J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 55, pp. 1-7, 2011

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۵۵، صفحات ۷-۱، ۱۳۹۰

تأثیر باربرودتی سیستم خنک‌کننده بر روی عملکرد ماشین سانتریفوژ

مجید آقایی*[۱و۲]، سیدجابر صفدری[۱]، محمدحسن ملاح[۱]، جواد کریمی‌ثابت[۱]، محمد اتوکش[۲]
۱- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران ـ ایران
۲- دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۱۱۵۵-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده: در این مقاله اثر بار برودتی یک سیستم خنک‌کننده بر روی عملکرد ماشین سانتریفوژ مورد مطالعه قرار گرفته است. افزایش بار برودتی سیستم، از طریق تغییر دما و دبی حجمی آب ورودی انجام پذیرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تأثیر افزایش بار برودتی از طریق کاهش دما یا افزایش دبی آب ورودی، بر روی واحد کار جداکنندگی (SWU)، ضرایب غنی‌سازی (α) و تهی‌سازی (β) جزیی است. در ضمن بار برودتی سیستم خنک‌کننده نباید از یک مقدار کمینه کم‌تر باشد چرا که عدم دفع گرمای تولیدی توسط مجموعه‌ی محرک ماشین سبب افزایش دمای قطعات مکانیکی و نهایتاً تخریب آن‌ها می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: *ماشین سانتریفوژ، شیب دما، بار برودتی سیستم خنک‌کننده، غنی‌سازی اورانیم*

The Effect of Cooling Rate of Cooling System on Centrifuge Machine Performance

M. Aghaei*[1,2], S.J. Safdari[1], M.H. Mallah[1], J. Karimi Sabet[1], M. Otoukesh[2]
1- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
2- Faculty of Energy, Sharif University of Technology, P.O.Box: 11155-11365, Tehran – Iran

Abstract: In this paper, the effect of cooling rate of a cooling system on performance of a centrifuge machine has been studied experimentally. The cooling rate is increased by temperature variation and volumetric flow rate of the inlet water to the cooling system. The results showed that the effect of cooling rate on separative work unit (SWU), heads and tails separation factors i.e. α and β are negligible. Also, if the cooling rate is less than a minimum value, the heat produced by moving machine elements cannot be dissipated and some elements of machine may be destroyed.

Keywords: *Centrifuge Machine, Temperature Gradient, Cooling Rate, Uranium Enrichment*

*email: Majid.sut@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۴/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۱۰/۲۹

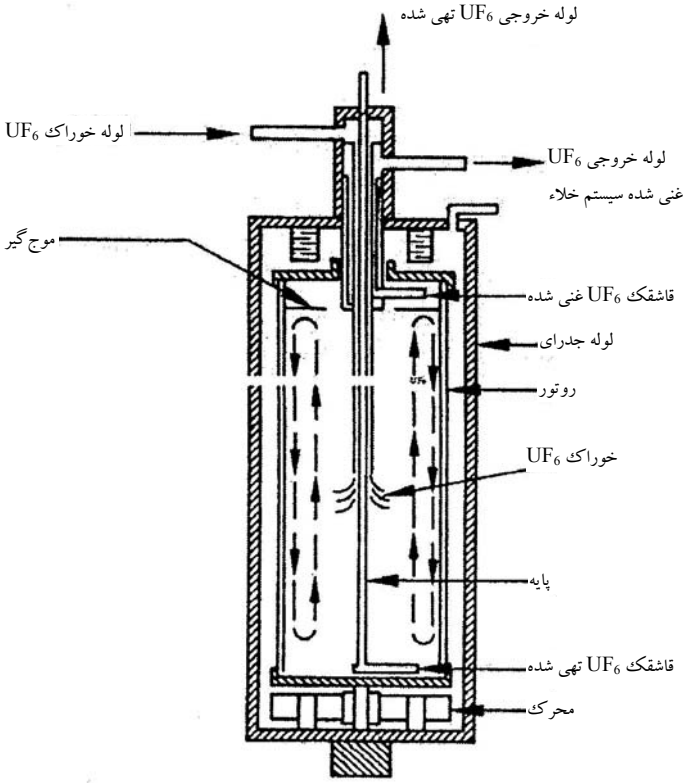
۱- مقدمه

استفاده از نیروی گرانشی یا نیروی مرکز گریز برای جداسازی مخلوط گازهای با جرم مولکولی متفاوت، شیوه‌ای بسیار قدیمی است. اولین آزمایش در این زمینه در سال ۱۸۹۵، توسط بردیک[۱] انجام شد. اولین روشی که برای غنی‌سازی ایزوتوپ‌ها پیشنهاد شد، در سال ۱۹۱۹ توسط استون و لیندمان[۲] ارایه گردید. اقدامات صورت گرفته برای دست‌یابی به این جداسازی تا سال ۱۹۳۴ که بیمز[۳] و همکارانش دستگاه سانتریفوژ خلاء را توسعه دادند، بی‌نتیجه ماند [۱].

