

## مطالعه تأثیر جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری در سفید کردن دندان

محسن محمدنژاد<sup>۱\*</sup>، الناز خرمی<sup>۱</sup>، سیده ندا سیادت<sup>۱</sup>، و یاشار رضاعی<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

۲. مرکز تحقیقات دندانپزشکی و پرودنتال، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز

پست الکترونیکی: mohammadnezhad@azaruniv.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳)

### چکیده:

در این مقاله، با به کارگیری یک جت پلاسمای فشار اتمسفری، تأثیر پلاسمای سرد آرگون بر سفید کردن دندان مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا مشخصات الکتریکی به منظور محاسبه توان مصرفی پلاسما، و طیف پلاسما به منظور تعیین گونه‌های فعال تولید شده در پلاسما اندازه‌گیری گردیدند. سپس دندان‌های تهیه شده در گروه‌های مختلف (با ژل فلوراید و بدون آن) تحت تابش پلاسما قرار گرفتند و برای مقایسه، رنگ دندان‌ها (قبل و بعد از پردازش) به کمک اسپکتروفتومتر مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج حاصل، تأثیر پلاسما بر سفید کنندگی دندان را به خوبی نشان داد. دلیل این اثر سفید کنندگی را می‌توان به فعالیت شیمیایی جت در اثر نفوذ بیشتر مولکول‌های هوا و تولید بیشتر گونه‌های نیتروژن و اکسیژن در پلاسمای رسیده به دندان مرتبط کرد. در بررسی تأثیر مدت زمان تابش پلاسما، زمان ۵ دقیقه به عنوان زمان بهینه بدست آمد. همچنین، بیشترین تأثیر در گروهی مشاهده گردید که ابتدا دندان با پلاسما تابش داده شد و سپس ژل فلوراید بر روی دندان قرار گرفت. به علاوه، اثر توان‌های مختلف پلاسما در سفید کردن دندان مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که به دلیل افزایش غلظت گونه‌های فعال در توان‌های بالاتر، میزان سفید شوندگی با افزایش توان افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** پلاسمای سرد فشار اتمسفری، جت پلاسما، درمان‌های دندان پزشکی

### ۱. مقدمه

پلاسماهای فشار پایین (امکان دستیابی و پردازش نمونه بدون محدودیت در ابعاد و نیز واکنش‌پذیری بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این نوع پلاسماهای غیرتعادلی نامیده می‌شوند زیرا دمای الکترون‌ها نوعاً از مرتبه چند الکترون است، در حالی که یون‌ها و اتم‌های خنثی خیلی نزدیک به دمای اتاق باقی می‌مانند. این ویژگی غیرتعادلی، چنین محیطی را مستعد رخداد واکنشهای شیمیایی مختلف (بسته به نوع گاز کاری) می‌کند [۱ و ۲]. یکی از راه‌های تولید پلاسمای سرد فشار اتمسفری استفاده از منبع پلاسمایی جت پلاسما است که بر پایه تخلیه سد دی‌الکتریک<sup>۱</sup> بنا نهاده شده است [۳]. در این منبع از دو الکتروود که حداقل یکی از الکتروودها با دی‌الکتریک پوشانده

یکی از بروزترین فن‌آوری‌های کاربردی در حوزه‌های مختلف پزشکی و دندان پزشکی در قرن بیست و یکم، فن‌آوری پلاسما است. پلاسما گازهای یونیزه شده‌ای مشتمل بر الکترون‌ها، یون‌ها، اتم‌های خنثی (در حالت‌های پایه و برانگیخته) و مولکول‌های واکنش‌پذیر است. همچنین، پلاسما انواع مختلفی از تابش‌های الکترومغناطیسی را ساطع می‌کند که از جمله آنها عبارتند از: نور مادون قرمز، مرئی و ماوراء بنفش. در حال حاضر پلاسمای فشار اتمسفری به دلیل دارا بودن مزایایی همچون سادگی در عملکرد، هزینه پایین (نسبت به

۱. Dielectric barrier discharge

شده است، استفاده می‌شود. فاصله دو الکترود معمولاً در حدود چند میلی متر است. میزان ولتاژ و بسامد با توجه به گاز مورد استفاده می‌تواند متفاوت باشد. معمولاً بسامد مورد استفاده در محدوده ۲۰-۱ کیلو هرتز است. البته بسامد می‌تواند ۵۰ هرتز باشد و تا حدود ۱۰۰ کیلو هرتز هم افزایش یابد. دی الکتریک می‌تواند از جنس شیشه، کوارتز، سرامیک، تفلون و یا پلیمر باشد. دستگاه جت پلاسما کاربردهای زیادی در اصلاح سطوح، کشتن باکتری، بهبودی زخم‌ها و سرطان، انعقاد خون، استریلیزه کردن کانال ریشه دندان، سفید کردن دندان و... دارند. پلاسما در سفید کردن دندان‌ها به عنوان یک روش پیشرفته، مؤثر و بدون عوارض جانبی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مزیت این روش نسبت به روش های معمول این است که در این روش از ژل سفید کننده به صورت مستقیم و از منبع های نوری مثل لیزر و غیره استفاده نمی‌شود. زیرا استفاده از منبع های نوری ممکن است منجر به افزایش دما شود و باعث آسیب حرارتی به بافت دندان شود [۴-۶]. در مطالعات انجام شده توسط لیو<sup>۱</sup> و همکارانش، روش سفید کردن دندان‌ها با استفاده از پلاسما فشار اتمسفری همراه با ژل هیدروژن پراکسید انجام شد. در این مطالعه، به منظور بررسی تأثیر پلاسما بر میزان سفیدشوندگی دندان، یک جت پلاسما آرگون که در فشار اتمسفر کار می‌کرد، ساخته شد. تمام دندان‌ها به دو نیم تقسیم شدند و به طور تصادفی در دو گروه قرار گرفتند: گروه اول ۲۰ درصد ژل هیدروژن پراکسید همراه پلاسما به مدت ۱۰ دقیقه و گروه کنترل به تنهایی بدون پلاسما در همان مدت زمان تحت درمان قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تابش پلاسما به تنهایی می‌تواند اثر سفیدکنندگی داشته باشد. به علاوه پلاسما همراه با هیدروژن پراکسید اثر سفیدکنندگی بالاتری دارد. اگرچه سازوکار اصلی کاملاً شناخته نشده است اما گونه‌های فعال اکسیژن<sup>۲</sup> که توسط سامانه پلاسما تولید می‌شود می‌تواند در فرایند سفید کردن دندان‌ها نقش به سزایی داشته باشد [۷]. همچنین در مطالعه اخیر انجام شده توسط نام<sup>۳</sup> و همکارانش پیشنهاد کردند که پلاسما فشار اتمسفر غیر حرارتی می‌تواند

