چهاردهمین کنفرانس هسته‌ای ایران
۱و۲ اسفند ماه ۱۳۸۶، یزد

طراحي و ساخت دستگاه شوينده فراصوتي قرص‌هاي استوانه‌اي دي اکسيد اورانيوم

نظام علی بختیاری* [۱]، بابک حبیبی [۲]
شرکت سوخت اتمی راکتورهای ایران (FMP)، پژوهشکده چرخه سوخت، اصفهان

چکیده: ذرات بجا مانده از فرایند سنگ‌زنی بر روی سطوح قرص یکی از معضلات اصلی خوردگی موضعی میله‌های سوخت در راکتور می‌باشد که با توجه به اهمیت ایمنی راکتورها یکی از فرایندهای خط تولید تمیز نمودن سطوح قرص‌ها می‌باشد که با روشهای مختلفی منجمله تکنیک لیزر و پدیده فراصوتی (التراسونیک) است. با توجه به سادگی و دامنه کاربردی وسیعتر تکنیک فراصوتی نسبت به لیزر؛ امروزه در اکثر صنایع مدرن خصوصاً هسته‌ای؛ از این سیستم برای تمیز کردن قرصهای UO_2 سایش داده‌شده که آلوده به ذرات حاصل از سایش، روغن موجود در سیال خنک کن دستگاه و غیره می‌باشند، استفاده شده است. بهمین منظور در این شرکت دستگاه شوینده فراصوتی طراحی و ساخته شده است و در حال حاضر با نرخ تولید ۶ سینی در ساعت فعال می‌باشد. این دستگاه متشکل از دو وان شوینده التراسونیک و یک وان رطوبت گیر با جریان هوای خشک بوده که سینی‌های حاوی ۱۲۰۰ قرص UO_2 به صورت اتوماتیک وارد این دستگاه شده و عملیات شستشو به صورت اتوماتیک در راستای خط تولید پیوسته انجام می‌پذیرد.

کلمات کلیدی: *چربی زدایی، شستشوی اولتراسونیک، قرص دی‌اکسیداورانیوم*

۱- مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در راکتورها و پدیده PCI[۳]؛ خوردگی موضعی در میله‌های سوخت و بوجود آمدن پدیده هیدراسیون می‌باشد. وجود ذرات ریز UO_2 با دمای بالا در حضور گازهای O_2 و H_2 و گازهای داغ حاصل از شکافت موجب شده تا تنش‌های حرارتی موضعی و به تبع آن خوردگی موضعی و نهایتاً پارگی میله‌های سوخت در این نقاط اتفاق افتاده و مشکلات جبران ناپذیری را در راکتور بوجود آورد. بهمین منظور جهت جلوگیری از ورود ذرات ریز به میله‌های سوخت عملیات زیر انجام می‌شود:

۱- شستشوی قرصها و زدودن ذرات ریز از سطوح آنها
۲- استفاده از مکانیزم لیزری و مکش برای برداشتن این ذرات از روی سطوح قرص
۳- استفاده از مکانیزم مکش در دستگاه بارگذاری قرص برای جلوگیری از ورود ذرات ریز به درون میله‌ها

در این مطالعه برای روش اول دستگاهی طراحی و ساخته شده‌است و در خط تولید از آن استفاده می‌شود. این دستگاه قابلیت شستشوی دو نوع قرص سوخت IR-40 و VVER-1000 را دارد و با ساخت سینی‌های جدید می‌تواند استفاده‌های گوناگونی داشته باشد.

