



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

## بررسی و تحلیل پیشرفت بر پایه اورانیوم با چگالی بسیار بالا برای دستیابی به تریتیوم به عنوان سوخت مطلوب و به وسیله آزمایش های دقیق جذب و دفع

امیر شاطری<sup>۱</sup>

۱- فارغ التحصیل مقطع کارشناسی پیوسته مهندسی برق موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز؛ ایران

[Amir.sh197799@gmail.com](mailto:Amir.sh197799@gmail.com)

### چکیده

برای عملکرد ایمن و کارآمد یک سیستم ذخیره و تحویل در یک کارخانه تریتیوم برای چرخه سوخت همجوشی، یک بستر هیدرید فلزی برای بازیابی و تحویل گاز ایزوتوپ هیدروژن ضروری است. برای توسعه یک بستر هیدرید فلزی برای چرخه سوخت همجوشی، و اعتبارسنجی عملکرد فرآیند یک بستر هیدرید اورانیوم ضعیف شده، یک بستر آزمایشی در مقیاس بزرگ که حمل ایمن و توزیع یکنواخت اورانیوم ضعیف شده را در نظر می‌گیرد، به تازگی طراحی و ساخته شده است. برای ایجاد روش فعال سازی این بستر جدید، در این تحقیق و مقاله تعدادی از چرخه‌های جذب/دفع لازم برای رسیدن به ظرفیت ذخیره‌سازی اشباع مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایشات دفع هیدروژن که امکان تحویل بدون پمپاژ خلاء را تأیید می‌کند نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و بیش از ۹۵ درصد هیدروژن از (هیدرید اورانیوم) ۲،۹ با موفقیت بررسی و تحلیل شد.

**کلمات کلیدی:** چرخه سوخت، هیدرید فلز، تریتیوم، ذخیره سازی، اورانیوم ضعیف شده

### ۱- مقدمه

برای عملکرد ایمن یک سیستم ذخیره سازی و تحویل (SDS) در یک کارخانه تریتیوم برای چرخه سوخت همجوشی، بستر هیدرید فلزی برای بازیابی و تحویل گاز ایزوتوپ هیدروژن ضروری است. عملکرد اصلی بستر ذخیره ایمن تریتیوم به عنوان یک هیدرید فلزی، جذب سریع جذب اضطراری گاز تریتیوم و دفع سریع برای برآوردن نیاز سوخت رسانی و محاسبه تریتیوم در محل با اندازه گیری کالریمتری گرمای واپاشی تریتیوم است. در مقایسه با سایر هیدریدهای فلزی، اورانیوم ضعیف شده (اورانیومی با چگالی بسیار بالا) مشکل عدم تناسب ندارد که اجتناب از آن یا کنترل آن با هیدرید آلیاژ فلزی آسان نیست. همچنین، فشار تجزیه تقریباً در تمام طول تجزیه کامل صاف است. این پتانسیل برای تحویل فشار بالا به دلیل فشار تعادل بالا در دمای بالا مشخص است. به دلیل این دلایل، اورانیوم ضعیف شده یکی از کاندیدهای قوی برای تبدیل شدن به یک ماده ذخیره‌سازی تریتیوم برای چرخه سوخت همجوشی علی‌رغم رادیواکتیویته و محدودیت در کارکرد آن است. همچنین، اورانیوم ضعیف شده، حتی زمانی که به صورت پودر ریز نباشد، پیروفوریک است. بنابراین، ساخت تخت اورانیوم با چگالی بسیار بالا نیاز به مراقبت یا محیط خاصی دارد. مطالعات قبلی در مورد کاربردهای بستر اورانیوم برای



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

سرویس یا ذخیره سازی تریتیوم، چندین نتیجه تخلیه هیدروژن را با یا بدون عملکرد پمپ نشان داده است [۱،۲]. با این حال، اعتبارسنجی عملکرد فرآیند بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا برای خدمات در کارخانه بزرگ تریتیوم مانند رآکتور گرمایسته ای آزمایشی بین المللی باید به شدت انجام شود. همچنین، توسعه طراحی که تولید تعداد زیادی تخت اورانیوم با چگالی بسیار بالا را در نظر می گیرد، مورد نیاز است. یک اورانیوم با چگالی بسیار بالا آزمایشی در مقیاس بزرگ طراحی و ساخته شده تختی که حمل و نقل ایمن اورانیوم با چگالی بسیار بالا را در نظر می گیرد. آزمایش های هیدروژن برای تأیید عملکرد فرآیند انجام شد. در این مقاله ویژگی های طراحی بستر آزمایشی فعلی معرفی می شود. نتایج آزمایش فعال سازی بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا و تحویل بدون پمپ ارائه شده است.