یک منبع انرژی جایگزین جدید برای منابع نور معمولی جهت سفید کردن دندان باشد [۸].

در این پژوهش، ابتدا تأثیر پلاسما سرد اتمسفری بر میزان سفیدشوندگی دندان و همچنین تأثیر زمان تابش پلاسما مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. یکی از جنبه‌های مهم این پژوهش، استفاده از ژل فلوراید است. هدف آن است که ببینیم آیا تابش پلاسما به همراه استفاده از این ژل اثر مثبتی در درمان سفید کردن دندان و ضد پوسیدگی دارد یا خیر. فلوراید ترکیباتی از سدیم است که به صورت طبیعی در آب و خاک یافت می‌شوند که به دلیل خواص موجود در این ماده برای جلوگیری از پوسیدگی و حفظ دندان‌ها در مقابل باکتری‌ها حتی در بسیاری از خمیر دندان‌ها استفاده شده و به سلامت دندان‌ها کمک می‌کند. پوسیدگی دندان زمانی رخ می‌دهد که باکتری‌های موجود در دهان و دندان پس از استفاده از مواد خوراکی به دلیل وجود قند و دیگر مواد معدنی اسید تولید کنند. این اسیدها به لایه مینای دندان حمله می‌کنند و در گذر زمان سبب فرسودگی دندان می‌شوند [۹]. در این حین، فلوراید مانع پیشروی باکتری‌ها برای تولید اسید شده و سبب تقویت مینای دندان می‌شوند. جنبه مهم دیگر که در این‌جا مورد مطالعه قرار گرفته است، تأثیر توان تحویلی به پلاسما در میزان سفیدشوندگی دندان است.

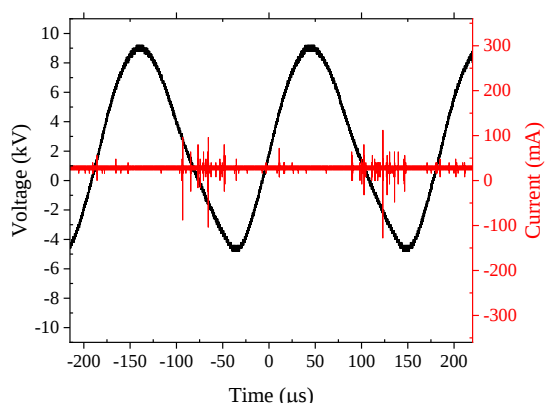
## ۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از یک سامانه جت پلاسما سرد تحت فشار اتمسفری استفاده شده است. این سامانه، شامل دو الکترود فلزی است که با یک عایق شیشه‌ای، جهت ایجاد تخلیه سد دی الکتریک، از یکدیگر جدا شده‌اند. الکترود ولتاژ بالا، یک لوله مسی (استوانه توخالی) به قطر داخلی ۳ میلی متر بوده که در داخل تیوب شیشه‌ای کوارتز به طول تقریبی ۱۰ سانتی متر، ضخامت ۱ میلی متر و قطر داخلی ۵ میلی متر قرار می‌گیرد.

۱. Liu

۲. Reactive Oxygen Species (ROS)

۳. Nam

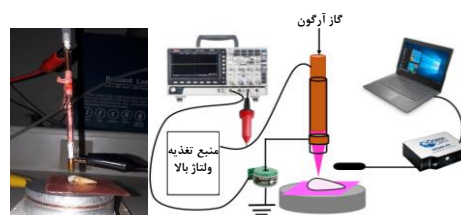


شکل ۲. نمودار جریان تخلیه و ولتاژ اعمالی نوعی به پلاسما بر حسب زمان

با استفاده از شکل ۲ و رابطه (۱)، توان متوسط در یک دوره تناوب آن تقریباً ۲۵ وات برآورد شد.

## ۲.۱. طیف‌سنجی نشر نوری

مطالعات گوناگون نشان داده اند که گونه‌های فعال ایجاد شده در پلاسما از جمله عوامل تعیین کننده برای عملکرد پلاسما در پردازش سطوح زیستی و غیر زیستی هستند. برای شناسایی گونه‌های تولید شده در یک جت پلاسما از طیف‌سنجی گسیل نوری استفاده می‌کنیم. بدین منظور، یک فیبر نوری یک طیف‌سنج (مدل HR2000+ES) برای ثبت طیف نور گسیلی از پلاسمای گاز آرگون به کار گرفته شد. شکل ۳، طیف نوعی و گونه‌های فعال موجود در جت پلاسمای اتمسفری آرگون را در گستره ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر نشان می‌دهد. بر اساس این طیف، خطوط ۶۹۶/۵، ۷۰۶/۷، ۷۱۴/۷، ۷۲۷/۳، ۷۳۸/۴، ۷۵۰/۴، ۷۵۱/۵، ۷۶۳/۵، ۷۷۲/۴، ۷۹۴/۸، ۸۰۱/۵، ۸۱۱/۵، ۸۲۶/۵ نانومتر مربوط به اتم‌های آرگون برانگیخته هستند. گونه‌های دیگر  $N_2$ ، NO، OH و O هستند که از بین آن‌ها، OH، NO و اکسیژن اتمی O بسیار واکنش پذیر هستند و نیمه عمر بالاتری نسبت به سایر عوامل تولید شده دارند. رادیکال‌های اکسیژن اتمی، به علت طول عمر و واکنش پذیری بالا، نقش تعیین کننده ای در عملکرد پلاسما به ویژه در پزشکی و اصلاح سطح دارند. این گونه‌های واکنش پذیر توانایی جداسازی اتم‌ها از سطح و جایگزین کردن آن‌ها با گروه‌های عاملی مؤثر را داشته و در نهایت منجر به پردازش سطح می‌شوند.



