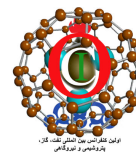


## اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی

مرکز همایش های بین المللی هتل المپیک تهران



# مروری بر ضربه قوچ در سیستم های تولید بخار و راهکارهای عملی جلوگیری از بوجود آمدن آن

اسماعیل بهمیاری کارشناس ارشد مهندسی مکانیک<sup>۱</sup>

علی صمدی افشار کارشناس ارشد مهندسی شیمی<sup>۲</sup>

### چکیده

ضربه قوچ بر قوانین فشار، تغییرات آبی یا تغییرات سرعت جریان و شرایط زمانی و مکانی حرکت سیال استوار است. در بعضی از سیستم های هیدرولیکی تخت فشار پدیده ضربه قوچ با ایجاد موج های سریع، زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی می شود. گاهی اوقات قدرت تخریبی این موج های فشار به حدی است که نتایج و خیمی به بار می آورد. ترکیب خطوط لوله در سیستم های انتقال و شبکه های توزیع، خرابی و شکسته شدن شیرها، دریچه های کنترل و پمپ ها از نمونه های بارز تأثیر این پدیده می باشد. به همین دلیل در این مقاله ابتدائات مخرب ضربه قوچ بر سیستم های تولید بخار بررسی شده و در ادامه شرایط بوجود آمدن این پدیده در یک سیستم تولید بخار توضیح داده شده است و نهایتاً راه حل هایی جلوگیری از بوجود آمدن این پدیده ارائه شده است. در ادامه نیز مدل ریاضی ضربه قوچ در جریان های تک و دو فازی برای شبیه سازی و محاسبه میزان ضربه به سیستم بیان شده است.

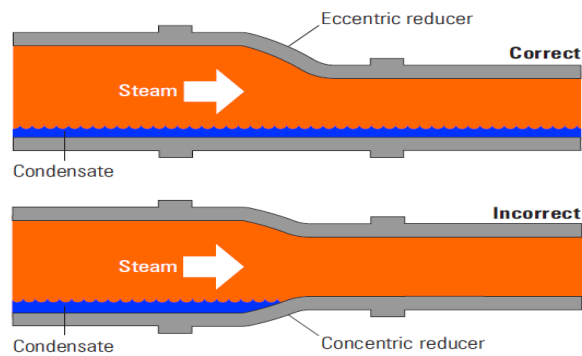
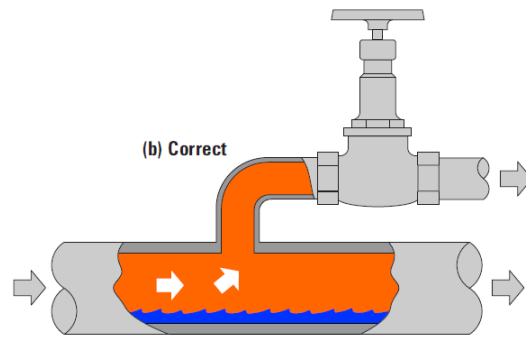
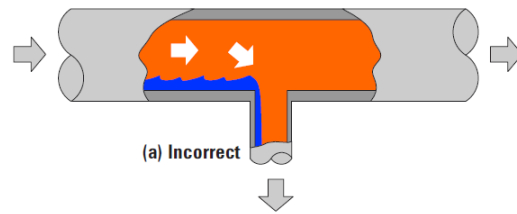
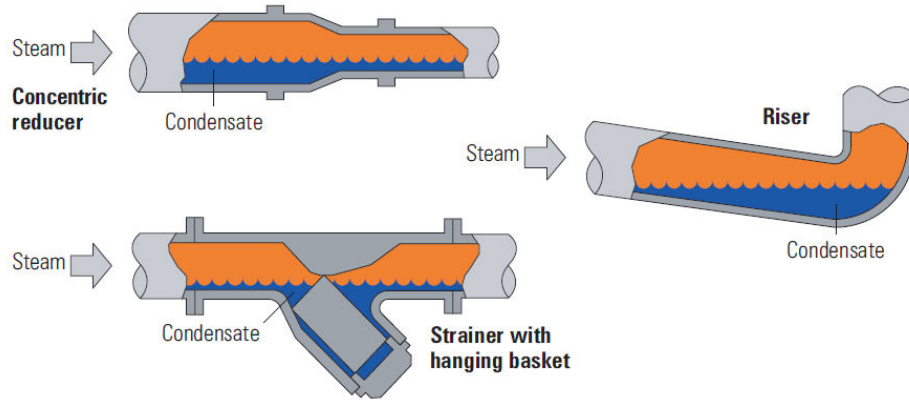
واژه های کلیدی: ضربه قوچ - کاندنس برگشتی - تله بخار - موج کاندنس - Flash steam - سیستم های دوفازی