۲- پدیده‌ی اولتراسونیک، مزایا و کاربرد آن در فرایند شستشو

[۱] - کارشناس ارشد مکانیک شرکت سوخت اتمی راکتورهای ایران (طرح FMP)، سرپرست گروه پژوهشی ساخت میله و مونتاژ مجتمع سوخت

[۲] -کارشناس ارشد مهندسی شیمی شرکت سوخت اتمی راکتورهای ایران (طرح FMP)

[۳] - Pellet Clad Interaction (PCI)

فرکانس‌های صوتی بالاتر از حد شنوایی(بالای KHz ۱۸) دارای شدت امواج بالایی بوده و انرژی مکانیکی و جنبشی حاصل از آنها نیز فوق‌العاده مؤثر می‌باشد. در فرایند فراصوتی بر اثر نوسان موجهای فشاری مثبت و منفی در سیال حبابهای ریزی درون سیال ایجاد شده که به این پدیده کاویتاسیون می‌گویند. نوسانات پی‌درپی باعث رشد حبابها می‌شود و حبابها به حالت رزونانس و ناپایداری رسیده و منفجر می شوند. مجموع انفجارهای ریز باعث ایجاد انرژی مکانیکی-جنبشی زیادی شده و باعث شکسته‌شدن پیوندهای فیزیکی بین آلودگی‌ها، هیدرولیز پیوندهای شیمیایی آلودگی‌ها، و افزایش حلالیت یونی آلودگی‌ها در محلول می‌شود. این فرایند باعث ایجاد جریانهای میکرونی با سرعت بالا (۴۰۰ Km/hr) و باعث ایجاد دمای ۵۰۰۰ °C در نقطه انفجار با فشاری معادل ۵۰۰ اتمسفر می‌شود که آلودگی‌ها را با سرعت زیادی از سطح قطعه دور می‌کند [۱و۲].

این روش برخلاف اکثر شوینده‌ها مشکل زیست‌محیطی نداشته و استفاده از آن برای شستشوی قطعات فلزی و غیرفلزی پیچده با هرگونه آلودگی بدون اینکه به سطوح آسیبی برساند روز به روز زیادتر می‌شود.

پارامترهای مؤثر در فرایند شستشوی التراسونیک عبارتند از: ۱- محیط شستشو، ۲- نوع آلودگی،۳- کشش سطحی سیال،۴- نیروی واندروالس بین آلودگی و سطح جسم،۵-دمای سیال. (جدول ۱)

مثلاً هرچه کشش سطحی مایع بیشتر باشد مقدار انرژی لازم جهت کاویتاسیون بیشتر خواهد بود. آب خالص (DI water) دارای کشش سطحی برابر با ۷۲dyne/cm بوده که در دمای محیط پدیده کاویتاسیون در آن به سختی انجام می‌پذیرد اما وقتی دمای آن تا ۷۰°C بالا برود شستشو بهتر انجام می‌پذیرد[۵]. در نقطه جوش چون مایع بخار شده و به جوش می‌آید، حبابهای بخار بوجود آمده، تأثیر زیادی بر کاهش شدت التراسونیک خواهد گذاشت بهمین خاطر جهت شستشوی مطلوب، هیچگاه محیط شستشو نباید به نقطه جوش برسد.

در شستشو بروش التراسونیک سه مکانیزم عمده: تک‌فرکانسی[۴]، چندفرکانسی[۵] و فرکانسهای جاروبی[۶] استفاده می‌شود که مکانیزمهای چند فرکانسی و جاروبی راندمان بسیار بالاتری را نسبت به مکانیزم اول دارند.

۳- طراحی و ساخت سیستم شستشو

با توجه به دلایل فوق و بالابردن ضریب ایمنی خط تولید و به تبع آن استفاده مطمئن بسته‌های سوخت در راکتور، طراحی و ساخت سیستم شستشو به روش التراسونیک در دستور کار قرار گرفت.

۳-۱- ایده‌ی طراحی

بعد از عملیات گرینددینگ سطوح قرص‌ها و کانال مرکزی آنها به روغن سیال خنک‌کن دستگاه و ذرات ریز UO_2 و نیز ذرات کنده‌شده از سطح چرخ‌های ساینده (Grinding Wheels) آلوده می‌شود. چون قطر کانال مرکزی قرص‌ها ۱/۵mm می‌باشد، مطمئن‌ترین روش برای شستشو خصوصاً سطوح داخلی، استقرار عمودی قرص‌ها در محلول؛ و شستشو با استفاده از فرایند التراسونیک می‌باشد[۴].

