دوره سوخت راکتورهای هسته‌ای

نوشته :

دکتر اردشیرگویری استادیار مؤسسه علوم وفنون هسته‌ای دانشگاه تهران

و حیدر علی فروزانفر مهندس هسته‌ای

چکیده :

یکی‌از راههای مناسب‌برای‌تأمین‌انرژی مورد نیازکه امروزه مورد توجه‌اکثرکشورهاقرارگرفته‌است استفاده از انرژی هسته‌ای می‌باشد. درحال‌حاضر مشکل‌ترین مانع برسرراه تولید این نوع انرژی، تأمین سوخت آن‌است که‌هم از نظر محدود بودن میزان ذخائر اورانیم وهم از لحاظ‌امکانات تکنولوژی، استفاده از راکتورهای قدرت هسته‌ای را پیچیده ساخته است. باید اضافه نمودکه دراغلب موارد قیدوبندهای سیاسی نیز مساله تأمین سوخت مورد نیاز نیروگاههای هسته‌ای را مشکل‌تر نموده‌است.

نظر به‌اهمیت تأمین سوخت نیروگاههای هسته‌ای، دراین مقاله‌پس‌از توضیح مختصری در باره دوره‌سوخت یک راکتور قدرت از نوع آب سبک، هزینه هریک از مراحل مختلف دوره سوخت وهزینه کل دوره سوخت مربوط به‌راکتورهای ۳۵۰ و ۵۰۰ مگاوات الکتریک‌وهمچنین راکتور ۱۲۰۰ مگاوات الکتریک (همانند نیروگاههای ۱ و۲ ایران) محاسبه‌گردیده است.

دوره سوخت:

دوره سوخت راکتورهای قدرت از نوع‌آب‌سبک راکه در شکل(۱)نشان داده‌شده است میتوان بصورت زیر خلاصه نمود:

۱- تهیه سوخت‌که شامل استخراج سنگ معدن اورانیم، تغلیظ،سرحله جداکردن اورانیوم وتخلیص ،غنی کردن، ساخت میله‌های سوخت وحمل سوخت به‌محل راکتور می‌باشد.

۲- جابجاکردن میله‌های سوخت در راکتور .

۳- جداسازی و بازسازی سوخت‌که شامل سوخت برداری ازهسته‌راکتور، نگهداری عناصر سوخت‌کارکرده، جدا سازی ، بازسازی وسرانجام نگهداری پس مانده‌ای سوخت می‌باشد .

علامت‌های‌های بکار برده شده در محاسبه مراحل مختلف هزینه دوره سوخت وهمچنین مشخصه‌های آنها در جدولهای ۱و۲ داده شده‌اند.

۱- تهیه سوخت :

۱-۱ محاسبه مقدار سوخت مورد نیاز :

برای بدست‌آوردن مقدار سوخت مورد نیاز یک راکتور هسته‌ای با توان الکتریکی P_2 مگاوات توان گرمائی (P_1) حاصل از سوخت را که به‌مشخصه‌های فیزیکی آن بستگی دارد میتوان چنین محاسبه نمود :

$$P_1 = \frac{\sum_f . V_u . \varphi_u}{S} \times 10^{-6} \quad \text{برحسب مگاوات} \qquad (۱)$$

که درآن $\sum_f$ سطح مقطع ماکروسکپی اورانیم برحسب Cm^{-1} ، V_u کل حجم اورانیم برحسب Cm^3 ، φ_u میانگین دانسیته شارنوترون دراین حجم از اورانیم برحسب $Cm^{-2} \cdot Sec^{-1}$ و $S = 3.1 \times 10^{10}$ تعداد واکنش فیسیون مورد نیاز برای تولید یک‌وات (ژول برثانیه) انرژی می‌باشد. چنانچه بهره تبدیل انرژی گرمائی به الکتریکی E_f باشد در اینصورت میتوان نوشت :

$$P_2 = P_1 . E_f \qquad (۲)$$

ومقداراورانیم‌غنی شده‌مورد نیاز برای سوخت‌گذاری اولیه عبارت خواهد بود از:

$$M_{(eu)} = \frac{P_1}{P_s} \quad \text{برحسب تن} \qquad (۳)$$

که‌پس‌از در نظرگرفتن ضریب افت (L_1) در مرحله ساخت میتوان نوشت :

$$M'_{(eu)} - L_1 M'_{(eu)} = M_{(eu)} \qquad (۴)$$

$$M'_{(eu)} = \frac{M_{(eu)}}{1 - L_1}$$

باتوجه به درجه غنی بودن اورانیم طبیعی که برابراست‌با $e_n = 0.711$ درصد اورانیم 235، مقدار اورانیم طبیعی مورد نیاز برای تهیه این مقدار اورانیم غنی شده عبارت خواهد بود از:

$$M_{(nu)} \times e_n = M'_{(eu)} \times e_i + M_t . e_t \qquad (۵)$$

که درآن e_i ، e_t و M_t به‌ترتیب نشانگر درجه غنی بودن سوخت،درجه‌غنی بودن اورانیم‌فقیر شده (۰/۲ درصد) و جرم اورانیم فقیرشده‌می‌باشد.

درنتیجه:

$$M_{(nu)} = K M'_{(eu)} \qquad (۶)$$

که در آن

$$K = \frac{e_i - e_t}{e_n - e_t} \qquad (۷)$$

عبارت است از ضریب تبدیل اورانیم طبیعی به‌غنی‌شده .

سپس باتوجه به‌ضریب افت تبدیل (L_2) رابطه (۶) را باید چنین تصحیح نمود

$$M'_{(nu)} = \frac{M_{(nu)}}{1 - L_2} \qquad (۸)$$

ازسوی دیگر بنابر تعریف واحد جداسازی که عبارت است از مقدار کار انجام شده جهت غنی کردن یک کیلو گرم اورانیم بادرجه غنی معین، میزان کار لازم برای غنی کردن اورانیم مورد نیاز برابراست با:

$$S.W = M'_{(eu)} \cdot V_{(e_i)} + M_t . V_{(e_t)} - M_{(nu)} . V_{(e_n)} \qquad (۹)$$

که درآن $V_{(e)}$ ارزش اورانیم برحسب درجه غنی بودن‌آن می‌باشد :

$$V_{(e)} = (2e-1) log_e \frac{e}{1-e} \qquad (۱۰)$$

باتوجه به‌رابطه تعادل جرم

$$M_t = M'_{(nu)} - M'_{(eu)} \qquad (۱۱)$$

رابطه (۹) را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$S.W = M'_{(eu)}[V_{(e_i)} - V_{(e_t)}] - M'_{(nu)}[V_{(e_n)} - V_{(e_t)}] \qquad (۱۲)$$

درنتیجه واحد جداسازی برابر خواهد بود با

$$S.W.U. = \frac{S.W}{M'_{(eu)}} \qquad (۱۳)$$

بادرنظرگرفتن مطالب بالا مقدار اکسید اورانیم (u_3o_8) مورد نیاز (از درصد اورانیم در اورانیم طبیعی چشم‌پوشی شده است) برابراست با:

$$\frac{M_{(u_3o_8)}}{M'_{(nu)}} = \frac{238\times 3 + 8\times 16}{238\times 3} = 1.179 \qquad (۱۴)$$

$$M_{(u_3o_8)} = M'_{(nu)} \times 1.179 \qquad (۱۵)$$

بنابراین برای تأمین $M_{(eu)}$ تن سوخت بادرجه غنی e_i (درصد اورانیم 235) جهت سوخت گذاری اولیه در راکتور ـ بترتیب $M_{(u_3o_8)}$ تن اکسید اورانیم و $M'_{(un)}$ تن اورانیم طبیعی مورد نیاز است و میزان کار لازم جهت بدست آوردن این مقدار اورانیم غنی‌شده برابر (S.W) تن واحد جداسازی می‌باشد.

۱-۲ هزینه تهیه سوخت.