## ۲- پیشینه تحقیق و پژوهش

گداخت هسته ای، همجوشی هسته ای و یا فیوژن به فرایندی عکس عمل شکافت هسته ای است. در فرایند همجوشی هسته ای هسته های سبک مانند هیدروژن، دوتریوم و تریتیوم با یکدیگر همجوشی داده شده و هسته های سنگین تر و مقداری انرژی تولید می شود. برای اینکه همجوشی امکان پذیر باشد هسته هایی که در واکنش وارد می شوند باید دارای انرژی جنبشی کافی باشند تا بر میدان الکترواستاتیکی پیرامونشان فائق آیند؛ بنابراین دماهای وابسته به واکنش های همجوشی فوق العاده بالاست. در سال ۱۹۵۲ اولین انفجار آزمایشی گرمایسته ای باعث آزاد شدن مقدار زیادی انرژی کنترل نشده شد. این آزمایش نشان داد که اگر دمای یک گاز متشکل از ذرات باردار-پلازما-با چگالی بالا تا حد ۵۰ میلیون درجه کلوین افزایش یابد، باعث ایجاد واکنش همجوشی هسته ای در گاز یونیده می شود. پس از انفجار موفقیت آمیز بمب هیدروژنی جستجو برای آزاد کردن کنترل شده انرژی همجوشی شروع شد. گرمای همجوشی به مفهوم گرمای حاصله از همجوشی هسته ای است. همجوشی هسته ای، واکنشی کاملاً برعکس شکافت هسته ای است. به جای شکافتن اتم های بزرگ به اتم های کوچک، اتم های کوچک به یکدیگر جوش داده می شوند تا اتم های بزرگ به وجود آیند. این واکنش انرژی خیلی زیادی آزاد می کند، چرا که طبق نظریه نسبیت خاص انشتین، قسمتی از ماده این واکنش به انرژی تبدیل می شود. واقعیت این است که خارج از نیروگاه های همجوشی و در طبیعت، ما هر روز اثر این واکنش را احساس می کنیم. همجوشی هسته ای همان چیزی است که در مرکز خورشید رخ می دهد می کند. چیزی که باعث می شود رسیدن به فناوری همجوشی مشکل باشد، عدم علاقه هسته ای ها به جوش خوردن با یکدیگر است. هسته اتم هیدروژن دارای یک پروتون است و بنابراین بار الکتریکی مثبت دارد. وقتی می خواهیم یک هسته اتم هیدروژن دیگر را به آن جوش بدهیم، به دلیل اینکه هر دو دارای بار مثبت هستند، در برابر جوش خوردن مقاومت می کنند. تنها راه این است که به زور این کار را انجام دهیم و آن قدر دمای اتم ها را بالا ببریم که به پلازما تبدیل شوند. اگر پلازمایی با دمای بسیار بالا داشته باشیم، بعضی از هسته ها چنان محکم به یکدیگر برخورد می کنند که به یکدیگر جوش می خورند. برای انجام این فرایند، به دما و فشار خیلی زیادی احتیاج است. مشکل این جاست که ما بر روی زمین باید شرایط قسمت مرکزی خورشید را بازسازی کنیم. خورشیدی که جرم اش ۳۳۰ هزار برابر زمین است و دمای مرکز آن به ۱۷ میلیون درجه سانتی گراد می رسد. مشکل نخست این است که بر روی زمین به اندازه خورشید سوخت هیدروژن در اختیار نداریم، باید دما را به ۱۰۰ میلیون درجه سانتی گراد برسانیم. مشکل دوم که ماده در شکل پلازما رفتارهای عجیبی از خود نشان می دهد. پلازما شکل چهارم ماده است نه مایع، نه جامد و نه گاز. وقتی پلازما را در دما و فشار خیلی زیاد قرار می دهیم، به شدت ناپایدار می شود. برای کنترل شرایط ناپایدار آن نیز از تجهیزات معمولی نمی توان استفاده کرد. به نوعی باید بر روی زمین یک ستاره ساخت. این کار به قدری چالش برانگیز است که بشر برای رسیدن به آن، باید پیچیده ترین فناوری تاریخ را بسازد.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

