

- The paper is written in Farsi and needs to be translated. You can find some of that as below:

عملیات سطحی

همانگونه که عکس ۴-۱۱ و جدول ۴-۳ نشان می‌دهند، توپوگرافی سطح قطعات پس از ساخت دارای زبری بسیار زیادی می‌باشد که به دلیل حضور پودرهای ذوب نشده یا ذوب ناقص شده ایجاد شده است. هدف از انجام انواع روش‌های پس پردازش دستیابی به روشی بهینه برای حذف پودرهای نامطلوب ذوب نشده از روی سطح می‌باشد. منظور از پودرهای نامطلوب پودرهایی می‌باشند که سطح تماس کوچکی با دیواره دارند و با قرار گیری درون بدن و حضور مداوم جریان خون امکان جدایش آن‌ها از دیواره و قرار گیری درون جریان خون وجود دارد که این اتفاق می‌تواند پاسخ‌های التهابی را از سمت بدن به دنبال داشته باشد. اما پودرهایی که سطح تماس زیادی با دیواره دارند مطلوب هستند، چرا که این سطح تماس زیاد امکان جدایش آن‌ها را ممکن نمی‌سازد و علاوه بر این، این پودرها با ایجاد یک زبری مناسب بر روی سطح ایمپلنت، با افزایش نسبت سطح تماس استخوان- ایمپلنت باعث افزایش نرخ استخوان سازی می‌شوند [۱۱۱]. در شکل ۴-۱۲ که نشان دهنده تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح یک نمونه بدون هیچ گونه عملیات سطحی پس از ساخت می‌باشد، این دو نوع پودر به ترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی برای حالت نامطلوب و مطلوب مشخص شده‌اند. برای این منظور، از چندین عملیات پس از ساخت شیمیایی، الکتروشیمیایی، و ترکیبی از آن‌ها کمک گرفته شد که در ادامه عملکرد هر روش به طور عمیق بررسی خواهد گردید.

جدول ۴-۳- پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصل از آزمون کانفوکال

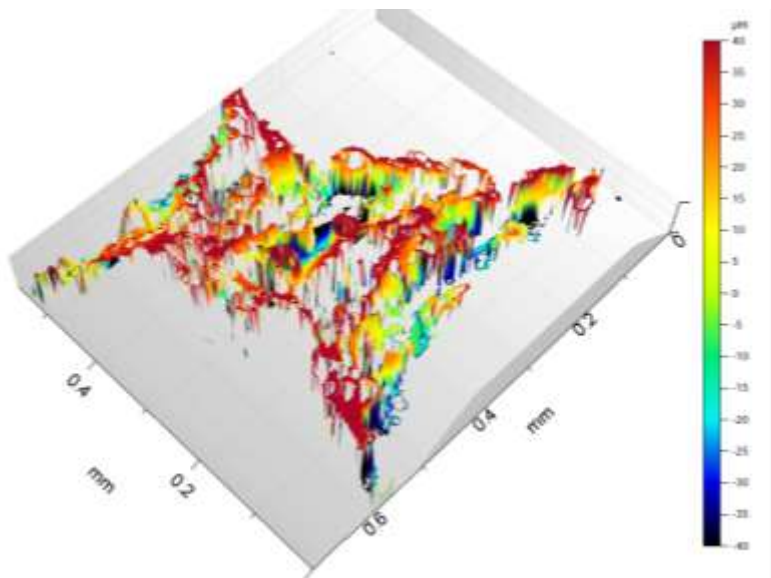
Height Parameters			
Sq	61.9	μm	Root mean square height
Ssk	-1.29		Skewness ^۱
Sku	6.76		Kurtosis ^۲
Sp	121	μm	Maximum peak height
Sv	370	μm	Maximum pit height
Sz	491	μm	Maximum height

^۱ مقادیر Ssk نشان‌دهنده میزان تقارن پروفایل زبری است. در $Ssk=0$ توزیع ارتفاع (قله ها و چاله ها) در اطراف صفحه میانگین متقارن است. در $Ssk<0$ توزیع ارتفاع بالاتر از سطح میانگین است.

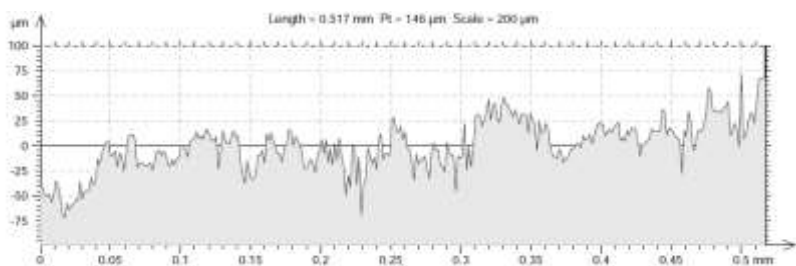
^۲ مقدار Sku معیاری برای سنجش میزان تیزی پروفایل زبری است. در $Sku=3$ توزیع ارتفاع نرمال است. (قسمت های تیز و قسمت های تورفتگی همزمان وجود دارند).

Amplitude parameters			
Ra ^۱	21.0	μm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz ^۲	90.1	μm	Gaussian filter, 0.08 mm

^۱ Ra میانگین انحراف ارتفاع هر نقطه از سطح از ارتفاع متوسط است.
^۲ میانگین اختلاف ارتفاع بین پنج مرتفع ترین قله و پنج پایین ترین دره.