### 1- مقدمه

ضربه قوچ هیچوقت یک پدیده عادی نیست و باید بلافاصله برطرف شود. درک طبیعت و شدت این پدیده در سیستم بخار و کاندنس باعث جلوگیری از بوجود آمدن نیروهای مخرب و ارتعاشات می شود. درک بیشتر منجر به وضع اقدامات پیشگیرانه در طراحی سیستم، راه اندازی سیستم و تعمیرات و نگهداری سیستم بخار، کمک به ایمنی پرسنل، کمک به کاهش هزینه تعمیرات و کاهش مدت از کار افتادگی سیستم، می شود. ضربه قوچ در مخرب ترین حالت خود می تواند باعث زخمی شدن یا مرگ پرسنل شود. برخی افراد اشتباهات معتقدند که این پدیده اجتناب ناپذیر و جزئی از سیستم بخار و کاندنس است، که این کاملاً اشتباه است زیرا اگر سیستمی بدرستی طراحی و راه اندازی شود، این پدیده هرگز در آن بوجود نمی آید. شکل (1) نمونه هایی از piping اشتباه که باعث ایجاد ضربه قوچ می شوند و نحوه اصلاح آنها را نشان می دهد.

1- بهر برداری، پالایشگاه پنجم، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، ebahmyari@yahoo.com

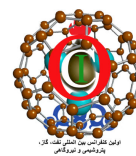
2- پژوهش، پالایشگاه پنجم، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، ali.samadiafshar@gmail.com



شکل 1- نمونه هایی از piping اشتباه که باعث ایجاد ضربه قوچ می شوند و نحوه اصلاح آنها.

## اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی

مرکز همایش های بین المللی هتل المپیک تهران



### 2- محل بوجود آمدن و تاثیرات ضربه قوچ بر روی سیستم

این پدیده می تواند در هر خط بخار یا کاندنس برگشتی ای اتفاق بیفتد. تاثیر آن می تواند در سیستم های ناهمگون یا دو فازی کاندنس و بخار بیشتر هم باشد. سیستم های دو فازی کاندنس شامل دو حالت می شوند، مایع (کاندنس) و بخار (Flash steam). مبدل ها، Heat tracing lines، خطوط اصلی بخار، خطوط برگشت کاندنس و برخی مواقع خطوط دیسچارج پمپ ها، نمونه هایی از خطوطی هستند که احتمال بوجود آمدن ضربه قوچ در آنها وجود دارد. مثال رایج این پدیده، صدا هایی هستند که در خطوط بخار اصلی در زمان راه اندازی سیستمی که بسرعت و بدون پیش گرم کردن براه می افتد، شنیده می شوند. زیرا در این حالت در مسیر یخار اصلی کاندنس تشکیل می شود و این کاندنس ها نمی توانند از سیستم خارج شوند، به همین خاطر بخار با کاندنس های تشکیل شده برخورد و ضربه قوچ بوجود می آید. نیروهای متناوب و ارتعاشاتی که این پدیده ایجاد میکند ممکن است باعث بروز مشکلات زیر شود:

1. خرابی اجزاء تله های بخار مانند از بین رفتن رزوه های اتصالات رزوه ای.
2. فشار زیاد به گیج های فشار که یکی از نتایج آن از کالیبره در آمدن آنهاست.
3. خمش اجزای سیستم.
4. ترک در بدنه تله های بخار.
5. شکستگی خطوط در محل اتصالات.
6. خرابی کنترل ولوها.
7. خرابی Tubing مبدل ها.
8. شکستگی خطوط.
9. جابجایی خطوط از محل تکیه گاه هایشان و همچنین خرابی تکیه گاه ها.