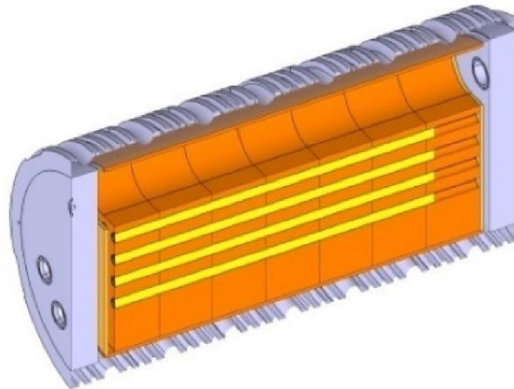
## ۳- بستر اورانیوم ضعیف شده آزمایشی

### ۳-۱- طراحی و ساخت

بستر آزمایشی اورانیوم با چگالی بسیار بالا در مقیاس بزرگ فعلی دو هدف عمده دارد. هدف اول ایجاد یک روش طراحی و ساخت است که به طور ایمن اورانیوم را کنترل کند. هدف دیگر انجام آزمایش‌هایی بر روی جذب/دفع، گرمایش/سرمايش و کالری‌سنجی بستر است. ۱,۸۶ کیلوگرم اورانیوم با چگالی بسیار بالا در بستر بارگذاری می‌شود که برابر با ظرفیت تریتیوم ۷۰ گرم به عنوان فرم  $UQ_3$  است (۱۱,۶۷ مول گاز  $Q_2$ ،  $Q$  مخفف ایزوتوپ هیدروژن است). تخت اورانیوم با چگالی بسیار بالا اساساً از یک ظرف اولیه و ژاکت بیرونی برای محصور دوگانه تشکیل شده است. مخزن اولیه ساخته شده از فولاد ضد زنگ حاوی هیدرید اورانیوم با چگالی بسیار بالا است و مجهز به یک گرمکن غلاف الکتریکی، یک لوله گاز ایزوتوپ گاز هیدروژن در داخل و خارج، یک فیلتر فلزی متخلخل، ترموکوپل و سایر اجزا است. ژاکت بیرونی ساخته شده از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ دارای یک فلنج منفصل با پورت های گاز، ورودی های الکتریکی و لوله های گاز متصل است. بین مخزن اولیه و ژاکت بیرونی، چندین لایه بازتابنده حرارتی برای به حداقل رساندن اتلاف حرارت از مخزن اولیه نصب شده است. ویژگی های اصلی طراحی تخت اورانیوم با چگالی بسیار بالا فعلی معرفی شده است. در ابتدا، تخت در جهت افقی نصب شد، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. نویسندگان این نصب را برای گرم کردن موثر و یکنواخت هیدرید فلز انتخاب کردند. انبساط حجمی اورانیوم ضعیف شده توسط هیدرید کردن بیش از ۷۵ درصد است [۳] و حجم بافر برای آزادسازی گاز از هیدرید فلز مورد نیاز است. بنابراین، مخزن اولیه داخلی به بخشی از حجم انبساط نیاز دارد. با این حال، این حجم اضافی در ظرف اولیه از نظر گرمایش/خنک کردن یکنواخت و سریع پودر اورانیوم با چگالی بسیار بالا به دلیل افزایش جرم حرارتی و کاهش تماس حرارتی بین پودر اورانیوم با چگالی بسیار بالا و ظرف اولیه نامطلوب است. برای جبران این، یک فوم فلزی ساخته شده از مس در ظرف اولیه نصب می‌شود. هیدرید فلز پودر شده در سلول های باز فوم مس توزیع می‌شود و اسکلت فوم به طور موثر گرما را منتقل می‌کند. بستر آلیاژی لانتانیم-نیکل-آلومینیوم برای ذخیره ایزوتوپ هیدروژن نیز فوم فلزی را تطبیق می‌دهد [۴]. فوم فلزی به عنوان جزئی عمل می‌کند که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و برای کاهش مهاجرت پودر در بستر مفید است. نویسندگان قبلاً یک مقایسه تجربی بین باله فلزی و فوم فلزی به عنوان یک جزء افزایش دهنده انتقال حرارت در بستر هیدرید فلزی انجام دادند. نشان داده شد که فوم فلزی برای انتقال حرارت و عملکرد جذب/دفع موثرتر است [۵].



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



(a)



(b)

شکل ۱. الف) مفهوم طراحی اولین بستر آزمایشی هیدرید اورانیوم در مقیاس بزرگ از منبع. ب) دومین بستر آزمایشی هیدرید اورانیوم در مقیاس بزرگ (طراحی تجدیدنظر شده) برای تأیید عملکرد فرآیند نصب شده در اورانیوم با چگالی بسیار بالا (سیستم تأیید فرآیند SDS با اورانیوم ضعیف شده).