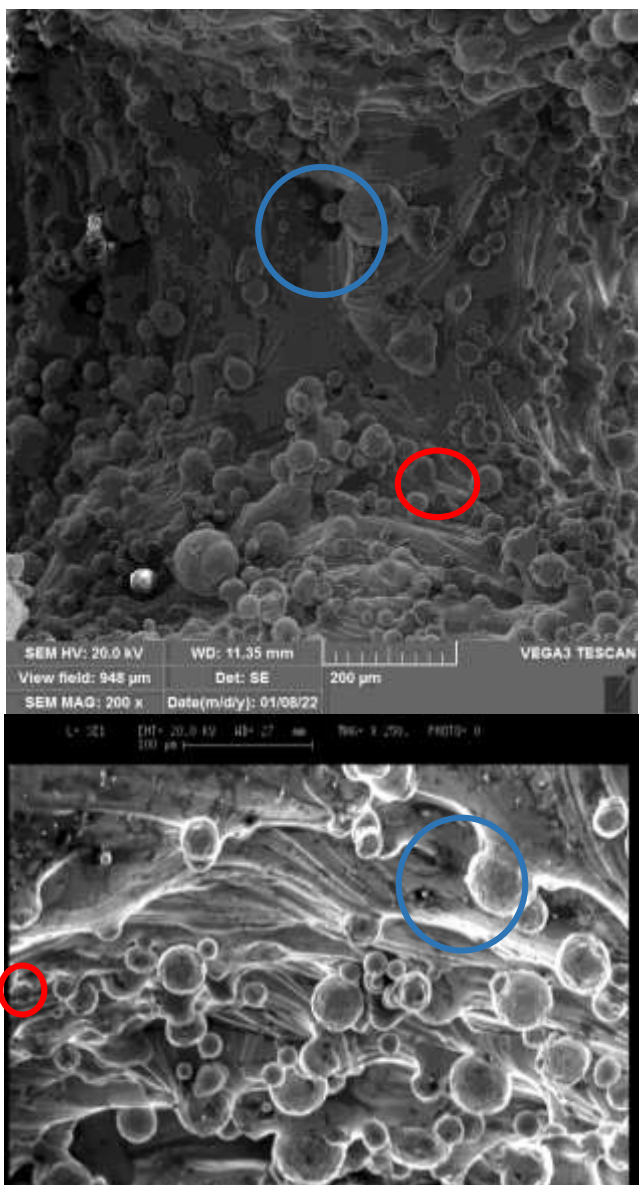


الف



ب

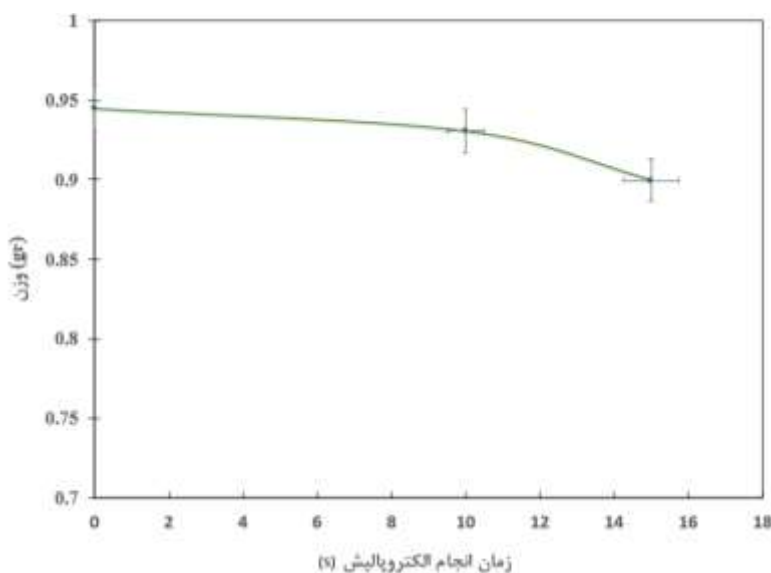
شکل ۴-۱۱- الف) تصویر توپوگرافی حاصل از آزمون کانفوکال از سطح نمونه‌ای بدون هیچ‌گونه عملیات سطحی پس از ساخت، و ب) پروفایل زبری آن



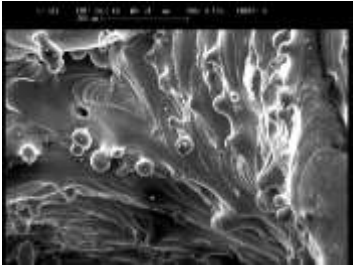
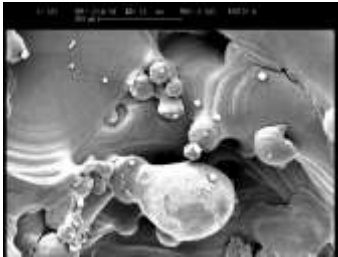
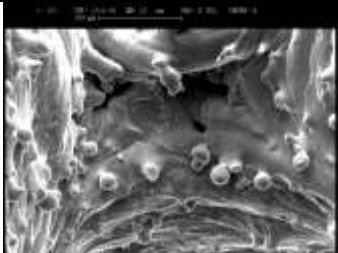
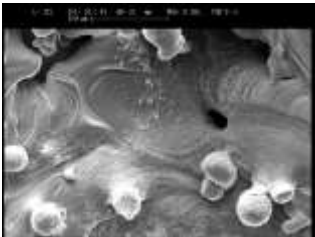

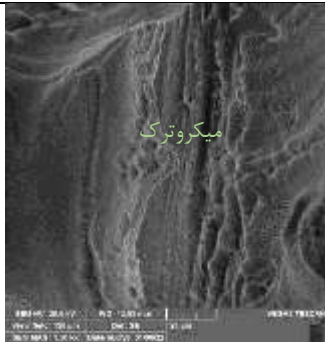
شکل ۴-۱۲- تصاویر SEM از سطح نمونه‌ای بدون هیچ گونه عملیات سطحی پس از ساخت. نمونه‌ای از پودرهای مطلوب با دایره آبی و نامطلوب با دایره قرمز مشخص گردیده‌اند.

۴-۲-۱- الکتروشیمیایی

اولین عملیاتی سطحی صورت گرفته عملیات الکتروشیمیایی بود که در بسیاری مقالات به عنوان یک روش کارآمد برای حذف پودرهای ذوب نشده نامطلوب ذکر شده است. بدین منظور ابتدا یک مرحله ده ثانیه‌ای عملیات الکتروپالیش بر روی نمونه انجام گرفت، اما کاهش وزن ناچیز و عدم حذف پودرهای ذکر شده در مشاهدات میکروسکوپی SEM و تغییرات اندک پروفایل کانفوکال باعث گردیدند که ۵ ثانیه دیگر این عملیات تکرار شود. پس از مرحله دوم، کاهش وزن بیشتر شد اما کماکان پودرهای ذوب نشده بسیاری بر روی سطح نمونه مشاهده می‌شد و پروفایل زبری آن نیز تغییر مطلوبی نکرد. شکل ۴-۱۳ نمودار وزن نمونه بعد از هر مرحله عملیات، و شکل ۴-۱۴ تصاویر SEM قبل و بعد از هر دو مرحله عملیات سطحی الکتروشیمیایی را نشان می‌دهند. جداول ۴-۴ و ۴-۵ پارامترهای مشخص کننده زبری سطح پس از هر دو عملیات ۱۰ و ۱۵ ثانیه‌ای را نشان می‌دهند. شکل ۴-۱۵ نیز پروفایل زبری و عکس‌های مربوطه حاصل از آزمون توپوگرافی کانفوکال را نشان می‌دهد که زبری آن در توافق با نتایج نارضایت بخش SEM است.



شکل ۴-۱۳- نمودار وزن نمونه در طی فرآیند الکتروپالیش

بدون عملیات		
پس از مرحله ۱		
پس از مرحله ۲		

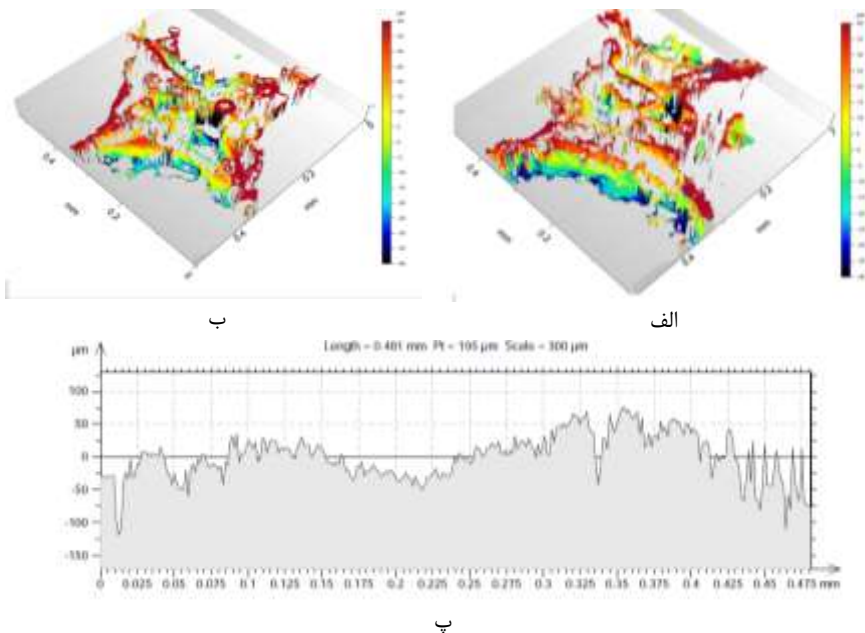
شکل ۴-۱۴- مقایسه کیفیت سطح پیش و پس از دو مرحله متوالی ده و پنج ثانیه‌ای عملیات الکتروپالیش به کمک تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی از نقاط مشابه

