

ارایه یک مدل دو بعدی برای توزیع ناخالصی محلول در مولد بخار PGV-۱۰۰۰

منصور خانکی*

قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مکانیک

چکیده: در این تحقیق، نحوه توزیع ناخالصی محلول در یک مولد بخار PGV-۱۰۰۰ بررسی و تحلیل شده است. مولد بخار PGV-۱۰۰۰، از انواع افقی مولدهای بخار بوده و با توان حرارتی ۷۵۰ مگاوات ۱۴۶۷ تن بخار در ساعت تولید می‌کند. در این مقاله، یک مدل دو بعدی برای مطالعه توزیع ناخالصی محلول در این مولد بخار ارایه می‌شود. مدل پیشنهادی می‌تواند توزیع ناخالصی در طول مولد بخار را با خطای متوسط حدود ۱۳ درصد حداکثر ناخالصی محلول در مولد بخار پیش‌بینی کند. برای توزیع ناخالصی در عرض مولد بخار خطای بالا حدود ۳۵ درصد حداکثر ناخالصی محلول است. به کمک این مدل در رژیم‌های متفاوت، نحوه تغذیه آب مولد بخار و نحوه اخذ بلو داون (زیر آب) بررسی می‌شود. نتیجه‌ی محاسباتی به عمل آمده نشان دهنده‌ی این موضوع است که می‌توان متوسط ناخالصی محلول در مولد بخار PGV-۱۰۰۰ را به میزان قابل توجهی کاهش داد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که در طرح استاندارد توزیع آب تغذیه و زیر آب می‌توان حداکثر ناخالصی محلول در مولد بخار PGV-۱۰۰۰ از ۲۷۰ برابر ناخالصی موجود در آب تغذیه به ۱۸۰ و متوسط ناخالصی محلول را از حدود ۱۰۰ به حدود ۲۵ کاهش داد. همچنین در طرح بهینه شده سیستم توزیع آب تغذیه و زیر آب مولد بخار یاد شده با اصلاح نحوه توزیع آب تغذیه، بر اساس نتیجه‌ی محاسباتی، می‌توان مقدار متوسط ناخالصی محلول در مولد بخار را تا حدود ۴۰ درصد کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: PGV-۱۰۰۰، شبیه‌سازی کامپیوتری، دیگ بخار، مولد بخار افقی، آب تغذیه، توزیع ناخالصی محلول.

KEY WORDS: PGV-1000, Computer simulation, Boiler, Horizontal steam generator, Feed water, Soluble impurity distribution.

مقدمه

چه در نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی و چه نیروگاه‌های حرارتی با سوخت هسته‌ای آب سبک، ضریب اطمینان عملکرد نیروگاه تا حد قابل توجهی وابسته به سازماندهی مناسب رژیم آب دیگ‌ها و مولدهای بخار آنهاست. در چرخه آب نیروگاه‌ها همواره ناخالصی به روش‌های متفاوت ناشی از نفوذ آب آلوده و

به‌طور عمده تولید انرژی الکتریکی در دنیا بر نیروگاه‌های حرارتی با سوخت فسیلی و یا سوخت هسته‌ای استوار است. نه تنها افزایش تولید انرژی الکتریکی و بازدهی مهم‌ترین هدف و دستاورد این صنعت بوده، بلکه ضریب اطمینان در بهره‌برداری این نیروگاه‌ها نیز همواره از چالش‌های مهم این صنعت محسوب شده است.

*E-mail: khanaki@ikiu.ac.ir

*عده دار مکاتبات

معرفی مولد بخار PGV-۱۰۰۰

در مدار اول نیروگاه نوع VVER-۱۰۰۰ چهار مولد بخار PGV-۱۰۰۰ وجود دارد. آب گرم تولید شده در راکتور به وسیله ی ۴ مولد بخار، بخار لازم برای کارکرد توربین ها را تأمین می کند. در شکل ۱ و جدول ۱ مشخصات این مولد بخار ارائه شده است [۱۳]. به جهت یکنواخت کردن بار بخار در مولد یک صفحه مشبک در روی سطح آب قرار دارد که بخشی از آب با دینامیک جریان روی صفحه منتقل شده و از جوانب صفحه مشبک در اطراف به حجم مولد بخار بر می گردد.

فرضیه های به عمل آمده

- ۱- دمای آب در طی مسیر از کلکتور گرم تا کلکتور سرد به طور خطی کاهش می یابد.
- ۲- تولید بخار متناسب با تفاوت دمای آب گرم داخل لوله و آب اشباع داخل مولد بخار است.
- ۳- جریان آب در مولد بخار دو بعدی است.
- ۴- انتقال آب مولد به همراه بخار تولید شده به روی صفحه مشبک متناسب با بخار تولید شده است.
- ۵- آب منتقل شده به روی صفحه سوراخدار (مشبک) باهم مخلوط شده و دارای یک ناخالصی محلول یکسان هستند. و با شدت یکسان از نواحی کناری صفحه مشبک به داخل مولد بخار برگردانده می شود.
- ۶- مقدار بخار تولید شده در نواحی مجاور دیواره ها صفر است و مقدار بخار تولیدی با عرض کانال به تدریج افزایش یافته و در وسط به بیشترین مقدار خود می رسد.
- ۷- به علت ناچیز بودن و مشخص نبودن از اثر رسوب در بالانس ناخالصی محلول صرف نظر می شود.

معادله ی بقای جرم با وجود چشمه در دوبعد

معادله ی بقای جرم در حجم کنترل (دو بعدی) را در نظر می گیریم:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

با وجود چشمه با شدت $c(x,y)$ بر واحد حجم، معادله ی بقای جرم به این صورت نوشته می شود:

خوردگی های مربوط به اجزاء به چرخه وارد می شوند. وجود این ناخالصی ها در آب ضمن ایجاد رسوب در سطوح حرارتی در نهایت سبب کاهش انتقال حرارت، افزایش دما و تخریب سطوح می شود. روش کنترل ناخالصی از طریق زیر آب^(۱) از دیر باز مورد استفاده بوده است. در خصوص کنترل رژیم دیگ های بخار دارای درام (که بخش قابل توجهی از نیروگاه ها را تشکیل می دهد) در سال ۱۹۳۸ میلادی رم [۱] رساله ی خود را در تبخیر مرحله ای منتشر کرد. پژوهشگران دیگری به کنترل ناخالصی و ساماندهی رژیم آب در نیروگاه ها توجه کرده اند [۶-۲].