این نکته را باید در نظر داشته باشیم که ممکن است سرو صدای ضربه قوچ شنیده نشود ولی در حال اتفاق افتادن باشد. برای مثال ممکن است حباب های بخار کوچک باشند و ترکیدن آنها صدای کمی ایجاد کند، ولی همراه با شوک حرارتی باشد. این شوک حرارتی به تنهایی می تواند برای سیستم مشکل ایجاد کند. تحلیل ریشه ای خرابی سیستم های بخار نشان می دهد که 67% خرابی ها مربوط به این پدیده هستند.

### 3- شرایط ایجاد ضربه قوچ

شرایط شناخته شده ایجاد ضربه قوچ بصورت زیر هستند:

1. شوک هیدرولیکی
2. شوک حرارتی
3. شوک حاصل از جریان
4. شوک حاصل از اختلاف سرعت Flash steam و کاندنس

### 3-1- شوک هیدرولیکی

درصد کمی از مشکلات ضربه قوچ بر اثر شوک هیدرولیکی بوجود می آیند. این نوع می تواند درون شیر آب خانگی اتفاق بیفتد. بدین صورت که وقتی شیر آب باز می شود، آب مانند شفت صلبی به بیرون هدایت می شود. این شفت می تواند  $889.5 N$  آب با سرعت  $3.05 m/s$  باشد. وقتی شیر بطور ناگهانی بسته می شود، مانند این است که ناگهان  $889.5 N$  شفت صلب متوقف شود. این توقف مانند کوبیدن فولاد به ورق استیلی صدا می دهد. این شوک فشاری که حدوداً  $300 psi$  است به عقب بر می گردد و تا آنجایی به عقب می رود تا انرژی اش تلف شود.

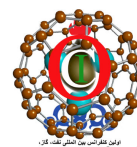
نمونه دیگری از این نوع در خط ساکشن و یا دیسچارج پمپ های سیستم های کاندنس اتفاق می افتد. معمولاً در دیسچارج پمپ ها چک ولو وجود دارد. وقتی که پمپ استارت و یا استاپ می شود، بدلیل وجود چک ولو که اجازه جریان تنها در یک جهت می دهد، باعث تغییر ناگهانی مقدار جریان می شود این باعث بوجود آمدن ضربه قوچ می شود. راه حل این مشکلات در این سیستم های نمونه، به آرامی بستن یا باز کردن شیر در مورد اول و در مورد دوم تنظیم چک ولو بطوری که به آرامی باز یا بسته شود.

### 3-2- شوک حرارتی

یک پوند بخار در  $0 bar$ ، حجمی معادل  $1600$  برابر حجمی که یک پوند آب در فشار یک اتمسفر اشغال می کند را اشغال می کند. این نسبت با افزایش فشار خط کاندنس بطور خطی کاهش پیدا می کند. وقتی حباب های بخار می ترکند حجم زیادی خالی می شود که این باعث ایجاد خلا در اطرافش می شود، نتیجتاً کاندنس ها با سرعت زیاد بسمت منطقه با فشار کم به حرکت در می آیند. در سیستم های کاندنس دوفازی ممکن است حباب های بخار زیر سطح کاندنس در خط کاندنس تشکیل شوند. برای مثال، ممکن است شاخه ای از طرف تله بخار به درون خط کاندنس و از طریق پایین آن وصل شود. فشار در خط کاندنس (با فشار پایین بالطبع دمای پایین) پایین تر از دمای  $Flash steam$  است. کاندنس حباب های بخار تشکیل شده را سرد و باعث ترکیدن ناگهانی آنها می شود. در حالی که این حباب ها می ترکند حجمی در زیر سطح کاندنس خالی می شود و باعث می شود کاندنس های اطراف بسرعت حجم خالی را به همراه صدایی مهیب پر کنند.