هزینه مربوط به‌مراحل مختلف تهیه سوخت چنین است:

هزینهٔ تأمین u_3o_8، $C_u = M_{(u_3o_8)} \times C'_u \times (1+i)^{t_u} \times 2.2 \times 10^3$ (۱۶)

هزینه تبدیل u_3o_8 به uF_6 ، $C_c = M_{(u_3o_8)} \times C'_c \times (1+i)^{t_c} \times 10^3$ (۱۷)

بادرنظرگرفتن درجه غنی متفاوت برای سوخت درنواحی مختلف قلب راکتور وهمچنین بفرض یکسان بودن توزیع جرمی سوخت در قلب راکتور، هزینه غنی کردن اورانیم وساخت میله‌های سوخت برابر خواهدبود با:

هزینه‌غنی کردن $C_E = \frac{S.W}{3}(Ce_1 + Ce_2 + Ce_3)(1+i)^{t_e} \times 10^3$ (۱۸)

هزینه‌ساخت میله‌های سوخت $C_F = M_{(eu)} \times C_f \times (1+i)^{t_f} \times 10^3$ (۱۹)

وچنانچه هزینه واحد حمل سوخت به‌راکتور را برای طول مسیر C_{tr} بنامیم در اینصورت :

$$C_{TR} = M_{(eu)} \times C_{tr} \times (1+i)^{t_{tr}} \times 10^3 \qquad \text{هزینه حمل‌سوخت به‌راکتور} \qquad (۲۰)$$

۲- جابجا کردن میله‌های‌سوخت دررا کتور .

بمنظور یکنواختی قدرت وبه‌سبب زیاد بودن شارنوترون در ناحیه مرکزی قلب راکتور وکمی آن در نواحی کناری، سوخت‌گذاری اولیه راکتور بادرجه غنی متفاوت صورت می‌گیرد. بدین معنی که معمولا قلب راکتورهای قدرت از نوع آب سبک تحت فشار به‌سه‌ناحیه بترتیب زیر تقسیم بندی میشود :

الف ـ ناحیه مرکزی،سوخت با درجه غنی کم.

ب- ناحیه میانی، سوخت بادرجه غنی متوسط .

ج- ناحیه کناری، سوخت بادرجه غنی زیاد.

تقریباً ۱۸ ماه پس‌از شروع کار راکتور، سوخت‌های ناحیه میانی وکناری بترتیب جای‌گزین سوختهای ناحیه مرکزی و میانی گردیده و یک دسته سوخت جدید در ناحیه کناری قرار داده میشود . به‌فاصله دوازده ماه پس‌از این جابه‌جائی، سوخت ناحیه مرکزی برداشته شده و دوباره سوختها بترتیبی که در پیش گفته‌شد جای گزین یکدیگر گردیده و یک دسته سوخت جدید در ناحیه کناری قرار داده میشود. این روند پس‌از ۱۲ ماه دوباره تکرار می‌گردد. بدین ترتیب سوخت اولیه ناحیه مرکزی قلب راکتور بمدت ۱۸ ماه، سوخت ناحیه میانی بمدت ۳۰ ماه، سوخت ناحیه کناری بمدت ۴۲ ماه وبقیه سوختها که بعداً به‌هسته راکتور اضافه میشوند هرکدام بمدت ۳۶ ماه در قلب راکتور خواهند بود.

۳- جداسازی وبازسازی سوخت .

برخلاف، سوختهای فسیلی، سوخت هسته‌ای تماماً سوخته نمیشود، بلکه پس‌از مدتی که در راکتور درمعرض بمباران نوترون‌های حرارتی قرارگرفت بدلیل کم شدن درجه‌غنی‌بودن‌آن واضافه شدن بعضی عناصر بسوخت از قدرت‌گرمائی آن کاسته شده ومی‌بایست تعویض‌گردد. بنابراین مطابق جدول زمانی توضیح داده شده در قسمت(۲) سوختهای تشعشع یافته از قلب راکتور خارج‌گردیده وازآن بمدت ۳ تا۶ماه در انبار مخصوص نگهداری میشود تا پس از تجزیه عناصر رادیو - اکتیو آن برای حمل وانجام عملیات جداسازی آماده گردد.

در عملیات جداسازی،عناصر رادیواکتیو، اورانیم باقیمانده بادرجه غنی کم وپلوتونیم‌حاصل‌از یکدیگر را جدا کرده واورانیم باقیمانده را دوباره به‌درجه غنی مورد نیاز رسانیده وسپس به‌میله سوخت تبدیل می‌نمایند. پلوتونیم حاصل از جداسازی را میتوان بطور جداگانه ویامخلوط بااورانیم بصورت سوخت جدید درآورد ویااینکه به‌مصارف دیگر رساند .