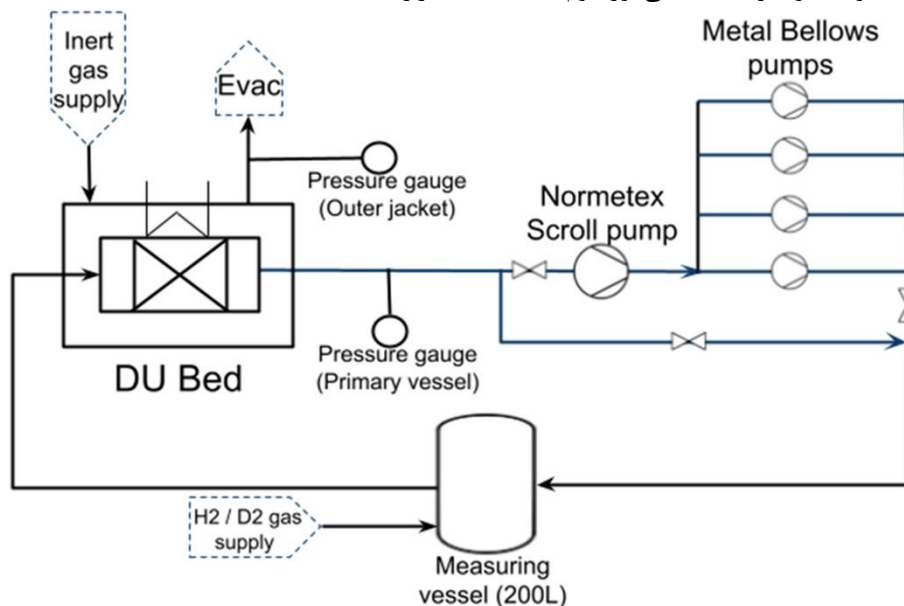
در مرحله دوم، حمل و نقل ایمن اورانیوم با چگالی بسیار بالا در طول ساخت در نظر گرفته شد. با توجه به ویژگی های پیروفوریک اورانیوم با چگالی بسیار بالا، جابجایی اورانیوم با چگالی بسیار بالا به شکل یک ذره کوچک یا حتی به صورت سیم نیاز به شرایط گاز بی اثر مانند جعبه دستکش دارد که هزینه و زمان ساخت را افزایش می دهد. با تمرکز بر این خطرات، میله های اورانیوم با چگالی بسیار بالا متعدد با روش قالب گیری تزریقی تهیه و در سوراخ های فوم فلزی مس وارد شدند (شکل ۱ ب)). این روش را می توان در جو بدون خطر آتش سوزی انجام داد. سوراخ های روی فوم مس با در نظر گرفتن توزیع یکنواخت پودر اورانیوم با چگالی بسیار بالا در سلول های فوم فلزی توزیع شد. همچنین، اورانیوم با چگالی

# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

بسیار بالا دارای یوتکتیک با آهن فولاد ضد زنگ در دمای حدود ۶۳۰ درجه سانتی گراد است. در نتیجه، یک مانع یوتکتیک در داخل رگ اولیه مورد نیاز بود. پوسته و پوشش مسی در سطح داخلی ظرف اولیه چسبانده شد. بخاری‌های غلاف الکتریکی و کانال‌های خنک‌کننده در شیار سطح بیرونی مخزن اولیه برای کارایی گرمایش بهتر با خلاء لحیم کاری شدند (شکل ۱ الف)). بخاری‌های کارتریج در فوم فلزی قرار داده شدند تا گرمای فروپاشی تریتیوم را شبیه سازی کنند. مولفه‌های کالری سنجی در بستر با اندازه گیری کالریمتری نیز نصب شد.

## ۲-۳- راه اندازی آزمایشی

تخت اورانیوم با چگالی بسیار بالا فعلی در سیستم تأیید فرآیند اورانیوم با چگالی بسیار بالا نصب شده است. DUSPOVE یک سیستم جعبه دستکش به طول ۱۰ متر است که مجهز به مخازن اندازه گیری متعدد، پمپ اسکرو Normtex، پمپ‌های دم فلزی و سیستم تخلیه با پمپ مولکولی توربو است. با استفاده از گاز هیدروژن و دوتریوم، DUSPOVE آزمایشات مختلف تأیید فرآیند مربوط به عملکرد سیستم ذخیره و تحویل کارخانه تریتیوم را انجام داد (شکل ۲). این در فضای تنظیم شده و محدود برای جابجایی اورانیوم ضعیف شده قرار داشت.



شکل ۲. نمودار جریان فرآیند ساده شده سیستم تأیید فرآیند SDS برای آزمایش‌های بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا.

## ۴- آزمایشات هیدروژن

### ۴-۱- فعال سازی اورانیوم ضعیف شده

برای فعال کردن اورانیوم ضعیف شده با پودر کردن، یک روش فعال سازی متشکل از بازپخت خلاء و ۵ سیکل جذب/دفع هیدروژن انجام شد. اورانیوم با چگالی بسیار بالا تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد برای بیش از ۴ ساعت تحت تخلیه پمپ مولکولی توربو از رگ اولیه و ژاکت بیرونی گرم شد. اولین جذب در دمای اولیه (اورانیوم با چگالی بسیار بالا) ۲۲۵ درجه سانتی گراد شروع شد و فشار اولیه گاز هیدروژن ۱۵۰ کیلو پاسکال در ظرف اندازه گیری ۲۰۰ لیتر بود. از جذب دوم تا پنجم، دمای اولیه اورانیوم با چگالی بسیار بالا دمای اتاق و فشار اولیه گاز هیدروژن نیز ۱۵۰ کیلو پاسکال بود. فرآیند دفع در دمای حرارت ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد با تخلیه پمپ خلاء (پمپ اسکرو نورمتکس+پمپ‌های دم فلزی) انجام