شکل ۱. طرح و تصویر جت پلاسمای تولید شده توسط ساختار دو الکترودی سد دی الکتریک

الکتروود دوم، حلقه نازک مسی به پهنای ۵ میلی‌متر است که دور استوانه کوارتز و در نزدیکی الکتروود داخلی ولتاژ بالا قرار گرفته و به زمین متصل می‌گردد. همزمان با هدایت گاز آرگون (با شار ۳ لیتر بر دقیقه) به داخل الکتروود استوانه‌ای داخلی، یک ولتاژ نوعی (۱۵ کیلو ولت با بسامد ۵ کیلوهرتز) به الکتروودها اعمال گردیده و گاز آرگون را یونیزه می‌کند. پلاسمای حاصل از این یونیزاسیون به صورت جت از انتهای لوله کوارتز خارج می‌گردد. در این جا، طول نوعی جت پلاسما ۵ میلی‌متر و فاصله نمونه‌ها و انتهای لوله کوارتز با توجه به شرایط آزمایش ۵ میلی‌متر انتخاب گردیده است. شکل ۱ سامانه جت پلاسما و چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد.

یکی از روش‌ها برای مشخصه یابی الکتریکی پلاسما، استفاده از منحنی مشخصه ولتاژ-جریان است. بدین منظور، برای ثبت سیگنال‌های ولتاژ و جریان، از یک اسیلوسکوپ چهارکاناله دیجیتال GW INSTEK مدل (GDS-2304A, 300MHz, 2GS/s) استفاده شد. همچنین با تغییر مشخصات الکتریکی منبع تغذیه، می‌توان شکل ولتاژ سینوسی و جریان تخلیه را به کمک اسیلوسکوپ مشاهده نمود. ولتاژ اعمالی بر الکتروود، توسط کاوه ولتاژ بالا (مدل HVP-39pro، شرکت PINTEK) و جریان تخلیه، توسط کاوه جریان (مدل 2878 شرکت Pearson) اندازه‌گیری گردید. شکل ۲، نمونه‌ای از جریان و ولتاژ ثبت شده در این آزمایش را نشان می‌دهد.

توان متوسط تحویلی به پلاسما در یک چرخه را می‌توان از رابطه زیر برآورد کرد:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V(t)I(t)dt \quad (1)$$

که در آن  $T$  دوره تناوب یک چرخه،  $V$  ولتاژ اعمالی و  $I$  جریان تخلیه است. ولتاژ روی الکتروود ولتاژ بالا و جریان تخلیه روی الکتروود زمین اندازه‌گیری می‌شوند.

و در محلول تیمول ۰/۱ درصد برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها در دمای اتاق معمولی به مدت یک هفته نگهداری شدند. دندان‌ها برای درمان با سه رویکرد درمانی متمایز، به چهار گروه به صورت تصادفی (گروه های A-D) با ۵ بار تکرار به شرح زیر تقسیم کردیم.

گروه A: دندان‌ها به مدت زمان ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه تحت تابش پلاسما قرار گرفتند.

گروه B: دندان‌های آغشته به دو قطره از ژل فلوراید به مدت زمان ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه تحت تابش پلاسما قرار گرفتند.

گروه C: دندان‌ها ابتدا به مدت ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه تحت تابش پلاسما قرار گرفتند و سپس دو قطره از ژل فلوراید به مدت ۵ دقیقه بلافاصله روی سطح دندان اعمال شد.

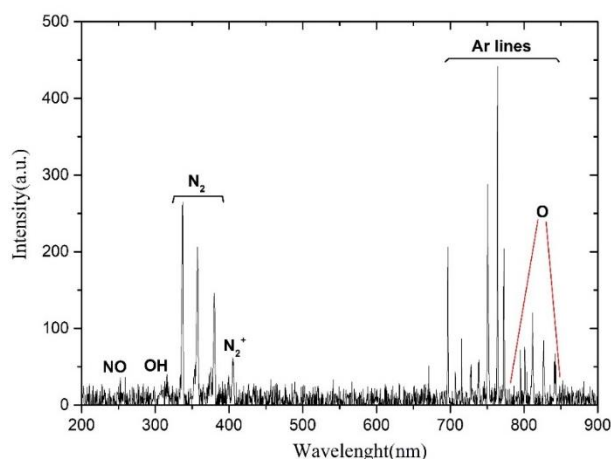
گروه D (گروه کنترل): دندان‌ها فقط ژل فلوراید دریافت کردند و هیچ تابش پلاسمایی دریافت نکردند.