فاکتورهای مهم در طراحی عبارت بودند از:

۱- آلودگی رادیواکتیویته کم ۲- سادگی طرح (User-friend) ۳- کیفیت و راندمان مطلوب در خط‌تولید
۴- انتقال ثقلی پساب (Waste) ۵- انتخاب جنس مواد مناسب ۶- انتخاب توان مناسب التراسونیک

[4] -Single Sonic(Single Frequency)
[5] -Multi Sonic(Multi Frequencies)
[6] -Sweep Sonic(Sweep Frequencies)

- استفاده از سیستم ثقلی بجای پمپاژ و دو جداره ساختن تانکهای شستشو جهت جلوگیری از سرریز شدن سیال و تولید جریان آرام(Steady State) با انتخاب لوله‌کشی از جنس فولاد زنگ‌نزن با Fitting مناسب و انتخاب فیلترهای کارتریجی از جنس فولاد زنگ نزن با قدرت جمع‌آوری ذرات 0.2-10μ بهترین انتخاب جهت کاهش آلودگی احتمالی ناشی از پخش ذرات رادیواکتیو بود. فیلترهای کارتریجی مصرفی در یک مکان مناسب به روش Backflow تمیز شده و دوباره استفاده می‌شوند و به راحتی در خط تولید استفاده خواهند شد. این فیلترها عمر زیادی داشته و براحتی Waste نخواهند شد.
- استفاده از فرکانس بالا جهت افزایش نسبت حبابها بر سطح مقطع قطعات و ایجاد منطقه همگنی از حبابها که نتیجه‌اش برداشتن ذرات بسیار ریز از سطح و شستشوی همگن خواهد شد (شکل (۱)). چون در محل شکم موج حبابهای کاویتاسیون بوجود می‌آید و نیروی حاصل از این پدیده، باعث کنده شدن ذرات از سطح قطعه می‌شود.
- استفاده از فرکانسهای متغیر (چند فرکانسی): هر چند با بالابردن فرکانس حبابهای کاویتاسیون به سمت همگن شدن میل می‌کنند ولی باز هم نقاط کور وجود خواهد داشت که با پدیده‌ی چند فرکانسی یا جاروبی این موضوع مرتفع خواهد شد. در دستگاه ساخته شده از پدیده‌ی چندفرکانسی استفاده شد.
- وانهای شستشو می‌بایست ضد خوردگی و ضد سایش و به اندازه‌ی کافی صلب بوده تا بهنگام برخورد امواج به سطح آنها مطلوبترین انعکاس را جهت تشکیل نقاط گره و شکم داشته باشند. فولاد زنگ‌نزن، کوراتز، PVC، پلی‌پروپلین، تیتانیوم و یا سطوح پوشش‌داده شده با نیترید تیتانیوم برای عمر بیشتر در مقابل سطوح پرتوزا؛ انتخابهای مناسبی هستند[۱]

۳-۲- محاسبات طراحی

حجم وانها و توان مورد نیاز جهت فرایند التراسونیک:

- حجم سیال مورد نیاز برای شستشو و توان مصرفی برای هر گالن سیال از فرمول زیر بدست می‌آید[۳].

$$Galon = 3.8\,Lit \qquad (1)$$

$$Medium\,Vol.(Galon) = \frac{Total\ Surface\ Area(in^2)of\ parts}{230} \qquad (2)$$

$$\frac{Total\ \ Power\ \ (watt)}{Medium\ \ Volum\ \ (Galon)} = 50 - 100\ \ Watt \qquad (3)$$

- ظرفیت خط تولید ۶ سینی در ساعت و ظرفیت هرسینی ۱۲۰۰ قرص UO_2 می‌باشد(شکل ۲، ۳).
- با در نظرگرفتن فاصله بهینه سطح ترانسدیوسرها از سطح قطعه(حدود ۲۰cm) و فضای لازم جهت نصب ترانسدیوسرها، سینی حاوی قرص و سایر موارد؛ ابعاد وانها ($۴۰۰\times۴۰۰\times۴۰۰\ mm^2$)بدست آمد.
- کل سطوح خارجی وانها که در معرض سیال هستند برابر شد با $۵\times۴۰۰\times۴۰۰=۸\times۱۰^۵mm^2$
- کل سطوح جانبی سینی با قرص‌ها برابر شد با $۱۰۶۳۷۶۲/۲۵mm^2$