ساده‌ترین سیستم، روش جریان هم‌سو می‌باشد که در آن جریان گاز از یک طرف روتور وارد و از طرف دیگر آن دو جریان در دو شعاع مختلف خارج می‌گردند. در این روش میزان غنی‌سازی محدود به مقداری است که در یک مرحله به دست می‌آید. مؤثرترین روش برای افزایش میزان غنی‌سازی، ایجاد یک جریان متقابل در درون دستگاه سانتریفوژ خواهد بود. در این روش، در سانتریفوژ جریان متقابل گاز از محلی بر روی محور روتور وارد سیلندر می‌شود. گردش گاز در درون روتور یا با ایجاد اختلاف دما در دو سر روتور و یا از طریق یک سازوکار مکانیکی صورت می‌گیرد. سپس گاز در طول محیط روتور در یک جهت به موازات محور و در جهت مخالف، با شعاع کوچک‌تر حرکت می‌نماید. در این دستگاه، انتقال ایزوتوپ‌ها بین جریان‌ها همانند دستگاه جریان همسو، صورت می‌گیرد اما به دلیل جریان گردشی گاز، میزان جداسازی بیش از آن چیزی است که در یک مرحله‌ی موازی به دست می‌آید. بیش‌ترین اختلاف میزان جداسازی بین دو سر ماشین سانتریفوژ حاصل می‌شود و از این دو نقطه است که بخش‌های غنی‌شده و تهی‌شده، به ترتیبی که در شکل ۱ نشان داده شده است، به وسیله‌ی قاشقک خارج می‌گردند [۲ و ۳]. عملکرد یک سانتریفوژ با دو گروه از پارامترها به شرح زیر توصیف می‌شود: پارامترهای جداسازی که خود شامل ضریب غنی‌سازی (α) و ضریب تهی‌سازی (β) می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$a = \frac{R_P}{R_F} \qquad (۱)$$

$$\beta = \frac{R_F}{R_W} \qquad (۲)$$



شکل ۱- طرح‌واره‌ی سانتریفوژ جریان مخالف.

در این روابط، R نسبت فراوانی ایزوتوپی است که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$R = \frac{N}{1-N} \qquad (۳)$$

در روابط ۱ تا ۳، شاخص‌های F، P، W و N به ترتیب، نشان‌دهنده‌ی جریان‌های خوراک ورودی، محصول و پس‌ماند خروجی از ماشین سانتریفوژ و کسر اتمی جزء مطلوب ($^{235}UF_6$) می‌باشند. هیچ کدام از پارامترهای بالا به تنهایی بیان‌گر عملکرد جداسازی یک سانتریفوژ نیست. سانتریفوژ علاوه بر داشتن ضرایب جداسازی و تهی‌سازی بالا، باید دارای جریان خوراک بالایی نیز باشد. پارامتری که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت جداکنندگی سانتریفوژ می‌باشد را توان جداکنندگی می‌نامند که از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\delta U = P.V(N_P) + W.V(N_W) - F.V(N_F) \qquad (۴)$$

که در آن V(N) به صورت زیر تعریف می‌شود

$$V(N) = (2N-1)Ln\frac{N}{1-N} \qquad (۵)$$

بر طبق نظر کهن[۴] که وی اثبات آن را به دیراک[۵] منسوب نموده است بیشینه توان جداکنندگی یک سانتریفوژ، برحسب گرم بر ثانیه چنین به دست می‌آید

$$\delta U_{max} = \rho D[(M_2 - M_1)(\omega r)^2 / 2RT]^2 \frac{Z\pi}{2} \qquad (۶)$$

برش (θ) ماشین پارامتر دیگری است که در راندمان زنجیره بسیار مهم بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\theta = \frac{P}{F} \qquad (۷)$$

