



بررسی اثر رسوب بر عملکرد مولد بخار افقی نیروگاه بوشهر با استفاده از کد MELCOR

هادی ابراهیم گل، مهدی آقایی مغانلو*، قاسم اله یاری زاده

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه چرخه ی سوخت

چکیده:

با توجه به اهمیت وجود انواع رسوب بر عملکرد حرارتی مولد بخار افقی در این مقاله سعی شده است تا به کمک روابط تجربی موجود در محاسبه ضخامت لایه رسوب به کمک کد MELCOR مدل ترموهیدرولیکی مولد بخار مورد مطالعه قرار گیرد. در همین راستا در ابتدا مدل دقیق مولد بخار تهیه شد و سپس لایه رسوب در آن به عنوان لایه مقاوم در برابر انتقال حرارت در نظر گرفته شد. به این ترتیب اثر رسوب بر تیوب های مولد بخار افقی به صورت تغییرات در شار گرمایی و همچنین مقاومت گرمایی در زمان نشست رسوب مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. در نهایت نیز تغییرات فشار و تولید بخار در مولد بخار بر حسب زمان نشست رسوب محاسبه شدند. کلمات کلیدی: مولد بخار، رسوب، کد MELCOR، مقاومت گرمایی، شار گرمایی

Investigation of fouling effects on performance of horizontal steam generator in Bushehr nuclear power plant using MELCOR code

H. Ibrahim Gol, M. Aghaie*, A. Zolfaghari, Gh. Alahyarizadeh
Engineering Department, Shahid Beheshti University, G.C, P.O. Box: 1983963113, Tehran, Iran.

Abstract

Considering the importance of fouled tubes on the thermal performance of the horizontal steam generator (HSG), this paper has been focused on the study of fouling effects on thermal hydraulics of the HSG. In this way, a model of the HSG using MELCOR code was prepared and the fouling was considered as a heat transfer resistant layer. The effect of fouling on HSG tubes is investigated by changing in thermal heat flux as well as thermal resistance during sedimentation. Finally, based on the sedimentation, the changes of pressure and vapor generation in the HSG were calculated.

Keywords: Steam Generator, Fouling, MELCOR, Thermal resistance, Heat flux

مقدمه:

آزمایش هانشان داده است که اثر رسوب در سیکل دوم مولد بخار از اهمیت به مراتب بسیار بیشتری نسبت به سیکل اول برخوردار است [1]. بنابراین در این مقاله تنها به بررسی اثر رسوب بر روی تیوبهای مولد بخار در سیکل دوم پرداخته شده است. ابتدا ماهیت رسوب از قبیل مشخصات فیزیکی و شیمیایی، معادلات حاکم بر آن را تعیین می کنیم و نرخ انتقال رسوب به درون مولد بخار را می یابیم، سپس مولد بخار را در حالت



پایا توسط کد MELCOR مدل‌سازی نموده و رسوب را روی آن شبیه سازی کرده و در نهایت نتایج را توسط نرم افزار MATLAB رسم می نماییم. رسوب های تولیدی عمدتاً از جنس اکسیدهای آهن ناشی از خوردگی در قسمت های مختلف سیکل دوم می باشد [2] که از غشاها عبور کرده و به صورت ذرات معلق شامل آهن حل نشده یا آهن کلوئیدی می باشد که از فیلتر های ۰,۴۵ میکرومتری عبور کرده و به داخل مولد راه می یابد. با بررسی غشاها مشخص گردید که ماهیت رسوبها غالباً به صورت مگنیت، هماتیت، لپیدوکروسیت، مگنتیت و سیلیکا می باشد. برای یافتن نرخ رسوب گیری از معادله (1) (بر مبنای آنالیز cleaver et al) استفاده شده است [3]:

$$M = \left(\frac{K C \rho v}{a U^{*2}} \right) * (1 - \exp(-a U^{*2} t / v)) \quad (1)$$

C: غلظت بالک ذره

ρ : چگالی محلول

U: ویسکوزیته جنبشی محلول

$$U^* = \sqrt{\tau / \rho}$$

τ : تنش برشی

t: زمان

a: ثابت عددی برابر $7.0e-11$

M: نرخ رسوبگیری (جرم بر واحد سطح)