با شروع به کار نیروگاه های اتمی، موضوع رژیم آب این نیروگاه ها در کنترل ناخالصی و ایجاد رسوب در مولدهای بخار و راکتورها که می توانست ماهیت رادیو اکتیو داشته باشد نیز مورد توجه قرار گرفت [۹-۷]. نیروگاه های اتمی با آب تحت فشار نوع VVER-۱۰۰۰ نوع روسی نیروگاه های PWR هستند، و در بوشهر یکی از این نیروگاه ها در حال نصب است. مولدهای بخار نوع PGV-۱۰۰۰ حلقه ارتباط مدار اول و دوم در این نوع نیروگاه است. چهار مولد بخار موجود در ترکیب نیروگاه یاد شده قرار دارند که هر کدام ۷۵۰ مگاوات توان حرارتی داشته و ۱۴۶۷ تن بخار در ساعت تولید می کنند. ویژگی افقی بودن مولدهای بخار نوع PGV-۱۰۰۰ و متغیر بودن نرخ تولید بخار در واحد حجم مولد ویژگی جدیدی بود که با تولید بخار در درام نیروگاه های بخاری متفاوت بود، لذا طبیعت سه بعدی این تغییرها سبب انجام فعالیت های پژوهشی بیشتری در این زمینه شد. در جهت بهبود توزیع ناخالصی محلول در این نوع مولد بخار و به کارگیری ایده آقای رم، بهینه کردن رژیم آب این نوع مولد بخار [۱۰] مورد توجه قرار گرفته است. ارائه تجربیات مدل سازی یک بعدی رژیم آب در کارهای گوربارف و بهبود رژیم آب واحدهای جوششی در نیروگاه های اتمی و متعارف ارائه شده اند [۱۱ و ۱۲].

مدل ریاضی مناسب و حل کامپیوتری آن می تواند به عنوان شیوه ای کارا در پیش بینی نحوه توزیع ناخالصی محلول با توجه به توزیع آب تغذیه و نحوه برداشت زیر آب مورد توجه قرار گیرد. مدل یک بعدی برای تحلیل ناخالصی محلول در احجام جوششی در پیش مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]. با توجه به نحوه تولید بخار در حجم مولد بخار PGV-۱۰۰۰ مدل دو بعدی می تواند کارایی مناسب تری در بررسی و تحلیل و پیش بینی نحوه توزیع ناخالصی محلول در مولد بخار داشته باشد.

(۱) Blow down

جدول ۱- ویژگی‌های مولد بخار PGV-۱۰۰۰

قدرت حرارتی	۷۴۹٫۳ مگاوات
ظرفیت اسمی تولید بخار	۱۴۶۹ تن در ساعت
فشار بخار	۶٫۴۸ مگاپاسکال
درجه حرارت بخار تولیدی	۲۷۸٫۵ درجه سانتی‌گراد
درجه حرارت آب تغذیه	۲۲۰ درجه سانتی‌گراد
دبی آب گرم ورودی از راکتور	۱۴۴۰۰ تن در ساعت
فشار آب گرم ورودی	۱۵٫۷ مگاپاسکال
دمای آب ورودی (از کلکتور گرم)	۳۲۲ درجه سانتی‌گراد
دمای آب خروجی (از کلکتور سرد)	۲۸۹ درجه سانتی‌گراد
سطح انتقال حرارت	۴۰۷۲ مترمربع
رطوبت بخار خروجی	۰٫۰۵ درصد
مقدار زیرآب اسمی	۷٫۳ تن در ساعت
طول مولد بخار	۱۴٫۵ متر
قطر مولد بخار	۴ متر
توزیع آب تغذیه (طرح استاندارد)	متقارن از ۱۶ لوله توزیع کننده
فاصله کلکتورها از محور تقارن	۱۱۵۰ میلی‌متر
فاصله محل زیرآب از کلکتورها	۱۶۰۰ میلی‌متر

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} - \rho c = 0 \quad (2)$$

در حالت پایدار:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} - c = 0 \quad (3)$$

با فرض وجود تابع جریان $\varphi(x,y)$ که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = v_x \quad ; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = v_y \quad (4)$$

معادله‌ی بقای جرم به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - c = 0 \quad (5)$$

این معادله با توجه به شرایط مرزی و تابع شدت چشمه به صورت عددی حل می‌شود.

حل عددی معادله‌ی دیفرانسیلی تابع جریان

برای گره m,n معادله فوق به صورت زیر می‌تواند نوشته شود (شکل ۲) [۱۴]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \approx \frac{\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta x^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \approx \frac{\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta y^2}$$

$$\frac{\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta y^2} - c_{i,j} = 0$$

از مرز بالایی جرمی عبور نمی‌کند، بنابراین برای گره واقع در مرز بالایی سرعت صفر است و از آنجا φ در دو طرف مرز یکسان است، در نتیجه می‌توان معادله‌های بقا را به صورت زیر به دست آورد (شکل ۳):

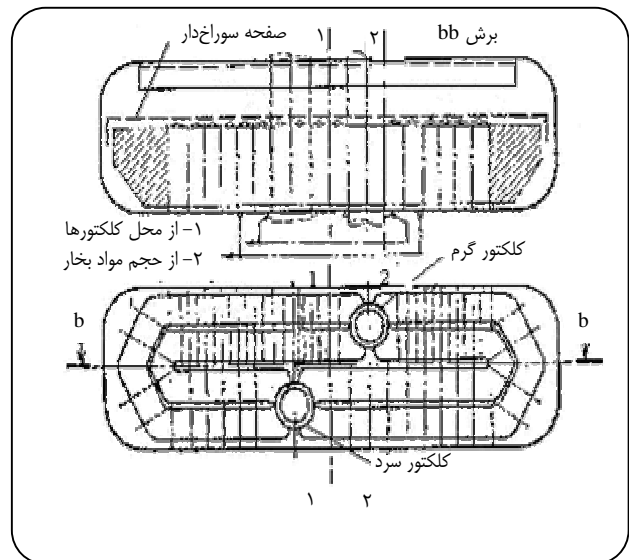
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \approx \frac{\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta x^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \approx \frac{2\varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta y^2}$$

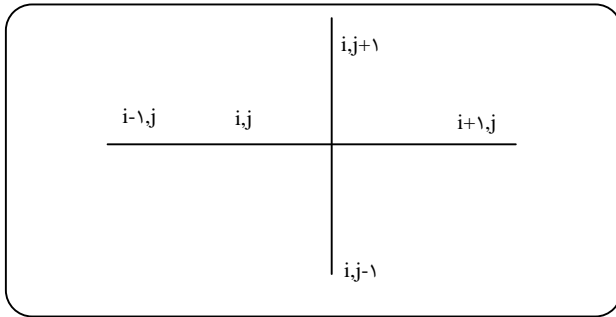
$$\frac{\varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{2\varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta y^2} - c_{i,j} \approx 0$$

و به همین ترتیب برای گره‌های واقع در مرز راست:

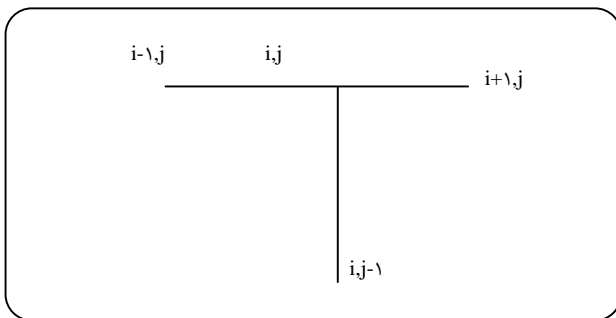
$$\frac{2\varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta y^2} - c_{i,j} = 0 \quad (8)$$



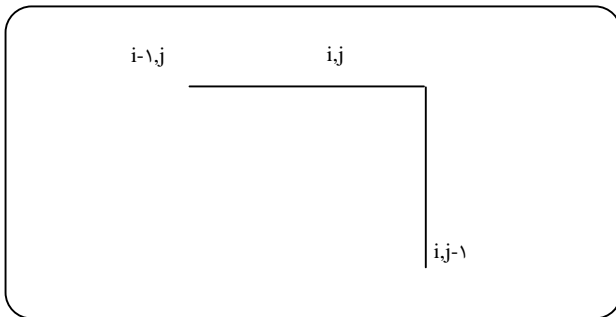
شکل ۱- مولد بخار PGV-۱۰۰۰، در طرح استاندارد دبی زیرآب ۷٫۳ تن در ساعت است که ۵ تن در ساعت آن از محل پیش‌بینی شده (حجم مولد بخار) و بقیه از محل کلکتورها در مولد بخار گرفته می‌شود.