طرح‌واره‌ی ماشین سانتریفوژ مورد استفاده برای انجام آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در این ماشین گاز UF_6 از وسط روتوری که از کامپوزیت ساخته شده است وارد می‌شود و به وسیله‌ی قاشقک محصول (پایین روتور) و قاشقک پس‌ماند (بالای روتور) خارج می‌گردد. قاشقک پس‌ماند در جریان مستقیم گاز قرار دارد و علاوه بر خارج کردن جریان پس‌ماند، در ایجاد جریان گردشی درون سانتریفوژ نقش مهمی (اثر مکانیکی) را ایفاء می‌نماید، به همین علت شکل و محل قرارگیری آن در ایجاد جریان گردشی و به طبع آن در افزایش راندمان سانتریفوژ بسیار مهم است، و در مقابل قاشقک محصول به منظور جلوگیری از ایجاد اغتشاش در جریان چرخشی از یک موج‌گیرصفحه‌ای[۶] استفاده می‌شود. تعادل روتور به وسیله‌ی دو یاتاقان مغناطیسی در بالا و پایین ماشین ایجاد می‌شود. روتور به وسیله‌ی یک موتور الکتریکی به حرکت درمی‌آید. و با استفاده از یک پمپ مولکولی حلزونی، که در دیواره‌ی محفظه‌ی خلاء قرار دارد، مقادیر کم گاز که از روتور نشت می‌نماید، به ناحیه‌ی بالای روتور رانده می‌شود [۳ و ٤].

جداسازی ایزوتوپ سبک از ایزوتوپ سنگین، به وسیله‌ی یک میدان مرکز گریز صورت می‌گیرد، این میدان شیب فشاری را برای مخلوط گازی ایجاد می‌کند. از آن جایی که اثر نیروی مرکز گریز به جرم ماده بستگی دارد، بنابراین شیب فشار برای دو ایزوتوپ متفاوت است. اما جدایشی که به این صورت انجام می‌شود بسیار محدود است. با ایجاد یک جریان اضافی در درون روتور در راستای محور آن، ظرفیت جداکنندگی را می‌توان بالاتر برد. این جریان چرخشی می‌تواند با محرک داخلی یا بیرونی ایجاد شود. جریان چرخشی با محرک درونی را می‌توان با دو اثر حرارتی و مکانیکی ایجاد نمود. اثر حرارتی می‌تواند ناشی از شیب دما بر روی دیواره‌ی جانبی روتور و یا شیب دما بین درپوش‌های بالا و پایین باشد.

اثر مکانیکی نیز تحت دو سازوکار کندسازی جریان گاز در یکی از دو انتهای روتور و ورود جریان از محل تغذیه به درون روتور و خروج جریان‌های پس‌ماند و محصول (وجود منبع و چاهک) انجام می‌پذیرد.

در صورتی که یک قاشقک ثابت در یکی از دو انتهای روتور قرار داده شود که در برابر جریان، ایجاد مانع می‌کند و در مقابل آن در انتهای دیگر روتور یک صفحه قرار داده شود که به خوبی جریان را به چرخش در می‌آورد، آن‌گاه اثر مکانیکی اول ایجاد می‌شود. در این صورت در انتهایی از روتور که جریان کند شده است، یعنی آن جایی که قاشقک در مقابل جریان قرار دارد، ایزوتوپ سنگین جمع می‌شود [۵ و ۶]. از آن جایی که در ماشین استفاده شده، درپوش پایین سردتر از درپوش بالایی است، بنابراین طبق اثر حرارتی، ایزوتوپ سنگین در بالای روتور جمع می‌شود. در قسمت بالایی روتور یک قاشقک ثابت و بدون صفحه قرار گرفته است، در مقابل، در قسمت پایین روتور یک صفحه در مقابل قاشقک محصول قرار داده شده است. از عوامل حرارتی که درپوش بالای روتور را گرم می‌کنند می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۷ و ۸]:

- برخورد مولکول‌ها با پمپ توربومولکولی،
- جریان گردابی ناشی از یاتاقان مغناطیسی و آهن‌ربای درپوش بالای روتور،
- برخورد گاز به قاشقک پس‌ماند،

از عوامل حرارتی که درپوش پایین روتور را گرم می‌کند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تلفات هیسترزیس،
- برخورد گاز با قاشقک محصول،
- گرمای استاتور ناشی از مقاومت سیم‌پیچ در برابر جریان.

۲- روش کار

در شکل ۲ نمای کلی ماشینی که در آن آزمایش‌ها انجام شده‌اند نشان داده شده است.

