

## ارزیابی کارائی نرم‌افزارهای Hytran، Hammer و روش حل معادله ژاکوفسکی برای تحلیل ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ سد حسنلو

پریسا نظری<sup>1\*</sup> و حسین رضایی<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 91/10/25 تاریخ پذیرش: 92/03/19

1- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [pnazari1363@gmail.com](mailto:pnazari1363@gmail.com)

### چکیده

از انواع جریان‌های هیدرولیکی در لوله‌ها، جریان‌های میرا است که به طور خاص ضربه قوچ نامیده می‌شود. جریان‌های میرا از یک حالت ماندگار شروع شده و به وضعیت ماندگار دیگری خاتمه می‌کنند. روش‌های محاسبه متعددی جهت بررسی پدیده ضربه قوچ از سال 1950 معرفی و به کار برده شده‌اند. یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها، معادله ژاکوفسکی می‌باشد که به عنوان روش حل دستی انتخاب گردیده است. از آنجائی که اغلب نرم‌افزارهای مورد استفاده در طراحی خطوط انتقال مانند نرم‌افزارهای واتر کد و واتر جیمز، به دلیل عدم در نظر گرفتن مومنتم، قادر به محاسبات جریان ناپایدار نمی‌باشند، نیاز به راه‌اندازی نرم‌افزارهای خاص جریان ناپایدار و بالاخص ضربه قوچ حائز اهمیت می‌نماید. نرم افزارهای *Hytran* و *Hammer* در حقیقت شبیه‌ساز عددی پدیده هیدرولیکی ضربه قوچ در مجاری آب، فاضلاب و صنعت می‌باشند. در این تحقیق توانائی این نرم‌افزارها در مقایسه با روش حل معادله ژاکوفسکی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور حداکثر فشار ضربه قوچ در حالت خاموشی ناگهانی پمپ بدون به کارگیری تجهیزات کنترل در خط لوله توسط نرم‌افزارهای *Hytran* و *Hammer* و سپس با استفاده از معادله ژاکوفسکی مطالعه می‌گردد. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد حل معادله ژاکوفسکی میزان ضربه بیشتری را نشان می‌دهد به طوری که نرم-افزارهای *Hytran* و *Hammer* میزان ضربه را نسبت به حل معادله ژاکوفسکی به ترتیب 23 و 32 درصد کمتر برآورد می‌نمایند.

واژه‌های کلیدی: ضربه قوچ، معادله ژاکوفسکی، *Hytran*، *Hammer*.

## Efficiency Evaluation of Hammer & Hytran Software and Joukowski Equation Solution in Analysis of Water Hammer at Hasanlu Dam Pumping Station

P Nazari<sup>1\*</sup> and H Rezaie<sup>2</sup>

Received: 14 January 2013 Accepted: 9 June 2013

<sup>1</sup>-M.Sc. Student, Dept. of Water Engin., Urmia Univ. Iran

<sup>2</sup>-Prof., Water Engin. Sci. Dept. Faculty of Agric., Univ. of Urmia. Iran

\*Corresponding Author Email: [pnazari1363@gmail.com](mailto:pnazari1363@gmail.com)

### Abstract

One of the hydraulic flow types in pipes is transient flow, which is specifically called water hammer. Transient flows start from a steady state and end to another steady flow. Several calculation methods introduced to study water hammer phenomenon, and have been used since 1950. One of the applied methods is Joukowski equation, which has been selected as the manual solution in this study. Because of ignorance of momentum in most of the pipeline design software such as WaterCad and WaterGems, they can not calculate unsteady flow. So it is important to launch specific software to calculate unsteady flow especially water hammer. In fact Hammer and Hytran software are numerical simulations of hydraulic phenomenon of water hammer in conduits of water, sewage and industrial sewage. In this study the ability of these software are compared with Joukowski equation solution method. For this purpose maximum pressure of water hammer in pump at sudden shut-off condition with no control equipment is studied using Hammer & Hytran software and Joukowski equation. Results show an overestimated water hammer pressure in Joukowski equation solution. Hytran and Hammer software calculate the surge pressure rate 23% and 32% less than Joukowski equation, respectively.

**Keywords:** Hammer, Hytran, Joukowski equation, Water hammer

جریان‌های ثقیلی، پدیده ضربه قوچ با ایجاد موج‌های

سریع، زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی می-

شود. قدرت تخریبی این موج‌های فشار به حدی است که

مقدمه

در بعضی از سیستم‌های هیدرولیکی تحت فشار،

نظیر خطوط انتقال آب، شبکه‌های توزیع و لوله‌های آب

منتهی به توربین‌ها، تونل‌های آبی، سیستم‌های پمپاژ و

روش‌های موجود برای حل معادله‌های ضربه قوچ عبارتند از: روش ترسیمی، روش حسابی، روش جبری، روش مشخصه.

در مقاله حاضر جهت بررسی ضربه قوچ و تجهیزات کنترل آن از مدل‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزارهای Hytran و Hammer؛ که از قدرتمندترین ابزارها جهت تحلیل سیستم‌های مرکب از پمپ و شبکه لوله‌ها هنگام انتقال از یک حالت ماندگار به حالت ماندگار دیگر می‌باشند، استفاده شده است. ژاکوفسکی (1897) یک سری آزمایشات در مسکو بر روی لوله‌های تامین آب آشامیدنی به طول‌ها و قطرهای زیر انجام داد: لوله 7620 متری به قطر 50 میلی‌متر، لوله 305 متری به قطر 101/5 میلی‌متر و لوله 305 متری به قطر 152/5 میلی‌متر. وی گزارشات کلاسیک خود را بر پایه مطالعات آزمایشگاهی و تئوری ضربه قوچ چاپ کرد. ژاکوفسکی رابطه‌ای برای سرعت موج در لوله‌ها با لحاظ نمودن الاستیسیته آب و لوله ارائه نمود، که در ادامه شرح داده می‌شود (برگانت و همکاران 2004).