جدول ۴-۴- پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصل از آزمون کانفوکال پس از عملیات سطحی الکتروپالیش به مدت ۱۰ ثانیه

Height Parameters			
Sq	59.5	μm	Root mean square height
Ssk	-0.644		Skewness
Sku	3.99		Kurtosis
Sp	143	μm	Maximum peak height
Sv	309	μm	Maximum pit height
Sz	452	μm	Maximum height
Amplitude parameters			
Ra	20.7	μm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	86.8	μm	Gaussian filter, 0.08 mm

جدول ۴-۵- پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصل از آزمون کانفوکال پس از عملیات سطحی الکتروپالیش به مدت ۱۵ ثانیه

Height Parameters			
Sq	52.8	μm	Root mean square height
Ssk	-0.771		Skewness
Sku	3.87		Kurtosis
Sp	138	μm	Maximum peak height
Sv	282	μm	Maximum pit height
Sz	420	μm	Maximum height
Amplitude parameters			
Ra	19.4	μm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	90.2	μm	Gaussian filter, 0.08 mm

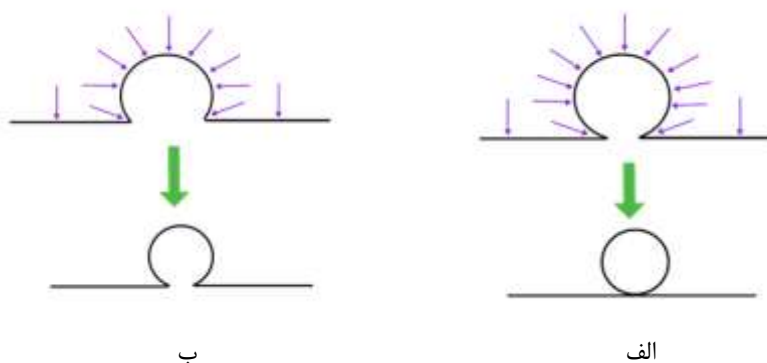


شکل ۴-۱۵- الف و ب) تصاویر توپوگرافی حاصل از آزمون کانفوکال از سطح نمونه پس از به ترتیب ۱۰ و ۱۵ ثانیه الکتروپالیش، و پ و ت) پروفایل زبری آن‌ها

دلیل عملکرد غیر رضایت بخش فرآیند الکتروپالیش این است که در این فرآیند در هر مرحله با انحلال مواد یک لایه از روی سطح برداشته می‌شود، حال اگر همانند شکل ۴-۱۶ الف سطح تماس پودر کم باشد، یا به عبارتی دیگر نامطلوب باشد، پس از عملیات الکتروشیمیایی حذف می‌شود. اما اگر همانگونه که شکل ۴-۱۶ ب نشان می‌دهد، پودر از نوع مطلوب باشد، پس از این فرآیند به پودر نامطلوب تبدیل می‌شود. این دلیل حضور پودرهای ذوب نشده نامطلوب در تمامی عکس‌های SEM مربوطه است. حال شاید این سوال پیش آید که اگر آنقدر فرآیند تکرار شود تا تمامی پودرها چه مطلوب چه نامطلوب حذف گردند، آیا می‌توان این فرآیند را موثر دانست؟ در جواب باید گفت با توجه به شرایط خاص ساختارها در پژوهش حاضر و مشاهدات صورت گرفته این امکان وجود دارد که با تکرار بیشتر این عملیات دیواره بسیار کوچک گردیده و منجر به کاهش چشمگیر استحکام می‌گردد و از آنجایی که استحکام با توجه به کارکرد ایمپلنت یک خاصیت مهم به حساب می‌آید، چنین کاری پیشنهاد نمی‌شود. اما با توجه به قابلیت عملیات الکتروشیمیایی در ناچیز کردن سطح تماس پودرهای ذوب نشده نامطلوب، می‌توان از این فرآیند با زمان کمتر به عنوان مرحله یک در فرآیندهای ترکیبی استفاده کرد. در تصاویر SEM مربوط به مرحله ۱

الکتروشیمیایی، باقی مانده مواد حل شده و پودرهای جدا شده بر روی سطح قابل مشاهده است که این به دلیل عدم شست و شوی کافی نمونه پس از عملیات می باشد و با افزایش زمان شست و شو، دیگر اثری از این باقیمانده ها مشاهده نشد. مقایسه تصاویر SEM مراحل ۱ و ۲ عملیات الکتروشیمیایی همچنین نشان می دهد که با تکرار عملیات به دلیل انحلال زیاد مواد به سطح حمله شده است و منجر به کاهش کیفیت آن گردیده است. علاوه بر این، همانگونه که شکل ۴-۱۴ نشان می دهد، پس از مدت زمان ۱۵ ثانیه، در اثر انحلال مواد در طول فرآیند میکروتترک هایی ایجاد گردیدند که حضور آن ها می تواند علاوه بر افت استحکام ساختار را مستعد خوردگی حفره ای کند که این خود باعث افزایش حفره ها یا سوراخ های داخلی می شود. این نکته دلیل افزایش مقدار RZ در جدول ۴-۵ به نسبت جدول ۴-۳ نیز می باشد. لازم به ذکر است اندازه کمتر پارامترهای ارتفاع اندازه گیری شده برای سطح نشانه حضور کمتر ذرات ذوب نشده است، اما از بین آن ها پارامترهای Ssk و Sku که برای توصیف میزان تیزی پروفایل زبری به کار می روند برای توصیف سطح کافی نیستند، و پیشنهاد می شود که

از پارامترهای Sdr و Sdq^2 کمک گرفته شود [۱۱۲، ۱۱۳].



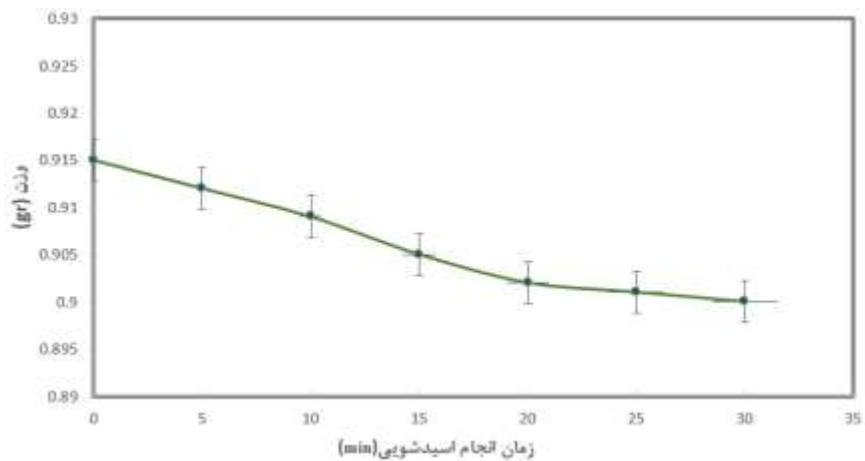
شکل ۴-۱۶- الف) چگونگی حذف پودرهای ذوب نشده نامطلوب در طی فرآیند الکتروپالایش، و ب) چگونگی تبدیل پودرهای ذوب نشده مطلوب به نامطلوب در طی این فرآیند

۴-۲-۲- عملیات شیمیایی

Sdr^1 (developed interfacial area ratio)، به عنوان درصد مساحت سطح اضافی ایجاد شده به علت زبری در مقایسه با صفحه ایده آل بدون زبری بیان می شود.