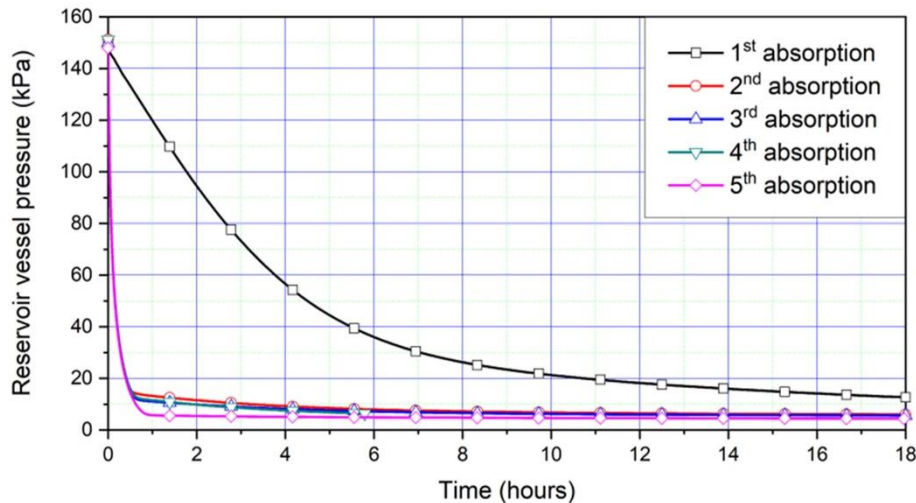


# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



شد. شکل ۳ و جدول ۱ نشان می دهد که اورانیوم با چگالی بسیار بالا به راحتی توسط چند چرخه جذب/دفع فعال می شود. اورانیوم ضعیف شده در اولین جذب بیش از ۸ ساعت طول کشید تا اشباع شود. با این حال، از جذب دوم، کمتر از ۱ ساعت طول کشید. منحنی جذب هیدروژن نشان می دهد که بیشتر اورانیوم با چگالی بسیار بالا پس از چرخه سوم پودر شده است. این نتایج به خوبی با مطالعه قبلی نویسندگان مطابقت دارد [۶]. هنگامی که جذب هیدروژن شروع شد، دمای اورانیوم ضعیف شده به سرعت افزایش یافت. حداکثر دما بین ۲۳۰ و ۲۶۰ درجه سانتی گراد در کمتر از ۵ دقیقه برای دومین تا پنجمین جذب با بستر فعلی بدست آمد (شکل ۴ را ببینید). با این حال، شیب کاهش دما به شدت با تعداد چرخه های جذب افزایش نمی یابد. تغییر در اندازه و توزیع پودر اورانیوم با چگالی بسیار بالا در نزدیکی ترموکوپل در طول چرخه های جذب به عنوان علت در نظر گرفته شد. میانگین نرخ جذب برای رسیدن به (اورانیوم هیدرید) ۲.۰، (اورانیوم هیدرید) ۲.۷ و (اورانیوم هیدرید) ۲.۸ در شکل ۶ مقایسه شده است. این میزان پس از سومین جذب تقریباً یکسان است. نتایج فعلی نشان می دهد که جذب دوم سریع ترین سرعت جذب را دارد. یکی از دلایل احتمالی این است که مهاجرت عمده اورانیوم با چگالی بسیار بالا پودر شده به داخل ظرف اولیه در طول جذب دوم رخ داده است.

Absorption for U bed activation



شکل ۳. جذب هیدروژن در طول فعال سازی بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا تغییر فشار ظرف اندازه گیری.

جدول ۱. نتیجه جذب فعال سازی.

سیکل	مقدار جذب شده		زمان جذب (دقیقه)		
	مول	اورانیوم هیدرید	(اورانیوم هیدرید) ۲.۰	(اورانیوم هیدرید) ۲.۷	(اورانیوم هیدرید) ۲.۸
۱	۱۱,۴۹	۲,۹۵	۱۱۱	۲۵۹	۳۴۳
۲	۱۱,۴۲	۲,۹۲	۷	۲۲	۲۸
۳	۱۱,۵۶	۲,۹۷	۹	۲۶	۳۴
۴	۱۱,۶۶	۲,۹۹	۸	۲۳	۳۴
۵	۱۱,۵۵	۲,۹۶	۸	۲۳	۳۱