معادلات اصلی ضربه قوچ ترکیبی از معادلات زیر می‌باشند:

1- معادله مومنتم در محاسبه ضربه قوچ:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \cdot \frac{dz}{ds} + \frac{f}{2D} \cdot v|v| = 0 \quad [1]$$

که در آن  $v$  سرعت جریان ماندگار،  $p$  فشار آب،  $f$  ضریب زبری،  $D$  قطر لوله،  $\rho$  چگالی سیال (آب) و  $g$  شتاب گرانش زمین می‌باشند.

2- معادله پیوستگی در محاسبه ضربه قوچ:

$$a \cdot \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad [2]$$

که در آن  $a$  سرعت موج می‌باشد (بی نام 1387، استریتز و وایلی 1987، وایلی و استریتز 1993).

ژاکوفسکی (1897) با معادلات مومنتم و پیوستگی، ارتباط بین کاهش سرعت و افزایش فشار را نشان داد. آلیوی (1913) تئوری عمومی ضربه قوچ را ارائه داد و بنیانگذار تئوری ضربه قوچ شناخته می‌شود.

همه ساله خسارات زیادی را بر سیستم‌های انتقال آب تحمیل می‌نماید (نجمائی 1369).

با وجود آنکه در حال حاضر مکانیزم تشکیل ضربه قوچ امری شناخته شده می‌باشد، اما به دلیل وسعت و گستردگی ابعاد مسئله ضربه قوچ و وجود شرایط گوناگون مکانی و زمانی در این فرآیند، دامنه تحقیقات در این زمینه ادامه داشته و هنوز دنیای وسیعی از مجهولات و مشکلات ناشی از ضربه قوچ در برابر محققین قرار دارد و کوشش برای حل و فصل آنها می‌تواند زمینه مناسبی را برای تحقیقات ایجاد نماید. به بیان دیگر، پدیده ضربه قوچ که در نتیجه تغییرات دبی یا سرعت رخ می‌دهد، مقدار معینی نیرو ایجاد می‌کند که به صورت موج با سرعت ثابت در خط لوله جریان، به طرف بالادست یا پائین دست، حرکت می‌نماید. این موج در مسیر حرکت خود به تدریج مستهلک می‌گردد و پس از مدتی که از رفت و برگشت موج سپری شد، این سیستم ناپایدار یا زودگذر به حالت پایدار دیگری می‌رسد که قابل پیش بینی می‌باشد (تریت 1369، احتشام منش 1389، حسن زاده 1389). مطالعه جریان‌های ناپایدار<sup>1</sup> در پروژه‌های مهندسی خط لوله و ایستگاه‌های پمپاژ از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند. به طور کلی تجزیه و تحلیل جریان‌های ناپایدار در سیستم‌های مختلف به دو روش عمده زیر انجام می‌شود: الف- سرج<sup>2</sup> ب- ضربه قوچ (آشفته 1369، نجمائی 1369، چاودری 1987).

جریان ناپایدار در حقیقت پاسخ سیال به تغییرات مشخصات هیدرولیکی کنترل کننده آن می‌باشد. در جریان سرج که به جریان شبه دائمی معروف است، تغییرات دبی و فشار با زمان آهسته و تدریجی می‌باشد و در فواصل زمانی کوتاه جریان یکنواخت فرض می‌گردد (بی نام 1383).

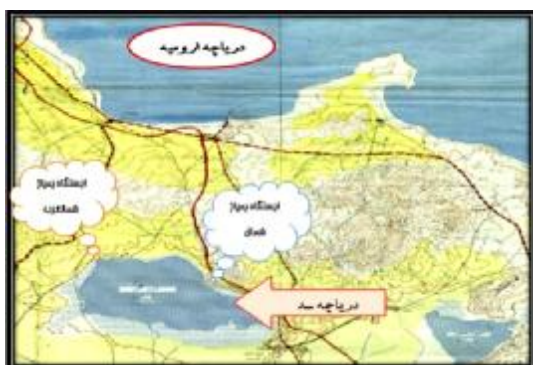
<sup>1</sup>Unsteady flow

<sup>2</sup> Surge

شلیس (2011) انجام گردید. زار (1978) با مقایسه نتایج پدیده ضربه قوچ از نرم افزار *Hytran* و مشاهدات صورت گرفته از سیستم هیدرولیک آزمایشگاهی متشکل از یک مخزن ساده و یک پمپ، مشابه بودن 80 درصد نتایج را تأیید نموده و حساسیت نرم افزار را به کنترل زمان بسته شدن شیر و جریان پایدار در سیستم پیش بینی نمود. هدف از این تحقیق بررسی پدیده ضربه قوچ در خطوط انتقال آب از ایستگاه‌های پمپاژ شمال و شمال غرب سد حسنلو به اراضی پائین دست می‌باشد. بدین ترتیب که تمامی خطوط انتقال در حالت خاموشی ناگهانی پمپ توسط نرم افزارهای *Hammer* و *Hytran* و معادله ژاکوفسکی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

#### مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی در غرب استان آذربایجان غربی و حد فاصل شهرستان نقده - اشنویه واقع گردیده است. سد حسنلو جهت ذخیره سازی آب رودخانه گدارچای به فاصله 12/7 کیلومتری خارج از بستر رودخانه گدار در محدوده تالاب شور گل با اهداف آب کشاورزی، پرورش ماهی و تفریحات سالم احداث شده است.



شکل 1- موقعیت جغرافیائی منطقه طرح.

