

بررسی عوامل تاثیر گذار فرآیند شستشوی فراصوتی در میزان پاک کنندگی فلزات Al23 و St37 به جهت بهینه سازی آنها

توحید محمندی^{۱*}، مفید گرجی^۲، وحید محمندی^۳

- ۱- دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی قائم شهر
- ۲- استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
- ۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی قائم شهر

تاریخ دریافت: ۸۵/۸/۱۵ تاریخ پذیرش: ۸۶/۹/۲۱

چکیده

یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های شستشوی صنعتی، تابش امواج فراصوتی در سیال ساکن است. با تابش این امواج در محیط همگن و ایجاد پدیده کاویتاسیون، شستشو و پاک کنندگی قطعات آلوده صنعتی بدون اثرات تخریبی روی قطعات مورد نظر صورت می‌پذیرد. در مقاله حاضر این روش شستشو، بر روی دو فلز Al23 و St37 با تاثیر پارامترهای موثر در سطوح مختلف به منظور تعیین میزان پاک کنندگی آلاینده‌ها از روی سطوح این دو فلز با اثرات کاویتاسیون و بدون استفاده از مواد شوینده شیمیایی در فرآیند شستشو با انجام آزمایشاتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد با به کار گیری روش شستشوی فراصوتی و پارامترهای مورد آزمایش در حداقل زمان و مناسب‌ترین دمای سیال در اپتیمم شدت صوت، امکان شستشوی این فلزات همراه با مزایایی همچون کیفیت مطلوب در شستشو، تعدیل مصرف انرژی و حفظ محیط زیست وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: فراصوت، کاویتاسیون، شستشوی صنعتی، دمای سیال، میزان پاک کنندگی

۱- مقدمه

میزان فشار صوتی که منجر به ایجاد پدیده کاویتاسیون در آب می‌شود تقریباً ۱۵۰۰ بار است ولیکن در عمل به صورت کاربردی اغلب کاویتاسیون‌ها، با فشار کمتر از ۵ بار اتفاق می‌افتد. پدیده تشکیل و فروپاشی حباب که اغلب توسط امواج فراصوتی به وجود می‌آید ناشی از برخی عوامل فیزیکی است [۲]. وترز و همکارانش [۳] نشان دادند که تکنولوژی فراصوتی و شستشو با اثرات پدیده کاویتاسیون موجب بهبود تاثیرات این فرآیند در مقایسه با روش‌های متداول می‌گردد [۴].

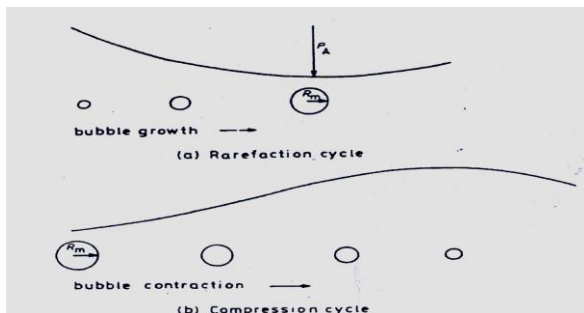
محققین در شستشوی کالاهای نساجی آلوده به روغن دریافتند که شستشوی فراصوتی این کالاها، راحت‌تر و ضمناً سفیدی بهتری را از خود نشان می‌دهند [۵]. در فرآیند رنگرزی انواع پارچه‌ها، تغییرات اساسی ناشی از کاهش اندازه ذرات

امواج فراصوتی با فرکانسی بالاتر از ۱۷ کیلوهرتز در طول سال‌های متمادی کاربرد گسترده‌ای در مهندسی و پزشکی داشته‌اند. این امواج از نوع فشاری طولی هستند که هرگاه به شکل امواج متراکم در آب انتشار یابند، میانگین فاصله میان مولکول‌های آب تغییر می‌کند. اگر شدت فشار صوتی زیاد شود فاصله میان مولکول‌های مجاور هم به دلیل فشردگی افزایش پیدا می‌کند. در این لحظه حالت جدیدی از سیال ایجاد می‌شود که به این پدیده کاویتاسیون صوتی گویند [۱].

