الیاف

شستشوی فراصوت پشم و اثرات آن روی کیفیت الیاف

مترجم: امین رضایی

چکیده

پشم شسته شده با امواج فراصوت آنالیز شده و با پشم شسته شده بدون استفاده از فراصوت مقایسه شد. دستورالعمل مرسوم با کاهش ۲۵٪ در غلظت مواد شیمیایی، زمان و دما اصلاح شد. بازده شستشو بر حسب محتوی چربی باقیمانده محاسبه شد. انرژی فراصوت چربی را با غلظت مواد شیمیایی، زمان و دمای کمتر به طور موثری از بین می‌برد. تمام حمام‌های شستشویی که در معرض فراصوت قرار گرفتند کمترین میزان محتوی چربی باقیمانده را داشتند. با این حال، بیشترین بهبود در میزان سفیدی در حمام آبکشی که در معرض فراصوت قرار گرفته بود، مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که ترکیب فراصوت و قلیا تاثیر منفی روی سفیدی و زردی دارد. آنالیزهای انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی پویشی هیچ آسیبی به کوتیکل را روی الیاف پشم نشان نداد. علاوه بر این، خواص شیمیایی پشم در نتیجه عمل با فراصوت هیچ تغییری نداشت. میانگین قطر الیاف، استحکام تک لیف و رطوبت محتوی نیز بعد از عمل با فراصوت تغییر قابل توجهی نشان نداد.

۱- مقدمه

هدف از شستشوی پشم از بین بردن چربی، کثیفی و عرق خشک شده از روی آن بدون آسیب زدن به خواص لیف است. روش و تکنیک شستشوی به کار رفته اثر مستقیمی روی کیفیت پشم شسته شده دارد. مهمترین فرآیند، امولسیونه کردن چربی روی سطح لیف در شستشوی آبی است. مواد شوینده، آب، دما و حرکات مکانیکی مایع شستشو، عمل از بین بردن آلودگی‌ها از پشم را انجام می‌دهند. شستشوی آبی معمولاً تحت شرایط با دمای بالا ($< 50^{\circ}C$) و غلظت بالای مواد شوینده انجام می‌شود. استفاده از مقادیر زیاد مواد شیمیایی و شوینده در روش‌های معمول شستشوی پشم، پیامدهای جدی برای محیط زیست و صنعت در هنگام دفع و تخلیه فاضلاب به دنبال دارد. علاوه بر این، شستشوهای مکانیکی معمول می‌توانند منجر به کاهش سفیدی و سطوح بالاتری از چرک باقیمانده شوند. شستشوی پشم با کمک امواج فراصوت پتانسیل صرفه‌جویی در آب و انرژی، بهبود کیفیت محصول و کاهش زمان و مواد شیمیایی را دارد. آبکشی فراصوت می‌تواند به طور موثری مواد و آلودگی‌های مختلف را از سطوح منسوجات حتی بدون استفاده از سطح فعال‌ها در حمام آبکشی جدا کند. این موضوع را می‌توان به ایجاد کاویتاسیون در داخل حمام در پارامترهای معینی از میدان فراصوت نسبت داد. فراصوت به عنوان صوتی با فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی انسان که بالاتر از ۱۶ کیلوهرتز است تعریف می‌شود. زمانیکه امواج فراصوت در محیط مایع انتشار می‌یابند، کاهش ناگهانی در فشار آکوستیکی منجر به ایجاد شکاف در مایع شستشو و نوسانات طولی مولکول‌ها منجر به تولید امواج تراکم و ترقیق می‌شود که در نهایت شکل‌گیری کاویتاسیون را به دنبال خواهد داشت. در حین فازهای تراکم، حباب‌های میکروسکوپی حاوی بخار با ابعاد ۱۰۰-۱۰ میکرومتر به شدت منبسط شده و متلاشی می‌شوند که منجر به تولید امواج ضربه‌ای می‌شود. کاویتاسیون آکوستیک، پروسه تولید و متلاشی شدن حباب‌ها، مسئول بیشتر اثرات فیزیکی و شیمیایی مشاهده شده در سیستم‌های جامد/ مایع و مایع/ مایع است. فراصوت به دو شکل، اولی با نام میکروجت که از کاویتاسیون انفجار حباب و دومی با نام میکرو جریان که از کاویتاسیون نوسان حباب ایجاد می‌شود به تمیز کردن کمک می‌کند. اثر ترکیبی کاویتاسیون و میکرو جریان منجر به گسیختگی بین مولکولی و سایش سطح لیف در حین عمل با فراصوت می‌شود.