شکل 1 موقعیت جغرافیائی منطقه طرح و محل قرارگیری دو ایستگاه پمپاژ سد مذکور را نمایش می‌-

استفنون (2002) برای اولین بار معادله نسبتاً دقیقی در ارتباط با محاسبه قطر ورودی و خروجی مخزن ضربه گیر تحت فشار ارائه داد. البته امروزه بیشتر از مبانی پدیده ضربه قوچ بر روی نرم افزارهای محاسبه آن تاکید می‌گردد. به طور مثال؛ نورمن لاوگان (2003) برنامه ای تحت عنوان *Hytran* جهت آنالیز هیدرولیک جریان غیرماندگار در خطوط لوله انتقال سیال ارائه داده است. همچنین مقالاتی که والسکی و وُو (2008) در رابطه با حل دقیق ضربه قوچ با روش مشخصه‌ها تدوین نمودند منجر به ارائه نرم افزار *Hammer* گردید. حسن زاده و فاضلی پایدار (1381) کاربرد روش مشخصه در تحلیل پدیده ضربه قوچ ایستگاه پمپاژ سد نهند تبریز را بررسی کردند. حسن زاده و عباسی (1387) تحلیل کامپیوتری پدیده ضربه قوچ در تاسیسات توربین برق آبی را ارائه نمودند. مشکلات ناشی از ضربه قوچ در خط انتقال آب شهر لامرد استان فارس توسط نامداری و طالب بیدختی (1387) بررسی و معرفی شد. سلیمانی (1387) حداکثر ضربه قوچ را به عنوان خطر سازترین عامل در طرح پمپاژ رودخانه کوهرنگ به چشمه مروارید مورد بررسی قرار داد. اکبری و فصیحی فرد (1390) پدیده ضربه قوچ و راهکارهای کاهش تخریبات این پدیده را بررسی نمودند. وُو و همکاران (2011) ضربه قوچ را در شبکه بررسی و حدود تحمل شبکه نسبت به فشار اعمال شده از پدیده ضربه قوچ را پیشنهاد نموده‌اند. مدل شبه دو بعدی مناسبی برای مشاهده مشکلات ایجاد شده توسط ضربه قوچ برای خط انتقال آب شامل فشارهای مثبت و منفی غیر قابل تحمل برای خط لوله توسط ژاو و همکاران (2003) معرفی و تحلیل شد. فونتانا و همکاران (2012) در بررسی کاهش تلفات و تولید انرژی در شبکه‌های توزیع آب یکی از علل مهم تلفات را رخداد ضربه قوچ و کاویتاسیون در شبکه معرفی نموده‌اند. ارائه تست‌های فیزیکی برای برآورد سرعت موج پدیده ضربه قوچ در لوله‌ها بر اساس صلب بودن جداره توسط هاچیم و

لوله الاستیک باشد تغییر شکل می‌دهد (حسن زاده و همکاران 1382). آب در داخل لوله از مخزن به سوی شیر فلکه و با فشار عادی و سرعت معمول جاری خواهد شد؛ با بستن آبی و سریع شیرفلکه یک سیکل چهار حرکتی با زمان برابر  $(4L/Vp)$  برای پدیده ضربه قوچ به وجود می‌آید. امواج فشاری ایجاد شده سیکل-های دیگری نیز در پیامد خواهند داشت، لکن اصطکاک، انرژی را کاهش داده و امواج فشاری به طور تدریجی از بین خواهد رفت. اکنون مقدار فشار اضافی ایجاد شده در اثر ضربه قوچ را می‌توان محاسبه نمود (تربیت 1369).

ژاکوفسکی (1897) با فرض یک استوانه آب به قطر  $2r$  و با ارتفاع  $ds$  با یک لوله که در انتهای آن یک شیر واقع شده است؛ و با بستن آبی شیر و استفاده از مدول الاستیسیته حجمی آب، تنش ایجاد شده در جدار لوله، مدول الاستیسیته جدار لوله و فرمول‌های نیرو و جرم، سرعت موج فشاری در لوله آب را محاسبه نمود.

$$a = Vp = \sqrt{\frac{Kg}{g} \frac{l}{l + \frac{KD}{E} e}} \quad [3]$$

سرعت انتشار امواج فشاری در سراسر محیط مایعی است که مدول الاستیسیته آن  $K$  و وزن مخصوص آن  $g$  است. در رابطه 3،  $D$  قطر داخلی لوله  $(mm)$ ،  $e$  ضخامت جداره لوله  $(mm)$  و  $E$  مدول الاستیسیته جداره لوله  $(N/m^2)$  می‌باشد. همچنین زمان رفت و برگشت موج فشاری از رابطه 4 محاسبه می‌شود:

$$t_w = \frac{2L}{a} \quad [4]$$

که در آن  $L$  طول لوله  $(m)$  است.

ژاکوفسکی (1897) طی تجربیات فراوان ثابت نمود، در صورتی که  $t_c$  که مشخصه زمان بستن شیر است، بزرگتر از  $t_w$  باشد برای خط لوله و مجاری خطراتی را ایجاد نمی‌نماید، در غیراینصورت موجب تخریب خطوط لوله، پمپ‌ها، فلکه انتهای خط لوله خواهد شد (تربیت 1369، آشفته 1369).

دهد. ایستگاه پمپاژ شمال شامل دو خط لوله 1000 میلی‌متری و 1400 میلی‌متری، و ایستگاه پمپاژ شمال غرب دارای خط لوله 1200 میلی‌متری می‌باشد. ایستگاه پمپاژ شمال؛ که دبی  $3/48$  مترمکعب بر ثانیه را پمپاژ می‌کند؛ شامل دو خط انتقال در سالن اصلی می‌باشد. یک خط انتقال شامل 7 پمپ اصلی و 2 پمپ غیراصلی می‌باشد که به لوله‌ای به قطر 1400 میلی‌متر پمپاژ می‌کند و خط انتقال دیگر شامل 5 پمپ اصلی و 1 پمپ غیراصلی می‌باشد که لوله‌ای به قطر 1000 میلی‌متر پمپاژ می‌کند. ایستگاه پمپاژ شمال غرب نیز دبی  $1/93$  متر مکعب بر ثانیه را از طریق 7 پمپ اصلی و 2 پمپ غیر اصلی لوله‌ای به قطر 1200 میلی‌متر پمپاژ می‌کند.