به منظور تغییر دما در طول روتور و پوسته و هم‌چنین اندازه‌گیری پارامترهایی از قبیل دما لازم است تجهیزات جانبی ذیل روی ماشین سانتریفوژ نصب گردد.

شکل ۲- نمایی از سانتریفوژ استفاده شده.

۲-۱ سیستم اندازه‌گیری دمای روتور

برای اندازه‌گیری دمای روتور در هنگام چرخش لازم است از دماسنجی استفاده گردد که مانع شکست خلاء شده و برای چرخش روتور مزاحمتی ایجاد ننموده و از دقت لازم برخوردار باشد. برای این منظور، دماسنج زیرقرمز انتخاب و از چهار دماسنج برای اندازه‌گیری دما در طول روتور استفاده شد (دمای درپوش پایین، دمای بالای روتور، دمای پایین روتور و دمای میانی روتور).

۲-۲ سیستم خنک‌کننده‌ی پوسته

بر روی قسمت پایینی پوسته‌ی ماشین مطابق شکل ۲ یک کویل خنک‌کننده‌ی مستقل مجهز به فلومتر قرار داده شد. بدین ترتیب، بسته به نوع آزمایش، دبی آب خنک ورودی قابل تنظیم می‌باشد.

با استفاده از گاز UF_6 و دستگاه سانتریفوژ چندین آزمایش تحت شرایط عملیاتی مختلف انجام شد. در هر کدام از آزمایش‌ها دبی گاز UF_6، ظرفیت جداسازی، ضرایب غنی‌سازی و تهی‌سازی، دمای روتور و پوسته‌ی ماشین در پنج نقطه در جهت محور چرخش روتور، هم‌چنین دبی و دمای آب خنک‌کننده و غیره اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری دبی گاز UF_6، غنای محصول و پس‌ماند در هر آزمایش به ترتیب، از دبی‌سنج جرمی و دستگاه طیف‌سنج جرمی استفاده شده است. هم‌چنین برای تأمین خلاء از سیستم مرکزی خلاء پایلوت (مجموعه‌ای از پمپ‌های خلاء) و برای جمع‌آوری محصول غنی‌شده و پس‌ماند تهی شده، از سیستم مرکزی جمع‌آوری (مجموعه تله‌های سرد) پایلوت استفاده گردید.

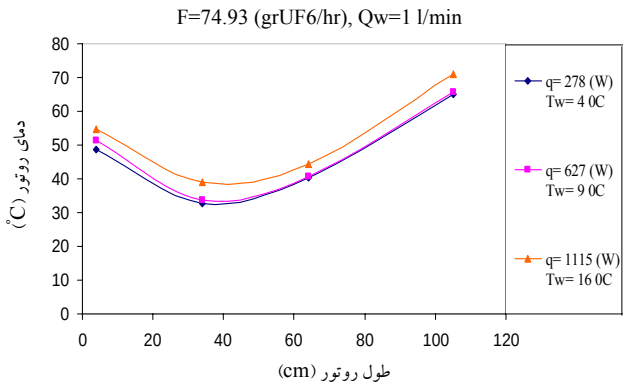
۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱ تأثیر افزایش بار برودتی سیستم خنک‌کننده بر عملکرد جداکنندگی

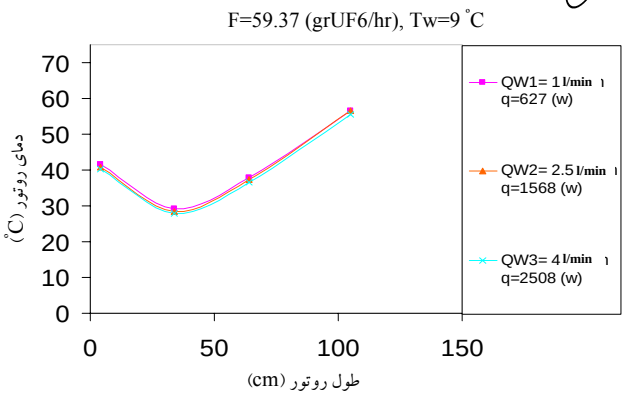
برای بررسی تأثیر بار برودتی سیستم خنک‌کننده بر عملکرد جداکنندگی ماشین با تغییر دبی و دمای آب ورودی، آزمایش‌های مختلفی انجام شد. منحنی تغییرات دما در طول روتور و پوسته ناشی از بار برودتی سیستم خنک‌کننده در شکل ۳ نشان داده شده است. هم‌چنین منحنی تغییرات ضرایب غنی‌سازی و تهی‌سازی، اختلاف دما در بالا و پایین روتور و واحد کار جداکنندگی برحسب باربرودتی سیستم خنک‌کننده در شکل ۴ نشان داده شده است. از منحنی‌های نشان داده شده در شکل‌های ۳ و ۴ نکات زیر استنباط می‌شود