فرآیند شستشو از زیر فرآیندهای مختلفی برای تمیز کردن پشم تشکیل شده است. این فرآیند شامل عمل با قلیا، عمل با مواد شوینده و عملیات آبکشی می‌شود. تا به حال مشخص نشده است که فراصوت در کدام مرحله از شستشو اثر بیشتری دارد. در کاری که اینجا انجام شده است، امواج فراصوت در این زیر فرآیندهای شستشوی پشم به کار گرفته شده است. اثر آن روی بازده شستشو بر حسب محتوی چربی باقیمانده بررسی شد. این بررسی‌ها روی میزان آسیب الیاف پشم از نظر خواص شیمیایی در نتیجه عمل با فراصوت ادامه یافت. اثر فراصوت روی خواص مهم الیاف مانند سفیدی، زردی، میانگین قطر لیف، استحکام تک لیف و رطوبت محتوی نیز بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

پشم دورگه خام تهیه شده از Himachal Pradesh, India برای تمام شستشوها استفاده شد. مواد شیمیایی استفاده شده شامل سدیم کربنات، Lissapol-N (ماده شوینده غیریونی) و اتانول برای استخراج سوکسله بود. نسبت ۱:۵۰ حمام شستشو برای تمام عمل‌ها ثابت باقی ماند.

۲-۲ روش‌ها

به طور معمول، پشم در شرایط آبی در ۵ حمام و با استفاده از ترکیبی از ماده شوینده و قلیا مانند سدیم کربنات شسته می‌شد. دستورالعمل مرسوم (CR) شستشوی پشم در جدول ۱ آمده است. به منظور بررسی کارایی فراصوت در شستشوی پشم این دستورالعمل اصلاح شد. در دستورالعمل اصلاح شده (MR)، قلیا، ماده شوینده، زمان و دما مطابق با جدول ۱، ۲۵٪ کاهش یافتند. ۵ آزمایش شستشوی مختلف با دستورالعمل اصلاح شده با نام‌های فراصوت به حمام قلیا (US-A)، فراصوت به حمام ماده شوینده (US-B)، فراصوت به حمام آبکشی (US-C)، فراصوت به حمام قلیا و ماده شوینده (US-D) و فراصوت به تمام حمام‌ها (US-E) انجام شد. عمل با فراصوت در هر زمان تنها برای حمام‌های معینی انجام شد و شدت آن به تدریج افزایش یافت (جدول ۲).

۲-۲-۱ عمل با فراصوت

یک تمیزکننده فراصوت آزمایشگاهی از M/s Oscar Ultrasonic Ltd, India (OU-mini 120 Model) مورد استفاده قرار گرفت. فراصوت با فرکانس ۳۳ کیلوهرتز و با توان خروجی ۱۲۰ وات تولید شد. تمام آزمایش‌ها روی یک دستگاه و با توجه به جدول ۲ انجام شد.

جدول ۱- دستورالعمل شستشوی پشم متداول و اصلاح شده

دستورالعمل	حمام ۱	حمام ۲	حمام ۳	حمام ۴	حمام ۵
متداول (CR)	Na_2CO_3	Lissapol-N	Lissapol-N	آبکشی	آبکشی
	۱/۳۳ g/L	۰/۵ g/L	۰/۵ g/L	–	–
	۶۰°C	۵۵°C	۵۰°C	۴۵°C	۴۵°C
	۳ دقیقه	۳ دقیقه	۳ دقیقه	۲ دقیقه	۲ دقیقه
اصلاح شده (MR)	Na_2CO_3	Lissapol-N	Lissapol-N	آبکشی	آبکشی
	۱ g/L	۰/۵ g/L	۰/۵ g/L	–	–
	۵۵°C	۵۰°C	۵۰°C	۴۰°C	۴۰°C
	۲ دقیقه	۲ دقیقه	۲ دقیقه	۱/۵ دقیقه	۱/۵ دقیقه