#### معادله ژاکوفسکی برای ضربه قوچ

توقف ناگهانی جریان مایع در یک لوله، سبب افزایش فشار در خط لوله یا مجرائی است که آب بصورت کاملاً پر در آن حرکت می‌نماید. این افزایش فشار در امتداد خط لوله بین مخزن آب و شیرفلکه حاصل می‌گردد در بعضی از موارد افزایش فشار ممکن است آن‌چنان زیاد باشد که موجب شکستگی لوله گردد، لذا لزوم تعیین قانونی حاکم بر موضوع ضربه قوچ در یک لوله مهم می‌باشد. ژاکوفسکی به منظور درک بهتر مفهوم ضربه قوچ حادث در یک لوله شرایط آزمایشگاهی تعریف شده‌ای شامل یک مخزن آب که آب را توسط لوله‌ای به قطر ثابت انتقال می‌دهد و یک شیر فلکه که در انتهای خط لوله مستقر گردیده است، بوجود آورد (استریرتر و واپلی 1987).

تحت شرایط معمول آب در داخل لوله بصورت پایدار و دائمی حرکت می‌نماید، سرعت جریان آب در لوله  $V$  است، چنانچه شیرفلکه بطور آبی و سریع بسته شود، ذرات آب بلادرنگ از سرعت  $V$  به سرعت 0 کاهش می‌یابد. چنانچه جرم کل آب در لوله صلب جاری باشد، تمام ذرات آب بطور آبی به حالت سکون در آمده و موجب برقراری فشار بسیار زیادی در سراسر لوله می‌گردد. لذا آب متراکم شده و در صورتی که جدار

قانون ارائه شده توسط ژاکوفسکی (1897)

افزایش فشار (پیزومتري)  $\Delta H$  ناشی از بسته شدن سریع شیر ( $Tc < 2L/a$ )؛ که سبب تغییرات ناگهانی

سرعت می‌گردد، را به صورت زیر

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta V}{g} \quad \text{بدست می‌دهد:} \quad [5]$$

که در آن  $DH$  حداکثر تغییر فشار ناشی از ضربه

قوچ ( $m$ )،  $a$  سرعت انتشار موج فشار در خط لوله ( $m/s$ )،

$DV$  تغییرات سرعت آب ( $m/s$ ) و  $g$  شتاب ثقلی

( $g=9.81m/s^2$ ) است. تجزیه و تحلیل نظری پدیده ضربه

قوچ که مستقلاً توسط ژاکوفسکی (1897) و

آیوی (1913) انجام شده، مبنای تئوری کلاسیک ضربه

قوچ می‌باشد (تربیت 1369).

#### نرم‌افزار Hammer

Hammer یک برنامه قدرتمند با کاربرد ساده

بوده که مهندسان را در آنالیز سیستم‌های پمپاژ و

شبکه لوله‌ها هنگامی که از یک حالت پایدار به حالت

ناپایدار تغییر می‌یابند، کمک می‌کند. جریان ناپایدار فقط

در چند لحظه اتفاق می‌افتد اما می‌تواند به سیستم

خسارت بزند یا مدیریت سیستم را با دشواری مواجه

می‌نماید (احتشام منش 1389).

نام Hammer به علت صدای کوبیده شدنی که

موقع وقوع جریان ناپایدار شنیده می‌شود، انتخاب شده

است. روش محاسباتی نرم‌افزار Hammer روش

مشخصه‌ها می‌باشد که در این روش حل کامل معادلات

پیوستگی و اندازه حرکت برای یک سیال نیوتونی با

فرض تئوری الاستیک که بر اساس این حقیقت که سیال

مورد نظر تراکم‌پذیر است و دیواره لوله نیز می‌تواند

تحت فشارهای زیاد منبسط شود محاسبه می‌شود.

روابط مورد استفاده این نرم‌افزار عبارتند از:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + r.c^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad [6]$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad [7]$$

و برای هرقطعه لوله:

$$A = \frac{\Pi}{4} D^2 \quad [8]$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad [9]$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{r}} \quad [10]$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_f} + \frac{D}{wE_p} \quad [11]$$

و با فرض شرایط مرزی و اولیه:

$$P(x=0, t) = rgH \quad [12]$$

$$P(x=L, t) = \frac{rK(t)[Q(t)]^2}{2A_x^2} \quad [13]$$

$$K(t) = \frac{K}{[Y(t)]^2} \quad [14]$$

در صورتی که شیر در ابتدا بسته باشد

$Q(x, t=0) = 0$  و زمانی که شیر در ابتدا به طور کامل

باز باشد  $Q(x, t=0) = Q_{max}$  فرض می‌گردد. که در

آنها  $v$  سرعت جریان ماندگار،  $Q$  دبی جریان،  $P$

فشار آب،  $f$  ضریب زبری دارسی - ویسباخ،  $D$  قطر لوله،

$\rho$  چگالی سیال (آب)،  $c$  سرعت موج فشاری،  $H$  هد

آب،  $A$  سطح مقطع لوله،  $K$  ضریب افت جزئی زمانی که

دبی ماکزیمم می‌باشد،  $K(t)$  ضریب افت جزئی زمانی که

شیر در حال باز شدن یا بسته شدن می‌باشد،  $L$  طول

لوله،  $E$  مدول الاستیسیته مرکب،  $E_f$  مدول الاستیسیته

سیال،  $E_p$  مدول الاستیسیته جداره لوله،  $t$  زمان و  $g$

شتاب گرانش زمین می‌باشند. تنظیمات خاص این نرم-

ویندوز 9 ایکس، ان تی و 2000 نوشته شده است. گراف‌های نمایش داده شده در محیط ویندوز، امکان رسم خط لوله، وارد کردن داده‌های ورودی، ویرایش و آماده‌سازی جهت آنالیز در چند دقیقه را فراهم می‌آورد (یانگ و چاو 1970).