*- نویسنده مکاتبه کننده

mohammadi_iau@yahoo.com

کاویتاسیون گفته می‌شود [۹]. هرگاه ظرف آبی در معرض تابش امواج فراصوتی قرار گیرد، در اثر کم شدن فشار موضعی و به علت وجود گازهای محلول در آب، حباب‌های کوچکی در ظرف ظاهر می‌شود و در سطح آن می‌ترکد. اساس ایجاد این پدیده در محیط انتشار امواج است به این صورت که فشار در یک نقطه معین محیط نسبت به مقدار متوسط آن متناوباً کم و زیاد می‌شود یا به عبارت دیگر با ارتعاشات طولی در دو طرف حد وسط آن نوسان می‌کند. در نواحی که فشار کم می‌شود حباب‌هایی پر از بخار آب تشکیل شده و در نهایت این حباب‌ها بزرگ می‌گردند، اما در نواحی که فشار زیاد است این حباب‌ها که حالا از بخار آب پر شده‌اند به سرعت متلاشی می‌شوند که این فروپاشی حباب‌ها باعث ایجاد امواج شوک دهنده‌ای می‌گردد که در سیال انتشار می‌یابند. با تابش موج صوتی با شدت زیاد در آب، سبب شکست آن شده و پدیده تشکیل و ترکیدن حباب اتفاق می‌افتد که این پدیده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. وضعیت تشکیل حباب در یک میدان فرا صوتی [۸]

در مواردی که حباب‌ها به سطح جسم می‌چسبند نیروی فشاری در آن نقاط وارد می‌شود که اگر حباب کروی باشد این نیروی فشاری روی سطح با نیروی کشش سطحی در میان سطح مایع موازنه می‌شود، لذا فشار داخل هر حباب کروی به شعاع که ایجاد کننده نیروهای ضربه‌ای ناشی از انفجار آن می‌باشد طبق رابطه (۲) برابر است با:

$$P_R = P_l + 2 \frac{\sigma}{R} \quad (2)$$

که در این رابطه P_R فشار داخل حباب کروی به شعاع R ، P_l فشار متناظر به ارتفاع σ کشش سطحی می‌باشد [۸]. اگر P_A فشار عمودی اتمسفریک، P_∞ فشار در حجم سیال در

رنگ از طریق دما و فشار بالا در نقاط مختلف مایع و همچنین امواج شوکی ناشی از پدیده کاویتاسیون صورت می‌پذیرد [۶]. همچنین محققین با استفاده از روش شستشوی فراصوتی به تصفیه دقیق غشاء انواع دستگاه‌ها در صنعت لبنیات سازی دست پیدا کردند [۷]. از آنجایی که فرآیند تولید قطعات در صنعت، دارای مراحل مختلفی است با طی این مراحل قطعات به چرک، روغن و انواع آلودگی‌ها آغشته می‌گردند لذا برای این که محصول با کیفیت بهتری وارد مراحل بعدی تولید گردد، شستشوی قطعات ضروری است. در این مقاله با انجام آزمایشاتی به بررسی پارامترهای موثر در فرآیند شستشوی فراصوتی با ایجاد پدیده کاویتاسیون و مقایسه میزان پاک کنندگی آلاینده‌های دو فلز $Al23$ و $Si37$ در برابر این پارامترها و شرایط بهینه شستشوی هر فلز می‌پردازیم.

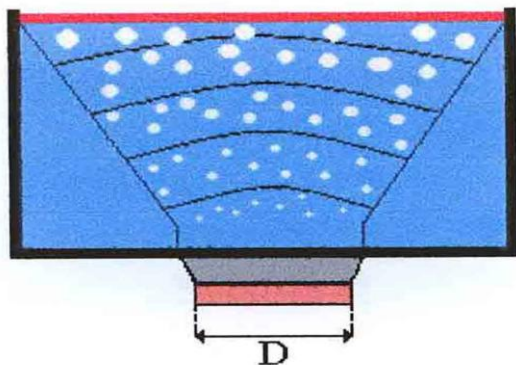
۲- تئوری

امواج فراصوتی شبیه به امواج ماوراء بنفش هستند منتهی، اولی جزء امواج مکانیکی و دومی جزء امواج الکترومغناطیس است. امواج فراصوتی حامل انرژی هستند که برحسب یک سری از پارامترهای موج شبیه به امواج الکترومغناطیس بیان می‌شوند. اساس کار و اجزاء تمام دستگاه‌های فراصوتی یکسان است. یکی از اجزاء مهم این دستگاه‌ها، تراگذر یا مبدل است که وسیله‌ای است که می‌تواند انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل کند. در تراگذر تبدیل انرژی، توسط بلورهایی انجام می‌شود که خاصیت پیزوالکتریک دارند و موجب تولید امواج فراصوتی می‌گردد. انرژی موج در محیط با سرعت C منتشر می‌شود، بنابراین انرژی که از میان سطح مقطع در واحد زمان عبور می‌کند، به همان شدت می‌باشد. اگر E_c چگالی انرژی باشد، انرژی کل در واحد زمان و در واحد سطح مساوی با شدت موج (I) است یعنی [۸]:

$$I = E_c \cdot C \quad (1)$$

زمانی که ظرفی حاوی سیال تحت فشار ثابت حرارت داده شود و یا فشار آن در شرایط دما ثابت کاهش یابد در این حالت حباب‌هایی (حفره‌هایی) تشکیل و به تدریج شروع به رشد می‌کنند و سپس رشد آنها با یک آهنگ معینی ادامه پیدا می‌کند تا حباب‌ها به حالت انفجار یا فروپاشی برسند. اگر این روند تحت شرایط افزایش دما ادامه یابد پدیده جوشش نامیده می‌شود ولی اگر این پدیده ناشی از کاهش فشار باشد

امواج فراصوتی از طریق وسیله‌ای به نام ترانسدیوسر (به قطر D) و با ارتعاشات مکانیکی خود، میدانی در سیال ایجاد می‌کند که موجب تغییرات فشار در لایه‌های سیال گردیده و در نتیجه باعث تشکیل حباب شده و عمل شستشو از طریق امواج شوکی حاصل از ترکیدن حباب‌ها انجام می‌گیرد. مدل ترسیمی شکل ۲ چگونگی تشکیل حباب‌های کاویتاسیون در فرآیند شستشوی فراصوتی با دستگاه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مدل ترسیمی تابش امواج فراصوتی و ایجاد حباب در فرآیند شستشو

۴- آزمایشات تجربی

در این تحقیق به منظور بررسی شستشو و پاک کنندگی آلاینده‌های قطعات، از نمونه‌هایی به شکل ورق و به اندازه‌های یکسان ۵ در ۸ سانتی متر مربع از جنس‌های آلومینیوم با مدل *Al23* و فولاد با مدل *St37* برای انجام آزمایشات استفاده شده است. به منظور ایجاد آلودگی یکسان ورق‌ها در کلیه آزمایشات، از روغن ایرانول ۴۰۰۰ و به میزان ۲ گرم در هر مرحله از آزمون استفاده شده است. به این صورت که در هر آزمایش این مقدار مشخص روغن به عنوان آلاینده ثابت، روی سطح فلزات ورقه‌ای شکل به طور منظم پخش نمودیم و به منظور شستشو به همان صورت در حمام شستشو قرار می‌دهیم. برای انجام عمل شستشو، فلزات ورقه‌ای شکل با سطح آغشته به روغن را بر روی سبد تعبیه شده داخل حمام آب قرار می‌دهیم.

جهت شستشوی قطعات آغشته شده به روغن در شرایط استاندارد، از دستگاه شوینده فراصوتی به نام *Power sonic* ساخت کمپانی *Martin Walter* آلمان استفاده شده است. گنجایش حمام آب این دستگاه ۲/۷۵ لیتر و با ابعاد $۱۰۰ \times ۱۳۷ \times ۲۴۰$ میلی متر می‌باشد.

طول حرکت حباب‌ها و در مسیر انتشار، فشار اولیه، f فرکانس موج و t زمان باشد بر اساس رابطه (۳) داریم:

$$P_{\infty} = P_0 - P_A \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

همچنین سرعت حباب‌های کروی (U) در حجم سیال در فاصله r از میدان فراصوتی با استفاده از معادلات *Gilmor* برابر با رابطه (۴) است [۱۰]:

$$U(r, t) = \frac{R^2}{r^2} \left(\frac{dR}{dt} \right) \quad (4)$$

۳- شستشوی فراصوتی

یکی از خواص آب این است که غیر قابل تراکم بوده و تقریباً فشرده نمی‌شود. اگر یک موج صوتی قوی در طول چنین محیطی انتشار یابد، نواحی فشار صوتی منفی باعث شکست سیال و به وجود آمدن فرآیندی می‌شوند که آن را "تشکیل و فروپاشی حباب‌ها" می‌گویند. این حباب‌های پر از بخار آب، در ابتدای سیکل در اثر فشار موج صوتی منفی بزرگ شده و سپس وقتی فشار موج صوتی معکوس می‌گردد، حباب‌ها به سرعت متلاشی می‌شوند. این فروپاشی باعث ایجاد امواج شوکی می‌گردد که در سیال انتشار می‌یابند. اغتشاشات میکروسکوپی که در مجاورت تشکیل و فروپاشی حباب روی می‌دهد به طور موثری ذرات چرکی را که به وسیله نیروهای یونی به سطح جسم چسبیده‌اند از بین می‌برند. به همین دلیل تشکیل و فروپاشی حباب‌ها در تسریع انحلال آلودگی‌های محلول نیز کمک می‌کنند.

در بررسی چگونگی جوانه زنی تا رشد حباب‌های میکروسکوپی از لحاظ موقعیت قرارگیری در سطح جسم در این روش شستشو، این نظریه وجود دارد که حباب‌ها قبل از برخورد به سطح جسم سرعتهشان به صفر می‌رسد. پس از برخورد این حباب‌ها به سطح جسم در دو طرف آن منتشر می‌گردد و پس از ترکیدن حباب‌ها نیروی ضربه‌ای با ارتعاشات میکروسکوپی ایجاد می‌شود. طی فعل و انفعالات ناشی از این فرآیند، حباب‌ها با بزرگ‌ترین ابعاد در محل قرارگیری قطعه آغشته به آلاینده و غوطه‌ور در سیال قرار می‌گیرند و با ترکیدن حباب‌ها بر روی سطح اجسام، با ایجاد خلاء و در نتیجه مکش ضربه‌ای، عمل پاک کنندگی صورت می‌گیرد. [۸].

نظر گرفته شده است. زمان شستشوی نمونه‌ها در چهار سطح مختلف ۱، ۳، ۵ و ۷ دقیقه انتخاب و بعد از اتمام زمان مورد نظر عملیات شستشو متوقف گردیده است. با توجه به سطوح مختلف پارامترهای مورد آزمایش، هر آزمون به منظور پاک‌کنندگی قطعات در یکی از سطوح مختلف شدت صوت، دمای سیال و زمان شستشو انجام و میزان پاک‌کنندگی آن مرحله تعیین شده است.

هر مرحله از آزمایش ۳ بار تکرار گردیده و به جهت دقت در آزمون توزین نمونه‌ها قبل و بعد از انجام شستشو، از ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم گرم استفاده شده است. در ضمن پس از اتمام فرآیند شستشو، هر یک از قطعات به مدت ۱۵ دقیقه در حالت استراحت در محیط آزمایشگاهی (رطوبت ۶٪ و درجه حرارت ۲۵ درجه سانتیگراد) قرار داده شده تا آب موجود روی قطعات تبخیر و میزان واقعی پاک‌کنندگی آلاینده روغن از سطح آنها به دست آید.

۵- تجزیه و تحلیل آزمایشات

میزان پاک‌کنندگی آلاینده از فلز $Al23$ و $St37$ در برابر تغییرات شدت صوت در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش پارامتر شدت صوت روندی افزایشی در مقادیر میانگین پاک‌کنندگی فلز $Al23$ و $St37$ ملاحظه می‌گردد. این نتیجه حاکی از آن است که افزایش پارامتر شدت صوت تاثیر مستقیمی بر روی پاک‌کنندگی آلاینده‌های قطعات دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که برای فلز $Al23$ تا شدت صوت ۹ وات بر سانتی متر مربع میزان پاک‌کنندگی روند افزایشی داشته اما در فلز $St37$ از شدت صوت ۵ وات بر سانتی متر مربع رفتاری یکنواخت از میزان پاک‌کنندگی از خود نشان داده است. به علت اکسید شدن بسیار سریع سطح آلومینیوم در محیط نسبت به فولاد، لذا چسبندگی سطح آن بیشتر بوده و در نتیجه به شدت صوت قوی تری برای تاثیر امواج شوکی و تمرکز انرژی حاصل از انفجار حباب‌های کائیتاسیون بر روی سطح آن به منظور پاک‌کنندگی آلاینده‌ها نیاز می‌باشد. در مقابل برای فلز $St37$ به علت چسبندگی سطحی کمتر، در شدت صوت ۵ وات بر سانتی متر مربع به بهترین شرایط پاک‌کنندگی رسیده است.