۲-۲-۲ اندازه‌گیری محتوی چربی باقیمانده بعد از شستشو

محتوی چربی پشم خام و محتوی چربی باقیمانده بعد از شستشو بر اساس استاندارد IWTO-19-03 اندازه‌گیری شد. استخراج کننده سوکسله با ظرفیت ۲۵۰ میلی‌لیتر که با لولاهای شیشه‌ای به یک فلاسک تقطیر ۲۵۰ میلی‌لیتری و چگالنده رفلاکس متصل شده بود برای اندازه‌گیری دقیق محتوی چربی باقیمانده استفاده شد.

۲-۲-۳ اندازه‌گیری سفیدی و زردی

شاخص ASTM سفیدی و زردی نمونه‌ها، قبل و بعد از شستشو با استفاده از اسپکتروفتومتر colour I-match (version 7) و بر اساس استاندارد IWTO-35-03 تعیین شد. بهبود سفیدی و کاهش در زردی بر حسب درصد و نسبت به سفیدی و زردی اصلی بیان شد.

۲-۲-٤ شناسایی سطح و تست انحلال‌پذیری قلیا

مورفولوژی سطح الیاف پشم شسته شده بعد از روکش کردن با طلا زیر میکروسکوپ الکترونی پویشی (Philips model XL30) مشاهده شد. تست انحلال‌پذیری قلیا، مقدار ماده پشم حل شده در قلیا را تحت شرایط استاندارد مشخص می‌کند. این تست بر اساس استاندارد ASTM D 1283-05 انجام شد.

۲-۲-۵ اندازه‌گیری رطوبت محتوی

تمام نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تحت شرایط دمای ۲۷°C و رطوبت نسبی ۶۵٪ قرار گرفتند. رطوبت محتوی نمونه‌ها قبل و بعد از شستشوی فراصوت اندازه‌گیری شد. جرم خشک نمونه‌ها بر اساس استاندارد IWTO-34-85(E) تعیین شد.

۲-۲-٦ تست میانگین قطر لیف

اندازه‌گیری قطر الیاف با استفاده از دستگاه OFDA 100 و بر اساس استاندارد IWTO 47-2011 انجام شد. نمونه‌های الیاف به تکه‌های ۲ میلی‌متری بریده شده و روی یک اسلاید شیشه‌ای ۷۰ میلی‌متری پخش شدند. کل اسلاید با حداقل ۶۰۰۰ لیف اسکن شد. برای هر نمونه، ۳ بار اندازه‌گیری انجام شد. قطر میانگین و انحراف معیار نمونه محاسبه شد.

۲-۲-۷ تست استحکام تک لیف

استحکام تک لیف پشم خام و تمام نمونه‌های شسته شده روی دستگاه اندازه‌گیری استحکام کششی Shimadzu و بر اساس استاندارد ASTM D 3822 اندازه‌گیری شد. دستگاه با نرخ ثابت افزایش طول به کار گرفته شد. فاصله بین فک‌ها ۱۰ میلی‌متر و نرخ تراورس ۶ میلی‌متر بر دقیقه بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ اثر امواج فراصوت روی محتوی چربی باقیمانده

برای تولید آسان در سیستم فاستونی، محتوی چربی باقیمانده الیاف پشم باید کمتر از ۲٪ باشد. محتوی چربی باقیمانده (RGC) به دست آمده با عمل‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده شد که RGC نمونه US-E بالاتر از

جدول ۲- پروتکل آزمایش شستشوی فراصوت

کد نمونه	عمل با فراصوت				
	حمام ۱	حمام ۲	حمام ۳	حمام ۴	حمام ۵
CR	×	×	×	×	×
MR	×	×	×	×	×
US-A	√	×	×	×	×
US-B	×	√	√	×	×
US-C	×	×	×	√	√
US-D	√	√	√	×	×
US-E	√	√	√	√	√