هدف از طراحی نرم‌افزار Hytran، به غیر از یک ابزار آنالیزی دقیق، تولید نرم‌افزاری ساده برای استفاده، و توانمند جهت بهره‌گیری از درک بهتر از پدیده ضربه قوچ می‌باشد. روش محاسباتی نرم‌افزار Hytran روش حل تفاضل محدود می‌باشد که معادلات ساده شده پیوستگی و اندازه حرکت را بر اساس تئوری ستون صلب که فرض می‌کند سیال غیرقابل تراکم و لوله نیز صلب است، حل می‌نماید. طراح برنامه Hytran؛ نرم‌لاوگان (2003) دارای بیش از 20 سال تجربه به عنوان مشاور برای بسیاری از شرکت‌های مهندسی عمران در نیوزلند می‌باشد. این نرم‌افزار برای اولین بار تحت برنامه فورترن با استفاده از رایانه‌های پردازنده مرکزی در نیوزلند ارائه شد. در مطالعه جریان غیرماندگار دو نوع حالت گذار به دلیل اینرسی و اثرات الاستیک وجود دارد. در جریان نوع اول که جریان شبه دائمی می‌باشد این دو فاکتور در نظر گرفته نمی‌شود. نوع دوم جریان که در آن اثر اینرسی سیال و یا الاستیسیته سیال و لوله در رفتار جریان عامل اساسی محسوب می‌گردند، جریان غیرماندگار واقعی می‌باشد. اگر اینرسی سیال قابل توجه بوده ولی تراکم‌پذیری سیال و لوله ناچیز باشد. نوع دیگری از جریان غیرماندگار واقعی مطرح خواهد شد که به آن نظریه غیرالاستیک یا جریان ستون صلب گویند که اساس حل معادلات اساسی ضربه قوچ با استفاده از نرم‌افزار Hytran می‌باشد. در نرم‌افزار Hytran، با استفاده از آیتم‌های نشان داده شده در محیط نرم‌افزار پلان خط لوله رسم می‌گردد، به این ترتیب که گزینه مورد نظر را انتخاب کرده و در صفحه محیط نرم‌افزار کلیک می‌شود. داده‌های ورودی مورد نیاز عبارتند از میزان کد ارتفاعی نقاط، طول لوله، قطر

افزار شامل تنظیمات مربوط به شرایط پروژه، تنظیمات مربوط به جریان ماندگار و اجرای اولیه و تنظیمات مربوط به شرایط جریان غیرماندگار و جریان میرا و در نهایت اجرای نهائی می‌باشند. از مهم‌ترین تنظیمات، انتخاب روش محاسبه است که از طریق روش افت<sup>1</sup> صورت می‌گیرد. در پروژه حاضر از میان روش‌های هیزن- ویلیامز که در آن افت اصطکاک متناسب با زبری لوله است و نه تغییرات جریان، و رابطه مانینگ که افت اصطکاک با زبری لوله متناسب است و نه با تغییرات جریان، و روش داریسی- ویسباخ که افت اصطکاک وابسته به زبری لوله و تغییرات جریان است، روش داریسی- ویسباخ برای محاسبه افت جریان ماندگار انتخاب گردید (نظری 1388).

هم‌چنین برای محاسبه جریان غیرماندگار، بایستی به خاطر داشت که در این نوع جریان در مقایسه با جریان ماندگار، افت و اصطکاک جریان حین بروز شرایط هیدرولیکی میرا افزایش می‌یابد، زیرا تغییرات ناگهانی در فشارهای میرا باعث افزایش شکاف و برش‌های گردابی می‌شود. بنابراین اصطکاک جریان میرا برای هر گام زمانی بایستی محاسبه شود. لذا در بخش مربوطه در نرم‌افزار، نوع بازه اجرا<sup>2</sup>، گام‌های زمانی<sup>3</sup> و میزان بازه اجرا یا تعداد گام‌های زمانی انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است بخش مربوط به پدیده کاویتاسیون نیز فعال می‌شود. در نهایت پس از راه-اندازی نرم‌افزار در شرایط جریان ماندگار و سپس در شرایط غیرماندگار و میرا، نتایج حاصله برای خطوط مورد نظر به صورت پروفیل و جداول مشاهده می‌شود (احتشام منش 1389).

#### نرم‌افزار Hytran

Hytran یک بسته نرم‌افزاری جهت آنالیز هیدرولیک جریان غیرماندگار در خطوط لوله می‌باشد. این برنامه به طور کامل تحت زبان ++C برای محیط

<sup>1</sup> Friction method

<sup>2</sup> Run Duration Type

<sup>3</sup> Time steps

که به طور ناگهانی و سریع رخ می‌دهند، دید مناسبی از پدیده ضربه قوچ به کاربر می‌دهد (ژاو و غیدوی 2003). برای حل دستی در حالت بستن سریع از رابطه 5 استفاده می‌شود.

### نتایج و بحث

ابتدا به بررسی پدیده ضربه قوچ در حالت خاموشی ناگهانی پمپ بدون به کارگیری تجهیزات کنترل در خط لوله توسط نرم‌افزارهای *Hammer* و *Hytran* پرداخته می‌شود. در این شرایط حداکثر ضربه ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از معادله ژاکوفسکی میزان ضربه در شرایط خاموشی ناگهانی پمپ تعیین می‌گردد.

لوله، جنس لوله، میزان سرعت موج و اطلاعات مربوط به پمپ‌ها شامل منحنی دبی-اشل، توان پمپ و غیره (نظری 1388).