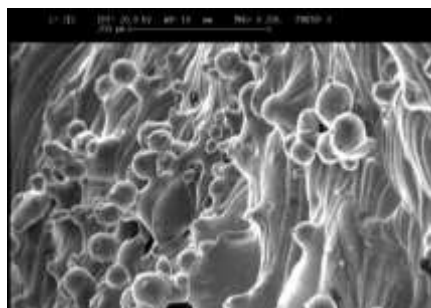
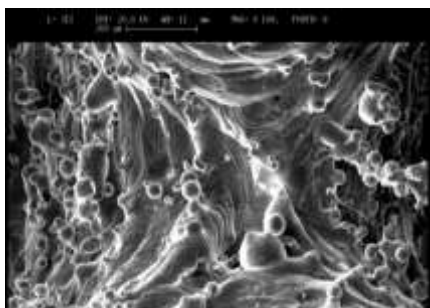
یک سطح کاملاً تراز ۰ است. Sdq گرادیان ریشه میانگین مربع است. Sdq (root mean square gradient)

عملیات سطحی اسیدشویی به عنوان یک عملیات سطحی شیمیایی، فرآیند دیگری بود که مورد بررسی قرار گرفت. اما به علت پیچیدگی ساختار، از التراسونیک مداوم نیز به منظور کمک به این فرآیند استفاده شد. در ابتدا، ۳ مرحله ۵ دقیقه‌ای این عملیات صورت گرفت، و نتایج SEM و کاهش وزن آن حاکی از امیدوار کننده بودن این روش بودند چرا که تعداد زیادی از پودرهای بزرگ نامطلوب و پودرهایی با سطح تماس کم حذف شده بودند. با توجه به نتایج و عدم کاهش وزن چشمگیر، این مرحله یکبار دیگر تکرار شد و کیفیت آن مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴-۱۷ نمودار وزن نمونه در طی فرآیند اسیدشویی را نشان می‌دهد. نکته جالبی که در رابطه با این نمودار وجود دارد، این است که هرچه زمان بیشتری سپری می‌شود، کاهش وزن نیز نسبت به مرحله قبل کمتر می‌شود، بصورتی که در انتها نمودار شکل افقی پیدا کرده است. دلیل این رفتار در این نکته نهفته است که اسید به سمت سطح مشترک پودر نامطلوب و دیواره حمله کرده و آن را تضعیف می‌کند و ارتعاشات التراسونیک باعث جدا گشتن آن می‌گردد، حال هرچه زمان بیشتری بگذرد، به علت حذف قسمت اعظم این پودرها در مراحل پیش‌تر، کاهش وزن کمتر می‌شود اما چنین روندی در روش الکتروشیمیایی به دلیل حل شدن مداوم مواد از روی سطح مشاهده نشد. تصاویر SEM از سطح نمونه پس از هر دو مرحله عملیات شیمیایی، و پروفایل زبری و تصاویر توپوگرافی مربوطه به ترتیب در شکل‌های ۴-۱۸ و ۴-۱۹ آمده و در توافق با این نکته می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، با وجود اینکه پودرهای نامطلوب در طی این روش در مقایسه با روش الکتروشیمیایی به میزان بیشتری حذف گردیده‌اند، کاهش وزن نهایی کمتر از روش الکتروشیمیایی بوده‌است و این بدین معنی است که در طی روش اسیدشویی آسیب بسیار کمتری به سطح دیواره وارد می‌شود و کیفیت سطح همانگونه که تصاویر SEM نیز نشان می‌دهد خیلی بهتر است. کمتر بودن مقادیر Rz و Ra در جداول ۴-۶ و ۴-۷ و همچنین کمتر بودن مقادیر اکثريت پارامترهای ارتفاع در جدول ۴-۷ در مقایسه با جدول ۴-۵ نیز بیانگر بهتر بودن توپوگرافی سطحی پس از این روش نسبت به روش الکتروشیمیایی می‌باشد.

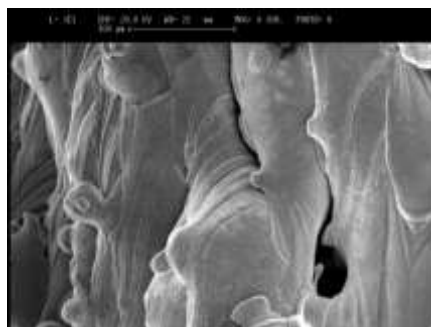
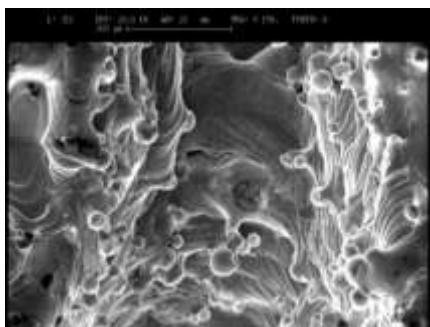


شکل ۴-۱۷- نمودار وزن نمونه در طی فرآیند اسیدشویی

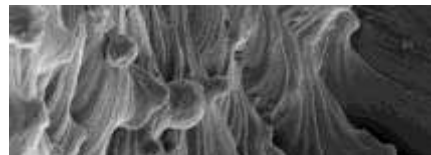
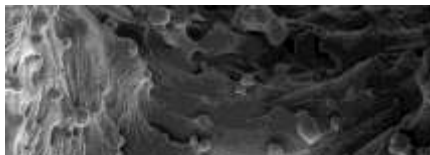
بدون عملیات



پس از مرحله ۱



پس از مرحله ۲



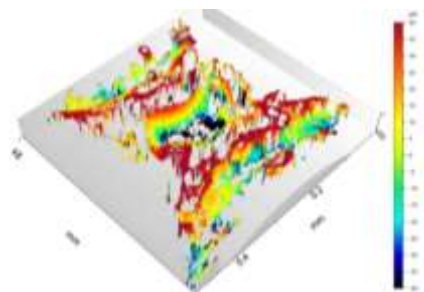
شکل ۴-۱۸- مقایسه کیفیت سطح پس از دو مرحله متوالی ۱۵ دقیقه‌ای عملیات اسیدشویی به کمک تصاویر SEM

جدول ۴-۶- پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصل از آزمون کانفوکال پس از عملیات سطحی اسیدشویی به مدت ۱۵ دقیقه

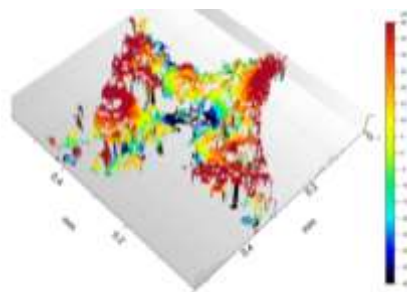
Height Parameters			
Sq	53.8	μm	Root mean square height
Ssk	-0.949		Skewness
Sku	5.72		Kurtosis
Sp	162	μm	Maximum peak height
Sv	256	μm	Maximum pit height
Sz	458	μm	Maximum height
Amplitude parameters			
Ra	19.2	μm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	85.5	μm	Gaussian filter, 0.08 mm

