد وجود دارند از مقادیر یکسانی برخوردار نمی‌باشند. با این توصیف چون سیمان پرتلند یک فرآورده صنعتی (ارزان) است، منطقاً و اخلاقاً امکان جایگزینی MTA به عنوان یک فرآورده مدیکال (گران قیمت) را ندارد، زیرا محققان اثبات کرده‌اند که این دو ماده تفاوت‌های شیمیایی متعددی را از خود نشان داده‌اند. (۲۷-۲۸ و ۳۲-۳۳)

اندازه ذرات MTA

الف) پودر: در بررسی اندازه ذرات انواع MTA توسط روش «آنالیز ذرات روان» نشان داده شد که درصد جمعی ذرات ۶-۱۰ میکرونی در ProRoot MTA خاکستری و سفید در قیاس با سیمان پرتلند به ترتیب ۶۵٪، ۷۳٪ و ۷۰٪ می‌باشد و نتیجه گرفتند که MTA سفید دارای ذرات کوچکتر و نیز طیف باریکتری از اندازه ذرات می‌باشد. (۳۴)، چنین تفاوتی بین ProRoot MTA و سیمان پرتلند بدون ذکر جزئیات در گذشته عنوان شده بود. (۳۲)

ب) پس از انجام واکنش سخت شدن: سمان MTA پس از سخت شدن به حالت جامد درمی‌آید و پس از پالایش سطح آن در نمای میکروسکوپ الکترونی دو فاز مجزای آمورف و کریستالین را نشان می‌دهد. براده‌های پراکنده‌ای از ذرات اکسید بیسموت نیز در زمینه آمورف به رنگ سفید نمایان می‌باشند که با هدف رادیوپاک کردن ماده به آن اضافه شده‌اند. اولین مطالعه‌ای که در سال ۲۰۰۵ در مورد اندازه کوچکتر کریستال‌های MTA سفید نسبت به خاکستری نتایج را منتشر کرده صرفاً به قیاس ظاهری پرداخته و به مقادیر اندازه‌ها اشاره نکرده است (۲۱) اما در سال ۲۰۰۶ با دقت نشان داده شده است که اندازه کریستال‌های MTA خاکستری با اندازه ۵-۵۰ میکرون نسبت به نوع سفید با اندازه ۵-۲۵ میکرون به صورت معنی‌داری بزرگتر است. (۳۳). عسگری و همکاران در سال ۲۰۰۹ میلادی در یک مطالعه تفصیلی، اندازه کریستال‌های انواع MTA را بررسی و گزارش کرده‌اند. (شکل ۱) (۲۷)

سمنتوم در محیط بدن فراهم می‌آورد. (۴۱)، از آنجا که کلسیم فسفات بی شکل یک واسطه کلیدی است که تشکیل آپاتیت‌های بیولوژیک را در کلسیفیکاسیون بافتهای سخت هدایت می‌کند، می‌توان چنین تصور کرد که فرآیند تولید این ماده در حین واکنش هیدراتاسیون، حداقل بخشی از مکانیزم تحریک تولید بافتهای سخت دندانی را توجیه می‌نماید. (۴۳-۴۵)، کشف این خاصیت بسیار مهم همراه با درک مکانیسم ساخت و تولید هیدروکسی آپاتیت هنگامی که MTA در مجاورت خون یا مایع بین بافتی قرار می‌گیرد توجیه کننده بسیاری از عملکردها و علی‌الخصوص سازگاری نسجی این ماده می‌باشد.

به نظر می‌رسد با توجه به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و واکنشهای بیولوژیک MTA می‌بایست در آینده نزدیک شاهد پژوهشهای بیشتر و کاربردهای متنوعتر از این ماده زیست سازگار در حوزه‌های پزشکی بود.

نتیجه‌گیری

۱- MTA یک سیمان آبدوست با خصوصیات شیمیایی و فیزیکی منحصر بفرد است که باعث بروز زیست سازگاری عالی آن شده است.

۲- MTA به عنوان یک ماده پرکننده انتهای ریشه در سال ۱۹۹۸ میلادی تولید و به بازار عرضه شد.

۳- اولین نسل این ماده خاکستری رنگ بود ولی با نسل دوم که به رنگ شیری است جایگزین شد تا از نظر زیبایی مشکل آفرین نباشد.