جدول ۳- محتوی چربی باقیمانده و مقادیر شاخص‌های سفیدی و زردی پشم شسته شده

کد نمونه	محتوی چربی باقیمانده، ٪	شاخص سفیدی	درصد بهبود در سفیدی	شاخص زردی	درصد کاهش در زردی
پشم خام (قبل از شستشو)	۱۱/۶۸	-۱۸/۲	-	۴۶/۹	-
CR	۰/۹۳	۱۱/۵	۱۶۲/۹	۲۲/۴	۵۲/۳
MR	۱/۳۳	۱۱/۲	۱۶۱/۳	۲۴/۶	۴۷/۵
US-A	۱/۱۸	۱۱/۱	۱۶۰/۹	۲۷/۲	۴۱/۹
US-B	۱/۱۳	۲۰/۸	۲۱۴/۱	۲۱/۱	۵۵/۱
US-C	۱/۲	۲۴/۳	۲۳۳/۶	۲۰/۰	۵۷/۴
US-D	۱/۱۱	۱۴/۳	۱۷۸/۳	۲۲/۱	۵۲/۹
US-E	۰/۹۶	۱۱/۲	۱۶۱/۳	۲۶/۲	۴۴/۲

نمونه MR و قابل مقایسه با نمونه CR است. می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که دستیابی به RGC مطلوب با استفاده از انرژی فراصوت و کاهش ٪۲۵ در غلظت مواد شیمیایی، زمان و دما امکان‌پذیر است. Goud و همکارانش گزارش دادند که شستشو به کمک فراصوت را می‌توان در دماهای پایین‌تر (۵۰°C)، با استفاده از مواد شیمیایی کمتر (۱ گرم بر لیتر قلیا و ماده شوینده) و صرفه‌جویی‌های اساسی در زمان و مقادیر قابل مقایسه RGC انجام داد. Hurren و همکارانش فشارهای بالای سیال در مقیاس میکرو را که توسط تلاطم‌های فراصوت به وجود می‌آید و از بین بردن موثرتر چربی نسبت به روش متداول در دمای شستشوی پایین‌تر را بررسی کردند. مقادیر RGC برای حمام‌های شستشوی میانی عمل شده با فراصوت (US-A، US-B، US-C، US-D) در مقایسه با دستورالعمل اصلاح شده کمتر بودند. این امر نشان می‌دهد که حتی کمترین میزان کاویتاسیون نیز به از بین بردن چربی در حین شستشو کمک می‌کند. تلاطم‌های در مقیاس میکرو که در مجاورت حباب کاویتاسیون اتفاق می‌افتد، به طور موثری سطح لیف را تر کرده و به جابجایی ذرات آلودگی و چربی کمک می‌کند. سطح لیف توسط عمل برس زدن در مقیاس میکرو که توسط امواج فراصوت صورت می‌گیرد زدوده شده و به طور موثری سطح لیف را تمیز می‌کند. همچنین مشاهده شد که عمل با فراصوت برای تمام ۵ حمام شستشو در بین کمترین میزان محتوی چربی باقیمانده بود. این امر منجر به این نتیجه شد که با افزایش تعداد این تلاطم‌ها، بازده از بین بردن چربی افزایش می‌یابد. زمانیکه حباب با فشار بالا در نزدیکی یک سطح سخت منفجر می‌شود، اندازه خود را به یک جت با ابعاد یک دهم حباب تغییر می‌دهد. به دلیل اندازه کوچک جت و انرژی نسبتاً بالای آن، تمیز کردن با فراصوت توانایی رسیدن به شکاف‌های کوچک و از بین بردن ذرات محصور شده را به طور موثری دارا می‌باشد.