- تغییرات دما در طول روتور، در بار برودتی ثابت، در نواحی پایین روتور نزولی است که بعد از عبور از نقطه‌ی کمینه به صورت صعودی درمی‌آید. و افزایش بار برودتی سبب جابه‌جایی منحنی به سمت بالا می‌شود (منحنی‌های a-۱ تا a-۴ شکل ۳).
- تغییرات دما در طول پوسته با بار برودتی، خطی و صعودی است (منحنی‌های b-۱ تا b-۴ شکل ۳).
- تغییرات ضرایب غنی‌سازی و تهی‌سازی برحسب بار برودتی خطی و مقدار آن بسیار جزیی است (منحنی‌های a-۱ و a-۲، b-۱ و b-۲ شکل ۴).
- تغییرات واحد کار جداکنندگی برحسب بار برودتی سیستم خنک‌کننده، جزیی و تقریباً ناچیز می‌باشد (منحنی‌های c-۱ و c-۲ شکل ۴).
- تغییرات شیب دما در بالا و پایین روتور برحسب بار برودتی سیستم خنک‌کننده خیلی کوچک و قابل اغماض است (منحنی‌های d-۱ و d-۲ شکل ۴).

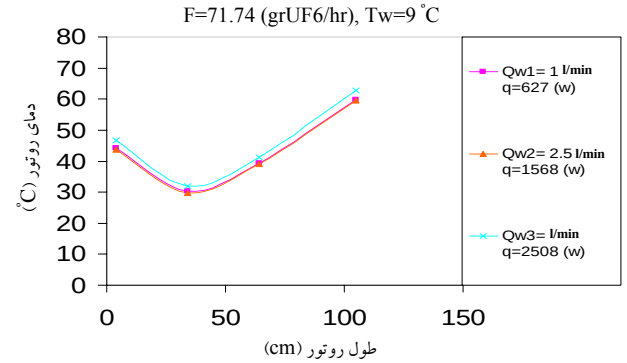
با توجه به تغییرات بسیار جزیی ظرفیت جداسازی، افزایش بار برودتی سیستم خنک‌کننده نه تنها از نظر کارآیی مزیتی نداشته بلکه سبب افزایش هزینه‌های بهره‌برداری خواهد شد. از آن جایی که واحد کار جداکنندگی به پارامترهایی از قبیل ضرایب غنی‌سازی و تهی‌سازی بستگی دارد و از طرفی شیب دما برای حالت‌های مختلف به عنوان یک عامل اثرگذار در بهبود جریان گردشی در راستای محور ماشین و نهایتاً ضریب غنی‌سازی و تهی‌سازی می‌باشد، عوامل مذکور می‌توانند از دلایل مهم تغییرات اندک واحد کار جداکنندگی محسوب شوند.



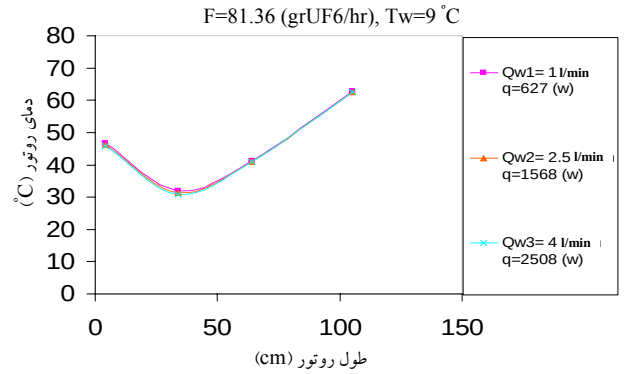
(a–1)



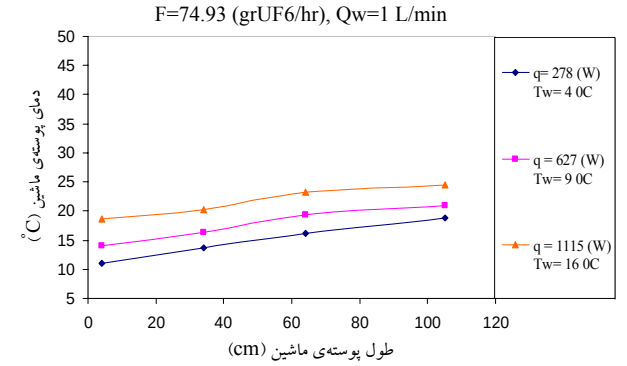
(a–2)