### 3-3- شوک حاصل از جریان

این حالت بدلیل کامل و درست خالی نکردن (Drain) خطوط بخار بعد و قبل از ایزولیشن ولوها یا کنترل ولوها بوجود می آید. برای مثال، یک ایزولیشن ولو خط بخار (به اندازه  $7.62 cm$  یا بزرگتر) را در نظر بگیرید که بدون این که کاندنس های تشکیل شده قبل از آن از سیستم خارج شوند و همچنین بدون اینکه خط پایین دستی آن Warm up شود، باز شود. چون خط پایین دست سرد است باعث بوجود آمدن مقدار زیادی کاندنس که با سرعت حرکت می کنند، می شود. این کاندنس ها درون خط کم کم جرم زیادی را تشکیل می دهند و باعث بوجود آمدن موجی از کاندنس با سرعت زیاد می شوند. این موج با سرعت زیاد درون خط حرکت می کند تا جایی که به یک Elbow یا ولو برسد، در این زمان ناگهان متوقف می شود که همین توقف ناگهانی باعث بوجود آمدن ضربه قوچ می شود. نمونه ای دیگر زمانی اتفاق می افتد که با باز کردن کنترل ولو جریانی از کاندنس و حباب هایی از بخار (Slug flow) با سرعت زیاد وارد تجهیزات شود. با برخورد حباب های بخار به دیواره تجهیزات می ترکند و به بدنه ضربه ایجاد می کنند. بعلاوه در این حالت شوک حرارتی هم با برخورد این جریان با کاندنس های سردتر و ترکیدن آنها اتفاق می افتد.



## 3-4- شوک حاصل از اختلاف سرعت Flash steam و کاندنس

این نوع ضربه قوچ، همانند شوک حاصل از جریان، در سیستم های دوفازی بخار و کاندنس بوجود می آید. این نوع زمانی اتفاق می افتد که بخار و کاندنس دارای سرعت های متفاوت درون سیستم با هم باشند. که این حالت در خطوط های برگشت کاندنس رایج است. در سیستم های دوفازی، سرعت بخار اغلب 10 برابر سرعت مایع (کاندنس) است. اگر دامنه موج جریان کاندنس زیاد شود و لوله را پر کند، موقتا بین بالادست و پایین دست بسته می شود. از آنجاییکه بخار روی کاندنس قرار دارد، نمی تواند عبور کند و فشار در پایین دست می افتد. این اختلاف فشار ایجاد شده باعث می شود تا این جریان کاندنس مانند یک پیستون درون سیلندر شتاب بگیرد. همچنان که جریان بطرف پایین دست می آید کاندنس بیشتری جاروب می کند تا اینکه به یک تغییر جهت جریان یا تغییر سطح مقطع مانند Elbow یا کنترل ولو برسد. در این حالت این جریان ضربه زیادی به آن محل وارد می کند. از آنجاییکه در بیشتر خطوط برگشت کاندنس جریان دوفازی داریم، ضروری است که اندازه خطوط برگشت کاندنس بدرستی طراحی شوند.



شکل 2- نمونه ای از موج کاندنس ایجاد شده در یک سیستم برگشت کاندنس

کاندنس معمولا به کمک نیروی جاذبه در پایین خط کاندنس جمع و بدلیل شیب ایجاد شده و همچنین سرعت بالای Flash steam بالای سر آن، جریان پیدا می کند. Flash steam بدلیل اینکه براساس اختلاف فشار حرکت می کند، سرعت بالایی دارد. Flash steam در خطوط برگشت کاندنس وقتی بوجود می آید که کاندنس با دما و فشار بالاتر وارد دیگر خطوط با فشار کاری پایین تر می شود. این فشار پایین باعث می شود تا درصدی از کاندنس ورودی به بخار تبدیل شود. همچنین اگر اندازه خطی که کاندنس به آن وارد می شود کوچکتر از خط اصلی باشد باعث می شود تا فشار Flash steam بالاتر رفته و با سرعت بالاتر حرکت کند. اتلاف حرارت در طول خط باعث می شود تا مقداری از Flash steam به کاندنس تبدیل شوند. برای کنترل این ضربه قوچ، باید از بسته شدن خط توسط موج کاندنس در سیستم های دوفازی جلوگیری کرد. در خطوط اصلی بخار تله های بخار بدرستی در جاهای مورد نیاز نصب و از صحت عملکردشان اطمینان پیدا کرد. اندازه خطوط کاندنس برگشتی باید طوری طراحی شود تا موج کاندنس نتواند باعث بسته شدن مسیر شود. طول خطوط افقی تا ورودی تله های بخار باید کمینه شود.