۳-۱ هزینه‌های مربوط به جداسازی و بازسای سوخت.

$$C'_{TR} = M_{(eu)} \times 10^3 \times C'_{tr}(1+i)^{t'_{tr}} \qquad \text{(۲۱) هزینه حمل‌سوخت مصرفی به‌محل جداسازی}$$

$$C_R = M_{(en)} \times 10^3 \times C_r(1+i)^{t_r} \qquad \text{(۲۲) هزینه جداسازی}$$

مقدار پلوتونیم حاصل از عملیات جداسازی را میتوان باتوجه به‌مدت زمان استفاده از سوخت در هر ناحیه از قلب راکتور بصورت زیر نوشت:

$$X_{pu} = \frac{K'.P.L}{3} \times (t_1+t_2+t_3)(1-L_3) \qquad \text{(۲۳) گرم‌پلوتونیم حاصل}$$

در نتیجه ارزش پلوتونیم حاصل از عملیات جداسازی عبارت است از:

$$CR_{Pu} = C'_{pu}[X_{1(pu)} \cdot (1+i)^{-t_1} + X_{2(pu)} \cdot (1+i)^{-t_2} + X_{3(pu)} \cdot (1+i)^{-t_3}] \qquad (۲۴)$$

مقدار اورانیم باقی مانده از عملیات جداسازی را میتوان از رابطه زیر محاسبه کرد :

$$X_{(e_t)} = M_{(eu)} - (X_{(235)} + X_{pu} + X'_{(eu)}) \qquad (۲۵)$$

که درآن

$$X_{(235)} = \frac{P_2 \times t \times 235 \times 10^6}{3.2 \times 10^{-11} \times N} \qquad (۲۶)$$

P_2 گرم اورانیم مصرفی

N عددآواگادرو، و

$$X'_{(eu)} = M_{(eu)} \times L_4 \qquad (۲۷)$$

است. این مقدار اورانیم بقیمانده معادل

$$X_{(nu)} = K'' X_{(e'_t)} \qquad (۲۸)$$

تن اورانیم طبیعی

و

$$X_{(u_3O_8)} = X_{(nu)} \times 1.179 \qquad (۲۹)$$

تن u_3O_8 میباشد که ارزش آنرا میتوان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$CR_u = 2.2 \times 10^3 \times C'_u [X_1(u_3O_8) \times (1+i)^{-t_1} + X_2(u_3O_8) \times (1+i)^{-t_2} + X_3(u_3O_8) \times (1+i)^{-t_3}] \qquad (۳۰)$$

ارزش اورانیم باقیمانده

نتیجه :

بااستفاده از روابط (۱۶) الی (۳۰) میتوان نوشت که:

$$C_T = C_u + C_c + C_E + C_F + C_{TR} + C'_{TR} + C_R \qquad (۳۱)$$

کل هزینه‌های مستقیم دوره سوخت

$$CR_T = CR_{pu} + CR_u \qquad (۳۲)$$

کل ارزش‌های سوخت باقیمانده

و درنتیجه :

$$D.C = C_T - CR_T \qquad (۳۳)$$

هزینه مستقیم دوره سوخت

که بااحتساب ده درصد این هزینه بعنوان هزینه غیر مستقیم، هزینه کل دوره سوخت بصورت زیر در میآید:

$$T.C = 1.1 \times D.C. \qquad (۳۴)$$

وهزینه دوره سوخت برای واحد تولید برابر خواهد بود با:

$$U.C = \frac{T.C}{E} \qquad (۳۵)$$

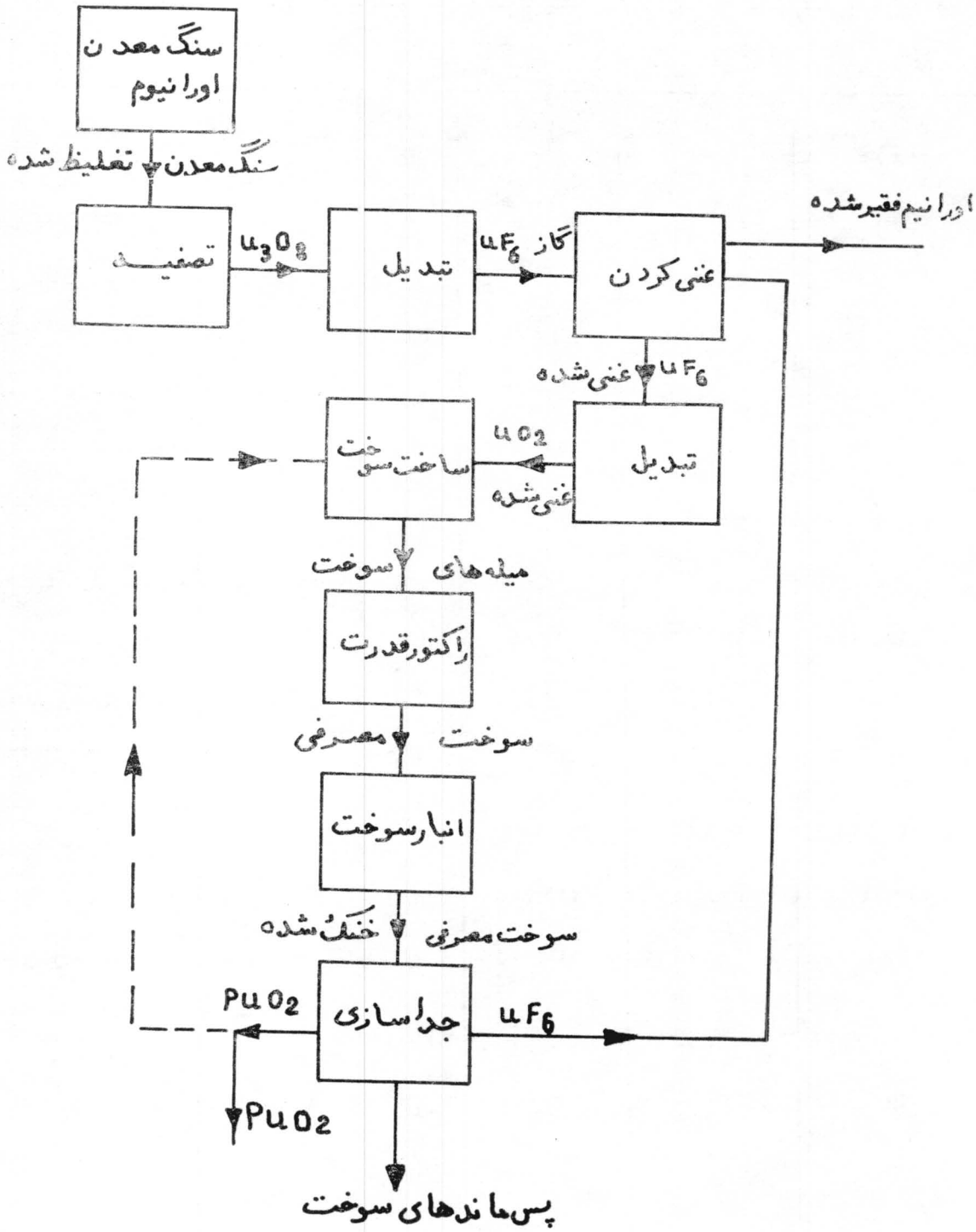
که درآن

$$E = P.L.365 \times 24 \left(\frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \right)$$

مگاوات ساعت انرژی

عبارت است از مقدار انرژی الکتریکی تولید شده توسط سوخت در قلب راکتور .

نتایج بدست آمده جهت هزینه سوخت واحد تولید برای نیروگاههای مختلف در جدول(۳) نشان داده شده‌است. چنانچه دیده میشود هزینه دوره سوخت واحد تولیدبرای دو واحد ۰.۳۵۰ و ۰.۰ مگاوات الکتریک تقریباً یکسان بوده در حالیکه این هزینه برای واحد ۱۲۰۰ مگاوات‌الکتریک در حدود ٪۶۵ هزینه دوره سوخت واحد تولید واحدهای کوچکتر است.