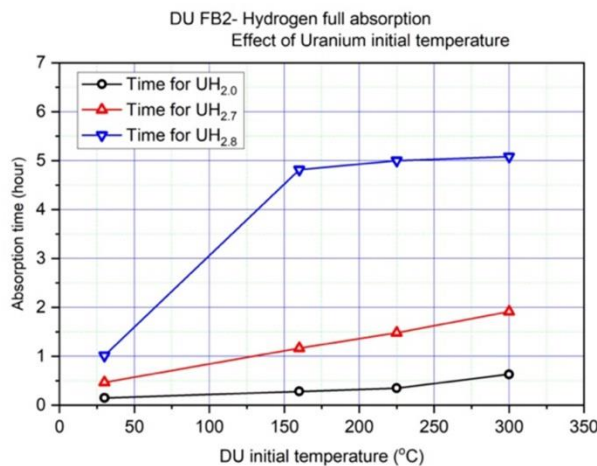


# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



## ۴-۲- امکان تحویل بدون پمپ از بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا

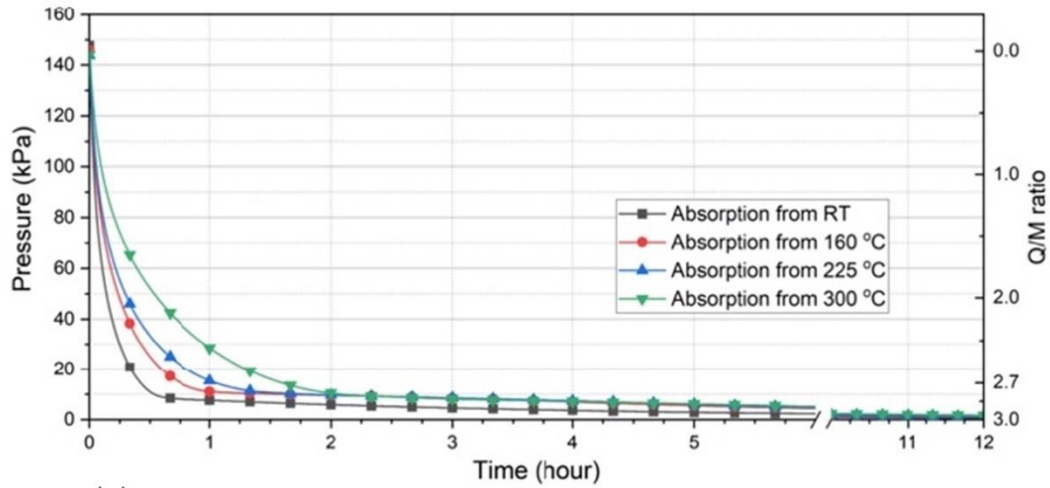
برای مشاهده امکان تحویل غیر پمپ از بستر هیدرید اورانیوم با چگالی بسیار بالا، یک آزمایش دفع انجام شد. دفع بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا از دمای اولیه اورانیوم با چگالی بسیار بالا در حدود ۲۵ درجه سانتی گراد شروع شد و مقدار ذخیره هیدروژن بیش از (اورانیوم هیدرید) ۲.۸ برآورد شد. شکل ۴ تغییرات فشار و دما را در طول آزمایش دفع فعلی نشان می دهد. دمای گرمایش روی ۳۵۰ درجه سانتی گراد تنظیم شد و به تدریج تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد افزایش یافت. پس از شروع گرمایش، گاز هیدروژن دفع شده حجم انبساط داخلی ظرف اولیه را پر کرد. پس از رسیدن دمای اورانیوم با چگالی بسیار بالا به حدود ۵۰ درجه سانتی گراد، فشار داخل ظرف اولیه تقریباً به صورت خطی افزایش یافت (خطوط یکپارچه در شکل ۴). برای بررسی روند هموار دفع، نویسندگان صبر کردند تا فشار داخل ظرف اولیه بستر به ۱ اتمسفر برسد. سپس دریچه خروجی هیدروژن بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا به مخازن اندازه گیری باز شد. در این کمپین آزمایشی از ۳ ظرف اندازه گیری که در مجموع ۴۸۰ لیتر بود استفاده شد. در طول تحویل بدون عملکرد پمپ، فشار مخزن به جای خطی به صورت لگاریتمی افزایش یافت. شیب متوسط آن نیز با افزایش دما تندتر شد، که به معنای افزایش نرخ تحویل با افزایش دما بود. هنگامی که دمای اورانیوم با چگالی بسیار بالا به دمای هدف گرمایش مانند ۴۰۰ یا ۴۵۰ درجه سانتی گراد نزدیکتر شد، شیب کمی کاهش یافت. بیش از ۹۵ درصد هیدروژن از (اورانیوم هیدرید) ۲.۹ بدون عملکرد پمپ دفع شد. بقیه هیدروژن تحت عملیات پمپ اسکرول Normetex با ۴ واحد پستی پمپ فلزی دمیده و جذب شد. دمای اورانیوم با چگالی بسیار بالا بلافاصله پس از شروع عملیات پمپ چند درجه بر حسب سانتیگراد کاهش یافت که نشان دهنده یک واکنش گرماگیر دفع بود. دمای اورانیوم با چگالی بسیار بالا در کمتر از ۵ دقیقه بازیابی شد که نشان می دهد بازده حرارتی بستر فعلی خوب است.



شکل ۴. میانگین نرخ های جذب (پاسکال در متر مکعب بر ثانیه) تا (اورانیوم هیدرید) ۲.۰، (اورانیوم هیدرید) ۲.۷ و (اورانیوم هیدرید) ۲.۸ بر اساس چرخه جذب.