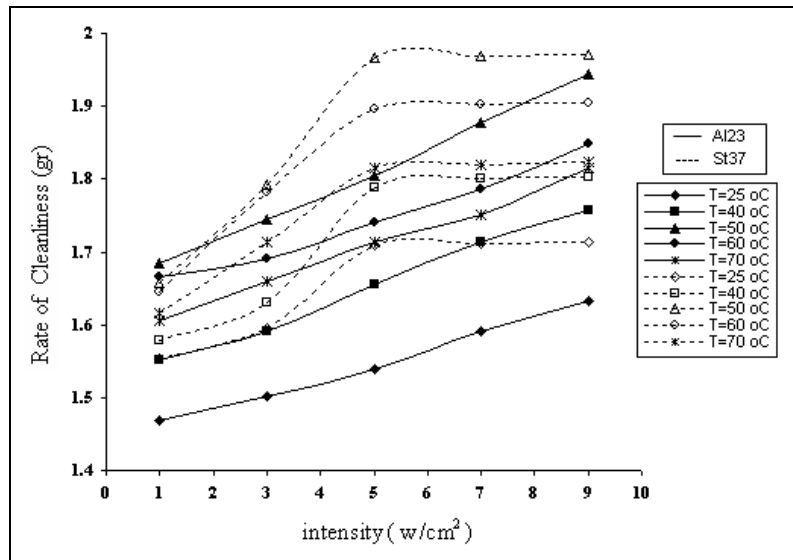
برای انجام آزمایش‌ها و پاک نمودن آلاینده‌های سطح فلزات مورد آزمایش، از اثرات کائیتاسیون استفاده گردیده است. با توجه به این که مکانیزم تشکیل و فروپاشی حباب‌ها بسیار سریع بوده و پدیده ای میکروسکوپی است، اندازه گیری قطر یا تعداد حباب‌ها یا نیروی انفجار آنها برای بررسی نقش آنها در میزان پاک‌کنندگی آلاینده‌های فلزات در فرآیند شستشو امکان پذیر نمی‌باشد. در نتیجه اثرات تعداد و انفجار حباب‌ها در مجاورت سطح آلوده موجب شستشو و پاک‌کنندگی آنها می‌گردد. لذا نقش کائیتاسیون در این تحقیق، پاک‌کنندگی آلاینده‌ها از سطح فلزات بوده و معرف آن پارامتر خروجی (متغیر پاسخ) میزان پاک‌کنندگی آلاینده‌ها است که در هر آزمایش در نظر گرفته شده است. میزان پاک‌کنندگی آلاینده‌ها در هر مرحله از آزمایش (Δw) برابر است با تفاضل وزن اولیه هر ورق به همراه آلاینده آن (w_1) از وزن ثانویه ورق پس از عمل شستشو و استراحت قطعه پس از شستشو (w_2)، یعنی:

$$\Delta w = w_1 - w_2 \quad (5)$$

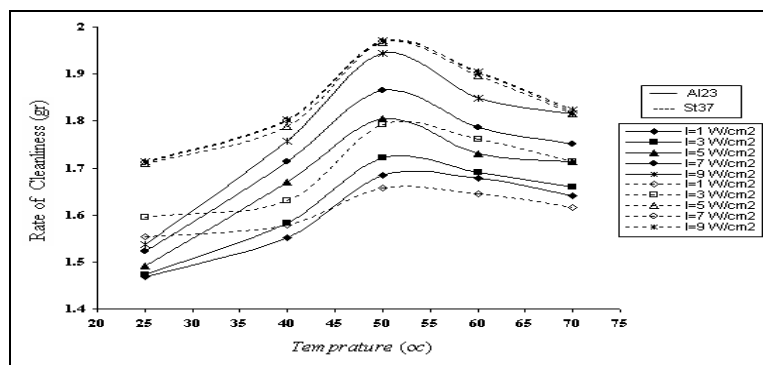
با این روش محاسبه می‌توانیم میزان روغن پاک شده از سطح فلزات در هر مرحله از آزمایشات را از میزان اولیه آن (۲ گرم) به دست آوریم.

