کاربرد روش مشخصه در تحليل پديده ضربه قوچ ايستگاه پمپاژ سد نهند تبريز

يوسف حسن زاده — استاد گروه عمران – آب دانشكده فني، دانشگاه تبريز
رضا فاضلي پايدار — كارشناس ارشد مهندسين مشاور فرازآب - تبريز

چكيده

وقوع پديده ضربه قوچ در اثر از كار افتادن ناگهاني پمپ و تغيير ناگهاني دبي و مالاً سرعت جريان مايع، موجب تغيير ناگهاني فشار و ايجاد امواج فشاري منفي و مثبت در خط لوله رانش ميگردد كه اگر تغييرات فشار مزبور به نحو مقتضي كنترل و تعديل نشود ميتواند موجبات انهدام ايستگاه پمپاژ را فراهم نمايد. در اين مقاله معادلات حاكم بر پديده ضربه قوچ با استفاده از روش مشخصه در ايستگاه پمپاژ سد نهند تبريز بهطور موردي بهكمك رايانه تحليل، ابعاد محفظة هوايي لازم براي كنترل پديده و تعديل امواج فشاري محاسبه و ارائه گرديده و نشان داده شده است كه در صورت عدم استفاده از اين محفظه ، احتمال بروز پديده خلاءزايي در لوله رانش با توجه به مسير و وضعيت استقرار آن، بسيار محتمل مي باشد.

كلمات كليدى: ضربه قوچ، روش مشخصهها، جريان ناپايدار، ايستگاه پمپاژ، از كار افتادن پمپها، خلاءزايي.

Waterhammer Analysis Using the Method of Characteristics on Nahand-Tabriz Pumping Station

Y. Hassanzadeh — Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran
R. Fazeli Paydar — Farazab Consulting Engineers, Tabriz, Iran

Abstract

Waterhammer phenomenon caused by pump failure and the sudden change of discharge and consequently the flow velocity, creates the sudden variation of pressure and initiates the upsurges and downsurges along the pipeline. If this abnormal pressure change does not control and adjust with an appropriate equipment, it may occur the destructive problems along the unprotected system. In this paper, by developing a computer program and using the method of characteristics, the governing equations of waterhammer phenomenon, on Nahand – Tabriz pumping station, as a case study, have been analyzed and the appropriate dimension of air chamber to control the surges has been calculated. It is shown that without using this control device, due to path convexity of discharge pipeline, the cavitation phenomenon may occur intensively along the pipeline.

Key words: Waterhammer, Method of characteristics, Transient flow, Pumping station, Pump failure, Cavitation.

۱- مقدمه

پديده ضربه قوچ(۱) و يا امواج فشاري ناشي از تغيير ناگهاني سرعت و يا دبي نمونه بارزي از جريانهاي ناپايدار بوده و وقوع آن در خطوط انتقال آب، ايستگاههاي پمپاژ و توربينهاي برقابي باعث بروز اغتشاشات شديد و نارسائيهاي جدي در عملكرد اينگونه تأسيسات شده و حتي ميتواند موجب منهدم شدن آنها گردد. اهميت اين پديده نظر بسياري از محققان و دانشمندان هيدروليك را در بيش از يك قرن اخير بهخود معطوف داشته است.

ژوكوسكي با لحاظ نمودن خاصيت كشساني آب و جدار لوله و با اتكاء بر نتايج بررسيهاي تئوري و تجربي خود علاوه بر ارائه فرمول سرعت انتشار موج، در زمينه اثرات محفظه هوايي، مخزن موجگير و تغييرات فشار ضربه قوچ نيز تحقيقاتي را در مسكو بهانجام رسانده و نشان داده است كه اگر مدت زمان بسته شدن شير فلكه كمتر يا برابر با مدت زمان لازم براي رفت و برگشت موج باشد، افزايش فشار ضربه قوچ به مقدار ماكزيمم ميرسد [۱]. شنيدر با در نظر گرفتن مشخصههاي كامل پمپها در آناليز پديده ضربه قوچ در يك خط لوله انتقال آب مجهز به پمپهاي سانتريفوژ، براي اولين بار در كاربرد روش ترسيمي ، افت انرژي را اعمال كرده است [۲]. برژرون و پرمكيان نيز روش ترسيمي را در تحليل پديده ضربه قوچ بهكار برده و آن را توسعه دادهاند [۳ و ۴]. استريتر و وايلي با اعمال روش مشخصه اين پديده را مورد بررسي و تجزيه و تحليل قرار دادهاند [۵]. آلميدا و كوئل در مطالعه جريانهاي ناپايدار در داخل شبكه لولهها، روشهاي حل عددي را بهكار بردهاند [۶]. زاروبا پديده ضربه قوچ را در سيستمهاي انتقال آب براي شرايط امكان بروز و يا عدم بروز جدايي ستون مايع با استفاده از رايانه تحليل كرده است [۷].

روشهاي اخير از لحاظ ميزان دقت و صرفهجوئي در وقت حائز اهميت بوده و ليكن جهت ارزيابي صحت نتايج تحليل رايانهاي، لازم است اين نتايج با دادههاي تجربي حاصل از آزمايش مورد مقايسه قرار گيرد [۸]. در گذشته با اعمال ضرايب اطمينان در انتخاب لولهها، اتصالات و ساير تجهيزات وابسته، اين پديده كنترل و اثرات منفي آن خنثي ميشد و ليكن امروزه چنين راهحلي از نظر اقتصادي توجيه پذير نيست.