۳-۲ بهبود سفیدی و کاهش زردی

Hurren و همکارانش گزارش دادند که رنگ الیاف تحت تاثیر روش شستشو نیست. آن‌ها تفاوت قابل توجهی در رنگ پشم شسته شده با فراصوت نسبت به روش‌های متداول مشاهده نکردند. بهبود سفیدی در نمونه‌های CR و US-E با بررسی‌های گزارش شده قبلی قابل مقایسه بود و انطباق داشت. با این حال، پدیده متفاوتی در بهبود سفیدی برای US-C (تنها حمام‌های آبکشی در معرض فراصوت قرار داشتند) نیز مشاهده شد. نتیجه به دست آمده به دو دلیل اتفاق می‌افتد. دلیل اول اینکه ماده شوینده میسل‌هایی را روی لایه خارجی سطح لیف تشکیل می‌دهد و از نشست دوباره ذرات آلودگی جلوگیری می‌کند. در حین آبکشی با فراصوت، امواج ضربه‌ای منجر به افزایش سرعت شکستن آلودگی‌های معلق، توزیع یکنواخت منفجر شدن حباب‌ها در محیط مایع و افزایش جابجایی فیلم ماده شوینده می‌شود. دلیل دوم این است که فراصوت در محیط آبی تنها و بدون حضور مواد شیمیایی به خصوص قلیا موثرتر است. زمانیکه فراصوت به همراه مواد شیمیایی به کار گرفته شود، بازده از بین بردن آلودگی کاهش می‌یابد. این به دلیل آن است که حمام تمیزکننده حاوی مواد شوینده و مواد شیمیایی، حباب‌های زیادی دارد که تاثیر منفی روی کاویتاسیون فراصوت خواهد داشت. بنابراین، بهبود در سفیدی و کاهش زردی در US-A، US-B و US-D نسبتاً کمتر از US-C است.

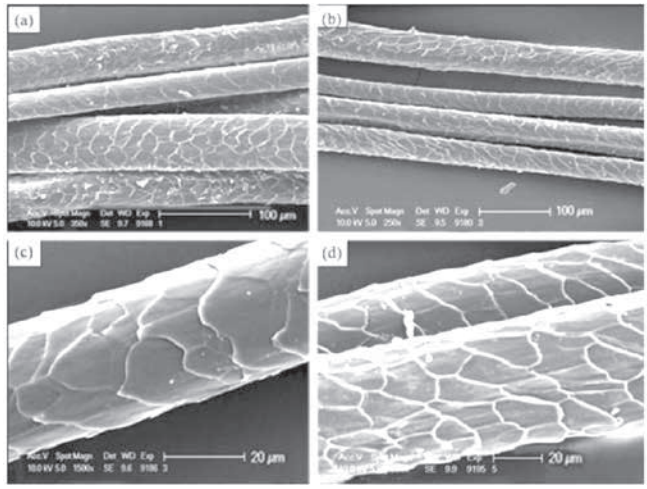
شاخص‌های سفیدی و زردی پشم، قبل و بعد از شستشو در جدول ۳ مشاهده می‌شود. درصد بهبود سفیدی بالای مشاهده شده بعد از شستشو که در محدوده ٪۱۶۰ تا ٪۲۳۳ قرار دارد، به مقادیر منفی سفیدی به دلیل وجود چربی موجود در پشم خام و شستشوی موثر نسبت داده می‌شود. ترتیب افزایش بهبود عملکرد به صورت زیر است:

US-A < MR < US-E < CR < US-D < US-B < US-C. کمترین بهبود در US-A به دلیل کاهش دستورالعمل شستشو و ترکیب قلیا – فراصوت است که تاثیر منفی روی فرآیند تمیز کردن دارد. در مورد US-E (تمام حمام‌ها در معرض فراصوت قرار داشتند)، سفیدی بدتر می‌شود که با CR قابل مقایسه است. این می‌تواند به دلیل اتصال مجدد جزئی علاوه بر ترکیب قلیا – فراصوت باشد. امواج پویای فراصوت در طول شستشو به ذرات آلودگی اجازه پایدار شدن و قرارگیری مجدد روی سطح لیف را نمی‌دهد. امواج ضربه‌ای صوتی روی میسل‌ها ممکن است منجر به اتصال مجدد جزئی شود.

زمانیکه فراصوت تنها روی حمام‌های آبکشی اعمال شود، همانطور که در جدول ۳ دیده می‌شود زردی تا بیشترین مقدار خود (٪۵۷) کاهش می‌یابد. به دنبال آن US-B قرار دارد که فراصوت به همراه ماده شوینده استفاده شده است. این بدان معنا است که فراصوت در عمل تمیز کردن به ماده شوینده کمک می‌کند.