۴- MTA از "سیمان پرتلند نوع یک" منشأ گرفته است.

۵- ترکیب شیمیایی انواع خاکستری و سفید MTA با سیمان‌های پرتلند متناظر بسیار نزدیک است و تنها تفاوت مهم آنها وجود اکسید بیسموت به عنوان رادیوپاگر در MTA است.

۶- سیمان پرتلند یک فرآورده صنعتی است و استفاده از آن در درمانهای دندانپزشکی هیچ مجوزی ندارد.

۷- مهمترین تفاوت شیمیایی MTA سفید نسبت به نوع خاکستری آن کاهش آلومینا، اکسید منیزیم و از همه مهمتر اکسید آهن در آن است.

۸- MTA سفید دارای ذرات و کریستال‌های کوچکتر و نیز طیف باریکتری از اندازه ذرات می‌باشد.

۹- واکنش شیمیایی هیدراتاسیون در MTA به تولید

لحاظ فن به شکل اکسید آنها گزارش می‌نمایند) نشان دهنده ۶۵٪ اکسید کلسیم است اما این که کلسیم در ماده با چه ترکیب شیمیایی وجود دارد با روشهایی چون تصویر برداری ترکیبی با SEM (۳۳) و خصوصاً تکنیک آنالیز تفرق اشعه ایکس (XRD) (۲۲) قابل اثبات است. با استفاده از چنین روشهایی مکرراً نشان داده شده است که کلسیم در ترکیب MTA (و مشابه با سیمان پرتلند) در چهار ترکیب شیمیایی اصلی تری کلسیم سیلیکات، دی کلسیم سیلیکات، تری کلسیم آلومینات و تتراکلسیم آلومینوفرات قابل یافت می‌باشد.

با این توصیف کلسیم هیدروکساید مهمترین فرآورده بیولوژیک واکنش هیدراتاسیون MTA محسوب می‌شود و اگر چه در گروهی از مقالات، بخشی از زیست سازگاری بسیار عالی MTA را به صورت عام ناشی از تولید مقادیر مناسب کلسیم هیدروکساید پس از قرار گرفتن MTA در کنار بافت زنده می‌دانند (۳۷-۳۸)، عده دیگری نیز پیشتر رفته و اثرات ناشی از هیدرولیز کلسیم هیدروکساید یعنی افزایش pH محیط و آزادسازی یون کلسیم را ذی مدخل دانسته‌اند. (۳۹)، اما مهمترین اساس فیزیکی- شیمیایی خاصیت زیست سازگاری MTA به توانایی تولید هیدروکسی آپاتیت توسط آن در محیط بیولوژیک برمی‌گردد. (۴۰)، در تشریح این پدیده چنین فرض شده است که یون‌های کلسیمی که از MTA آزاد می‌شوند در واکنش با فسفات موجود در محلول PBS (که مشابه با مایع بین بافتی است)، در ابتدا یک مرحله کلسیم فسفات بی شکل تشکیل داده که سپس باعث تولید یک لایه بینابینی از مرحله هیدروکسی آپاتیت در مرز بین MTA و عاج ریشه دندان می‌گردد. (۴۰)

توسط عسگری و همکاران نشان داده شده است که وقتی MTA به عنوان ماده پرکننده انتهای ریشه دندان در محلول PBS قرار می‌گیرد یک لایه هیدروکسی آپاتیت بر روی ماده، عاج اطراف آن و مرز آن دو نیز تشکیل می‌شود. این حالت در داخل محلول نرمال سالین که حاوی یون‌های فسفات نیست اتفاق نمی‌افتد و اثبات مجددی بر این موضوع است که MTA حاوی فسفات نیست. (۴۱-۴۲)، اما به هر حال در محیطی که دارای یون فسفات باشد این واکنش باعث ایجاد پوشش ثانویه‌ای از جنس هیدروکسی آپاتیت بر روی حفره انتهای ریشه خواهد شد که علاوه بر آنکه سیل را افزایش می‌دهد، یک کانون مناسب پیش ساز برای ساخته شدن

۱۲- کلسیم آزاد شده از MTA با یون فسفات موجود در محیط واکنش داده و باعث ایجاد هیدروکسی آپاتیت خواهد شد.