## 4- پیشگیری و رفع ضربه قوچ

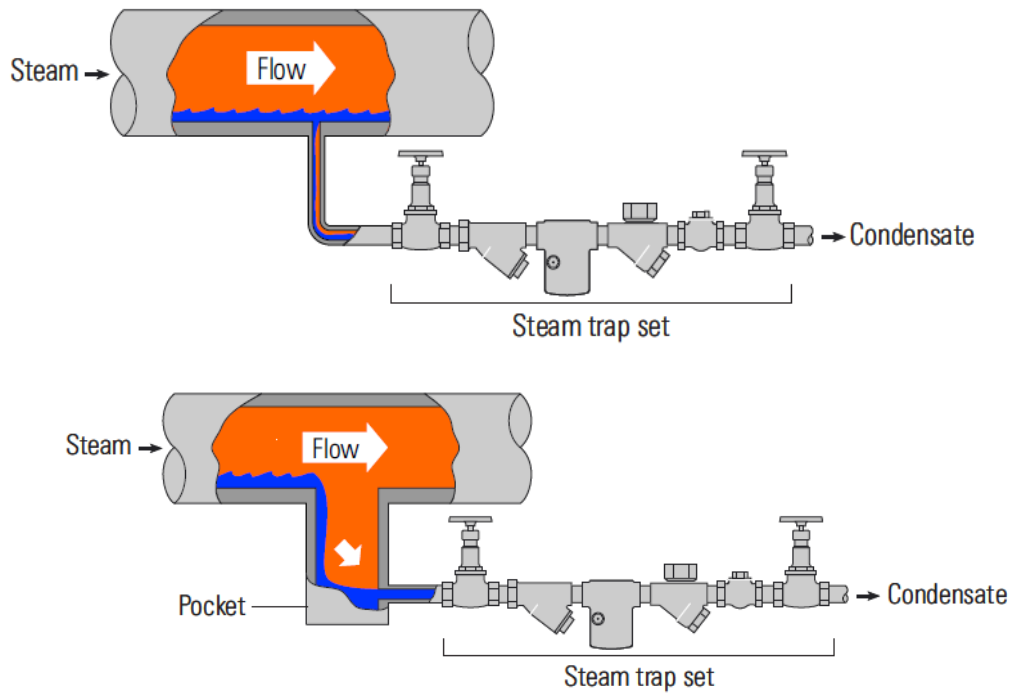
راه حل های زیادی برای حل این مشکل وجود دارند که مهمترین آنها در زیر آورده شده اند:

1. آموزش صحیح پرسنل
2. مطمئن شدن از اینکه سیستم درست طراحی شده یا نه.

3. تدوین یک SOP(Standard Operation Procedure) برای Startup و Shut down در زمان Normal operation

4. داشتن استاندارد نصب اجزاء سیستم بخار.