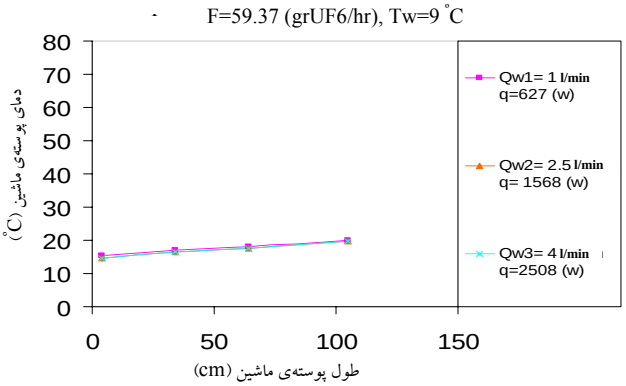
(a–3)



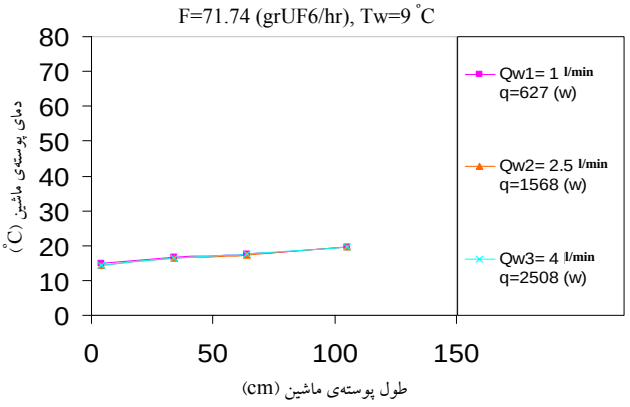
(a–4)



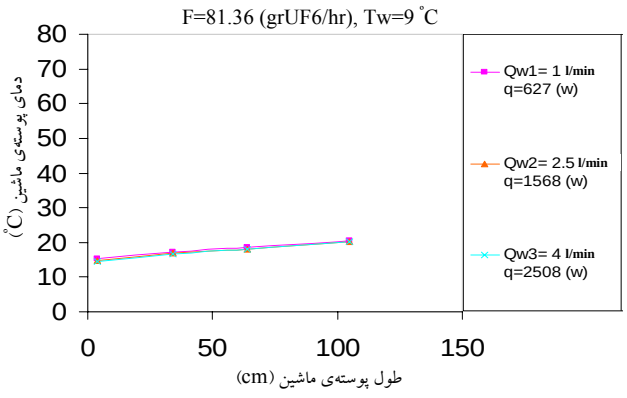
(b–1)



(b–2)

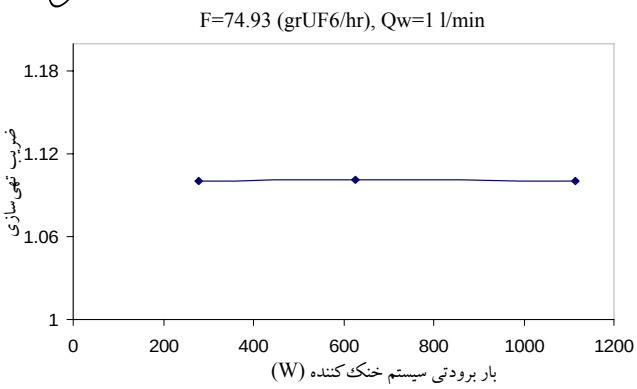


(b–3)

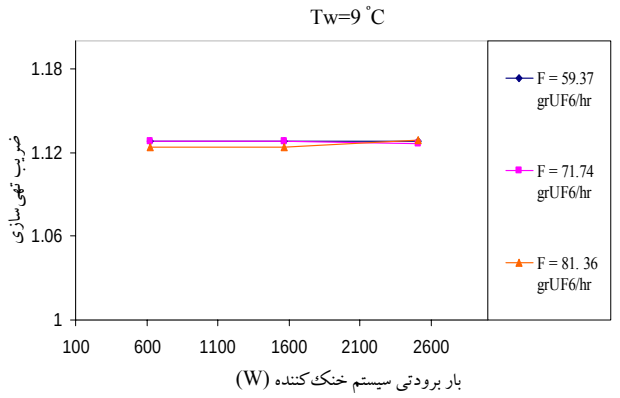


(b–4)