کلسیم هیدروکساید منجر می‌شود.
۱۰- بخشی از زیست سازگاری MTA ناشی از تولید و از هیدرولیز کلسیم هیدروکساید در مجاورت بافت زنده است.
۱۱- MTA حاوی فسفات نیست.

REFERENCES

1. Lee SJ, Monsef M, Torabinejad M. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate for repair of lateral root perforations. J Endod. 1993 Nov;19(11):541-4.
2. Torabinejad M, Watson TF, Pitt Ford TR. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. J Endod. 1993 Dec;19(12):591-5.
3. Torabinejad M, Higa RK, McKendry DJ, Pitt Ford TR. Dye leakage of four root end filling materials: Effects of blood contamination. J Endod. 1994 Apr;20(4):159-63.
4. Torabinejad M, Rastegar AF, Kettering JD, Pitt Ford TR. Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. J Endod. 1995 Mar;21(3):109-12.
5. Ford TR, Torabinejad M, McKendry DJ, Hong CU, Kariyawasam SP. Use of mineral trioxide aggregate for repair of furcal perforations. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1995 Jun;79(6):756-63.
6. Torabinejad M, Smith PW, Kettering JD, Pitt Ford TR. Comparative investigation of marginal adaptation of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials. J Endod. 1995 Jun;21(6):295-9.
7. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR. Physical and chemical properties of a new root-end filling material. J Endod. 1995 Jul;21(7):349-53.
8. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD. Antibacterial effects of some root end filling materials. J Endod. 1995 Aug;21(8):403-6.
9. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD. Cytotoxicity of four root end filling materials. J Endod. 1995 Oct;21(10):489-92.
10. Kettering JD, Torabinejad M. Investigation of mutagenicity of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials. J Endod. 1995 Nov;21(11):537-42.
11. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kaiyawasam SP. Tissue reaction to implanted super-EBA and mineral trioxide aggregate in the mandible of guinea pigs: A preliminary report. J Endod. 1995 Nov;21(11):569-71.
12. Torabinejad M, Hong CU, Lee SJ, Monsef M, Pitt Ford TR. Investigation of mineral trioxide aggregate for root-end filling in dogs. J Endod. 1995 Dec;21(12):603-8.
13. Abedi HR, Ingle JI. Mineral trioxide aggregate: A review of a new cement. J Calif Dent Assoc. 1995 Dec; 23 (12):36-9.
14. Arens DE, Torabinejad M. Repair of furcal perforations with mineral trioxide aggregate: two case reports. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1996 Jul;82(1):84-8.
15. Ford TR, Torabinejad M, Abedi HR, Bakland LK, Kariyawasam SP. Using mineral trioxide aggregate as a pulp-capping material. J Am Dent Assoc. 1996 Oct;127(10):1491-4.