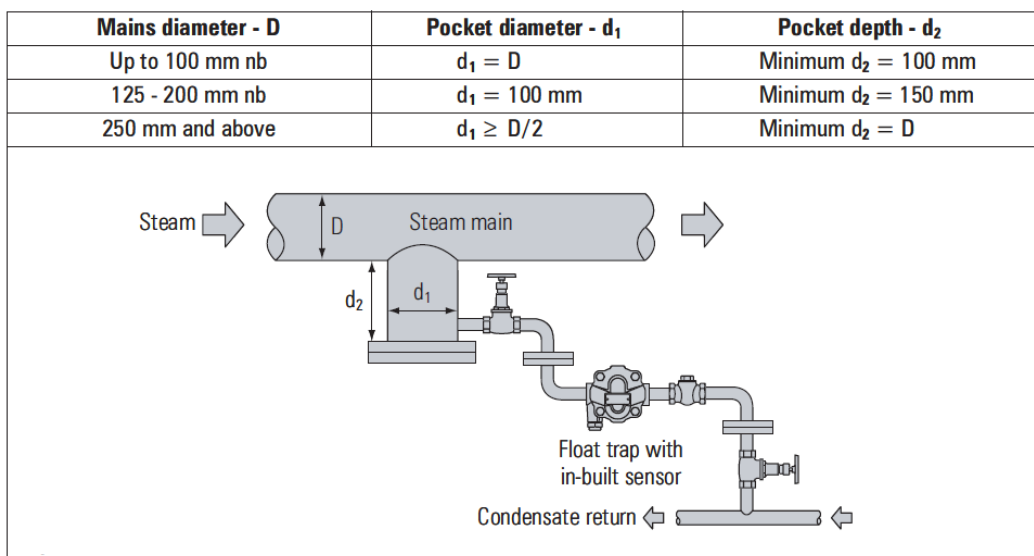
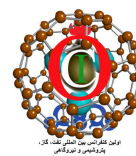
5. نصب صحیح تله های بخار در محل های مورد نیاز و همچنین انتخاب اندازه مناسب برای آنها. شکل (3) تله های بخاری را نشان می دهد که به ترتیب نادرست و درست انتخاب شده اند و همچنین شکل (4) نحوه انتخاب صحیح تله بخار را نشان می دهد.



شکل 3- الف: انتخاب نادرست اندازه تله بخار ب: انتخاب صحیح اندازه تله بخار

# اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی

مرکز همایش های بین المللی هتل المپیک تهران



شکل 4- چگونگی انتخاب اندازه تله بخار

6. نصب صحیح شاخه های کاندنس برگشتی در محل های اتصال به شاخه اصلی برگشت کاندنس. بدینصورت که شاخه فرعی حتما باید از بالای شاخه اصلی به آن متصل شود تا از تشکیل حباب در زیر کاندنس جلوگیری شود. شکل (5) اتصال صحیح شاخه فرعی به اصلی کاندنس برگشتی و شکل (6) اتصال نادرست شاخه فرعی به اصلی کاندنس برگشتی را نشان می دهند.



شکل 5- اتصال صحیح شاخه فرعی به اصلی کاندنس برگشتی



شکل 6- اتصال نادرست شاخه فرعی به اصلی کاندنس برگشتی

7. برای ایزولیشن ولوهای بزرگتر از  $7.62\text{ cm}$  از Warm up valve استفاده کنید. هیچوقت ولوی را به مقدار کمی باز نگه ندارید، به امید اینکه از بوجود آمدن ضربه قوچ جلوگیری کنید زیرا باعث نایمن شدن عملیات می شود.
8. عایق های مسیر را چک و تعمیر کنید زیرا باعث ذخیره انرژی و کاهش جمع شدن کاندنس می شوند.
9. انتخاب اندازه صحیح خط برگشت کاندنس ضروری است زیرا کوچک انتخاب کردن اندازه خط سهم عمده ای در بوجود آمدن ضربه قوچ می شود.
10. کنترل ولوهای مسیر بخار حتما در بالادستان باید تله بخار برای جلوگیری از تشکیل کاندنس داشته باشند.
11. همیشه برای Gravity drain از کنترل ولو استفاده کنید.

## 5- مدل ریاضی ضربه قوچ

پدیده ضربه قوچ می تواند هم در سیستم های تک فاز و هم دو فاز ایجاد شود. بررسی ها نشان می دهند که نیروهای وارده از طرف ضربه قوچی که در سیستم دو فاز ایجاد می شود بیشتر از سیستم تک فاز است.

### 5-1- سیستم تک فاز آب

نمونه ای از ضربه قوچ در سیستم آب زمانی اتفاق می افتد که دو پمپ داشته باشیم و یکی در سرویس باشد و دیگری Standby باشد. در خروجی هر پمپ یک چک ولو داریم. وقتی یک پمپ خاموش و پمپ Standby روشن می شود، در لحظه همین خاموش و روشن شدن پمپ ها، در پمپی که خاموش می شود چک ولو آن بسته می شود و این باعث تغییر ناگهانی جریان سیال می شود و این باعث ضربه زدن به سیستم می شود. مدل کردن اینگونه سیستم ها [1] بصورت زیر انجام می شود.