شکل ۲- موقعیت گره‌های داخلی.



شکل ۳- موقعیت گره در مرز بالایی.



شکل ۴- موقعیت گره واقع در کنج.

و برای کنج معادله‌ی بقا به صورت زیر در می آید (شکل ۴):

$$\frac{2\varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{2\varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j}}{\Delta y^2} - c_{i,j} = 0 \quad (9)$$

معادله‌های بقا با توجه به مشخص بودن تابع شدت چشمه برای همه گره‌ها به وسیله‌ی روش‌های متعارف عددی قابل حل هستند.

معادله‌ی بالانس ناخالصی محلول

در شرایط پایدار نمک محلول ورودی و خروجی به حجم مورد بررسی باید برابر باشند. با عنایت به این موضوع معادله‌ی بقای ناخالصی محلول را می توان به دست آورد.

نرخ ناخالصی محلول ورودی از وجه $x-\Delta x/2$:

$$\rho v_x s \Delta y - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x s \Delta y \right) \frac{\Delta x}{2} \quad (10)$$

نرخ ناخالصی محلول ورودی از وجه $y-\Delta y/2$:

$$\rho v_y s \Delta x - \left(\frac{\partial}{\partial y} \rho v_y s \Delta x \right) \frac{\Delta y}{2} \quad (11)$$

نرخ ناخالصی محلول خروجی از وجه $x+\Delta x/2$:

$$\rho v_x s \Delta y + \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x s \Delta y \right) \frac{\Delta x}{2} \quad (12)$$

نرخ ناخالصی محلول خروجی از وجه $y+\Delta y/2$:

$$\rho v_y s \Delta x + \left(\frac{\partial}{\partial y} \rho v_y s \Delta x \right) \frac{\Delta y}{2} \quad (13)$$

با توجه به وجود ناخالصی‌های محلول ورودی به وسیله‌ی آب تغذیه، سرریز صفحه مشبک و ناخالصی‌های خروجی به وسیله‌ی آب زیرآب، رطوبت محمول بخار، محلول در بخار، منتقل شده به روی صفحه مشبک و رسوب گذاری روی سطوح این موارد همانند چشمه یا چاه عمل می‌کنند که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

نرخ ناخالصی ورودی به وسیله‌ی آب تغذیه:

$$\dot{m}_{pv} s_{pv} \Delta x \Delta y \quad (14)$$

نرخ ناخالصی ورودی از جریان سرریز صفحه مشبک (که فقط برای المان‌های کناری مولد بخار در نظر گرفته می‌شود):

$$\dot{m}_{av} s_{av} \Delta x \Delta y \quad (15)$$

نرخ ناخالصی خروجی به وسیله‌ی زیرآب:

$$\dot{m}_p s \Delta x \Delta y \quad (16)$$

نرخ ناخالصی خروجی به وسیله‌ی رطوبت محمول بخار:

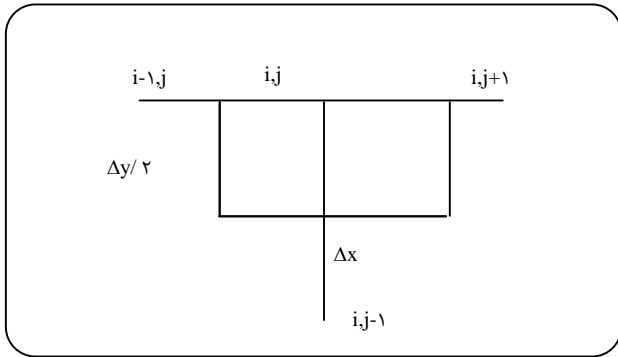
$$w \dot{m}_v s \Delta x \Delta y \quad (17)$$

نرخ ناخالصی خروجی به وسیله‌ی محلول در بخار:

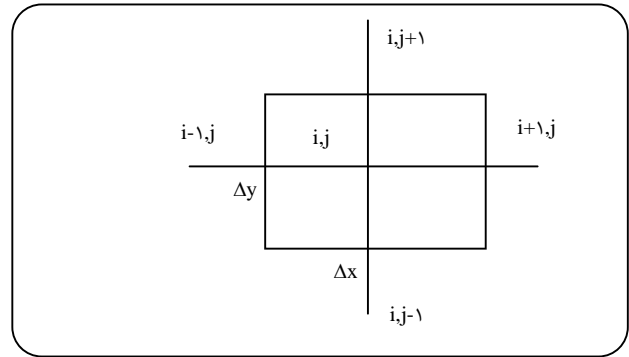
$$k \dot{m}_v s \Delta x \Delta y \quad (18)$$

نرخ ناخالصی خروجی به وسیله‌ی صفحه مشبک:

$$k c \dot{m}_v s \Delta x \Delta y \quad (19)$$



شکل ۶ - موقعیت و علایم یک گره در مرز.



شکل ۵ - موقعیت و علایم یک گره داخلی.

و به ترتیب مشابه برای $\partial sv_x / \partial y$ خواهیم داشت:

$$\frac{\partial sv_y}{\partial y} \approx \frac{s_{i,j}}{\Delta y} \left(\frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{\Delta y} \right) - \frac{s_{i,j-1}}{\Delta y} \left(\frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}}{\Delta y} \right) \quad (23)$$

در نتیجه معادله‌ی بالانس ناخالصی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\left(s_{i,j} \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\Delta x^2} - s_{i-1,j} \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right) + \left(s_{i,j} \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}}{\Delta y^2} - s_{i,j-1} \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) - \dot{m}_{pv} s_{pv} - \dot{m}_{av} s_{av} + \frac{(\dot{m}_p + w\dot{m}_v + k\dot{m}_v + km_v) s_{i,j} + \dot{m}_r}{\rho} \approx 0 \quad (24)$$

لازم به ذکر است بسته به علامت سرعت‌ها، عبارت‌های داخل پرانتزها باید اصلاح شوند. در عبارت بالا فرض شده که جهت‌ها مشابه علایمی است که در شکل ۵ نشان داده شده است.