در نهایت پس از راه‌اندازی نرم‌افزار در شرایط جریان غیرماندگار و میرا، نتایج حاصله شامل فشار حداقل ضربه، فشار حداکثر ضربه، سرعت حرکت آب در لوله، دبی عبوری از خط لوله، میزان افت در لوله و غیره، برای پروژه موردنظر به صورت پروفیل و جداول مشاهده می‌شود. شایان ذکر است این نرم‌افزار قابلیت نمایش تغییرات خط لوله را؛ در هر لحظه، از نظر فشار و هد آب به صورت انیمیشن دارا می‌باشد. در حقیقت مشاهده حرکت گراف‌های واقعی جریان میرا در زمان،

جدول 1- مقادیر حداکثر ضربه قوچ حاصل از نرم‌افزار *Hammer* برای خطوط پمپاژ سد حسنلو.

نام ایستگاه پمپاژ	قطر لوله (mm)	جنس لوله	سرعت موج (m/s)	میزان ضربه قوچ (m)
شمال	1400	فولادی	996/04	114/7
	1000	فولادی	995/8	96/8
شمالغرب	1200	فولادی	1037/44	135/3

جدول 2- مقادیر حداکثر ضربه قوچ حاصل از نرم‌افزار *Hytran* برای خطوط پمپاژ سد حسنلو.

نام ایستگاه پمپاژ	قطر لوله (mm)	جنس لوله	سرعت موج (m/s)	میزان ضربه قوچ (m)
شمال	1400	فولادی	996/04	130/0
	1000	فولادی	995/8	109/7
شمالغرب	1200	فولادی	1037/44	153/4

جدول 3- مقادیر حداکثر ضربه قوچ حاصل از روش حل معادله ژاکوفسکی برای خطوط پمپاژ سد حسنلو.

نام ایستگاه پمپاژ	قطر لوله (mm)	جنس لوله	$\Delta V$ تغییرات سرعت آب (m/s)	سرعت موج (m/s)	میزان ضربه قوچ (m)
شمال	1400	فولادی	1/53	996/04	155/3
	1000	فولادی	1/94	995/8	196/93
شمالغرب	1200	فولادی	1/62	1037/44	171/32

بررسی نتایج حاصل از نرم‌افزارهای *Hammer* و *Hytran* مشاهده می‌شود نرم‌افزار *Hytran* میزان ضربه قوچ را برابر 130 متر آب یعنی حدود 12 درصد بیشتر

جداول 1، 2 و 3 میزان حداکثر ضربه را در هرکدام از سه حالت نرم‌افزار *Hammer* و *Hytran* و روش حل معادله ژاکوفسکی را نمایش می‌دهند. با



(2004) بررسی گردید. برگانت و همکاران (2004) آنالیز عددی پدیده ضربه قوچ را در یک سیستم مخزن-لوله-شیر، برای طیف گسترده‌ای از مقادیر سرعت جریان اولیه ( $V_0$ )، هد استاتیکی مخزن بالادست ( $H_T$ ) و شیب لوله ( $\theta$ ) با لحاظ ثابت بودن مقیاس‌های زمانی  $L/A$  و  $T_C$  آزمایش، انجام دادند. نتایج عددی حاصل به وضوح تاثیر سرعت اولیه، هد استاتیکی مخزن بالادست و تاثیر جزئی شیب لوله بر روی هد ماکزیم ناشی از ضربه قوچ در محل شیر را نشان می‌دهد.

در آزمایشات انجام شده توسط برگانت و همکاران (2004) مشخص شد وقتی که حداقل فشار در هر نقطه از لوله رانش به حد فشار بخار آب برسد پدیده ضربه قوچ دیگر اعتباری ندارد. اگر این وضعیت فشار منفی (نسبت به اتمسفر) در داخل لوله برای مدت کافی ادامه پیدا کند ستون آب منفک شده و بوسیله بخار از هم جدا می‌گردد (نظری 1388).

نتایج بررسی‌های برگانت و همکاران (2004) نشان می‌دهد پدیده ضربه قوچ بدون جدایی ستون آب تنها در سرعت جریان‌های اولیه کم رخ می‌دهد. فشار حداکثر برای سرعت جریان‌های بالاتر به دلیل ایجاد پدیده جدائی ستون آب به تدریج کمتر از فشار حداکثر معادله ژاکوفسکی می‌گردد. در این حالت حداکثر حجم خلأ در محل شیر رخ می‌دهد، در حالی که حفره‌های کوچکتر در طول لوله تشکیل شده است. همچنین در لوله شیب‌دار به سمت پایین کاویتاسیون شدید در طول لوله رخ می‌دهد. بنابراین تنها در سرعت جریان‌های اولیه کم (کمتر از 0/5 متر بر ثانیه) معادله ژاکوفسکی نتایج صحیحی را ارائه می‌دهد. ولی در سرعت جریان‌های بیشتر؛ به دلیل عدم در نظر گرفتن رخداد پدیده کاویتاسیون میزان ضربه قوچ را دقیق محاسبه نمی‌کند (برگانت و همکاران 2004).

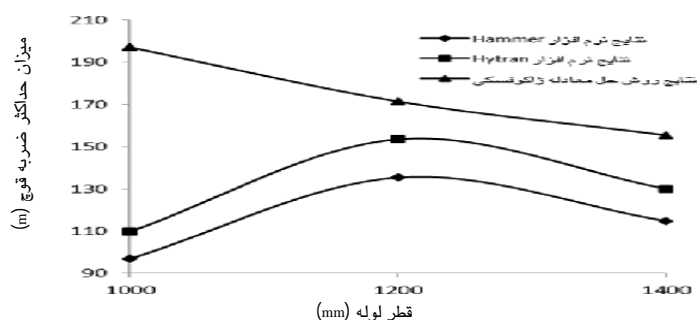
در منطقه مورد بررسی سرعت جریان در قطر 1400 میلی‌متری 1/53 متر بر ثانیه، در قطر 1000 میلی‌متری 1/94 و در قطر 1200 میلی‌متری 1/62 متر بر