باتوجه به موارد بالا حداقل حجم سیال مورد نیاز برای شستشو و مقدار توان ترانسدیوسرها بدست آمد:

$$Total\ Area = 1863762.25mm^2 = 2889in^2$$

$$\Rightarrow Minimum Medium Volume: 12.56\,gallon\ or\ 47.73lit$$

$$\Rightarrow Mean Power(Watt) = 942Watt \approx 1Kwatt$$

- وانها دو جداره از فولاد زنگ‌نزن به ضخامت ۲mm ساخته شد و از پشم شیشه بعنوان عایق صوتی استفاده شد

- توان مصرفی برای گرم کردن وانهای شستشو با توجه به رابطه $\dot{Q} = \dot{M} C_p \Delta T$ با ضریب اطمینان لازم ۴/۵KW بدست آمد.

۳-۳- طراحی واحد خشک کن

فرضیات: ۱- دما پایین بوده و مکانیزم انتقال جرم مبنای محاسبات می‌باشد. ۲- با توجه به خصوصیت سرامیک‌ها حداکثر ضخامت لایه رطوبت بر روی سطوح mm ۰/۱ در نظر گرفته شده است. ۳- هوای خشک در دمای محیط مورد نظر است تا قرص‌های UO_2 اکسید نشوند و مبنای محاسبات مشخصات هوای خشک در دمای ۳۰۰K و با رطوبت $kg\ H_2O/kg\ dry\ air$ ۰/ ۰۱ می‌باشد بنابراین سطح و مقدار رطوبت همراه قرص‌ها به صورت زیر (جدول زیر) به دست می‌آید:

(۴) سطح خارجی قرص‌ها = ۳/۲۴×۱۰$^{-۴}$ m^2	(۵) سطح مجرای میانی قرص‌ها = ۴/۷۱×۱۰$^{-۵}$ m^2
(۶) رطوبت موجود روی سطح خارجی قرصها = ۱/۷۹×۱۰$^{-۳}$ $kmol$	(۷) رطوبت موجود در مجرای میانی قرص‌ها = ۲/۶۰×۱۰$^{-۷}$ $kmol$

ضریب نفوذ رطوبت در هوا با توجه به شرایط گفته شده برابر است با:

$$D_{AB} = ۲/۵۸ \times ۱۰-۵ \quad m^2/s \qquad (۸)$$

یکی از راه‌های محاسبه‌ی سرعت تبخیر مایعات محاسبه‌ی ضریب انتقال جرم از روی ضریب انتقال حرارت می‌باشد. این کار به کمک شباهت میان اعداد بدون بعد در دو مبحث انتقال جرم و انتقال حرارت امکان‌پذیر می‌باشد. بر اساس این تئوری داریم:

$$j_H = j_D \qquad (9) \qquad j_H = \frac{h}{\rho.u.C_P}\Pr^{2/3} \qquad (10) \qquad j_D = \frac{F.M_{av}}{\rho.u} Sc^{2/3} \qquad (11)$$

با قرار دادن روابط ۱۰و ۱۱ در رابطه‌ی (۹) نتیجه می‌گیریم که:

$$F = \frac{h}{C_P.M_{av}}\left(\frac{\Pr}{Sc}\right)^{2/3} \qquad (12) \qquad For\ Air\ at\ Room\ Temp.\ \ Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{15.69\times10^{-6}}{2.58\times10^{-5}} = 0.608 \qquad (13)$$

رط

$$\Pr = 0.708 \qquad (14) \qquad and \qquad M_{av} = 28.67 kg/kmol \qquad (15) \qquad \Rightarrow Then;\ F = 3.84\times10^{-5} h \qquad (16)$$