معادله بالانس ناخالصی محلول برای المان‌هایی که یک طرف آن جدار مولد بخار است، با توجه عدم وجود جرم عبوری از مرز جامد، و بنابر این صفر بودن سرعت در این مرز منتج به برابری φ در دو طرف این مرز می‌شود و در نتیجه پس از اصلاح لازم و عنایت به ابعاد المان (شکل ۶) معادله‌ی بالانس ناخالصی محلول به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\left(s_{i,j} \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\Delta x^2} - s_{i-1,j} \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right) + \left(-2s_{i,j-1} \frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) - \dot{m}_{pv} s_{pv} - \dot{m}_{av} s_{av} + \frac{(\dot{m}_p + w\dot{m}_v + k\dot{m}_v + km_v) s_{i,j} + \dot{m}_r}{\rho} \approx 0 \quad (25)$$

نرخ رسوب گذاری روی سطوح حرارتی:

$$\dot{m}_r \Delta x \Delta y \quad (20)$$

معادله‌ی بالانس ناخالصی محلول با برابری ناخالصی‌های محلول ورودی و ناخالصی‌های محلول خروجی به دست می‌آید. شکل نهایی معادله به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \rho v_x s}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y s}{\partial y} - \dot{m}_{pv} s_{pv} - \dot{m}_{av} s_{av} + (\dot{m}_p + w\dot{m}_v + k\dot{m}_v + km_v) s + \dot{m}_r = 0 \quad (21)$$

در معادله‌ی بالا دو جمله اول نشان دهنده ناخالصی انتقالی به حجم کنترل و دو جمله بعدی مربوط به ناخالصی ورودی به حجم کنترل از طریق چشمه‌ها و جمله‌های بعدی مابین ناخالصی خروجی از حجم کنترل است.

حل عدی معادله‌ی بالانس ناخالصی محلول

با توجه به علامت گذاری در شکل ۵ برای بالانس ناخالصی محلول، با فرض ثابت بودن چگالی و تعریف φ می‌توان نوشت:

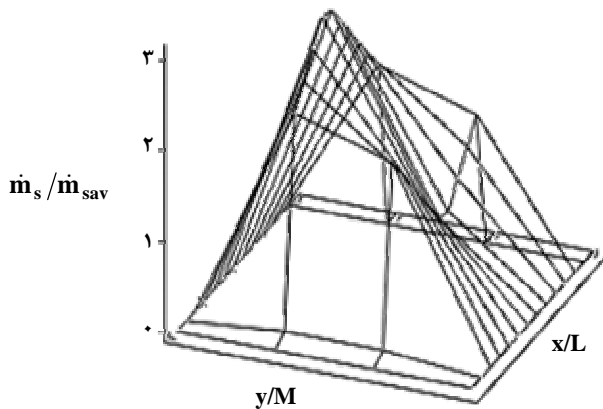
$$\frac{\partial sv_x}{\partial x} \approx \frac{sv|_{i+\frac{\Delta x}{2},j} - sv|_{i-\frac{\Delta x}{2},j}}{\Delta x} \quad (22)$$

$$\frac{\partial sv_x}{\partial x} \approx \frac{sv|_{i+\frac{\Delta x}{2},j}}{\Delta x} - \frac{sv|_{i-\frac{\Delta x}{2},j}}{\Delta x}$$

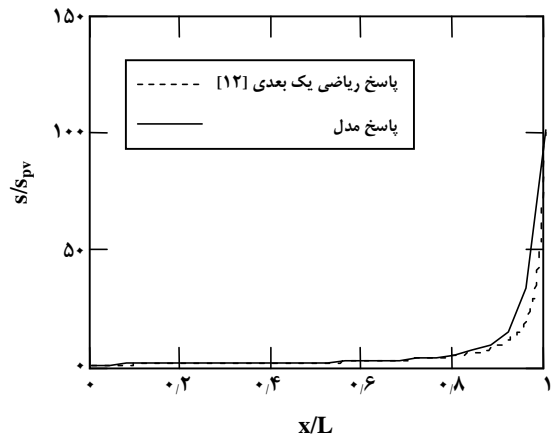
$$v|_{i+\frac{\Delta x}{2},j} = \left(\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\Delta x} \right)$$

$$v|_{i-\frac{\Delta x}{2},j} = \left(\frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\Delta x} \right)$$

$$\frac{\partial sv_x}{\partial x} \approx \frac{s_{i,j}}{\Delta x} \left(\frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\Delta x} \right) - \frac{s_{i-1,j}}{\Delta x} \left(\frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{\Delta x} \right)$$



شکل ۸ - نمودار شدت نسبی تولید بخار بر واحد سطح.



شکل ۷ - مقایسه‌ی پاسخ ریاضی و مدل پیشنهادی.

$$\frac{m_w(x)}{m_{pv}} = 1 + p - \frac{x}{L} \quad (27)$$

$$\frac{s(x)}{s_{pv}} = \frac{1+p}{1+p - \frac{x}{L}} \quad (28)$$

در معادله (۲۷) $m_w(x)$ دبی عبوری از هر مقطع کانال و m_{pv} آب تغذیه وارد شده در ابتدای کانال است.

در شکل ۷ منحنی تغییرهای ناخالصی محلول در طول مولد بخار با استفاده از معادله‌های بالا و مدل پیشنهادی با تقسیم طول مولد به ۱۰۰ قسمت ارایه شده‌اند. نتیجه‌ها با دقت خوبی با پاسخ ریاضی تطبیق دارند. نتیجه‌ها نشان می‌دهد حداکثر ناخالصی در انتهای مولد بخار با پاسخ ریاضی و مدل عددی برابر ۱۰۱ برابر ناخالصی محلول در آب ورودی و میزان متوسط ناخالصی در پاسخ ریاضی برابر ۴۶۶۱ و در مورد مدل عددی ۵۷۵۴۶ برابر ناخالصی آب تغذیه است که با افزایش تعداد تقسیمات نتیجه‌های مدل عددی به پاسخ ریاضی نزدیک‌تر می‌شود. محاسبه‌ها نشان می‌دهد که متوسط خطا در حد ۰/۳ درصد حداکثر ناخالصی محلول در مولد بخار است.

ارزیابی مدل در شرایط دو بعدی دشوارتر است، زیرا اطلاعات محدود هستند. بر اساس فرضیه‌های به عمل آمده شدت تولید بخار تابع دوعبدهی از طول و عرض مولد بخار است. نحوه توزیع تولید بخار در مولد در شکل ۸ نشان داده شده است. x نماینده طول، y نماینده بخار و محور عمودی نماینده نسبت شدت بخار تولیدی در یک قسمت نسبت به شدت متوسط بخار تولیدی می‌باشد. توزیع آب تغذیه نیز در طرح استاندارد در سطح مولد بخار

و برای کنج از دو وجه از چهار وجه جرمی عبور نمی‌کند. در نتیجه معادله بالانس ناخالصی محلول برای کنج به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\left(-\gamma s_{i-1,j} \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right) + \left(-\gamma s_{i,j-1} \frac{\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) - \dot{m}_{pv} s_{pv} - \dot{m}_{av} s_{av} + (\dot{m}_p + w\dot{m}_v + k\dot{m}_v + kc\dot{m}_v) s_{i,j} + \dot{m}_r \approx 0 \quad (26)$$