K: ضریب رسوب گیری است که از رابطه ی (2) بدست می آید [4]:

$$K = (1/K_t + 1/K_a) \quad (2)$$

معادله بالا نشان میدهد که رسوب گیری در طی دو فرآیند صورت می گیرد: انتقال و نشست رسوب (transport and attachment). در معادله بالا K_t ضریب انتقال رسوب می باشد که از رابطه (3) محاسبه می شود. در جدول (1) متغیر های مورد استفاده در معادلات ۴ الی ۹ معرفی شده اند.

$$K_t = K_a + K_i + K_{th} + K_b \quad (3)$$



K_d ضریب دیفیوژن مولکولی از رابطه (4) :

$$K_d = (Sc)^{-0.66} * U^*/11.9 \quad (4)$$

K_i ضریب لختی از رابطه (5) :

$$K_i = \frac{U^* * t_p^* * \rho}{500 * 5.23 \rho_p} * \exp(0.48 * t_p^*) \quad (5)$$

K_{th} ضریب ترموفورسیس از رابطه (6) :

$$K_{th} = \frac{-0.26 * h_c * (T_s - T_b)}{2(6k_f - k_p)T_b} \quad (6)$$

K_b ضریب جوش رسوب از رابطه (7) :

$$K_b = \frac{0.05q}{h_{fg} * \rho} \quad (7)$$

که t_p^* زمان نشست رسوب وبدون بعد می باشد که از رابطه (8) بدست می آید:

$$t_p^* = \frac{\rho_p *}{18\rho} * \left(\frac{U^* d_p}{\nu}\right)^2 \quad (8)$$

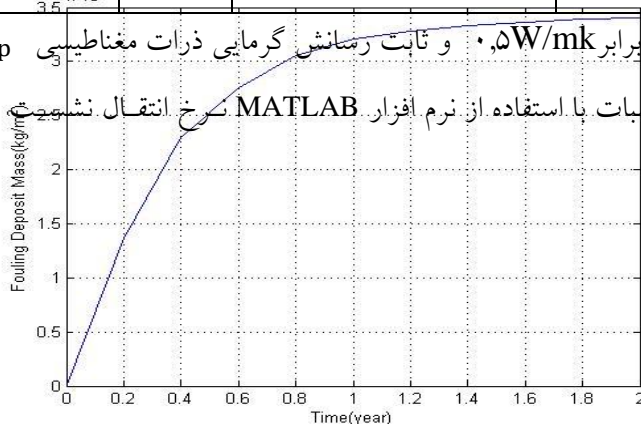
ضریب نشست رسوب نیز از رابطه (9) بدست می آید:

$$K_a = 1.9 \exp\left(-\frac{42000}{8.314 * T_s}\right) \quad (9)$$

جدول (1): معرفی متغیر های مورد استفاده در معادلات

متغیر	نام	متغیر	نام	متغیر	نام
Sc	عدد اشمیت	T_s	دمای سطح	k_p	ثابت رسانش ذرات مغناطیسی
ρ_p	چگالی رسوب	T_b	دمای بالک سیال	h_{fg}	گرمای نهان تبخیر
ρ	چگالی محلول	q	شار گرمایی	d_p	قطر ذره رسوب
h_c	ضریب انتقال حرارت	k_f	ثابت رسانش رسوب	ν	ویسکوزیته محلول

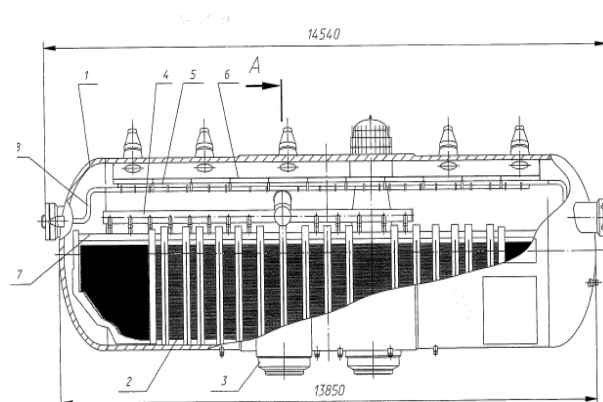
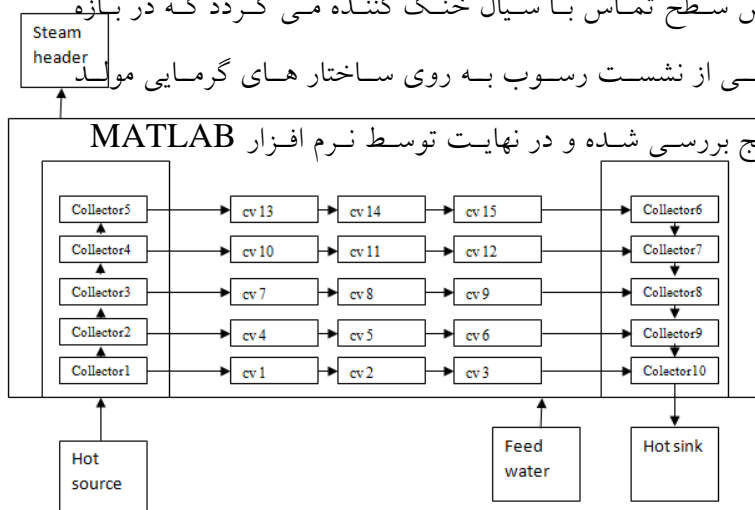
ثابت رسانش گرمایی رسوب k_f برابر 0.5 W/mk و ثابت رسانش گرمایی ذرات مغناطیسی k_p برابر 0.2 W/mk در نظر گرفته شد. پس از انجام محاسبات با استفاده از نرم افزار MATLAB نرخ انتقال رسوب به مدت دو سال به صورت زیر در می آید.