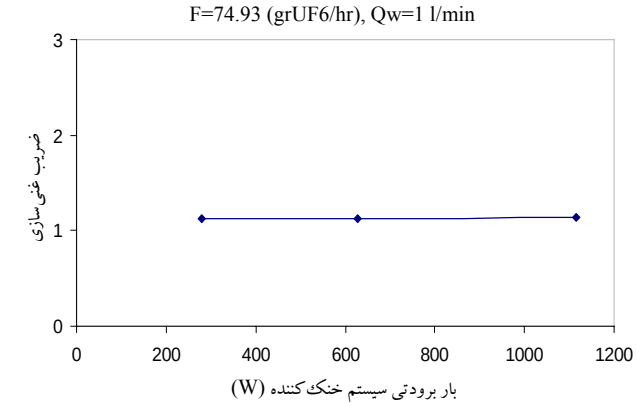
شکل ۳– تغییرات دما در طول روتور و پوسته‌ی ماشین.



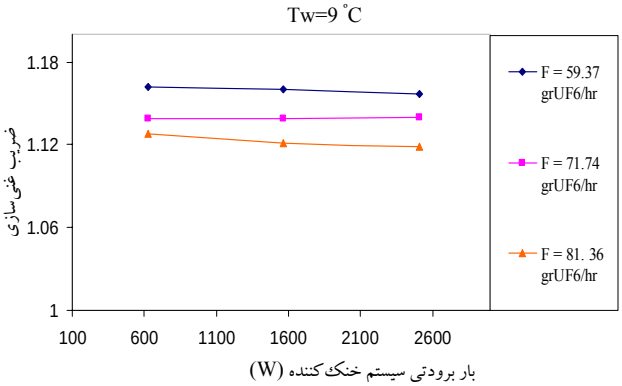
(a–1)



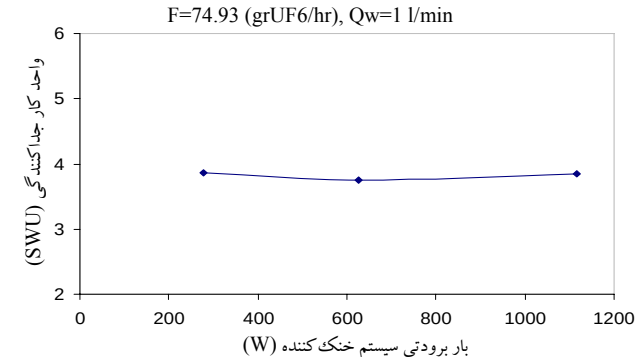
(a–2)



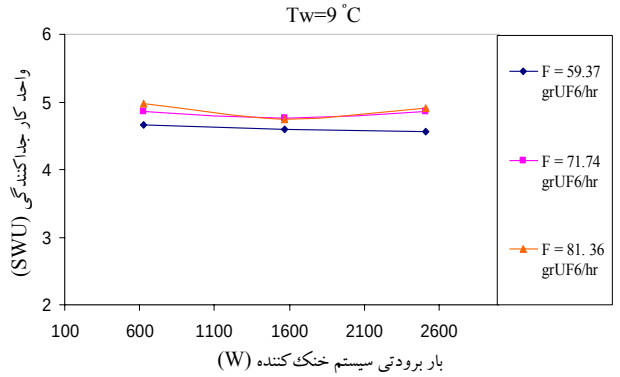
(b–1)



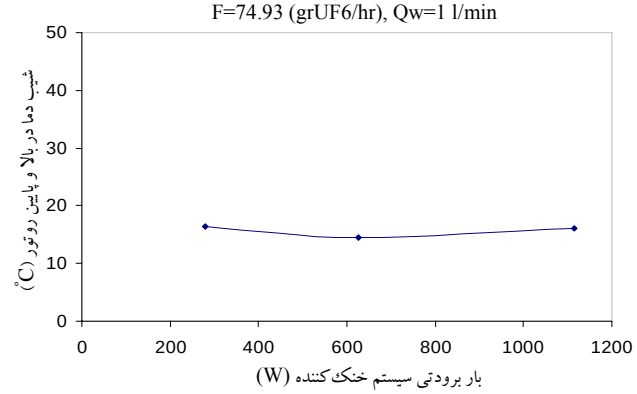
(b–2)