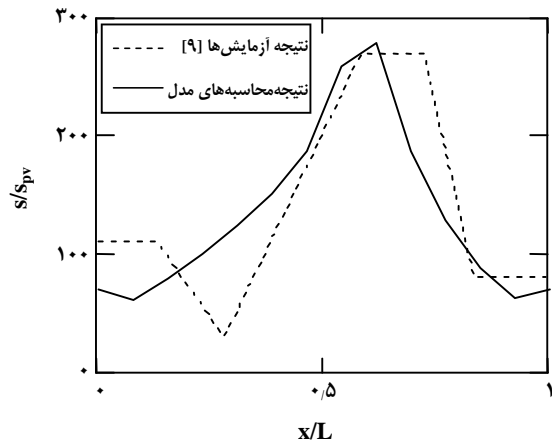
به این ترتیب، پس از به دست آوردن مقادیرهای ϕ معادله‌های بالانس ناخالصی محلول برای کلیه المان‌ها با توجه به جهت سرعت برای هر المان نوشته شده و برای یافتن مقادیرهای ناخالصی محلول با هم حل می‌شوند.

نتیجه‌ها و بحث

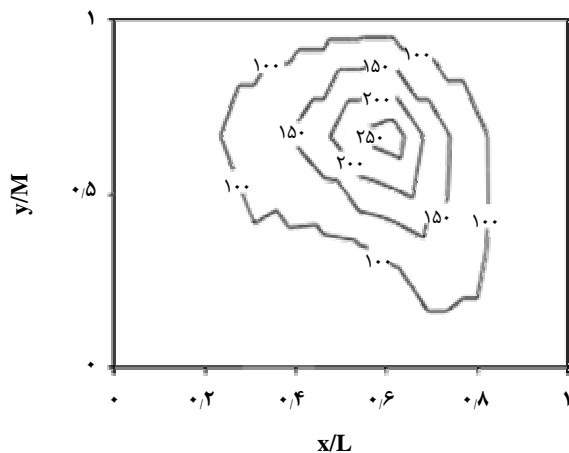
ارزیابی مدل ارایه شده

هرچند معادله‌ی ارایه شده دو بعدی است و لیکن می‌توان این مدل را در شرایط یک بعدی که پاسخ آن موجود است مورد ارزیابی قرار داد.

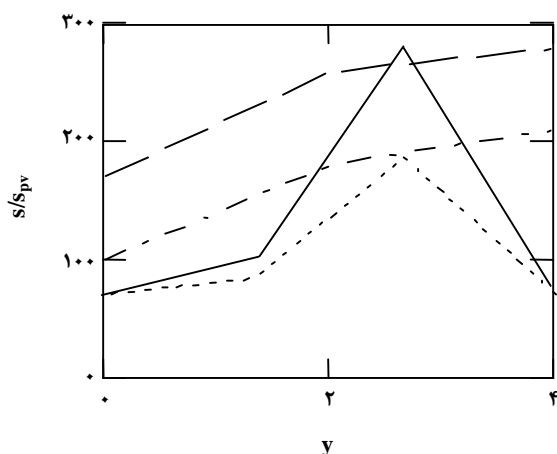
برای یک کانال یک بعدی با نرخ تولید ثابت بخار در طول، و تغذیه آب در ابتدای کانال و تخلیه زیرآب از انتهای دیگر و صرف نظر از رطوبت انتقالی به وسیله‌ی بخار و رسوب ایجاد شده، می‌توان توزیع ناخالصی محلول در کانال را به طور دقیق با رابطه‌های ریاضی به دست آورد. در مرجع [۱۲] نشان داده شده است که جرم عبوری از هر مقطع کانال از معادله‌ی (۲۷) و توزیع ناخالصی محلول در طول کانال از معادله‌ی (۲۸) به این صورت به دست می‌آیند [۱۲]:



شکل ۹- مقایسه ناخالصی محلول در مولد بخار در طرح استاندارد.



شکل ۱۰- نتیجه‌ی دوبعدی محاسبه‌های ناخالصی محلول در مولد بخار.

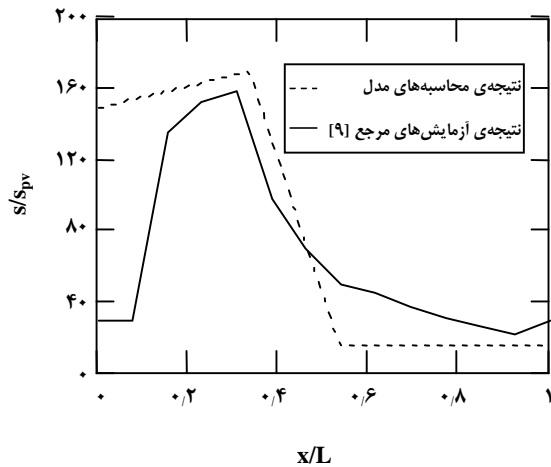


شکل ۱۱- تغییرهای عرضی ناخالصی محلول در مولد بخار.

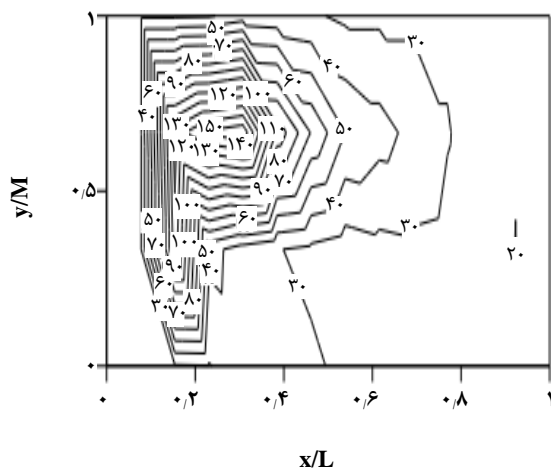
یکنواخت و متقارن است. زیرآب در این طرح از ۴ ناحیه (۲/۵) تن ساعت از محل قرار گرفتن کلکتورهای گرم و سرد و ۵ تن ساعت از دو محل پیش‌بینی شده برای زیرآب) گرفته می‌شود. نتیجه‌های پاسخ مدل عددی با توزیع ناخالصی محلول در مولد بخار ۱۰۰۰-PGV در طرح استاندارد آن [۹] شکل‌های ۹ تا ۱۱ ارایه شده است.

برای مقایسه‌ی نتیجه‌های مدل ارایه شده با نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌ها با پذیرش آن که آب با نرخ معادل ۶۰ درصد بخار تولیدی به روی صفحه‌ی مشبک منتقل شود نیز نشان داده شده است. در خصوص مقدار آب منتقل شده روی صفحه مشبک، اطلاعاتی از شرایط عملی در دست نیست. انتقال آب هر قسمت روی صفحه‌ی مشبک به معنای خروج ناخالصی در آن نقطه است و به این ترتیب همانند زیرآب برای آن ناحیه عمل می‌کند. با توجه به این‌که ناخالصی روی صفحه‌ی مشبک به سبب اختلاط جریان‌های منتقل شده روی صفحه یکسان فرض شده است، بنابراین، با برگشت این جریان‌ها از اطراف صفحه‌ی مشبک به مولد بخار ناخالصی‌های خارج شده از نواحی متفاوت به ترتیب ذکر شده به مولد بخار برگشته و سبب یکنواخت‌تر شدن ناخالصی محلول در حجم مولد بخار می‌شود. هرچه درصد بیشتری از آب هر ناحیه به روی صفحه‌ی مشبک منتقل شود، انتظار می‌رود توزیع ناخالصی در مولد بخار یکنواخت‌تر شود.