از آنجایی که دستگاه‌های ساخته شده توسط کمپانی سازنده در فرکانس ثابت عمل می‌نماید لذا در این تحقیق عامل فرکانس (۳۵ کیلو هرتز) ثابت در نظر گرفته شده است. از پارامتر فشار به دلیل این که از دستگاه در شرایط فشار ثابت استفاده گردید، صرف نظر شده است.

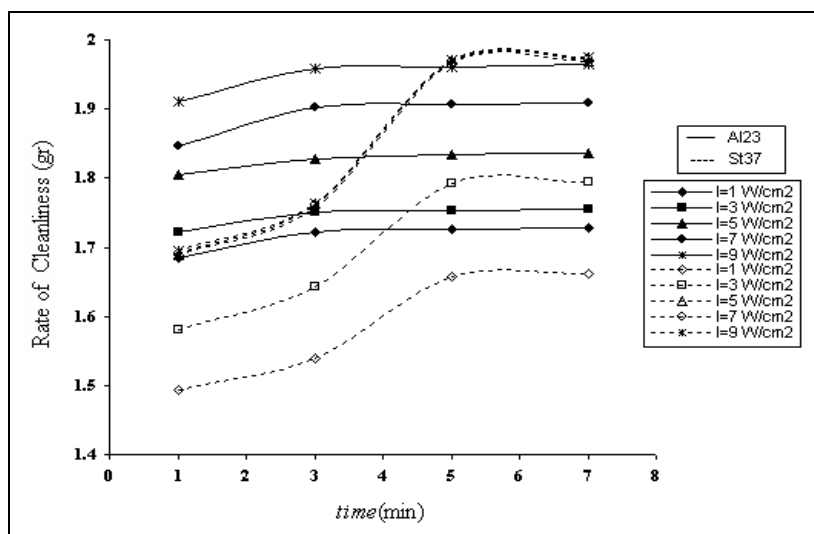
در نتیجه پارامترهای متغیر آزمایش‌ها شدت صوت، دمای سیال و زمان شستشو در نظر گرفته شده است. در دستگاه مورد آزمایش شدت امواج فراصوتی از ۱ تا ۹ وات بر سانتی متر مربع (۱۰ الی ۱۰۰ درصد) متغیر است که به عنوان یکی از پارامترهای مهم در پنج سطح مختلف ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ وات بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. قبل از اعمال تابش فراصوتی به نمونه‌ها در شرایط شستشو به مدت ۲ دقیقه عمل گاز زدایی انجام گردیده است. از آنجایی که در دو طرف دیوارهای دستگاه، گرم‌کن تعبیه شده است می‌توان دمای آب را حداکثر تا ۸۰ درجه سانتیگراد کنترل کرد لذا دمای سیال نیز در پنج سطح مختلف ۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد در



شکل ۳. نمودار تغییرات شدت صوت بر روی پاک کنندگی فلز *Al23* و *St37* با اثرات کاپیتاسیون در دماهای مختلف



شکل ۴. نمودار تغییرات دمای سیال بر روی پاک کنندگی فلز *Al23* و *St37* با اثرات کاپیتاسیون در شدت صوت‌های مختلف



شکل ۵. نمودار تغییرات زمان شستشو بر روی پاک کنندگی فلز *Al23* و *St37* با اثرات کاپیتاسیون در شدت صوت‌های مختلف

در این تحقیق به جهت تجزیه و تحلیل آماری عوامل مورد مطالعه (شدت صوت، دمای سیال، زمان شستشو) و متغیر پاسخ (میزان پاک کنندگی) از طرح آزمایش تصادفی عاملی در سطح اطمینان ۹۵٪ و فرض نرمال بودن داده‌ها و نرم افزار *SPSS13* استفاده شده است.

با استفاده از آنالیز واریانس، سطوح مختلف شدت صوت، دما و زمان شستشو با مقدار احتمال (۰/۰۰۰) بر روی میزان پاک کنندگی فلزات مورد آزمایش تاثیر گذار است. همچنین با آزمون دانکن ملاحظه شده است که بین اثر سطوح مختلف عامل‌ها و متغیر پاسخ آزمایش اختلاف معنی داری وجود دارد.