ش ۱- نمودار دوره سوخت یک راکتور قدرت از نوع آب سبک .

جدول (۱) ـ علامت های بکاربرده شده درمحاسبه هزینه ـــــــه تهیه سوخت.

شرح	واحد	علامت	۳۵۰ مگاوات الکتریک	۵۰۰ مگاوات الکتریک	۱۲۰۰ مگاوات الکتریک
توان گرمائی راکتور	مگاوات	P_1	۱۱۹۰	۱۶۷۲	۳۷۶۵
توان الکتریکی ماکزیمم	مگاوات	P_2	۳۶۹	۵۲۵	۱۲۹۲/۵
توان الکتریکی خالص	مگاوات	P	۳۵۰	۵۰۰	۱۱۹۶
بهره تبدیل انرژی گرمائی به الکتریکی	درصد	E_f	۳۱	۳۱/۴	۳۴/۴
توان گرمائی سوخت	مگاوات به تن	P_H	۳۳/۱	۳۳/۱	۳۶/۵
مقدار اورانیم غنی شده سوخت	تن	$M(eu)$	۳۵/۹۶۱	۵۰/۵۱۲	۱۰۳/۱۵۱
میانگین درجه غنی سوخت	درصد U_{235}	C_i	۳/۲	۳/۳	۲/۴۸
ضریب افت ساخت سوخت	درصد	L_1	۲	۲	۲
اورانیم طبیعی لازم برای سوخت	تن	$M'_{(nu)}$	۲۲۸/۶۵۴	۳۲۱/۹۷۶	۴۷۱/۹۹۵
درجه غنی بودن اورانیم طبیعی	درصد U_{235}	C_n	۰/۷۱۱	۰/۷۱۱	۰/۷۱۱
مقدار اورانیم تغذیه شده	تن	M_t	۱۱۹/۹۶۰	۲۶۹/۶۳۳	۳۶۸/۸۴۴
درجه غنی بودن اورانیم تغذیه شده	درصد U_{235}	C_t	۰/۲	۰/۲	۰/۲
ضریب افت تبدیل	درصد	L_2	۰/۵	۰/۵	۰/۵
ضریب تبدیل اورانیم طبیعی به غنی شده	ـــــ	K	۶/۲	۶/۲	۴/۴۶۲
مقدار U_3O_8 مورد نیاز	تن	$M(U_3O_8)$	۲۶۹/۵۸۳	۳۷۸/۶۶۶	۵۵۶/۴۸۲
مقدار کار جداسازی	تن واحد جداسازی S.W.		۱۴۸/۷۹۲	۲۰۸/۹۹۴	۳۳۸/۱۰۸
واحد جداسازی	ـــــ S.W.U.		۴/۰۵۴	۴/۰۵۴	۳/۲۱۲
هزینه تامین U_3O_8	دلار به پوند	C'_u	۴۰	۴۰	۴۰
هزینه تبدیل	دلار به کیلوگرم	C'_c	۱۰	۱۰	۱۰

بقیه جدول (۱) ۰

شرح	واحد	علامت	۳۵۰ مگاوات الکتریک	۵۰۰ مگاوات الکتریک	۱۲۰۰ مگاوات الکتریک
هزینه غنی کردن	دلار به کیلوگرم واحد جداسازی	C_e	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰
هزینه ساخت سوخت	دلار به کیلوگرم	C_f	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
هزینه حمل سوخت به راکتور	دلار به کیلوگرم	C_{tr}	۵	۵	۵
میزان بهره	درصد	i	۸	۸	۸
مدت زمان تامین U_3O_8	سال	t_u	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
مدت زمان تبدیل	سال	t_c	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
مدت زمان غنی کردن	سال	t_e	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
مدت زمان ساخت سوخت	سال	t_f	۰/۵	۰/۵	۰/۵
مدت زمان حمل سوخت	سال	t_{tr}	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵

جدول (۲) ــ علامت های بکاربرده شده در محاسبه هزینه جداسازی و بازسازی سوخت .