۳-۳ شناسایی سطح

Goud و همکارانش گزارش دادند که فراصوت هیچ تغییر سطحی و هیچ آسیبی به الیاف پشم وارد نکرده است. فلس‌های سطحی دست نخورده باقی ماندند و هیچ شکاف سطحی بعد از عمل با فراصوت مشاهده نشد. با این حال، گزارش شده است که عمل با فراصوت برای شستشوی پشم، اصلاح سطحی و شکست کوتیکل پشم را به همراه خواهد داشت. ترک خوردن فلس‌های سطحی لیف در حین عمل با فراصوت اتفاق می‌افتد. شکست کوتیکل پشم می‌تواند با فرکانس فراصوت مورد استفاده ارتباط داشته باشد. کنده شدن فلس‌ها و آسیب سطحی



شکل ۱- تصاویر SEM پشم شسته شده با a) دستورالعمل اصلاح شده (MR)؛ b) و c) پرتودهی فراصوت به حمام‌های شستشو (US-C)؛ d) پرتودهی فراصوت به تمام حمام‌ها (US-E)

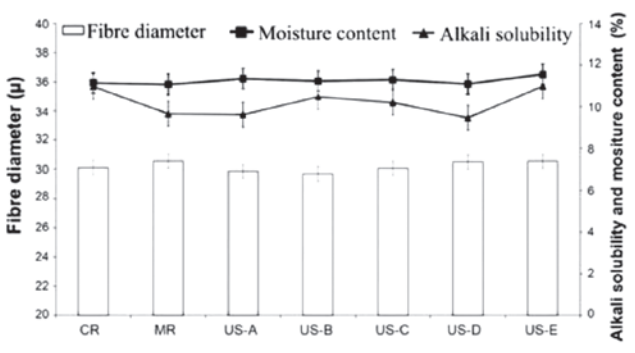
شدید در فرکانس‌های پایین (۲۸ کیلوهرتز) آشکار است. با این حال، گزارش شده است که تنها بخش کمی از الیاف موجود در حمام دچار آسیب فلس‌ها می‌شوند.

تصاویر SEM نمونه‌های MR، US-C و US-E در شکل ۱ مقایسه شده‌اند. هیچ گونه آسیبی به کوتیکل نمونه‌های الیاف عمل شده در فرکانس ۳۳ کیلوهرتز و برای ۹ دقیقه عمل شدن با فراصوت مشاهده نشد. از طرف دیگر، سطح US-C در مقایسه با دو نمونه دیگر صاف‌تر و تمیزتر بود که در انعکاس بالاتر اتفاق افتاد. بنابراین، بهبود سفیدی پشم را تائید می‌کند.

۳-٤ اثر فراصوت روی خواص لیف پشم

انحلال‌پذیری قلیا نشانه‌ای از درجه آسیب وارده به پشم در نتیجه عملیات شیمیایی است. پشم شسته شده بدون آسیب انحلال‌پذیری قلیا در محدوده ٪۱۵-۹ دارد. انحلال‌پذیری قلیای تعیین شده برای تمام نمونه‌ها در محدوده ٪۱۱-۹ قرار داشت (شکل ۲). این امر نشان دهنده آن است که عمل با فراصوت برای شستشو هیچ اثر مضری روی خواص شیمیایی الیاف پشم ندارد.

انرژی فراصوت تنها روی کوتیکل اثر می‌گذارد و روی سلول‌های داخلی اثری ندارد. افزایش میزان جذب رطوبت را می‌توان به ترک‌های سطحی نسبت داد که امکان نفوذ رطوبت به داخل لیف از طریق ترک‌ها و همچنین بین فلس‌ها را فراهم می‌کند. گزارش شده است که لایه چربی روی سطح لیف در عمل با فراصوت شکسته شده و افزایش جذب آب را فراهم می‌کند. کاهش میزان عناصر آبگریز



شکل ۲، اثر فراصوت روی خواص لیف پشم

جدول ٤- استحکام تک لیف پشم عمل نشده و عمل شده با فراصوت

کد نمونه	ماکزیمم بار گسیختگی، N		ازدیاد طول در بار ماکزیمم ٪	
	بار	انحراف معیار	ازدیاد طول	انحراف معیار
CR	۰/۲۷	۹/۱۳	۵۳/۳۸	۱۱/۱۱
US-E	۰/۳	۷/۹۳	۶۰/۱۶	۱۵/۹۹

باعث می‌شود تا بخش آبدوست آب بیشتری را در نتیجه زمان‌های بالای عمل با فراصوت جذب کند.