وبت موجود بر روی سطوح میانی و خارجی قرص‌ها و ضریب انتقال حرارت در این دو ناحیه از روابط زیر بدست می‌آید. برای جریان در مجرای میانی و سطح خارجی قرص به ترتیب روابط ۱۷ و ۱۸ بدست می‌آید و ضریب انتقال حرارت از رابطه‌ی ۱۹.

$$Nu_d = 0.023\,\mathrm{Re}_d^{0.8}\,\Pr^{0.4} \qquad (17) \qquad Nu_L = 0.664\,\mathrm{Re}_L^{1/2}\,\Pr^{1/3} \qquad (18) \qquad Nu = \frac{h.d}{k}\ or\ \frac{h.L}{k} \qquad (19)$$

بعد از محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت، از رابطه (۱۲) ضریب انتقال جرم و سپس از رابطه‌ی زیر(۲۰) سرعت انتقال جرم بدست می‌آید:

$$N_A = F.Ln\frac{1-\frac{C_{A2}}{C}}{1-\frac{C_{A1}}{C}} \qquad (20)$$

بر روی سطح قرص‌ها هوا همواره اشباع از بخار آب در آن دما فرض می‌شود و در جریان هوا، فرض می‌شود حداقل رطوبت یعنی $kg\ H_2O / kg\ dry\ Air$ ۰/ ۰۱ باشد. با این شرایط مقدار غلظت مولی هوای مرطوب به صورت زیر بدست می‌آید:

$\frac{C_{A1}}{C} = 0.03524 molH_2O / totalmol$ (21), $\frac{C_{A2}}{C} = 0.01577 molH_2O / totalmol$ (22)

با جاگذاری در رابطه‌ی ۲۰ خواهیم داشت:

$N_A = 0.02F$ (23)

غیر از خواص فیزیکی آب و هوا، سرعت جریان هوا می‌باشد. یکی از عواملی که بر روی حداکثر سرعت مجاز هوا روی سطح قرص موثر می‌باشد، نیروی فشاری هوا وارد بر قرص می‌باشد بطوریکه قرصها را جابجا نکند. برای راندمان بیشتر جهت جریان هوا عمود بر سطح قرصها و به طرف پایین در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نیروی وارد بر قرص‌ها هم به سمت پایین بوده و اثری بر به هم ریختن قرص‌ها ندارد. ولی آشفتگی جریان در برخورد با سطح باعث می‌شود که نیرو در جهت‌های دیگر هم به قرص‌ها وارد شود. بنابراین دانستن حداکثر سرعت مجاز جریان هوا بر روی قرص‌ها مهم می‌باشد.

برای محاسبه‌ی نیروی وارد بر قرص‌ها از طرف جریان هوا داریم: $Drag = C_D A_P \frac{u^2}{2}$ (24)

برای قرص‌ها که بصورت استوانه هستند داریم: $\frac{L}{d} \approx 1 \Rightarrow C_D = 0.9$ (25)

با قرار دادن سایر پارامترها در رابطه‌ی (۲۴)، حداکثر سرعت هوا به صورت زیر بدست می‌آید:

$$u_{\max} = 45 m/s \qquad (26)$$

۳-٤- طراحی سیستم انتقال

این سیستم (شکل ۴، ۵، ۶) با توجه به وزن سینی‌ها و با توجه به نرخ تولید ۶ سینی در ساعت طراحی شد. انتخاب سروموتورها برای کنترل بهتر و خاصیت ضد زنگ بودن و در نظر گرفتن ایمنی لازم برای موتورها و گیربکسها(IP=56) از پارامترهای مهم در دستگاه بودند ضمن اینکه در سیستم چنگک دستگاه از نظر مکانیکی، مکانیزمی طراحی شده‌است که خود قفل کن است و اگر موتور از کار بیفتد و یا برق قطع شود وزن سینی‌ها باعث شده چنگک سینی را رها نکند.