## ۲.۳. ارزیابی سفیدشدگی دندان به کمک اسپکتروفتومتری

ارزیابی رنگ دندان قبل از درمان و یک روز بعد از اتمام درمان با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر<sup>۵</sup> (مدل Spectroshade Micro II انجام شد و شاخص‌های رنگ در سامانه CIELab بیان شدند. این دستگاه، یک طیف‌سنج قدرتمند است که شاخص‌های رنگ دندان طبیعی و مصنوعی را تحت هر گونه شرایط محیطی به دقت اندازه گیری می‌کند. سامانه CIELab از سه جزء a، b و L تشکیل شده است. گستره ی L از ۰ (سیاه) تا ۱۰۰ (سفید)، a از ۱۲۰- (قرمز) تا ۱۲۰+ (سبز) و b از ۱۲۰+ (زرد) تا ۱۲۰- (آبی) است. تغییر کلی مقدار رنگ دندان یعنی  $\Delta E$ ، از طریق فرمول (۲) تعیین می‌شود [۱۰]:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (2)$$

مقادیر میانگین  $\Delta E$  دندان‌های ۴ گروه بالا پس از تابش با پلاسما در نمودار میله‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. میانگین  $\Delta E$  در این شکل، از تابش پلاسما (به همراه به‌کارگیری ژل فلوراید) برای زمان‌های مختلف با تکرار ۵ بار آزمایش برای هر زمان معین برای گروه‌های A، B و C و نیز استفاده از ژل فلوراید (بدون تابش پلاسما) برای گروه D بدست آمده اند.

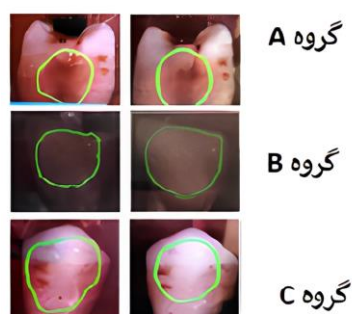


شکل ۳. طیف انتشار نوری پلاسما جت آرگون

در کاربردهای پزشکی، این گونه‌ها می‌توانند روی ساختار خارجی سلول‌ها، اثر اکسیداسیون قوی داشته باشند که از سازوکارهای مؤثر باکتری زدایی به شمار می‌رود. جت آرگون با حرکت در هوای اطراف، مولکول‌های هوا (شامل اکسیژن و نیتروژن) را یونیزه می‌کند. همچنین در اثر تجزیه مولکول اکسیژن، ترکیب NO تولید می‌شود. تحریک NO ها نیز موجب تولید فوتون‌ها می‌شود و این فوتون‌ها (به عنوان یکی دیگر از روش‌های غیرفعال‌سازی باکتری‌ها) باعث شکستن اتصال‌های DNA ها می‌شوند. همچنین، انتشار این خط اکسیژن اتمی در ۷۷۷/۴، ۸۴۲/۵۹ نانومتر و باند OH (A-X) در ۳۰۶-۳۰۹ نانومتر شواهدی برای تشکیل ROS ارائه می‌دهد. نتایج آزمایشات در این پژوهش نشان داد که پلاسمای فشار اتمسفری به همراه فلوراید فعال شده اثر سفید کنندگی بالایی در دندان دارد. اگرچه سازوکار اصلی آن کاملاً شناخته شده نیست اما گونه‌های فعال ROS که توسط سامانه پلاسما تولید می‌شود در فرایند سفید کردن دندان‌ها می‌توانند نقش به سزایی داشته باشند. در واقع گونه‌های فعال مانند OH و O با مولکول‌های رنگدانه روی سطح دندان واکنش داده و پیوندهای زنجیره بلند کربنی را شکسته و در نتیجه اثرسفید شدن حاصل می‌شود.

## ۲.۲. آماده سازی و گروه‌بندی نمونه‌های دندان

از ۱۵ دندان مولر انسان کشیده شده به دلایل ارتودنسی در این آزمایش استفاده کردیم. دندان‌ها قبل از استفاده کاملاً تمیز شده



شکل ۵. تصاویر دندان‌ها از گروه A، B، C، D قبل از درمان پلاسما (ستون چپ) و بعد از درمان پلاسما (ستون راست)

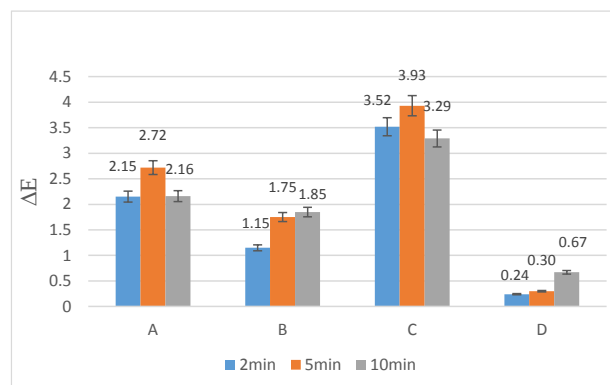
بنابراین نتایج نشان می‌دهد که گروه C بیشترین تأثیر پلاسما را دارد. برای مقایسه تغییر رنگ دندان‌ها در گروه‌های مختلف تصویر واقعی آنها در شکل ۵ ارائه شده است. زمان به کارگیری پلاسما در هر گروه ۵ دقیقه است.

#### ۴.۲. تحلیل آماری

در این آزمایش‌ها، برای ارزیابی میزان سفیدشدگی دندان، از آزمون t-test جهت مقایسه میانگین‌ها بین گروه‌ها (A با D، B با D، و C با D) استفاده شد. سطح معناداری ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. جدول ۱، آمار توصیفی (شامل میانگین و انحراف معیار) مربوط به میزان سفیدشدگی دندان ( $\Delta E$ ) را قبل و بعد از درمان نشان می‌دهد. نتایج آزمون نشان داد که میزان سفیدشدگی دندان پس از استفاده از هر سه روش درمانی، تفاوت معناداری با گروه کنترل (D) داشت ( $p < ۰.۰۵$ ) (جدول ۱).