شرح	واحد	علامت	مگاوات الکتریک ۳۵۰	مگاوات الکتریک ۵۰۰	مگاوات الکتریک ۱۲۰۰
هزینه حمل سوخت مصرفی	دلار به کیلوگرم	C'_{tr}	۴۰	۴۰	۴۰
مدت زمان حمل سوخت مصرفی	سال	t'_{tr}	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
هزینه جداسازی	دلار به کیلوگرم	C_r	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
مدت زمان جداسازی	سال	t_r	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
پلوتونیم حاصل	گرم به ازاء واحد برسال	K'	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
مقدار پلوتونیم حاصل	کیلوگرم	X_{Pu}	۱۷۳/۲۵۰	۲۴۷/۵۰۰	۵۹۲/۰۲۰
ضریب بار	درصد	L	۸۰	۸۰	۸۰
ارزش پلوتونیم	دلار به گرم	C'_{Pu}	۹	۹	۹ (در سال ۱۹۷۴)
مدت زمان استفاده از سوختهای ناحیه مرکزی	سال	t_1	۱/۵	۱/۵	۱/۵
مدت زمان استفاده از سوختهای ناحیه میانی	سال	t_2	۲/۵	۲/۵	۲/۵
مدت زمان استفاده از سوختهای ناحیه کناری	سال	t_3	۳/۵	۳/۵	۳/۵
ضریب افت جداسازی پلوتونیم	درصد	L_3	۱	۱	۱
ضریب افت جداسازی سوخت مصرفی	درصد	L_4	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
درجه غنی بودن اورانیم باقیمانده	درصد	e'_t U_{235}	۱/۲۱	۱/۲۱	۱/۲۱
ضریب تبدیل اورانیم باقیمانده به اورانیم طبیعی	ــــ	K''	۱/۹۷۶	۱/۹۷۶	۱/۹۷۶
اورانیم طبیعی معادل	تن	$X_{(nu)}$	۶۸/۴۸۰	۹۶/۱۳۰	۱۹۷/۷۸۶
U_3O_8 معادل	تن	$X_{(U_3O_8)}$	۸۰/۷۳۸	۱۱۳/۳۳۷	۲۲۳/۱۸۹

جدول (۳) ــ مقایسه هزینه های دوره سوخت وهمچنین ارزش های سوخت باقیمانده برای نیروگاههای هسته ای با قدرت های مختلف.

قدرت به مگاوات	کل هزینه های مستقیم به دلار	کل ارزش‌ها به دلار CR_T	هزینه مستقیم D.C.	هزینه کل T.C	انرژی دوره سوخت به مگاوات ساعت E	هزینه دوره سوخت بر حسب هزار دلار بر کیلووات ساعت
۳۵۰	۱۸۶۹۵۶و۷۰	۷و۱۳۸۲۰۱	۶۳و۰۴۸۷۵۵	۶۹و۳۵۳۶۳۰	۶و۱۲۲۰۰۰	۱۱/۳۱۰
۵۰۰	۵۸۶۳۱۸و۹۸	۱۰و۰۴۶۴۱۲	۸۸و۵۳۹۹۰۶	۹۷و۳۰۹۳۸۹۵	۸و۷۶۰۰۰۰	۱۱/۱۱۸
۱۲۰۰	۴۰۱۹۹۵و۱۶۱	۲۱و۱۰۹۰۴۱	۱۴۰و۲۹۲۹۵۴	۱۵۴و۳۲۲۲۴۹	۲۰و۹۵۳۹۲۰	۷/۳۶۴

منابع

1 – Nuclear fuel–cycle services, by P.Krymm and G.Waite, I.A.E.A. vol.18 No. 516,1976.

2 – Developments in the uranium enrichment industry, I.A.E.A., 1977.

3 – Trends in uranium supply, by Maurice Hansen, I.A.E.A. Vol.18 No.5 16, 1976.

4 – Introduction to nuclear engineering, by John R. Lamarsh,Polytechnic Institute of NewYork, 1975.

5 – The economic comparison of nuclear reactors of 350 and 500 MW (e) for developing countries, by N.Aybers,etal., Istanbul Technical University, Nuclear Energy Institute,1974.

6 – Mathematical modeling of regional fuel–cycle centres, by L.L.Bennett and L.D.Reynolds, I.A.E.A., 1976.