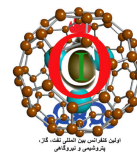
یک جریان یک بعدی تراکم پذیر را که درون یک لوله جریان دارد را در نظر بگیرید.

بالانس جرم:



# اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی

مرکز همایش های بین المللی هتل المپیک تهران



$$\frac{Du}{Dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

بالانس مومنتم:

$$\frac{Du}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{fu|u|}{2D} + g \sin \theta = 0 \quad (2)$$

بالانس انرژی:

$$\frac{Dh}{Dt} - \frac{1}{\rho} \frac{Dp}{Dt} - \frac{fu^2|u|}{2D} + \frac{\dot{q}}{\rho} = 0 \quad (3)$$

که در آنها  $\rho$  چگالی سیال،  $u$  سرعت سیال،  $p$  فشار سیال،  $h$  آنتالپی مخصوص،  $f$  ضریب اصطحکاک،  $\dot{q}$  شار حرارت واحد جرم،  $D$  قطر لوله و  $\theta$  زاویه شیب لوله، هستند.

برای حل این دستگاه معادلات روش های مختلفی وجود دارد که یکی از این روش ها MOC(Method Of Characteristic) است. البته برای حل این دستگاه به شرایط اولیه سیستم از قبیل فشار، سرعت و دما(آنتالپی) در سیستم قبل از ، برای مثال راه اندازی پمپ، و همچنین شرایط مرزی، نیاز داریم.

## 5-2- سیستم های دوفازی کاندنس و بخار

نمونه هایی از این نوع در خطوط کاندنس برگشتی که قبلا توضیح داده شد بوجود می آید. مدل ریاضی این سیستم ها [2] بصورت زیر انجام می شود.

بالانس جرم:

$$\frac{Du}{Dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

بالانس مومنتم:

$$\frac{Du}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{fu|u|}{2D} + f_t \text{sign}(u) \left| \frac{\partial u}{\partial t} \right| + g \sin \theta = 0 \quad (5)$$

بالانس انرژی:

$$\frac{Dh}{Dt} - \frac{1}{\rho} \frac{Dp}{Dt} - \frac{fu^2|u|}{2D} - f_t \text{sign}(u) \left| \frac{\partial u}{\partial t} \right| + \int_{x_i-\varepsilon}^{x_i+\varepsilon} \frac{\dot{q}_{Aa_i}}{\rho} \delta(x - x_i) dx = 0 \quad (6)$$

عبارت آخر در معادله انرژی (6) شار حرارتی بر واحد جرم تغییر فاز را نشان می دهد. بدینصورت که:

$$\dot{q}_A = h_{cond}(T_g - T_1) \quad (7)$$

روش حل این دستگاه هم مانند سیستم قبلی است.

## 6- نتیجه گیری

ضربه قوچ هم در سیستم های تک فازی و هم دوفازی بوجود می آید. اثرات آن در سیستم های دوفازی مخرب تر است. در سیستم های تک فازی بیشتر بدلیل تغییر ناگهانی جریان سیال بوجود می آید که راه حل آن بطور کلی تنظیم ولو خروجی بطوریکه به آرامی عکس العمل نشان دهد. ضربه قوچ در سیستم های دوفازی ممکن است بدلیل ایجاد کاندنس در خطوط اصلی بخار و عمدتاً بدلیل ایجاد Flash steam در خطوط کاندنس برگشتی بوجود می آید. از مهمترین راه حل ها می توان به نصب تله بخار با اندازه و مکان مناسب، طراحی اندازه صحیح برای خط کاندنس برگشتی، نصب تله یخار درست قبل از کنترل ولوها و اتصال شاخه فرعی کاندنس برگشتی به خط اصلی از بالای آن و بسیاری از راه حل های دیگر، اشاره کرد.

## 7- منابع

1. Tijsseling, A.S., (2007), Water hammer with fluid-structure interaction in thick-walled pipes, Computer and structure 85, pp. 844-851.
2. Wenxi, Tian, et al., (2008), Numerical simulation and optimization on valve-induced water hammer characteristics for parallel pump feed water system, Annals of Nuclear Energy 35, pp.2280-2287.
3. Sharp B.B., (1996), Water hammer practical solutions, Butterworth-Heinemann, NJ.