#### ۵.۲. برهم‌کنش پلاسما با ساختار دندان و نقش ژل فلوراید

مینای دندان، سخت‌ترین ماده در بدن، عمدتاً از هیدروکسی‌آپاتیت کربناته طبیعی (c-HAP) تشکیل شده است. هیدروکسی‌آپاتیت (HAP) یک فسفات کلسیم کریستالی با فرمول شیمیایی  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  و ساختار کریستالی هگزاگونال است. با این وجود، c-HAP موجود در مینای دندان، ترکیبی متفاوت از این فرمول آرمانی دارد، زیرا ناخالصی اصلی آن یون‌های کربنات  $\text{CO}_3^{2-}$  هستند که هم در محل چهاروجهی  $\text{PO}_4^{3-}$  و هم در محل‌های OH- قرار دارند.



شکل ۴. مقادیر میانگین  $\Delta E$  گروه دندان‌های A، B، C، D پس از درمان با پلاسما

دندان‌های گروه A در فاصله ۵ میلی‌متری از انتهای شیشه سامانه جت پلاسما قرار داده شده و به مدت ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه تحت تابش مستقیم پلاسما قرار گرفتند. نتایج نشان داد میانگین  $\Delta E$  نسبت به گروه D بیشتر است، طوری که تابش پلاسما در مقایسه با قرارگیری فلوراید به طور قابل ملاحظه‌ای در سفید کردن دندان تأثیر داشته است. در دندان‌های گروه B که به نحوی همزمانی درمان ژل و پلاسما بررسی شدند، ابتدا دندان‌ها آغشته به دو قطره از ژل فلوراید شده و سپس به مدت زمان ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه تحت تابش پلاسما قرار گرفتند. مشاهده گردید تأثیر همزمانی ژل با پلاسما در مقایسه با گروه D بیشتر اما از گروه A کمتر است. در گروه C، دندان‌ها ابتدا به مدت ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه تحت تابش پلاسما قرار گرفته بودند و سپس دو قطره از ژل فلوراید به مدت ۵ دقیقه بلافاصله روی سطح دندان قرار داده شد. مشاهده گردید میانگین  $\Delta E$  در مقایسه با گروه‌های A، B و D بیشتر است. همچنین، از لحاظ مدت زمان تابش، زمان ۵ دقیقه نتیجه بهتری برای گروه‌های A، B و C نشان می‌دهد.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت، در مقایسه با گروه‌های A، B، و D سفیدی دندان در گروه C به طور قابل توجهی پس از درمان با ژل فعال شده با پلاسما بهبود می‌یابد.  $\Delta E$  میانگین دندان‌های گروه A کمی بالاتر از دو،  $\Delta E$  میانگین دندان‌های گروه B حدوداً یک به بالا، و گروه D کمتر از یک هستند. درحالی که میانگین  $\Delta E$  دندان‌های گروه C تقریباً به  $\pm ۰/۲۶$  رسید.

۳/۹۳ رسید.

جدول ۱. میانگین و انحراف معیار گروه‌های مورد بررسی قبل و بعد از درمان‌های سفید کردن دندان (گروه کنترل: گروه D)

| گروه   | نیمه  | میانگین | انحراف معیار | نتیجه آزمون t |
|--------|-------|---------|--------------|---------------|
| گروه A | تجربی | ۲/۳۴    | ۰/۱۰         | P=۰/۰۰۱       |
|        | کنترل | ۰/۴۱    | ۰/۰۵         |               |
| گروه B | تجربی | ۱/۵۸    | ۰/۱۴         | P=۰/۰۱        |
|        | کنترل | ۰/۴۱    | ۰/۰۵         |               |
| گروه C | تجربی | ۳/۵۸    | ۰/۱۱         | P=۰/۰۰۰۱      |
|        | کنترل | ۰/۴۱    | ۰/۰۵         |               |

دمینرالیزاسیون<sup>۱</sup> و رمینرالیزاسیون<sup>۲</sup> دندان فرآیندهایی هستند که شامل از دست دادن و به دست آوردن مواد معدنی، به ویژه کلسیم و فسفات، می‌شوند. این سازوکارها در حفظ ساختار دندان و سلامت دهان و دندان نقش حیاتی دارند. دمینرالیزاسیون به عنوان کاهش مواد معدنی از مینای دندان زمانی تعریف می‌شود که pH از سطح بحرانی پایین‌تر می‌آید. در نتیجه، مینای دندان ضعیف‌تر، نرم‌تر و مستعدتر به پوسیدگی می‌شود. بزاق اسیدها را بافر کرده و یک محلول اشباع از کلسیم و فسفات را فراهم می‌کند تا از دمینرالیزاسیون جلوگیری کرده و رمینرالیزاسیون را ایجاد کند. رمینرالیزاسیون عبارت است از رسوب مواد معدنی در مینای دندان. این امر همچنین می‌تواند از طریق درمان با فلوراید محقق شود. فلوراید با تشکیل فلوروآپاتیت، یک ساختار کریستالی مقاوم‌تر، نقش مهمی در رمینرالیزاسیون ایفا می‌کند [۱۱].