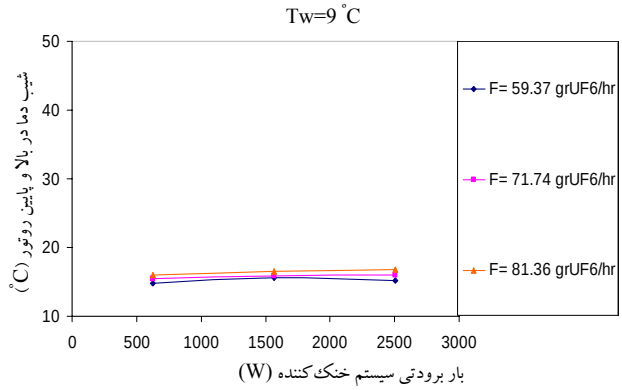
(c–1)



(c–2)



(d–1)



(d–2)

شکل ۴– تغییرات پارامترهای مؤثر بر راندمان جداسازی برحسب بار برودتی سیستم خنک‌کننده.

۴- نتیجه‌گیری

با تغییر دبی آب خنک‌کننده‌ی پایین پوسته، دمای پوسته تغییر چندانی نکرده و به طبع آن دمای روتور و پارامترهای فرایندی نیز تغییر قابل توجهی نمی‌کنند. هم‌چنین با کاهش دمای آب خنک‌کننده‌ی پایین پوسته، دمای پایین و بالای پوسته هر دو به یک نسبت کاهش پیدا کرده و نهایتاً اختلاف دمای بالا و پایین روتور تغییر چندانی نمی‌کنند. لذا کاهش دمای آب خنک‌کننده سبب کاهش میانگین دمای گاز می‌شود و با توجه به فرمول دیراک انتظار می‌رود که کار جداکنندگی افزایش یابد. ولی در عمل براساس نتایج حاصله در شکل‌های ۴ نشان داده شده است که کار جداکنندگی تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین می‌توان گفت که تغییر دمای گاز تأثیر چندانی بر روی کار جداکنندگی ندارد و معادله‌ی پیشنهادی دیراک باید اصلاح گردد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از تلاش و زحمات پرسنل محترم واحد پایلوت تحقیق و توسعه شرکت کالا الکتریک سپاسگزاری می‌نمایند.

نمادهای لاتین

T_w	دمای آب خنک ورودی (^oC)
q	بار برودتی (W)
Q_w	دبی آب خنک ورودی (l/min)
F	دبی جرمی UF_6 ورودی به ماشین (gr/hr)
W	وات (واحد بار برودتی)
δU	ظرفیت جداکنندگی ماشین (SWU $KgUF_6$/year)
ω	سرعت دورانی ماشین (rad/sec)
Z	طول روتور (m)
ρ	چگالی گاز (kg/m^3)
r	شعاع روتور (m)
D	ضریب نفوذ گاز (m/sec^2)
M_1	جرم مولکولی $^{235}UF_6$
M_2	جرم مولکولی $^{238}UF_6$
R	ثابت گازهای ایده‌آل (J/mol K)
T	دمای مطلق برحسب کلوین

پی‌نوشت‌ها:

۱- Bredig

۲- Stone and Lindman

۳- Beams

۴- Cohen

۵- Dirac

۶- Baffle

References:

1. K. Cohen, "The theory of isotope separation as applied to the large scale production of ^{235}U," McGraw-Hill Book Company, Inc (1965).
2. D.G. Avery and E. Davies, "Uranium enrichment by gas centrifuge," London, Mills and Boon (1973).
3. S. Villani, et al, "Uranium enrichment topics in Applied Physics," Vol. 35, Springer-Verlag (1979).
4. Stanley Whitley, "Review of the gas centrifuge until 1962. Part I: Principles of separation physics," British Nuclear Fuels Limited, England.
5. D.R. Olander, "Technical basis of the gas centrifuge," Adv. Nucl. Sci. Tech. Vol. 6, 105-174 (1972).
6. Cohen, Kerl, "The Theory of Isotope Separation," McGraw Hill Co, Inc, New York (1951).
7. H.P. Greenspan, "Theory of rotating fluids," (Cambridge university press, London 1969).
8. G.M. Homsy, J.L. Hundson, J. Fluid Mech. 35, 33- 52 (1969).