جدول ۴-۷- پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصل از آزمون کانفوکال پس از عملیات سطحی اسیدشویی به مدت ۳۰ دقیقه

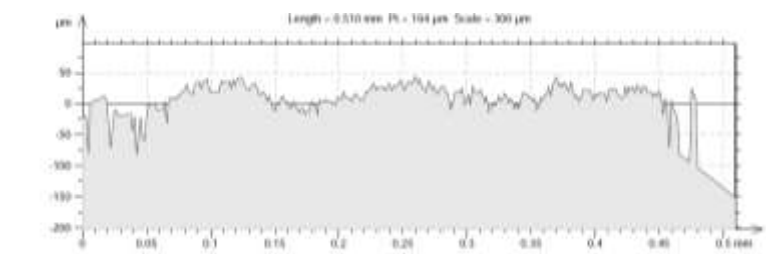
Height Parameters			
Sq	51.4	μm	Root mean square height
Ssk	-1.08		Skewness
Sku	5.39		Kurtosis
Sp	122	μm	Maximum peak height
Sv	218	μm	Maximum pit height
Sz	340	μm	Maximum height
Amplitude parameters			
Ra	18.4	μm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	84.9	μm	Gaussian filter, 0.08 mm



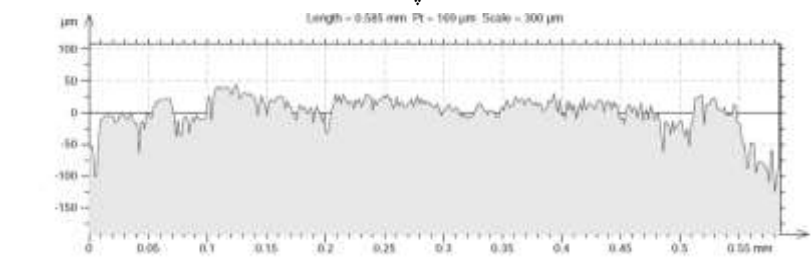
ب



الف



پ



ت

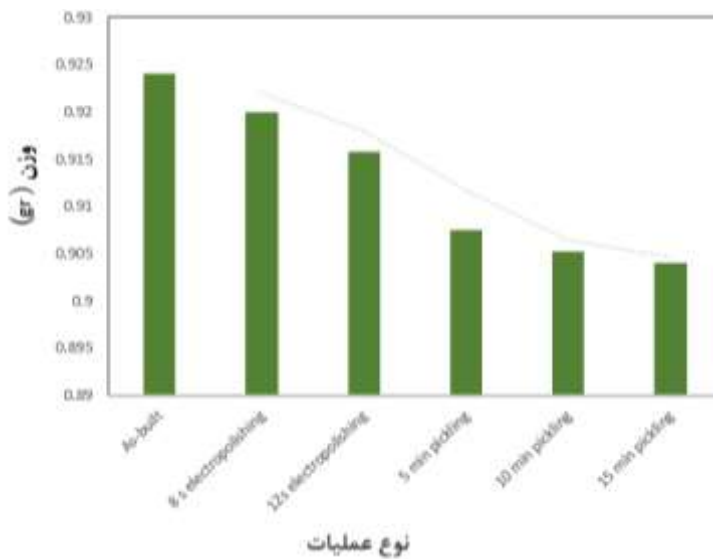
شکل ۴-۱۹- الف و ب) تصاویر توپوگرافی حاصل از آزمون کانفوکال از سطح نمونه پس از به ترتیب ۱۵ و ۳۰ دقیقه اسید شویی، و پ و ت) پروفایل زبری آن‌ها

۴-۲-۳- عملیات ترکیبی ۱

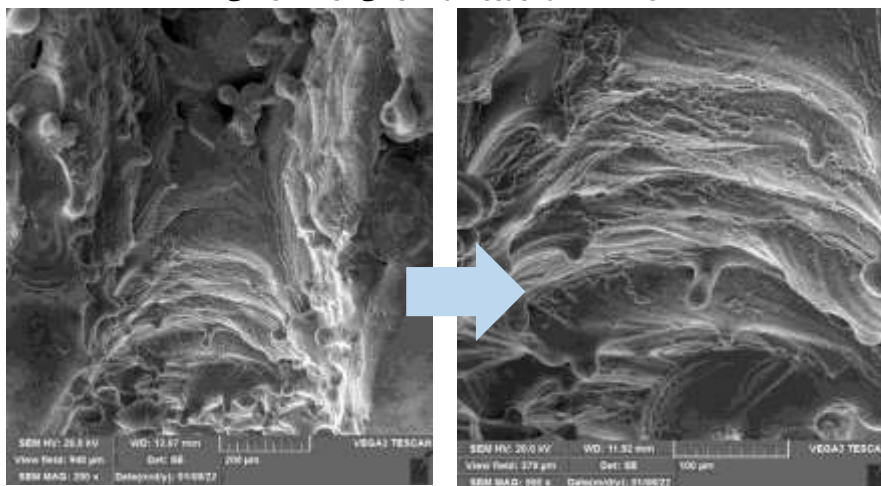
علاوهم توانایی فوق العاده عملیات اسیدشویی در حذف پودرهای نامطلوب، کماکان تعداد اندکی از آن‌ها باقی ماندند و با توجه به توانایی عملیات الکتروشیمیایی در کاهش سطح تماس پودرها، برآن شدیم تا ترکیبی از این دو عملیات را بررسی کنیم. در عملیات سطحی ترکیبی ۱، ابتدا از ۱۲ ثانیه الکتروپالیش کمک گرفته شد تا سطح تماس پودرها کاهش پیدا کند. پس از آن، ۱۵ دقیقه اسیدشویی و ارتعاشات التراسونیک اعمال گردید و کیفیت سطح نهایی به کمک بررسی‌های SEM و کانفوکال مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴-۲۰، نمودار وزن نمونه پس از هر عملیات، و شکل‌های ۴-۲۱ و ۴-۲۲ نیز به ترتیب تصاویر SEM و نتایج آزمون کانفوکال را نشان می‌دهند. جدول ۴-۸ نیز پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصله را گزارش می‌کند.

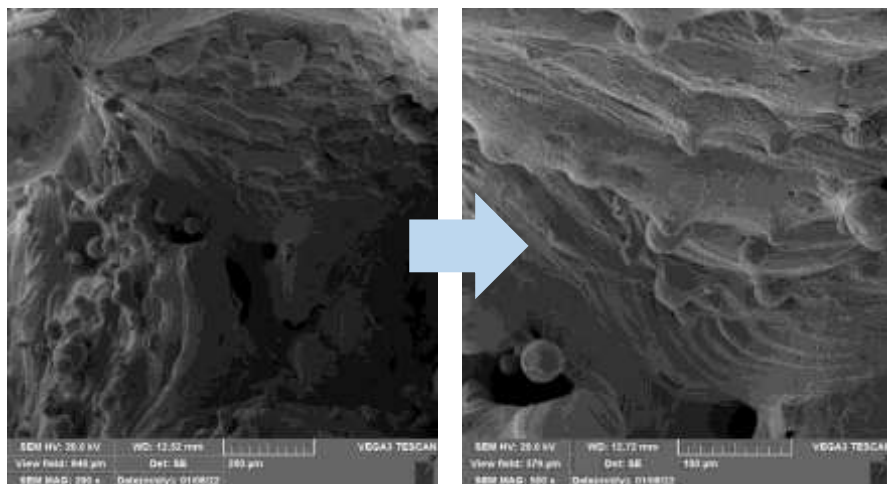
با توجه به مشاهدات می‌توان گفت این روش به میزان موثری پودرهای نامطلوب را حذف کرده است، اما با در نظر گرفتن تصاویر SEM در شکل ۴-۲۱، کیفیت سطح دیواره در این روش مورد قبول نیست که این می‌تواند به دلیل زمان نسبتاً زیاد عملیات الکتروشیمیایی در ابتدای فرآیند باشد. همچنین با توجه به تصاویر میکروسکپی و مقدار Rz در جدول ۴-۸، می‌توان گفت که عملیات اسیدشویی توانایی

اصلاح سطح پس از عملیات الکتروشیمیایی را ندارد.