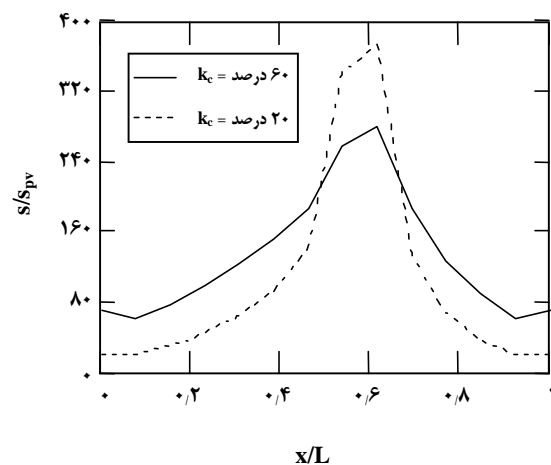
در شکل ۹ محور عمودی ناخالصی محلول نسبت به ناخالصی آب تغذیه و محور افقی موقعیت نسبت به طول مولد بخار است. باتوجه به دوبعدی بودن مدل، می‌توان توزیع دوبعدی ناخالصی محلول در مولد بخار ارایه کرد. در شکل ۱۰ توزیع ناخالصی در سطح نشان داده شده است. عددهای روی منحنی‌ها ناخالصی محلول نسبت به ناخالصی محلول در آب ورودی را نشان می‌دهد. محور عمودی عرض و محور افقی طول مولد بخار را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ در دو مقطع عرضی ۱ و ۲ (شکل ۱) نتیجه‌های حاصل از محاسبه‌های مدل و نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌ها [۹] ارایه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتیجه‌ی آزمایش‌ها نشان دهنده تفاوت مشابه در ناحیه حداکثر ناخالصی محلول است. ولی در ناحیه کناری نتیجه‌ها تطبیق کم‌تری را نشان می‌دهند. این موضوع احتمالاً ناشی از غیر دقیق بودن فرض یکنواخت بودن ناخالصی محلول روی صفحه‌ی مشبک و غیر یکنواخت بودن میزان آب برگشتی از نواحی کناری به‌داخل مولد بخار است. با توجه به‌شکل، متوسط خطا حدود ۳۵ درصد حداکثر ناخالصی محلول است.



شکل ۱۲- توزیع ناخالصی محلول، طرح بهینه شده.



شکل ۱۳- نتیجه محاسباتی طرح بهینه شده، عددهای روی منحنی‌ها نسبت ناخالصی به ناخالصی محلول در آب تغذیه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- اثر میزان انتقال آب به روی صفحه‌ی مشبک بر ناخالصی.

با توجه به تداوم پژوهش‌ها سیستم بهینه شده آب تغذیه و آب زیرآب در این مولد بخار به کار گرفته شده است به این منظور دو سوم آب تغذیه در نیم گرم مولد بخار و یک سوم در سمت راست آن توزیع می‌شود و به منظور جلوگیری از اختلاط آب تمیز جریان آب در روی صفحه‌ی مشبک به سمت بخش با ناخالصی محلول زیاد بسته شده و محل زیرآب به همین بخش منتقل شده است. نتیجه بهینه یاد شده در مرجع [۱۰] آمده است. توزیع ناخالصی محلول در سیستم بهینه شده و نتیجه محاسباتی مدل ارایه شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارایه شده است.

در شکل ۱۲ عددهای روی منحنی‌ها نسبت ناخالصی محلول در یک قسمت را نسبت به ناخالصی محلول در آب تغذیه نشان می‌دهد.

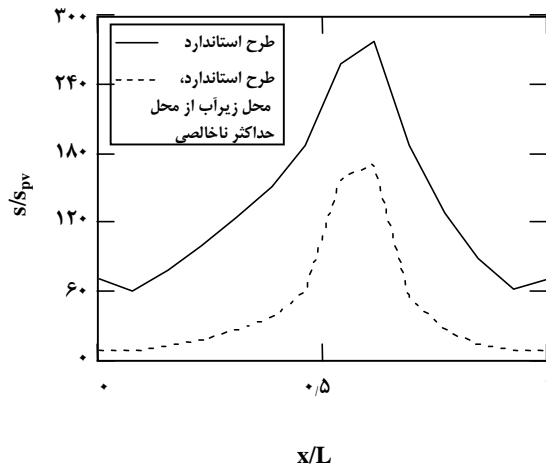
همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، توزیع دوسوم آب تغذیه در نیم راست مولد بخار جایی که کلکتور ورودی آب گرم قرار دارد سبب شده تا ناخالصی محلول در این ناحیه کاهش چشم‌گیر یافته و با جریان طولی ناشی از بالانس جرم به نیمه چپ منتقل شود، جایی که زیرآب در آن ناحیه قرار دارد. میزان حداکثر ناخالصی محلول به دلیل قرار داشتن محل زیرآب در ناحیه حداکثر ناخالصی نسبت به حالت قبل کاهش نشان می‌دهد. در این حالت متوسط خطای مدل حدود ۱۳ درصد حداکثر ناخالصی محلول در مولد بخار است.

در سیستم بهینه شده حداکثر ناخالصی محلول حدود ۱۶۰ برابر ناخالصی محلول در آب تغذیه و متوسط ناخالصی محلول در مولد بخار برابر ۲۷ برابر ناخالصی موجود در آب تغذیه است که نسبت به طرح استاندارد آب تغذیه و زیرآب کاهش زیادی را نشان می‌دهد.

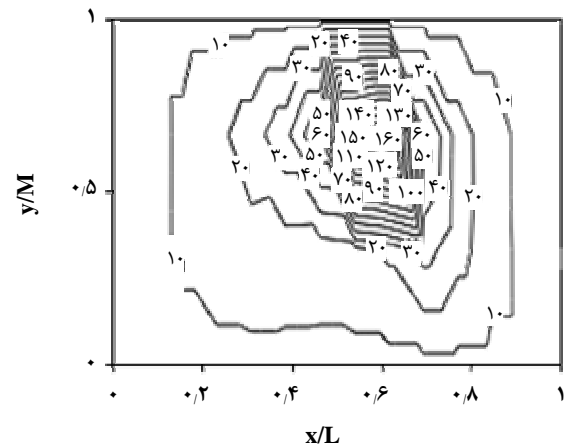
بررسی اثر صفحه‌ی مشبک بر توزیع ناخالصی محلول

وجود صفحه‌ی مشبک سوراخ‌دار برای متعادل کردن بار بخار خروجی است. با توجه به انتقال آب مولد بخار به روی صفحه‌ی مشبک و از آنجا انتقال آن از اطراف صفحه‌ی مشبک به حجم مولد بخار ناخالصی محلول موجود در یک ناحیه را به نواحی دیگر منتقل می‌کند.