در جدول ۱ آزمون برآورد اثرهای اصلی و متقابل طرح آزمایش نشان داده شده است. با توجه به ستون مربع *Eta* جزئی، عامل دما در بین عامل‌های اصلی بیشترین تاثیر پذیری را در مدل آزمایش تحقیق از خود نشان داده است. در آزمون برآورد اثرها عبارت ضریب تعیین (*O.R.Square*) میزان تغییرات متغیر وابسته را نسبت به متغیرهای مستقل بیان می‌کند. هر چه این عدد به یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده رابطه ای قوی بین متغیرهای مستقل و وابسته است [۱۱]. با توجه به جدول ۱ مقدار ضریب تعیین ۰/۹۹۸ به دست آمده است، در نتیجه رابطه قوی بین متغیرهای مستقل و وابسته تایید می‌گردد.

میزان پاک کنندگی آلاینده از فلز *Al23* و *St37* در برابر تغییرات دمای سیال (آب) در شکل ۴ آمده است. با افزایش دمای آب تا ۵۰ درجه سانتیگراد روندی افزایشی در مقادیر میانگین پاک کنندگی و با افزایش دمای آب از ۵۰ درجه سانتیگراد به بالا روندی کاهشی در مقادیر میانگین پاک کنندگی دیده می‌شود. این نتیجه حاکی از آن است که روند تغییرات دما بر روی مقادیر میانگین پاک کنندگی تا ۵۰ درجه سانتیگراد صعودی و بعد از آن نزولی می‌باشد. در نتیجه این حالت بیانگر وجود یک نقطه بهینه معادل ۵۰ درجه سانتیگراد، حاصل از تاثیر پارامتر دمای آب بر روی پاک کنندگی آلاینده‌های فلز *Al23* و *St37* است.

نتایج به دست آمده از تاثیر پارامتر دما بر روی پاک کنندگی آلاینده‌ها از سطح فلز *Al23* و *St37* نشان می‌دهد که مناسب‌ترین دمای حمام آب برای هر دو فلز به منظور حداکثر پاک کنندگی روغن از سطوح آنها، دمای ۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

همچنین به علت تغییر ساختار شیمیایی روغن در دمای بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد جدایش مناسبی از سطح فلزات هنگام شستشو و برخورد حباب‌های کایتاسیون به سطح آنها نداشته‌اند. این پدیده موجب کمتر شدن میزان پاک کنندگی روغن در دماهای بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد گردیده است.

میزان پاک کنندگی آلاینده از فلز *Al23* و *St37* در برابر تغییرات زمان شستشو در شکل ۵ آمده است. با افزایش زمان شستشو روندی افزایشی در مقادیر میانگین پاک کنندگی فلز *Al23* و *St37* ملاحظه می‌گردد. این نتیجه حاکی از آن است که افزایش زمان شستشو تاثیر مستقیمی بر روی پاک کنندگی قطعات دارد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که فلز *Al23* از زمان شستشوی ۳ دقیقه و فلز فولادی از زمان شستشوی ۵ دقیقه رفتاری یکنواخت از میزان پاک کنندگی از خود نشان داده‌اند، لذا در این زمان‌ها به حداکثر پاک کنندگی رسیده‌اند. در نتیجه برای فلز *Al23* به علت اعمال شدت صوت قوی‌تر، زمان کمتری به منظور پاک کنندگی روغن از سطح آن نیاز می‌باشد و برعکس به علت نیاز به شدت صوت ضعیف‌تر در فلز *St37* زمان بیشتری به منظور شستشو و پاک کنندگی روغن از سطح آن نیاز می‌باشد.

جدول ۱: نتایج آزمون اثر بین عاملها

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Cleaning

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	7.143 ^a	199	.036	1241.098	.000	.999
Intercept	1155.116	1	1155.116	4E+007	.000	1.000
material	.110	1	.110	3806.751	.000	.950
intensity	2.076	4	.519	17941.82	.000	.997
temperature	2.568	4	.642	22196.86	.000	.998
time	1.147	3	.382	13224.21	.000	.995
material * intensity	.149	4	.037	1290.746	.000	.963
material * temperature	.227	4	.057	1963.440	.000	.975
intensity * temperature	.143	16	.009	308.787	.000	.961
material * intensity * temperature	.056	16	.004	121.245	.000	.907
material * time	.545	3	.182	6280.208	.000	.989
intensity * time	.026	12	.002	75.755	.000	.820
material * intensity * time	.015	12	.001	43.058	.000	.721
temperature * time	.029	12	.002	83.094	.000	.833
material * temperature * time	.027	12	.002	76.423	.000	.821
intensity * temperature * time	.012	48	.000	8.998	.000	.683
material * intensity * temperature * time	.013	48	.000	9.057	.000	.685
Error	.006	200	2.89E-005			
Total	1162.265	400				
Corrected Total	7.148	399				

a. R Squared = .999 (Adjusted R Squared = .998)