از نرم‌افزار Hammer برآورد می‌نماید. در مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار Hammer و روش حل معادله ژاکوفسکی، تفاوت از 21% برای قطر 1200 میلی‌متری تا 50% برای قطر 1000 میلی‌متری مشاهده می‌شود. برای قطر 1400 میلی‌متری، روش حل معادله ژاکوفسکی میزان ضربه قوچ را حدود 26 درصد بیشتر نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار Hytran و روش حل معادله ژاکوفسکی نشان‌دهنده تفاوت 16 درصدی در برآورد میزان ضربه قوچ برای قطر 1400 میلی‌متری می‌باشد. همچنین میزان ضربه قوچ در قطر 1000 و 1200 میلی‌متری در روش حل معادله ژاکوفسکی به ترتیب به میزان 44 و 10 درصد بیشتر از نرم افزار Hytran بدست آمده‌اند. با توجه به آنالیزهای انجام شده توسط نرم‌افزارهای Hammer و Hytran و حل معادله ژاکوفسکی ملاحظه می‌شود که رابطه ژاکوفسکی میزان فشار ضربه قوچ بیشتری را نسبت به نرم‌افزار Hytran و این نرم‌افزار نیز به نوبه خود نسبت به نرم‌افزار Hammer نتایج بزرگتری را برآورد می‌نماید. نرم‌افزار Hammer در محاسبات جریان میرا و برآورد ضربه قوچ از روش مشخصه‌ها استفاده می‌کند. در حالی که نرم‌افزار Hytran در بررسی پدیده ضربه قوچ از روش محاسبه ستون صلب استفاده می‌کند، که دارای الگوریتم‌های ساده‌تر و سریع‌تر می‌باشد. نرم‌افزار Hammer تحلیل جریان میرا را در گام‌های زمانی زیادی انجام می‌دهد. لذا استفاده از معادلات ترکیبی بیشتر برای دنبال کردن تغییرات دینامیکی در سراسر سیستم همراه قدرت شبیه‌سازی اضافه شده به این نرم‌افزار، ارزش محاسباتی بیشتری را می‌دهد. بنابراین نتایج حاصل از نرم‌افزار Hammer نسبت به نتایج نرم‌افزار Hytran دقیق‌تر می‌باشند (احتشام منش 1389، یانگ و چاو 1970).

علت بیشتر بودن نتایج حل معادله ژاکوفسکی توسط فرمول ژاکوفسکی توسط برگانت و همکاران

ژاکوفسکی تفاوت 50 درصدی با نتیجه نرم افزار Hammer و تفاوت 44 درصدی با نتیجه نرم افزار Hytran دارد. همچنین در قطر 1400 میلی متری که دارای کمترین مقدار سرعت جریان برابر 1/53 متر بر ثانیه است، تفاوت نتیجه روش حل معادله ژاکوفسکی با نتیجه نرم افزار Hammer 26 درصد و با نتیجه نرم افزار Hytran 16 درصد می باشد.



شکل 2- تغییرات ضربه قوچ حاصله از روش حل معادله ژاکوفسکی و نرم افزارها.

روش‌ها می باشد. به این صورت که روش فرمول ژاکوفسکی با حداکثر فرض‌ها در حل پدیده ضربه قوچ، معادله را ساده تر نموده که نتایج حاصله با واقعیت اختلاف خواهند داشت. درحالی که نرم افزارها (روش‌های عددی) به دلیل استفاده از رایانه و روش‌های مختلف و پیچیده تر حل مسئله، فرضیات کمتری را در نظر گرفته و لذا با در نظر گرفتن تعداد المان‌های بیشتر، نتایج دقیق تری را ارائه می دهند. این در حالی است که نرم-افزار Hammer به دلیل محاسبات پیشرفته تر از نرم افزار Hytran از جمله محاسبه سرعت موج توسط خود نرم-افزار توسط معادلات پیچیده، مقادیر واقعی تری برای پدیده ضربه قوچ نتیجه می دهد. معادلات و نتایج نرم-افزارها در مراجع فوق الذکر نیز بررسی گردیده است، لذا به نظر می رسد دقیق تر باشند. البته در مواردی که مشاهده گرافیکی چگونگی رخداد پدیده ضربه قوچ و کاویتاسیون مهم باشد، می توان از نرم افزار Hytran با

ثانیه می باشد. که اولاً به دلیل آنکه بزرگتر از 0/5 متر بر ثانیه می باشند. ثانیاً هر چقدر میزان سرعت جریان بیشتر باشد نتایج حل معادله ژاکوفسکی تفاوت بیشتری با مقادیر بدست آمده از نرم افزارهای Hammer و Hytran خواهد داشت. بدین ترتیب که در قطر 1000 میلی متری که سرعت جریان دارای بیشترین مقدار و برابر 1/94 متر بر ثانیه است، نتیجه حل معادله

شکل 2 گویای روند تغییرات نتایج روش حل معادله ژاکوفسکی و نرم افزارها بر حسب قطر خطوط لوله مورد مطالعه می باشد. توصیه می شود برای تخمین حدودی میزان فشار ضربه قوچ ایجاد شده در شبکه لوله و خطوط پمپاژ از روش حل معادله ژاکوفسکی استفاده شود. ولی به دلیل آنکه در معادله ژاکوفسکی که در واقع روش ریاضی حل پدیده ضربه قوچ می باشد، فرض می شود جریان به طور آبی قطع می شود  $(Tc < 2L/a)$ ، و نمی تواند جدائی ستون آب را مستقیماً در نظر بگیرد و از افت‌ها صرف نظر کرده است، بهتر است برای مطالعات دقیق ضربه قوچ مبنای کار قرار نگیرد.