16. Bates CF, Carnes DL, del Rio CE. Longitudinal sealing ability of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. *J Endod.* 1996 Nov;22(11):575-8.
17. Torabinejad M, Pitt Ford TR, McKendry DJ, Abedi HR, Miller DA, Kariyawasam SP. Histologic assessment of mineral trioxide aggregate as a root-end filling in monkeys. *J Endod.* 1997 Apr;23(4):225-8.
18. Koh ET, Torabinejad M, Pitt Ford TR, Brady K, McDonald F. Mineral trioxide aggregate stimulates a biological response in human osteoblasts. *J Biomed Mater Res.* 1997 Dec 5;37(3):432-9.
19. Torabinejad M, White DJ. Tooth filling material and method of use. US Office Patent Number 5415547. May 16,1995.
20. Torabinejad M, White DJ. Tooth filling material and method of use. US Office Patent Number 5769638. June 23,1998.
21. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Brink F. Chemical differences between white and gray mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2005 Feb;31(2):101-3.
22. Camilleri J, Montesin FE, Brady K, Sweeney R, Curtis RV, Ford TR. The constitution of mineral trioxide aggregate. *Dent Mater.* 2005 Apr;21(4):297-303.
23. Song JS, Mante FK, Romanow WJ, Kim S. Chemical analysis of powder and set forms of Portland cement, gray ProRoot MTA, white ProRoot MTA, and gray MTA-Angelus. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2006 Dec;102(6):809-15.
24. Wucherpfenning AL, Green DB. Mineral trioxide vs portland cement: two biocompatible filling materials. *J Endod* 1999;25:308. [Abstract]
25. Estrela C, Bammann LL, Estrela CR, Silva RS, Pécora JD. Antimicrobial and chemical study of MTA, Portland cement, calcium hydroxide paste, Sealapex and Dycal. *Braz Dent J.* 2000;11(1):3-9.
26. Funteas UR, Wallace JA, Fochtman EW. A comparative analysis of Mineral Trioxide Aggregate and Portland cement. *Aust Endod J.* 2003 Apr;29(1):43-4.
27. Asgary S, Eghbal MJ, Parirokh M, Ghodousi J, Kheirieh S, Brink F. Comparison of mineral trioxide aggregate's composition with Portland cements and a new endodontic cement. *J Endod.* 2009 Feb;35(2):243-50.
28. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Brink F. A comparative study of white mineral trioxide aggregate and white Portland cements using X-ray microanalysis. *Aust Endod J.* 2004 Dec;30(3):89-92.
29. Islam I, Chng HK, Yap AU. X-ray diffraction analysis of mineral trioxide aggregate and Portland cement. *Int Endod J.* 2006 Mar;39(3):220-5.
30. Camilleri J. Characterization of hydration products of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2008 May;41(5):408-17.
31. O'beirne JL, Shelton RM, Wright AJ, Lumley PJ, Hofmann MP. Plaster of Paris-Accelerated Setting of Mineral Trioxide Aggregate (MTA). Pan European Federation of the International Association for Dental Research (PEF IADR), 2008, University of Birmingham, London, UK.
32. Dammaschke T, Gerth HU, Züchner H, Schäfer E. Chemical and physical surface and bulk material characterization of white ProRoot MTA and two Portland cements. *Dent Mater.* 2005 Aug;21(8):731-8.
33. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Stowe S, Brink F. A qualitative X-ray analysis of white and grey mineral trioxide aggregate using compositional imaging. *J Mater Sci Mater Med.* 2006 Feb;17(2):187-91.

34. Komabayashi T, Spångberg LS. Comparative analysis of the particle size and shape of commercially available mineral trioxide aggregates and Portland cement: a study with a flow particle image analyzer. *J Endod.* 2008 Jan;34(1):94-8.
35. Camilleri J. Hydration mechanisms of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J.* 2007 Jun;40(6):462-70.
36. Faraco IM Jr, Holland R. Response of the pulp of dogs to capping with mineral trioxide aggregate or a calcium hydroxide cement. *Dent Traumatol.* 2001 Aug;17(4):163-6.
37. Asgary S, Eghbal MJ, Parirokh M, Ghanavati F, Rahimi H. A comparative study of histologic response to different pulp capping materials and a novel endodontic cement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2008 Oct;106(4):609-14.
38. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Ghoddusi J. SEM evaluation of pulp reaction to different pulp capping materials in dog's teeth. *Iranian Endod. J* 2006;1(4):117-22.
39. Duarte MA, Demarchi AC, Yamashita JC, Kuga MC, Fraga Sde C. pH and calcium ion release of 2 root-end filling materials. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003 Mar;95(3):345-7.
40. Sarkar NK, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I. Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2005 Feb;31(2):97-100.
41. Asgary S, Eghbal MJ, Parirokh M, Ghoddusi J. Effect of two storage solutions on surface topography of two root-end fillings. *Aust Endod J.* Published Online: 25 Nov 2008.
42. Parirokh M, Asgary S, Eghbal MJ, Ghoddusi J, Brink F, Askarifar S, Torabinejad M, Raouf M. The long-term effect of saline and phosphate buffer solution on MTA: an SEM and EPMA Investigation. *Iranian Endodontic J.* 2007 Sum;2(3):81-6.
43. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Ghoddusi J, Eskandarizadeh A. SEM evaluation of neodentinal bridging after direct pulp protection with mineral trioxide aggregate. *Aust Endod J.* 2006 Apr;32(1):26-30.
44. Parirokh M, Asgary S, Eghbal MJ, Stowe S, Ghoddusi J. Interface between newly formed dentine and mineral trioxide aggregate: A preliminary scanning electron microscopy study. *Iranian Endod J.* 2006;1(1):25-9.
45. Reyes-Carmona JF, Felipe MS, Felipe WT. Biomineralization ability and interaction of mineral trioxide aggregate and white portland cement with dentin in a phosphate-containing fluid. *J Endod.* 2009 May;35(5):731-6.