۶- نتایج و بحث

در این مقاله اثر تغییرات پارامترهای اساسی شدت صوت، دمای سیال و زمان شستشو با استفاده از روش شستشوی فراصوتی با اثرات پدیده کاویتاسیون بر روی پاک کنندگی آلاینده از دو فلز *Al23* و *St37* در سطوح مختلف عاملها انجام شده است. با انجام آزمایشهای تجربی نتایج زیر به دست آمده است:

- ۱- با افزایش پارامتر شدت صوت، میزان پاک کنندگی آلاینده فلز آلومینیومی و فولادی افزایش یافته اما شدت صوت مناسب برای حداکثر پاک کنندگی فلز آلومینیومی شدت صوت ۹ وات بر سانتی متر مربع و فلز فولادی ۵ وات بر سانتی متر مربع می باشد.
- ۲- مناسب ترین دمای حمام آب برای شستشوی فلزهای آلومینیومی و فولادی در روش شستشوی فراصوتی، دمای ۵۰ درجه سانتیگراد می باشد.
- ۳- با افزایش پارامتر زمان شستشو، میزان پاک کنندگی آلاینده فلز آلومینیومی و فولادی افزایش یافته است اما مناسب ترین زمان برای حداکثر پاک کنندگی فلز

- ۴- با شرایط مناسب شستشوی فراصوتی به دست آمده در این تحقیق برای پاک کنندگی قطعات آلوده آلومینیومی و فولادی، مزایایی همچون کیفیت مطلوب در شستشو و تعدیل مصرف انرژی را در پی دارد.
- ۵- نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان می دهد عامل دما بیشترین تاثیر را در مدل آزمایشی تحقیق داشته است. همچنین در آزمون برآورد اثرها با به دست آمدن ضریب تعیین ۰/۹۹۸، رابطه قوی بین متغیر وابسته با متغیرهای مستقل طرح آزمایش تایید می گردد.
- ۶- بر اساس نتایج به دست آمده با اعمال اثرات کاویتاسیون و بدون استفاده از مواد شوینده شیمیایی تا ۹۵ درصد آلایندهها از فلزات پاک گردیده است که این دستاورد تاثیر بسزایی در حفظ محیط زیست خواهد داشت.

مراجع

1. M.M.C.G. Warmoeskerken, P. Vandervlist, V.S. Moholkar, V.A. Nierstrasz, Colloids, Surfaces a: Physicochem Eng. Aspects, No. 210, (2002) 277,.
2. K.A. Thakore, C.B. Smith, T.G. Glapp, Am. Dyestuff rep., No. 72, (1990) 30
3. M. Vouters, P. Rumeau, P. Tierce, S. Costes, Ultrasonic Sonochem., No. 11, (2004) 33
4. E.A. Neppivas, "Physics Reports Rev. Sect. Phys. Lett.", No. 61, , (1980) 159
5. I. Antonescu, E. Grunicherici, "Industrial Usoara", No 30, , (1979) 254
6. S.R. Shukla, R. Manisha, Mathur, Nov., JSDC, Vol. 111, (1995) 342-345
7. S. Muthukumaran, S. Kentish, S. Laichandani, "The Optimisation of Ultrasonic Cleaning Procedures for Dairy Fouled Ultrafiltration Members", Ultrasonic Sonochem. J., (2004) 29-35
۸. محمدی. وحید، اصغریان جدی. علی اصغر، رحیم زاده. حسن، هنرور. فرهنگ، "تجزیه و تحلیل رفتار مکانیکی پارچه حلقوی پودی ساده پنبه ای در شرایط استراحت امواج فراصوتی"، پایان نامه دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ص. ۲-۳۵، ۱۳۸۴.
9. F. Caupin, E. Herbert, "Cavitation in Water: a Review", Science Direct Physique, (2006) 1000-1018.
10. V.S. Moholkar, V.A. Nierstrasz, M.M.C.G. Warmoeskerken, "Intensification of Mass Transfer in Wet Textile Processes by Power Ultrasound", Phisique Jour., Vol. 3, No.3, (2003) 299-310.
11. "SPSS help".ver 13.