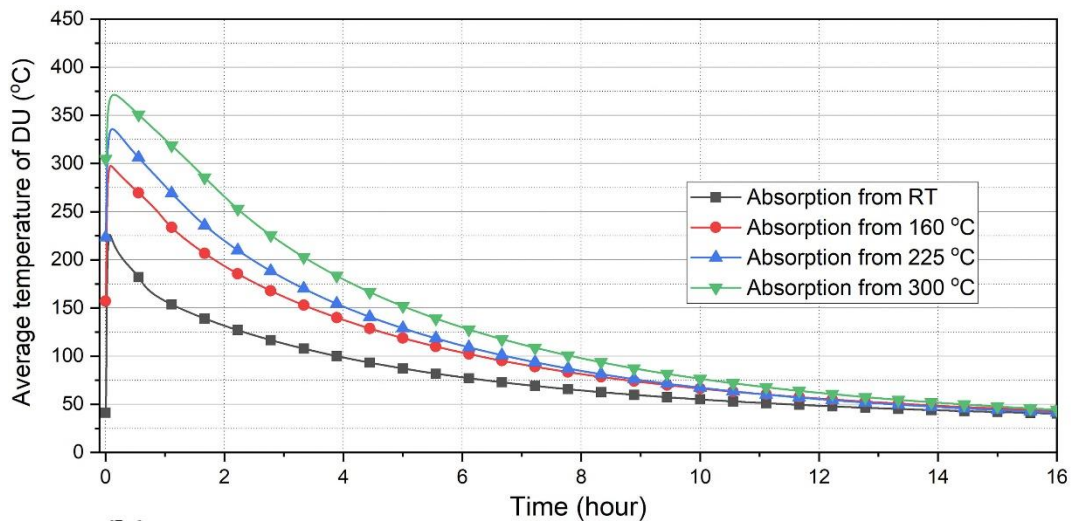


DU FB2- Hydrogen full Absorption  
Effect of Uranium initial temperature



(a)

DU FB2- Hydrogen full Absorption  
Effect of Uranium initial temperature



(b)

شکل ۵. تغییر فشار و دما در طول جذب هیدروژن بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا از دماهای اولیه مختلف اورانیوم. (الف) فشار ظرف اندازه گیری. (ب) دمای متوسط اورانیوم هیدرید.