شکل ۴-۲۰- نمودار وزن نمونه در طی فرآیند ترکیبی ۱

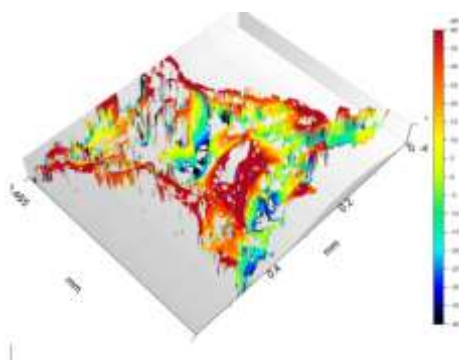




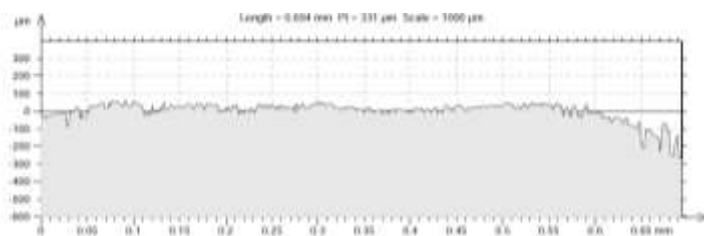
شکل ۴-۲۱- تصاویر SEM از دو ناحیه با دو بزرگنمایی متفاوت پس از عملیات سطحی ترکیبی ۱

جدول ۴-۸- پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصل از آزمون کانفوکال پس از عملیات سطحی ترکیبی ۱

Height Parameters			
Sq	52.7	μm	Root mean square height
Ssk	-0.819		Skewness
Sku	4.39		Kurtosis
Sp	120	μm	Maximum peak height
Sv	202	μm	Maximum pit height
Sz	322	μm	Maximum height
Amplitude parameters			
Ra	16.8	μm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	86.9	μm	Gaussian filter, 0.08 mm



الف



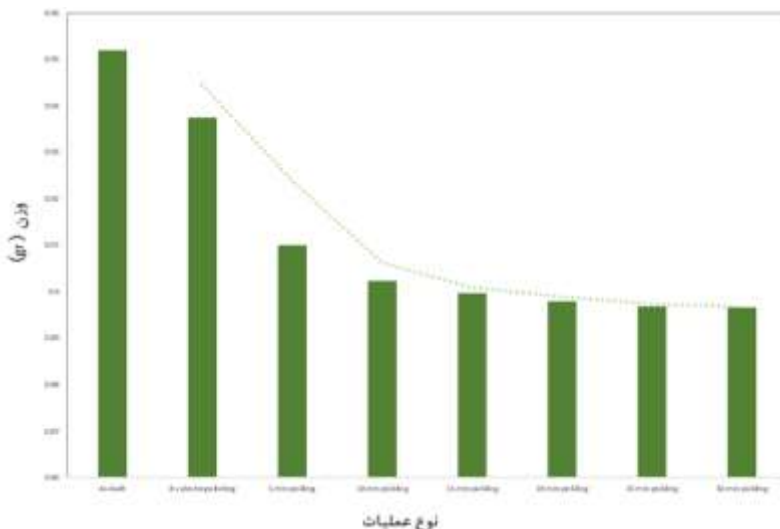
ب

شکل ۴-۲۲- الف) تصویر توپوگرافی حاصل از آزمون کانفوکال از سطح نمونه پس از عملیات سطحی ترکیبی ۱، و ب) پروفایل زبری آن

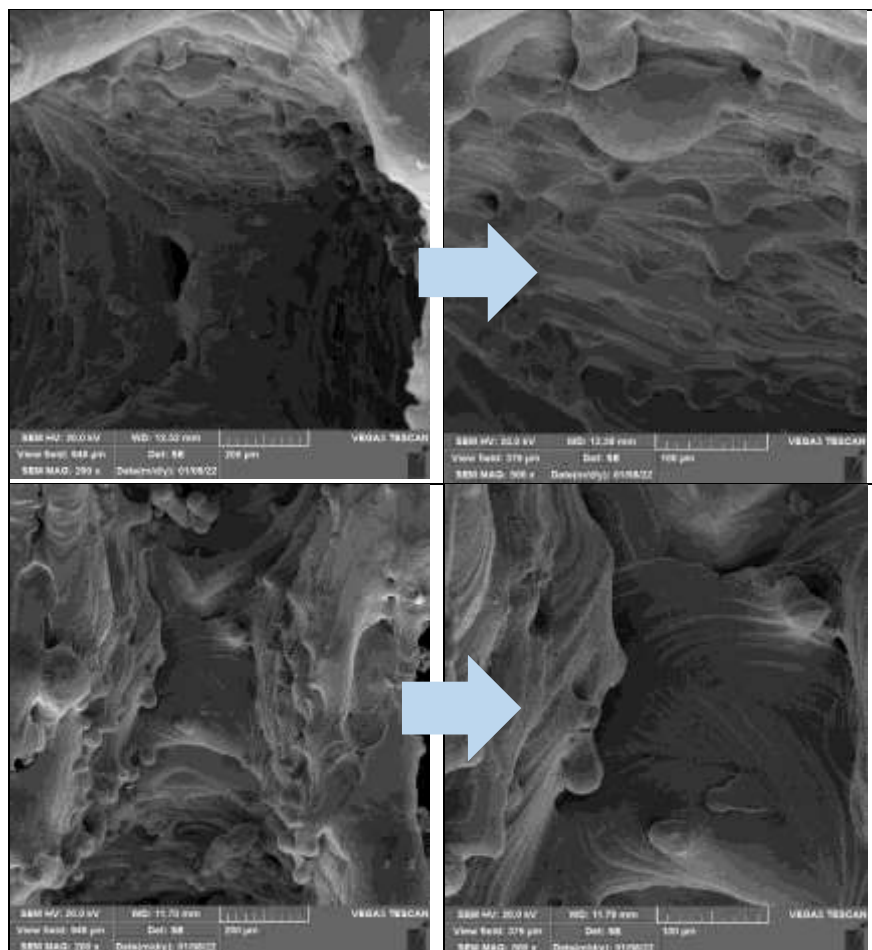
۴-۲-۴- عملیات ترکیبی ۲

با توجه به نتایج عملیات ترکیبی ۱، عملیات ترکیبی ۲ به صورت دو مرحله پیایی الکتروشیمیایی ۸ ثانیه‌ای، و اسیدشویی ۳۰ دقیقه‌ای صورت گرفت. به دلیل تاثیر زیاد مدت زمان عملیات الکتروپالایش بر کیفیت سطح و عدم توانایی عملیات اسیدشویی که به دنبال آن انجام می‌شود بر اصلاح کیفیت سطح زمان عملیات الکتروپالایش در این فرآیند ۸ ثانیه در نظر گرفته شد که با توجه به مشاهدات تجربی صورت گرفته در آزمایشگاه (شامل کاهش وزن و مشاهدات میکروسکوپی) زمان بهینه است. قابلیت عملیات الکتروپالایش در کاهش سطح تماس پودر و دیواره دلیلی است که باعث می‌شود در این فرآیند از آن در کنار اسیدشویی استفاده شود.