با بررسی مدل ارایه شده در دو حالت، یکی با انتقال آب معادل ۶۰ درصد بخار تولیدی در هر ناحیه، و دیگری با انتقال آب معادل ۲۰ درصد بخار تولیدی در هر ناحیه در شکل ۱۴ ارایه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این حالت بیشترین ناخالصی محلول از ۲۸۰ به ۳۷۰ افزایش یافته ولیکن متوسط ناخالصی



شکل ۱۶- توزیع ناخالصی در طرح استاندارد.



شکل ۱۵- توزیع ناخالصی در طرح استاندارد، زیرآب از محل حداکثر ناخالصی، عددها روی منحنی ها نسبت ناخالصی به ناخالصی محلول در آب تغذیه را نشان می دهد.

محل تخلیه زیرآب به این نقطه منتقل شده است. نتیجه محاسبه‌ها در مقایسه آن با توزیع ناخالصی محلول در حالت استاندارد در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارایه شده است.

همان طور که ملاحظه می‌شود، برداشت زیرآب از ناحیه حداکثر ناخالصی محلول در مولد بخار اثر بخشی زیرآب را افزایش می‌دهد، در این حالت حداکثر ناخالصی محلول موجود از حدود ۲۸۰ برابر ناخالصی موجود در آب ورودی (حالت ۱) به ۱۸۰ (حالت ۲) و مقدار متوسط ناخالصی محلول از ۹۸ به ۲۳ کاهش یافته است.

بررسی طرح بهینه شده مولد بخار ۱۰۰۰-PGV

همان طور که در قبل اشاره شد، در طرح بهینه شده دوسوم آب تغذیه در سمت گرم مولد بخار و یک سوم آن در سمت سرد مولد بخار توزیع شده است و زیرآب به ناحیه با ناخالصی بیشتر که با عدم تقارن یاد شده ایجاد شده، منتقل شده است. حال اثر عدم تقارن بیشتر در توزیع آب تغذیه در مولد بخار مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت کل آب تغذیه به طور یکنواخت در نیمه گرم مولد بخار توزیع شده است (محل زیرآب تغییری نکرده است). نتیجه‌ی محاسبه‌ها در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ در قیاس با طرح بهینه شده [۹] و به صورت دوبعدی ارایه شده است. در محاسبه‌ها، حداکثر ناخالصی محلول ۱۶۱ برابر ناخالصی آب تغذیه و مقدار متوسط آن در مولد بخار حدود ۱۰ به دست آمده است.

محلول در حجم مولد بخار از ۹۸ به ۵۷ کاهش یافته است. به این ترتیب ملاحظه می‌شود که میزان آب منتقل شده به روی صفحه‌ی مشبک تأثیر قابل توجهی بر توزیع ناخالصی محلول در حجم مولد بخار دارد که البته ضرورت وجودی آن متعادل کردن توزیع بخار در حجم مولد بخار است که می‌تواند متغییرهای آن در پژوهشی مستقل مورد بررسی قرار گیرد.

بررسی اثر بخشی زیرآب

در شرایط پایدار، ناخالصی محلول به طور عمده با آب تغذیه به مولد بخار وارد و به وسیله‌ی آب زیرآب از آن خارج می‌شود (با صرف‌نظر از رسوب ایجاد شده و مقدار ناخالصی که همراه با بخار خارج شده است). بالانس یاد شده نشان دهنده ناخالصی موجود در مولد بخار نیست، بلکه نشان‌دهنده مقدار ناخالصی محلول در محل یا محل‌هایی است که زیرآب از آن محل تخلیه می‌شود. بنابراین، انتظار می‌رود که با انتخاب محل زیرآب در ناحیه حداکثر ناخالصی محلول، مقدار ناخالصی محلول در آن نقطه محدود شده (که مقدار آن با بالانس کلی ناخالصی محلول تعیین می‌شود) و ناخالصی محلول در سایر نقاط از ناخالصی در محل تخلیه زیرآب کم‌تر باشد.

در آثار پژوهشگران در بررسی مدل یک بعدی که به آن اشاره شده است [۱۲] با توجه به طرح استاندارد حداکثر ناخالصی محلول در اطراف کلکتور آب گرم دیده می‌شود، به این جهت در بررسی دو بعدی با مشخص بودن مقدار و محل حداکثر ناخالصی محلول،

نتیجه گیری نهایی

نتیجه‌های ارایه شده تجربی و نتیجه‌های مدل ارایه شده نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی می‌تواند توزیع ناخالصی در طول مولد بخار را با خطای متوسط حدود ۱۳ درصد حداکثر ناخالصی محلول در مولد بخار را پیش‌بینی نماید. برای توزیع ناخالصی در عرض مولد بخار خطای بالا حدود ۳۵ درصد حداکثر ناخالصی محلول است.

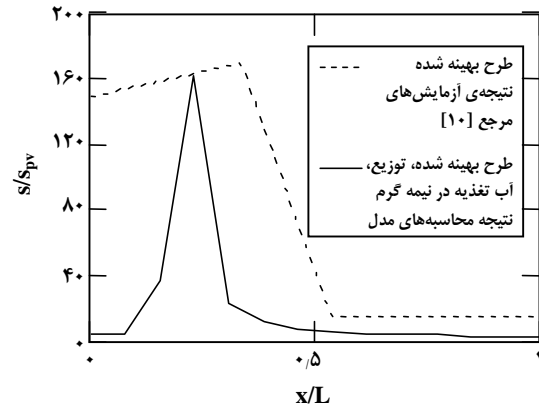
بحث در خصوص سیستم بهینه شده آب تغذیه و آثار جابه‌جایی محل زیرآب نشان دهنده توانایی مدل در تحلیل نحوه توزیع ناخالصی با تغییر محل زیرآب، جابه‌جایی و نحوه توزیع آب تغذیه در مولد بخار است. این مدل می‌تواند در تحلیل توزیع ناخالصی محلول با سیستم مشخص آب تغذیه نحوه تولید بخار و نحوه اخذ زیرآب به کار گرفته شده و به این ترتیب قابلیت مناسبی را در پیش‌بینی نحوه بهینه سیستم آب تغذیه و زیر آب فراهم آورد. بر اساس مدل پیشنهادی برخی محاسبه‌ها به عمل آمده در جدول ۲ ارایه شده است.

این محاسبه‌ها نشان می‌دهد که طرح استاندارد از رژیم مناسب آب تغذیه و زیرآب برخوردار نیست. طرح بهینه شده (ردیف ۳) نسبت به طرح استاندارد شرایط بسیار مناسب‌تری دارد. همان‌طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، انتخاب محل مناسب‌تر زیرآب می‌تواند به مقدار قابل توجهی متوسط ناخالصی محلول را حتی نسبت به طرح بهینه شده کاهش دهد. در ردیف ۴ نشان داده شده است که هرگاه آب تغذیه فقط در نیم گرم توزیع شود متوسط ناخالصی محلول از مقدار ۴۰ به ۲۲ کاهش خواهد یافت.