پلاσμα با ایجاد گونه‌های واکنش‌پذیر، سطح مینای دندان را تغییر می‌دهد و انرژی سطحی آن را افزایش می‌دهد. این تغییرات باعث افزایش چسبندگی و نفوذ یون‌های فلوراید به داخل مینای دندان می‌شود، که در نهایت منجر به بهبود کارایی درمان فلوراید می‌شود. ژل فلوراید با جایگزینی یون‌های هیدروکسیل در هیدروکسی آپاتیت (ماده اصلی مینای دندان) با

یون‌های فلوراید، فلوروآپاتیت تشکیل می‌دهد. فلوروآپاتیت در برابر اسیدها مقاوم‌تر است و از دمینرالیزاسیون مینای دندان جلوگیری می‌کند. فلوراید همچنین می‌تواند تولید اسید توسط باکتری‌های دهان را مهار کند و به حفظ محیط خنثی در دهان کمک کند. ژل فلوراید<sup>۳</sup> به ویژه ژل فلوراید همراه با پلاσμα<sup>۴</sup>، به دلیل ویژگی‌های شیمیایی خاص خود، تأثیر زیادی بر روی مینای دندان دارد و می‌تواند به افزایش مقاومت دندان در برابر تخریب و پوسیدگی کمک کند و فرآیند دمینرالیزاسیون را بهبود بخشد [۱۲]. روش‌های متعددی برای ارزیابی رمینرالیزاسیون دندان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، از روش-DR FTIR برای بررسی اثرات ژل فلوراید و ژل فلوراید همراه با پلاσμα بر ساختار شیمیایی مینای دندان در طول فرآیند رمینرالیزاسیون استفاده شد. شکل ۷. الف، طیف DR-FTIR نمونه‌ها را قبل از هر گونه درمان (تیمار نشده)، پس از دمینرالیزاسیون توسط محلول اتیلن دی آمین تترا استیک اسید<sup>۵</sup> (یک ماده از بین برنده مواد معدنی) و پس از رمینرالیزاسیون توسط ژل فلوراید نشان می‌دهد. شکل ۷. ب، همان اطلاعات شکل ۷. الف را نشان می‌دهد، اما با این تفاوت که فرآیند رمینرالیزاسیون با استفاده از ژل فلوراید همراه با پلاσμα انجام شده است. برای هر دو شکل، طیف‌ها برای سه حالت مختلف نمونه‌ها نشان داده شده‌اند:

- تیمار نشده<sup>۶</sup>: نمونه‌هایی که هیچ گونه درمانی روی آن‌ها انجام نشده است (نمونه شاهد).
- دمینرالیزه شده: نمونه‌هایی که با محلول اتیلن دی آمین تترا استیک اسید دمینرالیزه شده‌اند تا شرایطی مشابه پوسیدگی دندان ایجاد شود.
- رمینرالیزه شده: نمونه‌هایی که پس از دمینرالیزاسیون، با ژل فلوراید (در شکل ۷. الف) یا ژل فلوراید همراه با پلاσμα (در شکل ۷. ب) رمینرالیزه شده‌اند.

۱. Demineralization

۲. Remineralization

۳. Fluoride gel (FG)

۴. Plasma-activated fluoride gel (PAFG)

۵. Ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA)

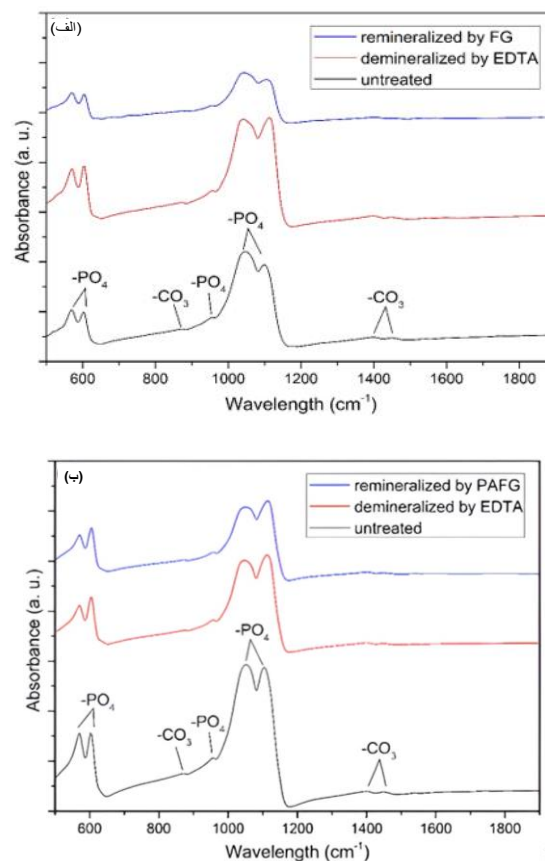
۶. Untreated

افزایش یافته و منجر به افزایش ناحیه اثر و عمق نفوذ جت می‌شود. توان بالاتر عموماً به تولید پلاسما با یونیزاسیون بیشتر منجر می‌شود که می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی جت را تغییر دهد. بسیاری از تحقیقات نشان داده‌اند که با افزایش توان، ساختار جت دستخوش تغییرات می‌شوند. به عنوان مثال، ممکن است عرض جت افزایش یابد یا شکل آن تغییر کند.

همچنین، توان پلاسما ارتباط مسقیمی با غلظت و تنوع گونه‌های فعال تولید شده در پلاسما دارد. به طور خلاصه می‌توان گفت در توان‌های پایین، دما و چگالی پلاسما و دمای گاز پایین بوده و تعداد گونه‌های فعال (اتم‌های برانگیخته، یون‌ها، رادیکال‌ها) کم است و پلاسما کمتر فعال است.

با افزایش توان، ضمن تغییر سایر ویژگی‌ها، تعداد و غلظت گونه‌های فعال افزایش می‌یابد و پلاسما برای واکنش‌های شیمیایی و سطحی فعال‌تر می‌شود. با افزایش بیشتر توان، ممکن است گونه‌های فعال ناپایدار تشکیل شوند و واکنش‌های ناخواسته رخ دهد. همچنین با افزایش دما و چگالی، ممکن است پلاسما حرارتی شده و برای سطوح حساس به دما مناسب نباشد [۱۴]. مطالعه اثر توان مختلف در جت پلاسمای فشار اتمسفری غیر حرارتی آرگون می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی و پزشکی کمک کند و همچنین در طراحی ابزارهایی با کارایی بالاتر مورد استفاده قرار گیرد. به منظور بررسی تأثیر توان ورودی جت پلاسمایی بر کیفیت و سرعت فرآیند سفید کردن دندان، در قسمتی از این پژوهش توان‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات قبلی نشان داد که گروه C بیشترین تأثیر سفید کردن را در بین گروه‌ها دارد. بنابراین برای گروه C، تأثیر پلاسما در توان‌های مختلف روی دندان‌ها با زمان تابش ۵ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نمودار ۷ مشاهده می‌شود که با افزایش توان، مقدار متوسط  $\Delta E$  (میزان سفید شونده) افزایش می‌یابد.