همانگونه که نمودار شکل ۴-۲۳ نیز نشان می‌دهد، در این فرآیند تاثیر عملیات اسیدشویی بر کاهش وزن همانند مشاهدات عملیات اسیدشویی که پیش‌تر درباره آن صحبت شد، با گذر زمان آنقدر کم می‌شود که می‌توان گفت به پایداری نزدیک می‌شود. یا به عبارت دیگر، پودرهای نامطلوب حذف گردیده‌اند. همچنین تصاویر SEM شکل ۴-۲۴ و نتایج توپوگرافی حاصل از آزمون کانفوکال در شکل ۴-۲۵ و جدول ۴-۹ گواه بر آن هستند که عملیات سطحی ترکیبی ۲ در حذف پودرهای نامطلوب بسیار موفقیت آمیز بوده و کیفیت سطحی نیز مناسب می‌باشد. با مقایسه این تصاویر SEM با تصاویر شکل ۴-۱۲ می‌توان عنوان کرد که اکثر پودرهای نامطلوب حذف گردیده‌اند و تنها تعداد ناچیزی باقی مانده است.



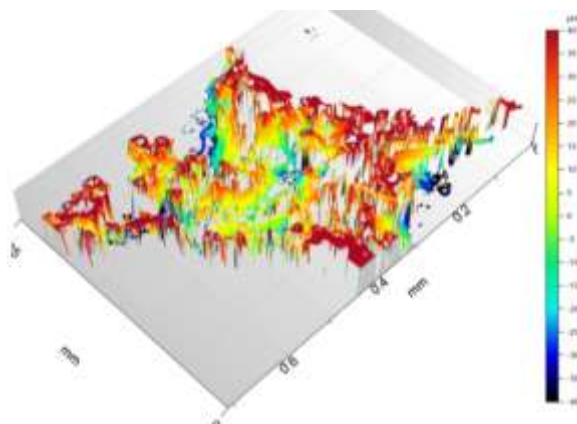
شکل ۴-۲۳- نمودار وزن نمونه در طی فرآیند ترکیبی ۲



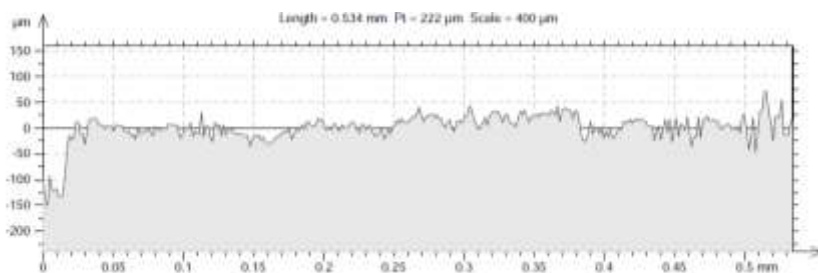
شکل ۴-۲۴- تصاویر SEM از دو ناحیه با دو بزرگنمایی متفاوت پس از عملیات سطحی ترکیبی ۲

جدول ۴-۹- پارامترهای مشخص کننده زبری سطح حاصل از آزمون کانفوکال پس از عملیات سطحی ترکیبی ۲

Height Parameters			
Sq	46.4	μm	Root mean square height
Ssk	-1.2		Skewness
Sku	6.09		Kurtosis
Sp	106	μm	Maximum peak height
Sv	203	μm	Maximum pit height
Sz	309	μm	Maximum height
Amplitude parameters			
Ra	16.2	μm	Gaussian filter, 0.08 mm
Rz	74.0	μm	Gaussian filter, 0.08 mm



الف



ب

شکل ۴-۲۵- الف) تصویر توپوگرافی حاصل از آزمون کانفوکال از سطح نمونه پس از عملیات سطحی ترکیبی ۲، و ب) پروفایل زبری آن

۴-۲-۵- تاثیر عملیات سطحی صورت گرفته بر تراوایی

در بخش‌های پیش‌تر تراوایی نمونه‌ها پس از ساخت بررسی شد و مشخص گردید که در محدوده بهینه با توجه به استخوان تراپکولار قرار دارند. اما، حضور پودرهای ذوب نشده باعث گردیده‌است که تراوایی آن‌ها کمتر از پتانسیل واقعی آن‌ها باشد یا به عبارت دیگر، حضور پودرها باعث انسداد در برابر جریان سیال شده‌است و با حذف آن‌ها انتظار می‌رود که تراوایی بهبود یابد. جدول ۴-۱۰، تراوایی نمونه‌ها پیش و پس از چهار عملیات سطحی صورت گرفته را نشان می‌دهد و همانطور که انتظار میرفت، هر چهار عملیات باعث افزایش تراوایی گردیده‌اند. بیشترین و کمترین تاثیرات را نمونه‌هایی با به ترتیب عملیات‌های سطحی ترکیبی ۲ و الکتروپالایش پذیرفته‌اند که این نیز در توافق با نتایج ارائه شده در بخش قبل می‌باشد. در آخر می‌توان گفت که هر یک از عملیات سطحی انجام شده، با افزایش تراوایی به گونه‌ای که در بازه بهینه باقی بمانند باعث بهبود آن گردیده‌اند.

جدول ۴-۱۰- تراوایی نمونه‌ها پیش و پس از عملیات سطحی انجام شده به همراه درصد تغییراتشان

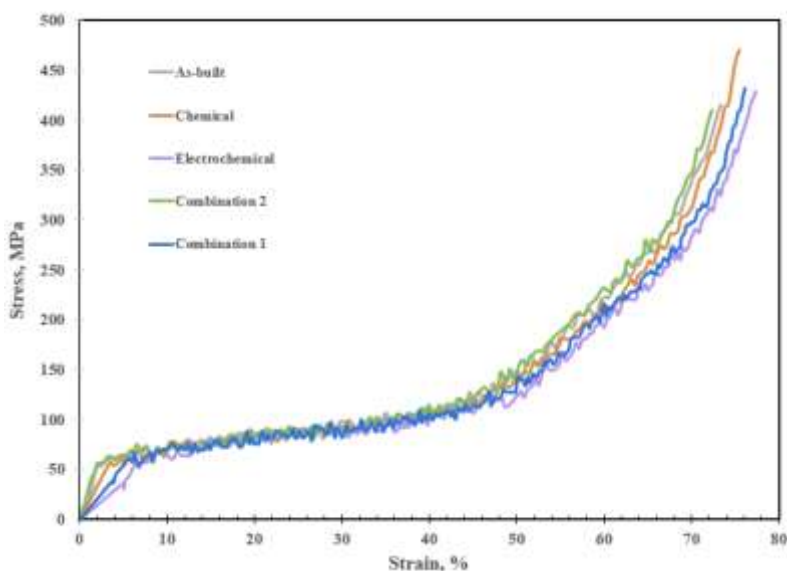
تغییرات، %	تراوایی پس از عملیات، m^2	تراوایی پیش از عملیات، m^2	نوع عملیات
8.26	5.64×10^{-10}	5.21×10^{-10}	الکتروشیمیایی
13.68	6.67×10^{-10}	5.87×10^{-10}	شیمیایی
16.27	6.94×10^{-10}	5.97×10^{-10}	ترکیبی ۱
27.97	6.58×10^{-10}	5.14×10^{-10}	ترکیبی ۲

۴-۲-۶- تاثیر عملیات سطحی صورت گرفته بر رفتار مکانیکی

به منظور بررسی تاثیر عملیات سطحی بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها، آزمون مکانیکی فشار صورت گرفت. شکل ۴-۲۶ نمودار تنش-کرنش حاصله را نشان می‌دهد و مقادیر استحکام و سفتی آن‌ها نیز در جدول ۴-۱۱ گزارش گردیده‌است.