مدلسازی مولد بخار درکد MELCOR با توجه به اطلاعات زیر انجام شد. مولد بخار افقی روسی نیروگاه
 شکل شماره (۱) - میزان رسوب در سطح در طول زمان
 پوشهر شامل ۱۱۰۰۰ تیوب از جنس استیل ضد زنگ با طول حدود ۱۱ متر می باشد که دارای قطر
 داخلی ۱۳ میلیمتر و قطر خارجی ۱۶ میلیمتر می باشند. تیوبها در ۵ سری و ۳ ستون سازه گرمایی (HS) شبیه
 سازی شده اند. گره بندی مولد بخار مورد نظر به صورت شکل (۳) طراحی شده است. رسوب باعث

افزایش قطر خارجی حجم کنترل ها و بالطبع افزایش سطح تماس با سیال خنک کننده می گردد که در بازه
 های زمانی معینی (۷۳ روزه) افزایش ضخامت ناشی از نشست رسوب به روی ساختارهای گرمایی مولد
 بخار (تیوبهای مولد بخار) اعمال می گردد و نتایج بررسی شده و در نهایت توسط نرم افزار MATLAB

رسم می گردد.



شکل شماره (۳) - گره بندی مولد بخار افقی روسی

شکل شماره (۲) - مولد بخار افقی

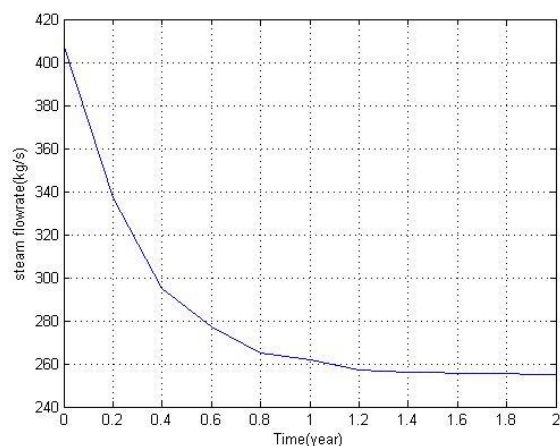
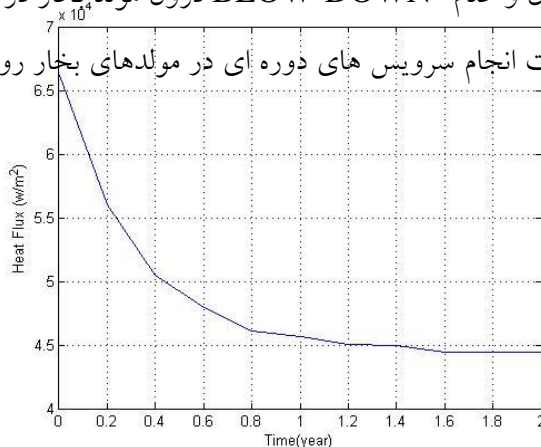
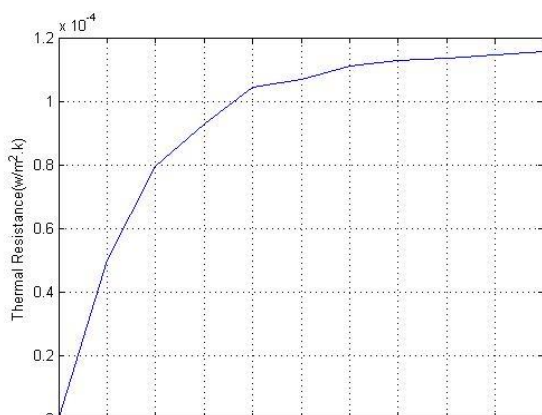
بحث و نتیجه گیری:

بعد از انجام محاسبات مربوط به ضخامت لایه رسوب، مدلسازی مولد بخار نشان داد که افزوده شدن این لایه باعث
 کاهش میزان برداشت حرارت از لوپ اول خواهد شد به این ترتیب میزان شار حرارتی کاهش یافت. همانطور که در
 نمودار ۴ نشان داده شده است شار گرمایی تیوبها در حدود $21890 \text{ (W/m}^2\text{)}$ در سال دوم کاهش داشته است. مطابق



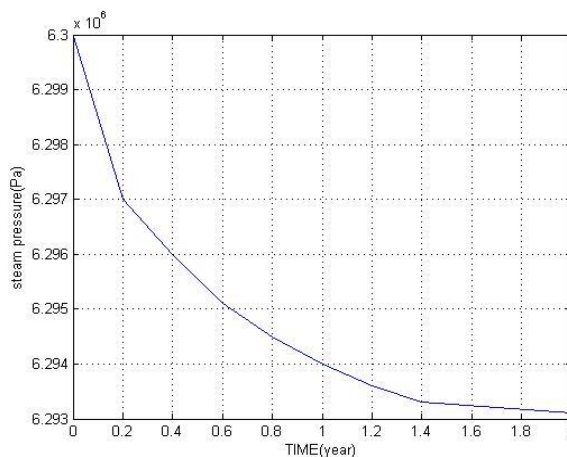
نمودار ۵ نیز مقاومت گرمایی تیوبها پس از دو سال نشست رسوب به میزان $1.15 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$ افزایش خواهد داشت. وهمانطور که در شکل ۶ مشخص است فشار بخار تولیدی در سال دوم به میزان 8.92 KPa کاهش خواهد یافت. طبق شکل ۷ برای رسوب با ضریب هدایت حرارتی ثابت 0.02 W/m.K [7] نرخ بخار تولیدی پس از گذشت دو سال و عدم BLOW DOWN درون مولد بخار در حدود 152 کیلوگرم کاهش خواهد داشت. به این ترتیب

اهمیت انجام سرویس های دوره ای در مولدهای بخار روشن می گردد.



شکل شماره (۴) - شار گرمایی مولد بخار در طول زمان

شکل شماره (۵) - مقاومت گرمایی مولد بخار در طول زمان



شکل شماره (۶) - فشار بخار تولیدی مولد بخار در طول زمان



مراجع:

- 1) A. Stutzmann et al, *French Experience on OD-IGA/SCC and Fouling of SG Tubes*, Nuclear Energy, Vol. 41, No. 2, pp. 137-144, April 2002
- 2) *Fouling of Nuclear Steam Generators: Fundamental Studies, Operating Experience and Remedial Measures Using Chemical Additives* C.W. Turner.
- 3) J. W. Cleaver et al, *The Effect of Re-entrainment on Particle Deposition*, Chemical Engineering and Science, Vol. 31, pp. 147-151, 1976.
- 4) B. D. Bowen et al, *Fine Particle Deposition in Smooth Parallel-Plate Channel*, J. Colloid Interf. Sci., Vol. 72, pp. 81-97, 1979.
- 5) MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 1: Primer and Users' Guide
- 6) 48. C. W. Turner et al, *Modeling Magnetite Particle Deposition in Nuclear Steam Generators and Comparisons with Plant Data*, Presented at the Second International Steam Generator and Heat Exchanger Conference, Toronto, Canada, 1994.
- 7) *Theoretical and Experimental Study of Degradation Monitoring of Steam Generators and Heat Exchangers*, Xuedong Huang.
- 8) *Chemical Thermodynamics of iron Part I*, Robert J. Lemire (chairman)



پاسخ به داوران

تمامی نکات نگارشی مذکور برطرف گردیدند و معادلات با معرفی متغیرها ارائه شدند. همچنین ثوابت معادلات تعریف شدند و محورهای نمودارها اصلاح گردیدند و بازه زمانی نیز به دو سال ویرایش گردید.