این موضوع با مقایسه خطوط طیفی حاصل از بیناب سنجی گسیل نوری توان‌های مختلف در شکل ۸ به این صورت قابل توصیف است که به دلیل این‌که شدت خطوط طیفی مشاهده شده در توان‌های بالا قوی‌تر بوده و در نتیجه تعداد گونه‌های فعال بیشتری شود، میزان سفید شدن دندان در توان‌های بالا بیشتر است.



شکل ۶. طیف‌های FTIR دو گروه در طول فرآیند remineralizasyon با (الف) ژل فلوراید و (ب) ژل فلوراید همراه با پلاسما

طیف‌ها در محدوده طیفی ۲۰۰۰-۵۰۰ نشان داده شده‌اند و برای درک بهتر شکل، در امتداد محور y جابه‌جا شده‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، قله‌های مشاهده شده مربوط به نوارهای کربنات (تقریباً ۱۵۰۰-۱۴۰۰ و ۸۷۰) و گروه‌های فسفات هیدروکسی‌آپاتیت مینای دندان (تقریباً ۱۰۰۰-۱۱۵۰، ۹۶۰ و ۵۵۰-۶۵۰) بودند. تجزیه و تحلیل DR-FTIR نشان داد که ترکیب کربنات‌ها و فسفات‌ها در نمونه‌های تیمار نشده، دمینرالیزه شده و remineralized شده مشابه است. این بدان معناست که اگرچه دمینرالیزاسیون و remineralizasyon می‌تواند بر ساختار مینای دندان تأثیر بگذارند، اما ترکیب کلی کربنات‌ها و فسفات‌ها در طول این فرآیندها نسبتاً ثابت باقی می‌ماند [۱۳].

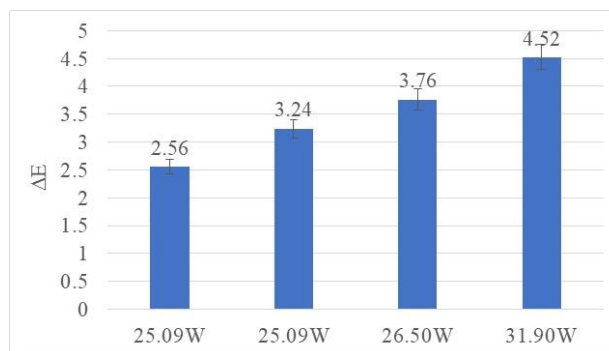
## ۲.۶. تأثیر توان تحویلی به پلاسما در سفید کردن دندان

تغییر توان ورودی به سامانه می‌تواند بر ویژگی‌های جت پلاسمایی شامل دما، چگالی، ساختار پلاسما و گونه‌های فعال تأثیر بگذارد. به‌طوری که با افزایش توان، دما و چگالی پلاسما

مینای دندان ایجاد نمی‌کند. به عبارت دیگر، در این مطالعه خاص، فعال‌سازی پلاسما تأثیر سویی بر ترکیب مینای دندان نداشت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در شرایط آزمایشگاهی حاضر، فعال‌سازی پلاسما به عنوان روشی برای افزایش کارایی ژل فلوراید، حداقل از نظر تغییرات در ترکیب مینای دندان، عوارض جانبی قابل توجهی ایجاد نکرده است.

با توجه به این‌که زبری سطح دندان می‌تواند به دلیل فرسایش، حل شدن مواد معدنی یا رسوب مواد جدید تغییر کند و این تغییرات معمولاً با تغییر در ترکیب شیمیایی سطح توسط FTIR قابل تشخیص هستند. یافته‌های تحلیل DR-FTIR نشان داد که دمنیرالیزاسیون و رمینرالیزاسیون، با وجود تأثیر بر ساختار مینا، تغییر قابل توجهی در نسبت کربنات‌ها و فسفات‌های سطح دندان ایجاد نمی‌کنند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات زبری سطح مشاهده شده در این فرآیندها احتمالاً به دلیل تغییرات دیگری در ساختار مینا، مانند تغییر در اندازه و آرایش بلورها، ایجاد می‌شوند و نه ناشی از تغییر در ترکیب شیمیایی اصلی سطح دندان.