٤- نتایج طراحی و ساخت دستگاه

باتوجه به طراحی‌های بالا، دستگاه شستشو با مشخصات زیر ساخته شد:

شستشوی قرص‌ها در سه مرحله(شکل ۴):۱- شستشو با محلول پاک‌کننده۲- آبکشی۳- خشک‌کردن با هوای فشرده تمیز در دمای محیط و یا گازN_2. در مرحله ۱ و۲ از فرایند التراسونیک نوع چند فرکانسی استفاده شده است. آب دیونیزه بعنوان محیط شستشو مطلوب، بهترین انتخاب بود و استفاده از گازN_2 به صورت اختیاری جهت اطمینان از عدم اکسیداسیون قرصها بجای هوای خشک در نظر گرفته شد.

در سیستم لوله‌کشی با استفاده از مقاومت سنج و PH سنج همواره شرایط آب دیونیزه کنترل شده و با توجه به برنامه‌ی دستگاه راهکار لازم در نظر گرفته می‌شود. دستگاه به صورت پیوسته در خط تولید کار کرده و نسبت به خطوط تولید مشابه خارجی[۶] از تکنیک جدید و راندمان بالاتری برخوردار است. در نهایت نتایج بدست آمده از طراحی، پارامترهایی بودند که در دستگاه ساخته شده لحاظ شدند و به مرحله اجرا در آمدند این پارامترها در جدول (۲) زیر نشان داده شده‌است.

٥- مراجع

[1]. "www.crest-ultrasonics.com"
[2] "ASM Handbook, Vol. 5. Surface Engineering, Surface Cleaning, Ultrasonic Cleaning", 1994
[3] "www.fastlaundry.com"

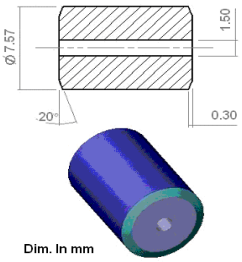
[4]. Nezam Ali Bakhtiary; "Basic Design for an Ultrasonic Washing System" FMP-DSN-130, 2004
[5]. F.J. Fuchs, "Ultrasonic Cleaning, Metal Finishing Guidebook and Directory", Elsevier Science, 1992, p134-139
[6]. Rozhkov, V.V, et al, "Method and Installation for Wet Grinding of Fuel Pellets", Ru2179759, Russian Agency of Patents and Trademarks, 2002

جدول ۱: تاثیرپارامترهاي سیال بر شدت التراسونیك

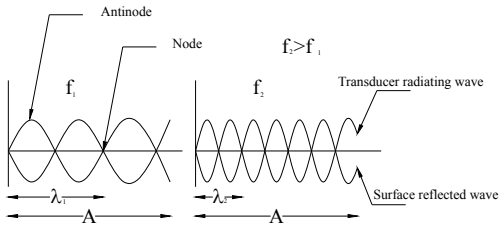
تأثیر پارامتر	دما	کشش سطحی	نیروی واندوالس بین آلودگی و سطح قطعه	فشاربخار	فرکانس موج	لزجت سیال	جریان آرام	حباب و گاز در محلول	نقطه‌جوش
شدت التراسونیک	↑	↓	↓	↑	↑	حد بهینه دارد	↑	↓	↓