نتایج آزمون فشار حاکی از آن است که نمونه‌ها در نواحی دوم و سوم نمودار تطابق خوبی دارند و تفاوت آن‌ها عموماً در ناحیه اول (ناحیه الاستیک) می‌باشد. بیشترین و کمترین این تغییرات به دنبال عملیات سطحی به ترتیب الکتروشیمیایی و ترکیبی ۲ صورت گرفته‌است. اما نکته جالبی که در نتایج حاصله مشاهده می‌شود، این است که با وجود بازه نسبتاً زیاد تغییرات سفتی (۷٪-۳۸٪)، استحکام دسوخوش تغییرات زیادی نشده‌است (۳٪-۱۱٪) و هر دو استحکام و سفتی در بازه مناسب

استخوان تراپکولار باقی ماندند. دلیل این رفتار در هندسه ویژه ساختار آن‌ها نهفته است؛ به عنوان مثال پس از عملیات الکتروشیمیایی به دلیل کاهش ضخامت دیواره، سفتی کاهش چشمگیری (۳۸٪) داشته‌است، اما استحکام آن به دلیل حضور سلول-های واحد کوچکتر که پیش‌تر درباره آن‌ها صحبت شد تنها ۱۱٪ کاهش پیدا کرد. تغییرات کم خواص مکانیکی پس از روش‌های شیمیایی و ترکیبی ۲ در توافق با نمودار کاهش وزن و مشاهدات میکروسکوپی SEM می‌باشد که نشان دادند سطح دیواره انحلال کمتری از مواد را داشته است.



شکل ۴-۲۶- نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها پس از عملیات سطحی در کنار نمونه خام

جدول ۴-۱۱- مقادیر استحکام و سفتی نمونه‌ها پس از عملیات سطحی در کنار نمونه خام

نوع عملیات	استحکام، MPa	سفتی، GPa
بدون عملیات سطحی	65.3	12.3
الکتروشیمیایی	58.1	7.6
شیمیایی	63.3	11.0
ترکیبی ۲	63.2	11.4
ترکیبی ۱	60.8	9.6

۴-۲-۷-تاثیر عملیات سطحی صورت گرفته بر آزاد سازی یون

نتایج حاصل از آزمون آزاد سازی یون در جدول ۴-۱۲ گزارش گردیده است. بارزترین نتیجه این آزمون، کاهش چشمگیر میزان یون آهن پس از هر گونه عملیات سطحی می باشد. آهن به عنوان یک عنصر مهم و ضروری در خون وجود دارد و کمبود آن می تواند به سلامتی فرد آسیب بزند. حد مجاز یون آهن در بدن $6-17 \text{ ppm}$ می باشد [۱۱۴]. همچنین لازم به ذکر است که میزان بیشتر آن به بدن از جمله قلب و کبد آسیب جدی وارد می کند. با توجه به میزان آزاد سازی یون آهن در همگی نمونه ها می توان گفت که استفاده از ایمپلنت های ساخته شده از آلیاژ $L 316$ به کمک SLM نمی تواند منبعی برای قرار گرفتن در معرض خطر آهن باشد. همچنین میزان کاهش چشمگیر یون آهن پس از عملیات های سطحی می تواند به دلیل روپین شدن نمونه ها به دلیل نیتریک اسید باشد، اما با این حال برای اطمینان از صحت این نکته انجام آزمون های خوردگی بر روی نمونه ها پیشنهاد می شود [۱۱۵].

یون های غیر فعال مانند یون های نیکل، بلافاصله با مولکول های آب و آنیون های معدنی ترکیب نمی شوند و به عنوان یک حالت یونی برای مدت نسبتاً طولانی زنده می مانند. بنابراین، این یون ها شانس بیشتری برای ترکیب با مولکول های زیستی و ایجاد رفتار سمی دارند و میزان مجاز آن ها در بدن کم می باشد (کمتر از 30 ppm [۱۱۶]). دلیل این رویداد اتحاد ضعیف بین اتم های نیکل و ترکیبات بین فلزی قوی است که منجر به آزاد شدن نیکل از سطح آلیاژ می گردد. طبق نتایج حاصله از آزاد سازی یون، می توان گفت که تمامی نمونه های موجود دارای میزان نیکل آزاد شده مجاز می باشند اما با توجه به اهمیت این موضوع، آزمایش های بیشتر درون تنی^۱ به تعیین صحت اینکه آیا سطوح نیکل محلول به غلظت سمی یا زیر سمی می رسد کمک می کند.

ترکیبات کروم فقط پس از مصرف خوراکی جذب ضعیفی می شوند و ذخیره کروم (III) تا حد زیادی به سیستم های رتیکولواندوتلیال محدود می شود. یون کروم (VI) قادر به عبور آزادانه از غشای پلاسمایی در هر دو جهت است [۱۱۷]. با توجه به نتایج جدول مربوطه، می توان گفت که مقدار یون کروم آزاد شده در همه موارد کم بوده است و مشکلی ایجاد نمی کند.

عنصر مولیبدن یک عنصر ضروری برای بدن می باشد و به راحتی از طریق روده جذب می شود. حد مجاز مولیبدن در کبد $3-1 \text{ ppm}$ می باشد. با وجود اینکه این

¹ in vivo

عنصر برای عملکرد آنزیم های خاص ضروری است در دوزهای زیاد سمی است [۱۱۷]. عناصر مولیبدن و کروم نیز در همه موارد دارای مقادیر کمی بوده و مشکلی ایجاد نمی کند.

همچنین با توجه به نتایج می توان گفت که آزاد سازی یون متناسب با محتوای یون در آلیاژ نیستد و در نهایت می توان گفت عملیات سطحی انجام شده علی الخصوص عملیات ترکیبی ۱ و ۲ تاثیر بسیار مثبتی بر روی کاهش آزاد سازی یون های نامطلوب داشته اند.

جدول ۴-۱۲- نتایج حاصل از آزمون ICP-MS برای نمونه هایی با عملیات سطحی متفاوت و محلول PBS به عنوان رفرنس

نوع عملیات	Cr (ppm)	Fe (ppm)	Mo (ppm)	Ni (ppm)
محلول PBS	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
بدون عملیات سطحی	<0.01	0.24	<0.01	0.09
الکتروشیمیایی	<0.01	0.07	0.02	0.04
شیمیایی	<0.01	0.04	<0.01	0.02
ترکیبی ۱	<0.01	0.02	<0.01	0.02
ترکیبی ۲	<0.01	0.02	<0.01	0.01