تغییر قابل توجهی در رطوبت محتوی به دلیل عمل با فراصوت مشاهده نشد که توسط تصاویر SEM از فلس سطحی آسیب ندیده نیز تائید می‌شود. همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، تمام نتایج به دست آمده نزدیک ٪۱۱ است و هیچ تفاوت قابل توجهی در سطح معناداری ٪۵ بین نمونه‌های شسته شده با روش متداول و دستورالعمل‌های مختلف فراصوت مشاهده نشد.

Hurren و همکارانش گزارش دادند که عمل با فراصوت هیچ اثری روی خواص مکانیکی الیاف پشم ندارد. زمانیکه پشم به مدت ۹۰ دقیقه با فراصوت عمل شود، اثر ناچیزی روی استحکام کششی و ازدیاد طول الیاف پشم به وجود خواهد آمد. این را می‌توان به درجه تغییر پذیری بالای ابعاد لیف و انرژی نایکنواخت فراصوت در حمام نسبت داد.

عمل با فراصوت به مدت طولانی و بیشتر از ۲ ساعت می‌تواند منجر به شکستن پیوندها و بخش‌های خطی که زنجیرهای پلی‌پپتیدی لیف پشم را به یکدیگر متصل می‌کنند شده و باعث تعاملات غیرمنسجم در بین ساختار پروتئین و کاهش قابل توجه در استحکام کششی و قابلیت کشش لیف شود. بررسی انجام شده نشان داد که هیچ تفاوتی بین بار گسیختگی تک لیف و ازدیاد طول در سطح معناداری ٪۵ در بین تمام نمونه-های شسته شده وجود ندارد (جدول ۴). همچنین مشخص شد که هیچ تفاوتی بین قطر لیف نمونه‌ها در سطح معناداری ٪۵ وجود ندارد. همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود، محدوده قطر لیف بین ۲۹/۵ و ۳۰/۵ میکرون قرار دارد. این بدان معنا است که عمل با فراصوت برای شستشو اثری روی قطر لیف ندارد.

٤- نتیجه‌گیری

۴-۱ کاویتاسیون فراصوت باعث افزایش بازده از بین بردن چربی شده است. شستشو با انرژی فراصوت توانایی رسیدن به شکاف‌های کوچک و از بین بردن ذرات محصور شده را به طور موثری دارد.

۴-۲ محتوی چربی باقیمانده مطلوب را می‌توان از طریق شستشوی فراصوت با ٪۲۵ کاهش در غلظت مواد شیمیایی، زمان و دما به دست آورد.

۴-۳ عمل با فراصوت تنها روی حمام‌های شستشو منجر به بیشترین مقدار سفیدی و کمترین مقدار زردی می‌شود. امواج فراصوت در محیط آبی به تنهایی موثرتر هستند. ترکیب قلیا و فراصوت تاثیر عکس روی فرآیند تمیز کردن دارد.

۴-۴ فرکانس فراصوت ۳۳ کیلوهرتز آسیبی به فلس‌های سطحی لیف پشم وارد نمی‌کند. استفاده از فراصوت برای شستشو، تغییر یا آسیبی به خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی پشم وارد نمی‌کند.

۴-۵ این مطالعه کاربردی مستقیم در صنعت پشم دارد. بکارگیری انرژی فراصوت روی حمام‌های آبکشی به جای استفاده از آن در تمام ۵ حمام، در عمل امکان‌پذیر بوده و صرفه اقتصادی دارد. این استفاده راهبردی از انرژی فراصوت برای شستشوی پشم می‌تواند منجر به الیاف سفید و تمیز و از بین بردن بهتر چربی و آسیب کمتر به سطح پشم شود.