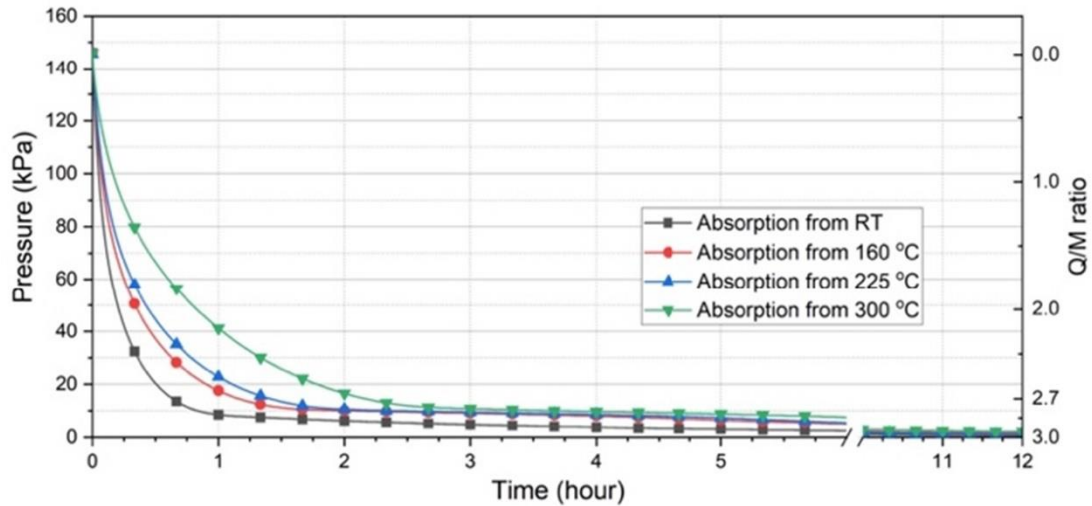




# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

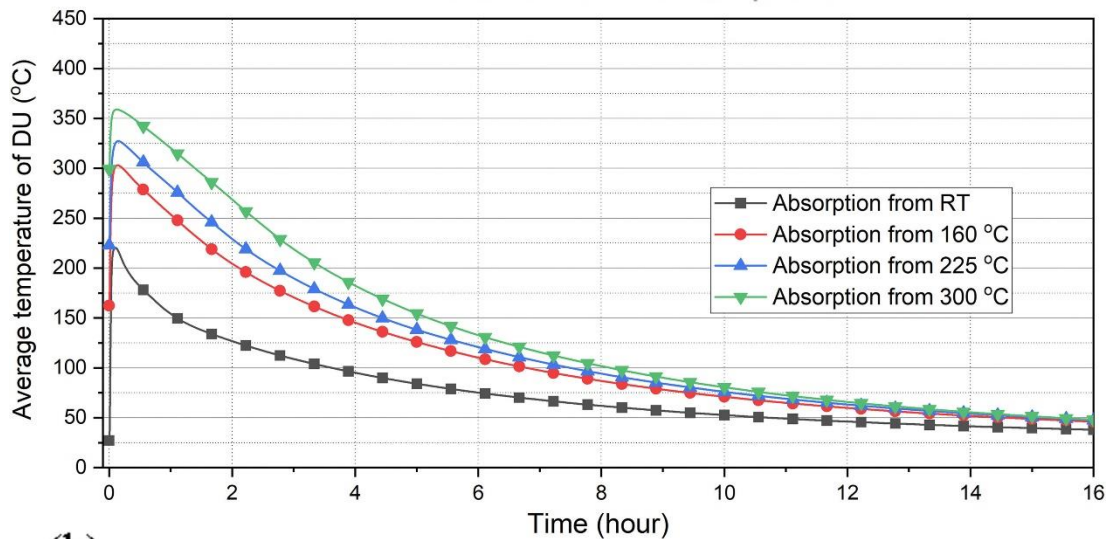


DU FB2- Deuterium full Absorption  
Effect of Uranium initial temperature



(a)

DU FB2- Deuterium full Absorption  
Effect of Uranium initial temperature



(b)

شکل ۶. تغییر فشار و دما در طول جذب دوتریوم در بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا از دماهای اولیه مختلف اورانیوم. (الف) فشار ظرف اندازه گیری. (ب) دمای متوسط اورانیوم دوترید.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



## ۵- نتیجه گیری

برای توسعه یک سیستم ذخیره و تحویل برای چرخه سوخت همجوشی و اعتبار سنجی فرآیند آن، یک بستر هیدرید اورانیوم ضعیف شده (اورانیوم با چگالی بسیار بالا) با ظرفیت ۷۰ گرم تریتیوم ساخته شد و برای آزمایش‌ها استفاده شد. در نتیجه، یک روش طراحی و ساخت که حمل و نقل ایمن اورانیوم با چگالی بسیار بالا را در نظر می‌گیرد توسعه یافت. یک اورانیوم با چگالی بسیار بالا به شکل میله ای که در فوم فلزی مس بارگذاری شده بود ارائه شد. با این ویژگی طراحی جدید، ساخت و جابجایی اورانیوم با چگالی بسیار بالا در شرایط جوی به دست آمد و توزیع یکنواخت پودر ریز اورانیوم با چگالی بسیار بالا در داخل ظرف اولیه انتظار می‌رفت. روش فعال سازی برای پودر کردن اورانیوم با چگالی بسیار بالا تکمیل شد. نتایج این تحقیق و مقاله نشان می‌دهد که پس از سه سیکل جذب و دفع، ظرفیت ذخیره سازی هیدروژن و سرعت جذب تقریباً اشباع شده است. آزمایشات دفع با گرمایش ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد اورانیوم با چگالی بسیار بالا بررسی و تحلیل شد. با دفع بدون پمپاژ، حدود ۹۷ درصد از هیدروژن از (اورانیوم هیدرید) ۲٫۹ مورد بررسی قرار داده شد. آزمایش‌های پایه فعلی نشان داد که تحویل گاز ایزوتوپ هیدروژن از بستر اورانیوم با چگالی بسیار بالا به یک مخزن بدون عملیات پمپ امکان‌پذیر است.

## منابع و مراجع

۱. R. Lässer, et al., Prototype testing of uranium beds for the JET active gas handling system, JET-IR ۸۸ (۹) (۱۹۸۸).
۲. W.T. Shmayda, P. Mayer, Uranium beds for temporary tritium storage, J. Less Common Met. ۱۰۴ (۱۹۸۴) ۲۳۹-۲۵۰.
۳. M. Salloum, et al., Empirical and Physics Based Mathematical Models of Uranium Hydride Decomposition Kinetics with Quantified Uncertainties, SAND۲۰۱۳-۸۵۴۰, Sandia National Laboratories, ۲۰۱۳, pp. ۲۱-۳۱.
۴. L.K. Heung, Design of metal hydride vessels for processing tritium, Fusion Sci. Technol. ۴۱ (۲۰۰۱) ۷۵۳-۷۵۷.
۵. H. Kang, et al., Experimental comparison on heat transfer-enhancing component of metal hydride bed, Fusion Eng. Des. ۱۰۹-۱۱۱ (۲۰۱۶) ۹۶۵-۹۶۹.
۶. D. Chung, et al., Morphology study on the depleted uranium as hydriding/dehydriding cycles, Fusion Eng. Des. ۱۰۹-۱۱۱ (۲۰۱۶)