در مقایسه نرم افزارهای مورد بررسی و روش حل دستی با لحاظ مطالعات صورت گرفته توسط احتشام منش (1389)، یانگ و چاو (1970) و لاوگان (2003) مشاهده می گردد علت تفاوت نتایج حاصل، ناشی از فرضیات در نظر گرفته شده برای هر کدام از

در نظر گرفتن ضریب اطمینان 13% با توجه به مقایسه صورت گرفته در این تحقیق، استفاده نمود. پیشنهاد می‌گردد در زمان روشن و خاموش شدن پمپ‌ها، آنها به تدریج و با فاصله زمانی روشن و

یا خاموش گردند، تا زمان استهلاک تاسیسات و لوله‌ها بیشتر شده و عمر مفیدشان افزایش یابد.

#### منابع مورد استفاده

- اکبری غ و فصیحی فرد ه، 1390. بررسی پدیده ضربه قوچ و ارائه پیشنهادات برای کاهش اثرات این پدیده. صفحه های 820 تا 828، مجموعه مقالات اولین همایش منطقه ای توسعه منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی ابرکوه، ابرکوه، ایران. احتشام منش ج. 1389. راهنمای نرم‌افزار *Hammer*. انتشارات آیدین، تهران.
- آشفته ج، 1369. هیدرولیک کاربردی جریان‌های میرا، ضربه قوچ. انتشارات کبری، تهران.
- بی نام، 1387، دستورالعمل انتخاب و طراحی تجهیزات کنترل ضربه قوچ در تاسیسات آبرسانی شهری، دفتر استانداردهای مدیریت منابع آب ایران، جلد 325، صفحه های 1 تا 90.
- بی نام، 1383، نشریه ضوابط طراحی هیدرولیکی ایستگاههای پمپاژ، دفتر استانداردهای مدیریت منابع آب ایران، جلد 207، صفحه های 1 تا 60.
- تربیت ف، 1369. هیدرولیک ایستگاه های پمپاژ. امور آبی وزارت نیرو، تهران.
- حسن زاده ی. 1389. ماشینهای آبی - جلد اول: پمپها. انتشارات دانشگاه تبریز، تبریز.
- حسن زاده ی، زمانیان ج و ابریشمی ج، 1382. بررسی روشهای کنترل فشارهای ماکزیمم و مینیمم ناشی از پدیده ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ فشار قوی. صفحه های 609 تا 621. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس دینامیک شاره ها، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- حسن زاده ی و عباسی س، 1387. تحلیل کامپیوتری پدیده ضربه قوچ در تاسیسات توربین آبی. صفحه های 2018 تا 2026. مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برق آبی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
- حسن زاده ی و فاضلی پایدار ر، 1381. کاربرد روش مشخصه در تحلیل پدیده ضربه قوچ ایستگاه پمپاژ سد نهند تبریز. مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، جلد 28، شماره 3 (مهندسی عمران)، صفحه های 45 تا 53.
- سلیمانی ع، 1387. آنالیز حساسیت حداکثر ضربه قوچ در طرح پمپاژ رودخانه کوهرنگ به چشمه مروراید با استفاده از نرم‌افزار *Hammer*. صفحه های 363 تا 371. مجموعه مقالات نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران.
- نامداری ط و طالب بیدختی ن، 1387. بررسی چالشها و معضلات پیش آمده در اثر ضربه آبی و تحلیل آن در خطوط انتقال آب (مطالعه موردی روی شهر لامرد در استان فارس). مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. تهران.
- نجمائی م، 1369. ضربه قوچ. انتشارات هما، تهران.
- نظری پ، 1388. بررسی پدیده ضربه قوچ و معرفی بهترین روش های کنترل آن با استفاده از نرم‌افزار های *Hammer* و *Hytran* (مطالعه موردی خط لوله ایستگاه پمپاژ سد حسنلو). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.

Allievi L, 1913. Theory of water hammer. Proceedings of the Italian Electrotechnical Association 17(127-150):861-900.

Bergant A, Simpson AR and Tijsseling AS, 2004. Water Hammer With Column Separation. Department of Mathematics and Science, Eindhoven University of Technology, Netherlands.

- Chaudhry MH, 1987. Applied Hydraulic Transients, 2th Ed. Van Nostrand Reinhold Compitition, New York.
- Fontana N, Giugni M and Portolano D, 2012. Losses reduction and energy production in water-distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management. 138: 237–245.
- Hachem FE and Schleiss AJ, 2011. Physical tests for estimating the water hammer wave speed in pipes and tunnels with local weak wall stiffness, Pp:4322-4331. World Environmental and Water Resources Congress, May 22-26. Switzerland.
- Joukowsky N, 1897. On the Hydraulic Hammer in Water Supply Pipes. Division of Physical Sciences of O.L.E., University of California. USA.
- Lawgun N, 2003. Hytran Solutions. Maritime Research Centre (MRC). School of Civil & Environmental Engineering. Auckland, New Zealand.
- Stephenson D, 2002. Simple guide for design of air vessels for water hammer protection of pumping lines. Journal of Hydrulic Engineering . ASCE 0733-9429.128: 792-800.
- Streeter VL and Wylie EB, 1987. Fluid Mechanics. 8th Ed., McGraw-Hill Book Co. ,New York.
- Walski, T and Wu Z, 2008. Self-adaptive penalty approach compared with other constraint-handling techniques for pipeline optimization. Journal of Water Resour Plann Manage. 131(3): 181–192.
- Wu Y, Xu Y and Wei W, 2011, Water hammer analysis of district Networks, Pp:492-501. International Conference on Pipelines and Trenchless Technology, October 26–29. China.
- Wylie EB and Streeter VL, 1993. Fluid Transients in Systems. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, USA.
- Yang RC and Chu HY, 1970, HYTRAN Computer Program User's Manual, M. Parsons Company, Los Angeles.
- Zhao M and Ghidaoui MS, 2003. Efficient quasi-two-dimensional model for water hammer problems. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 0733-9429 129:1007-1013.
- Zur A, 1978. Experimental study of hydraulic systems transient response characteristics. Master's thesis, Air Force Institute Of Tech Wright-Patterson AFB OH School Of Engineering, USA.