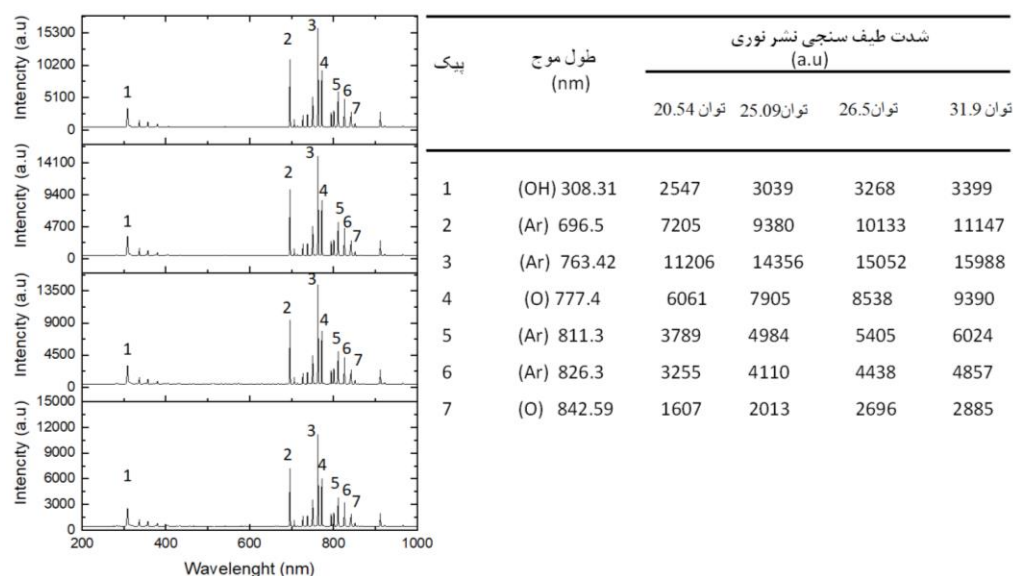
در بررسی تأثیر توان پلاسما، مشاهده شد برای توان‌های بالا شدت گونه‌های فعال قوی‌تر شده و در نتیجه میزان سفید شدن دندان افزایش یافته است. توان‌های بالاتر می‌توانند موجب تولید پلاسما با چگالی بالاتر و فعالیت بیشتر رادیکال‌های آزاد شوند. در توان‌های بالا، ممکن است سرعت اثر سفیدی افزایش یابد، اما ممکن است خطر آسیب به ساختار دندان یا بافت‌های نرم افزایش یابد. به همین دلیل، انتخاب توان مناسب حائز اهمیت است. توان‌های مختلف می‌توانند بر زمان مورد نیاز برای مشاهده نتایج تأثیر بگذارند. توان بالاتر ممکن است زمان درمان را کاهش دهد، اما نیاز به دقت بیشتری برای جلوگیری از آسیب داریم. در واقع استفاده از جت پلاسمای فشاراتمسفیری غیر حرارتی آرگون در سفید کردن دندان‌ها یک راهکار نوین و مؤثر است که با تنظیم دقیق توان ورودی می‌توان به نتایج مطلوب و ایمنی دست یافت.



شکل ۷. مقادیر میانگین  $\Delta E$  گروه C پس از درمان با پلاسما برای توان‌های مختلف (فاصله انتهایی شیشه تا دندان ۵ میلی متر و شار گاز ۳ لیتر بر دقیقه)

### ۳. بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساختار دو الکترودی جت پلاسمای فشار اتمسفری آرگون طراحی و ساخته شد. سپس اندازه‌گیری مشخصه‌های الکتریکی جت، جهت تعیین توان پلاسما، برای آن انجام گرفت و گونه‌های فعال تولید شده از جت با طیف‌سنجی گسیلی شناسایی گردید. در نهایت تأثیر تابش پلاسما با روش‌های مختلف اعمالی بر سفید کردن دندان‌ها مورد بررسی قرار گرفت. براساس نمودار ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده، قله تا قله اعمالی ولتاژ نوعاً به اندازه ۱۵/۲ کیلو ولت با بسامد ۵/۱۸ کیلو هرتز است. توان متوسط در یک دوره تناوب با استفاده از ولتاژ و جریان تخلیه تقریباً ۲۵.۰۹ وات برآورد شد. از گونه‌های واکنش پذیر ظاهر شده در طیف می‌توان به  $OH$ ،  $NO$ ،  $N_2$  و  $O$  اشاره کرد که از میان آن‌ها،  $OH$  و اکسیژن اتمی  $O$  بسیار واکنش پذیر هستند، که نقش به سزایی در فرآیند سفید کردن دندان دارند. نتایج نشان داد زمانی که دندان‌ها ابتدا به مدت ۲، ۵ و ۱۰ دقیقه تحت تابش پلاسما قرار گرفتند و سپس دو قطره از ژل فلوراید به مدت ۵ دقیقه بلافاصله روی سطح دندان اعمال شد بیشترین تأثیر سفید کردن دندان را در بین گروه‌های معرفی شده داشت. همچنین زمان ۵ دقیقه به عنوان زمان بهینه بدست آمد. نتایج تجزیه و تحلیل DR-FTIR نشان داد که استفاده از پلاسمای سرد به عنوان فعال‌کننده ژل فلوراید، تغییرات قابل توجهی در ترکیب



شکل ۸. طیف انتشار نوری پلاسما جت آرگون برای توان‌های مختلف

#### ۴. مراجع

1. A Fridman and L Kennedy, "Plasma Physics and Engineering," CRC press, (2011).
2. R Roth, "Industrial Plasma Engineering" vol.2 IoP Publishing (2001).
3. L Bárdos and H Baránková, Thin Solid Films **518** (2010) 6705.
4. K D Weltman, et al., Contrib. Plasma Phys. **52** (2012) 644.
5. Z Machala, et al., "Plasma for bio-decontamination, medicine and food security", Springer Science and Business Media, (2012).
6. G Heinlin, et al., J. Dtsch. Dermatol. Ges. **8** (2010) 968.
7. Y Liu et al., J. Dent. Res. **95** (2016) 496.
8. S Nam, et al., Int. J. Environ. Res. Public Health **18** (2021) 4714.
9. Y Nassar and M Brizuela, "The Role of Fluoride on Caries Prevention", StatPearls Publishing; St.Petersburg, FL, USA, (2023).
10. R Hunt and M Pointer, "Color Measurement and Calibration in Medical Photography", Wiley, Hoboken, NJ, (2011).
11. J M Ten Cate, Aust Dent J. **53**(3) (2008) 281.
12. S Fathollah, et al., Sci. Rep. **12** (2022) 4657.
13. J Reyes-Gasga, et al., Mater. Sci. Eng. **33**(8), (2013) 4568.
14. Q Xiong, et al., Plasma Sci. Technol. **24** (2022) 105404.