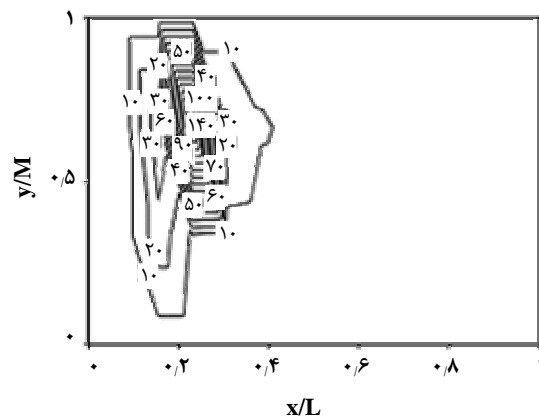
با بررسی‌های به عمل آمده و ارایه شده، نشان داده شده است که این نحو نگرش در بررسی توزیع ناخالصی در شرایط مشابه می‌تواند به عنوان روشی قابل توجه مورد استفاده قرار گیرد.

فهرست علائم

VVER	نوع روسی نیروگاه اتمی با آب تحت فشار
PGV	مولد بخار افقی نیروگاه اتمی VVER
ρ	چگالی (kg m^{-3})
x	متغیر طول (m)
y	متغیر عرض (m)
L	طول مولد بخار (m)
M	عرض مولد بخار (m)



شکل ۱۷- توزیع ناخالصی در طرح بهینه شده.



شکل ۱۸- توزیع ناخالصی در طرح بهینه شده، توزیع آب تغذیه در نیمه گرم مولد بخار، عددهای روی منحنی‌ها نسبت ناخالصی به ناخالصی محلول در آب تغذیه را نشان می‌دهد.

جدول ۲- خلاصه‌ی نتیجه‌های به‌دست آمده از محاسبه‌های توزیع ناخالصی محلول در مولد بخار PGV-۱۰۰۰.

مدل	محل زیرآب	نحو توزیع آب تغذیه	حداکثر ناخالصی S/Spv	متوسط ناخالصی S _{av} /S _{pv}
طرح استاندارد PGV-۱۰۰۰	از چند نقطه (شکل ۱)	یکنواخت	۲۷۰	۹۸
طرح استاندارد PGV-۱۰۰۰	از ناحیه حداکثر ناخالصی محلول	یکنواخت	۱۸۰	۲۲
مدل بهینه شده PGV-۱۰۰۰	از ناحیه حداکثر ناخالصی محلول	دوسوم در نیمه گرم و یک سوم در نیمه سرد	۱۵۲	۴۰
مدل بهینه شده	از ناحیه حداکثر ناخالصی محلول	تمام آب تغذیه در نیمه گرم به صورت یکنواخت	۱۶۰	۲۲

\dot{m}_{sav}	بخار تولیدی بر واحد سطح ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-2}$)	v_x	سرعت در جهت x (ms^{-1})
k_c	نسبت دبی جرمی آب منتقل شده	c	شدت چشمه بر واحد حجم (s^{-1})
	روی صفحه مشبک نسبت به دبی بخار تولیدی	φ	تابع جریان ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
k	ضریب حلالیت ناخالصی در بخار	\dot{m}_{pv}	دبی جرمی آب تغذیه ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-2}$)
s	ناخالصی در مولدبخار (mgkg^{-1})	\dot{m}_v	دبی جرمی بخار ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-2}$)
S_{pv}	ناخالصی آب تغذیه (mgkg^{-1})	ω	رطوبت بخار
S_{av}	متوسط ناخالصی در صفحه‌ی مشبک (mgkg^{-1})	\dot{m}_p	دبی جرمی زیرآب ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-2}$)
S_p	ناخالصی محلول در بلوداون (mgkg^{-1})	\dot{m}_r	دبی جرمی رسوب ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-2}$)
		\dot{m}_{av}	دبی جرمی روی صفحه مشبک ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-2}$)
		\dot{m}_w	دبی جرمی عبوری در هر مقطع از کانال ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-1}$)
		\dot{m}_s	بخار تولیدی بر واحد سطح ($\text{kgs}^{-1} \text{m}^{-2}$)

تاریخ دریافت: ۱۵/۱۱/۱۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۶/۲/۱۰

مراجع

- [1] Romm, E.I., Chemical Displacement and Staged Evaporation in Steam Generators, Doctorate Thesis, All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI), p. 175 (1938).
- [2] Стыркович М.А. ,О применении ступенчатого испарения при кипении котлов конденсатом. *Электрические станции*, С 75 (1951).
- [3] Жирнов Н. И.,К от А.А. Непрерывная из котлов лысого давления. *Электрические станции*, . № 2, С. 23-27 (1965).
- [4] Марголова Т. Х. Реконструкция котлов леффлева для перевода их на ступенчатое испарение. *Тр. Ин-та / МЭИ – 1955 – Вып. 25*. С. 133-143
- [5] Горбуров В. И., Эорин В. М., Хритонов, Ю. В., О контроле водного режима парогенерирующих устройств. *Теплоэнергетика*, № 7, С. 25 (1994).
- [6] Сирияпина Л. А. , Маргулова Т. Х., Повышение эффективности продувки парогенераторов АЭС с ВВЭР. *Теплоэнергетика*. № 6, С. 59-60 (1984).
- [7] Гуцев Д. Ф. , Козов Ю. В., Некрасов А. В., Титов В. Ф., Тараконов Г. А., О концентрации растворимых примесей в водяном объеме парогенератора ПГВ-1000. *Теплоэнергетика* -№ 12, С. 62-63 (1987).
- [8] Слтников А. Ф. Эффективность продувки парогенераторов ПГВ-1000. *Теплоэнергетика*, С. 66-67 (1988).
- [9] Козлов Ю. В., Румянцев Л.К., Свистонов П. Е., Севастьянов, В. П. И др., Распределение растворимых примесей питательной воды в водяном объеме парогенератора ПГВ-1000 *Электрические станции*. - № 2, С, 33-37 (1992).
- [10] Козлов Ю. В. ,Свистонов П. Е., Траканов Г. А. И др., Исследование распределения солей в водяном объеме парогенераторов ПГВ-1000М с модернизированными системами раздачи питательной воды и продувки. *Электрические станции*. № 9, С. 30-32 (1991).

- [11] Gorburov, V.I., Zorin, V.M., Khritonov, U.V., Distribution Soluble Impurities in Water Volume of the Steam Generating Equipment, *Vestnik MPEI*, **3**, p. 41-50 (1996).
- [12] Gorburov, V.I., Zorin V.M., Doctors, Kaverznev M.M., Khaaneki, M., Engineers Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Staged Evaporation in Steam-Generating Units, *Thermal Engineering*, **3**, p. 55 (1997).
- [13] В.А. Григорьев, В. М. Зорин, “Тепловые и атомные электрические станции”, М. Энергоиздат, С625 (1982).

[۱۴] هولمن جی.پی؛ ترجمه افضل، محمدرضا؛ انتقال گرما، مرکز نشر دانشگاهی (۱۳۷۸).