جدول ۲: مشخصات فني دستگاه

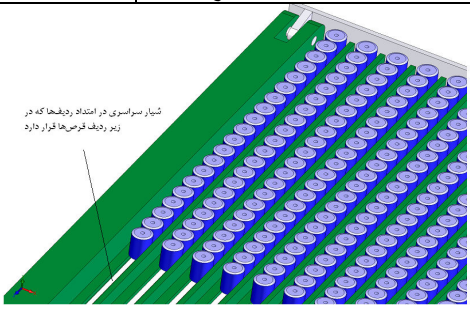
۹۰	توان موتور محرک (Watt)	روی سطح قرص	درون مجرای میانی قرص	مشخصات واحد شستشو
۵۰	حجم وانها (Lit)	۲۹/۶	۱۰/۴	Nu
۴/۵	توان هیتر برقی (KW)	۵۵/۵	۱۸۲	h, ($W/m^2.K$)
۱	توان ترانسدیوسرها (KW)	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۷	F, ($kmol/m^2.S$)
سازه آلومنیوم، وانها فولادزنگ‌نزن	بدنه و وانها	$۴/۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۴ \times ۱۰^{-۴}$	N_A, ($kmol/m^2.S$)
۶ سینی در ساعت	نرخ تولید	۱۳۲	۴۰	t, (S)
اتوماتیک پیوسته مجهز به سنسورهای تعیین موقعیت مجهز به PH سنج و مقاومت سنج آب DM	مشخصه‌ی دستگاه	۱۵۰۰		دبی هوای مصرفی (CFM)
		۳۰۰		دمای هوای مصرفی (K)
		۲/۵		زمان خشک‌کن (دقیقه)
		استفاده از N_2 بجای هوای خشک سیستم خودقفل‌کن		قابلیت‌ها



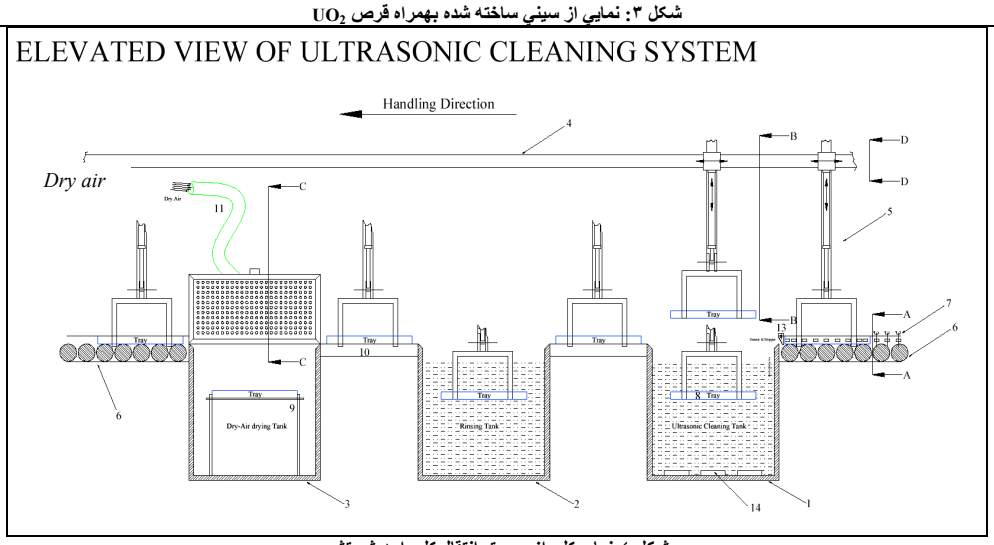
شکل ۲: قرص سوخت با کانال مرکزي



شکل ۱: افزایش فرکانس و تأثیر آن بر همگن شدن فرایند کاویتاسیون بر سطح قطعه

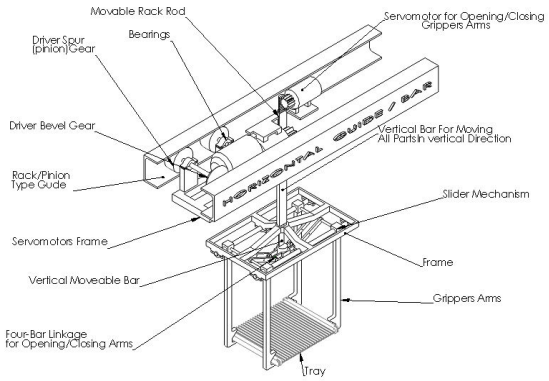


شکل ۳: نمايي از سيني ساخته شده بهمراه قرص UO_2



شکل ٤ :نماي كلي از سيستم انتقال كل واحد شستشو

شکل ٥: نماي كلي دستگاه ساخته شده



شکل ٦: نمايي از سيستم انتقال و مكانيزم چنگكي خود قفل كن