تجزيه و تحليل ضربه قوچ به دو روش عمدة «تئوري ستون صلب آب» و «تئوري كشساني» انجام ميپذيرد كه در اين تحقيق روش بهكار رفته تئوري كشساني ميباشد. معادلات حاكم در اين روش دو معادله ديفرانسيل غيرخطي ميباشند كه در عمل تحليل آنها بسيار پيچيده است.

در اين مقاله، پديده ضربه قوچ بهطور موردي در ايستگاه پمپاژ سد نهند تبريز، با استفاده از روش مشخصه بهوسيله رايانه تحليل گرديده و ضمن ارزيابي توانائي اين روش نشان داده شده است كه در صورت عدم استفاده از تجهيزات كنترل فشار، امكان بروز پديده خلاءزايي(۲) در خط لوله رانش بسيار محتمل خواهد بود و ليكن با محاسبه و نصب محفظه هوايي با ابعاد مناسب، ميتوان پديده را كنترل نمود.

۲- معادلات حاكم

معادلات حاكم بر پديده شامل معادله ديناميكي و معادله پيوستگي جريان بهصورت يك زوج معادله ديفرانسيل با مشتقات جزئي به شرح زير هستند:

۲-۱- معادله ديناميكي

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + g\sin\phi + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \qquad (۱)$$

۲-۲- معادله پيوستگي جريان

$$L_2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad (۲)$$

در معادلات L_2, L_1 دو متغيير وابسته سرعت V و فشار p و دو متغيير مستقل فاصله x و زمان t وجود دارد. در معادلات ياد شده ρ جرم مخصوص، g شتاب ثقل، ϕ زاويه تمايل محور لوله نسبت به افق، D قطر لوله، a سرعت انتشار امواج فشاري و f ضريب اصطكاك را بيان ميكنند. ضريب اصطكاك f تابع عدد رينولدز و زبري نسبي جدار لوله است، با وجود اين

1- Waterhammer phenomenon

2- Cavitation

در بسياري از موارد مقدار آن ثابت فرض ميشود، زيرا كه اثر تغييرات f در جريانهاي ناپايدار(1) قابل اغماض است [۹].

حل معادلات L_2, L_1 با روش تحليلي دشوار است از اينرو اين معادلات با استفاده از روش مشخصه ابتدا به معادلات ديفرانسيل معمولي تبديل شده و سپس بوسيله روش تفاضلهاي محدود صريح به كمك برنامه رايانهايكه براي همين منظور تهيه شده، تحليل گرديدهاند. از آنجائيكه هر كدام از شرايط مرزي و هريك از مقاطع لوله در هر فاصله زماني بهطور جداگانه مورد تحليل قرار ميگيرند، اين روش براي سيستمهاي داراي شرايط مرزي پيچيده مناسب بوده و قابل توصيه ميباشد.

در معادله L_2، سرعت موج فشاري a با رابطه زير بيان ميشود:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1+\frac{K}{E}\frac{D}{e}]}} \qquad (۳)$$

كه در آن K مدول كشساني حجمي مايع، E مدول كشساني جدار لوله و e ضخامت جدار لوله ميباشد.

با در نظر گرفتن تركيب خطي $L = L_1 + \lambda L_2$ از معادلات L_2, L_1 رابطه زير بهدست ميآيد:

$$L = (\frac{\partial V}{\partial x}\lambda\rho a^2 + \frac{\partial V}{\partial t}) + \lambda(\frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{\rho\lambda} + \frac{\partial p}{\partial t}) + g\sin\phi + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \qquad (۴)$$

با لحاظ كردن متغيرهاي وابسته $p(x,t)$ و $V(x,t)$ بهعنوان جواب معادله بالا، در اينصورت مشتقات كلي آنها بهصورت زير خواهد بود:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial p}{\partial t} \qquad (۵)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \qquad (۶)$$

از مقايسه روابط اخير با معادله (۴) نتيجه ميشود:

$$\lambda = \pm\frac{1}{\rho a} \qquad (۷)$$

يا

$$\frac{dx}{dt} = \lambda\rho a^2 = \frac{1}{\lambda\rho}$$

از آنجا

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \qquad (۸)$$

مقادير $\pm\frac{1}{a}$ مطابق شكل (۱) در صفحه مختصات x و t ضريب زاويه دو خط راستي را نشان ميدهند كه به نام خطوط مشخصه معروفند. از نقطه نظر فيزيكي اين خطوط بيانگر مسير طي شده توسط اغتشاشات ميباشد. مثلا اغتشاشات ايجاد شده در لحظه t در نقطه A مطابق شكل (۱) بعد از زمان Δt بهنقطه p خواهد رسيد. با اعمال $\lambda = \pm\frac{1}{\rho a}$ در معادله (۴)، رابطه L بهصورت زير در ميآيد:

$$L = \frac{dV}{dt} \pm \frac{1}{\rho a}\frac{dp}{dt} + g\sin\phi + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \qquad (۹)$$

گفتني است كه به شرط ارضا معادله (۸)، معادله (۹) معتبر است. در اين معادلات علامت (+) و (-) به ترتيب براي خطوط مشخصه مثبت AP و منفي BP مطابق شكل (۱) بهكار ميروند. بنابراين با ملحوظ داشتن:

$$P = \rho g H \quad ، \quad V = \frac{Q}{A} \quad ، \sin\phi = \frac{Z_p - Z_A}{\Delta x}$$

رابطه (۹) بر روي خطوط مشخصه مثبت و منفي بهشرح زير بيان ميشود:

1- Transient

- در امتداد خط مشخصه مثبت (C^+):

$$Q_p - Q_A + \frac{gA}{a}(H_p - H_A) + \frac{f\Delta t Q_A |Q_A|}{2DA} = 0 \quad (۱۰)$$

- در امتداد خط مشخصه منفي (C^-):

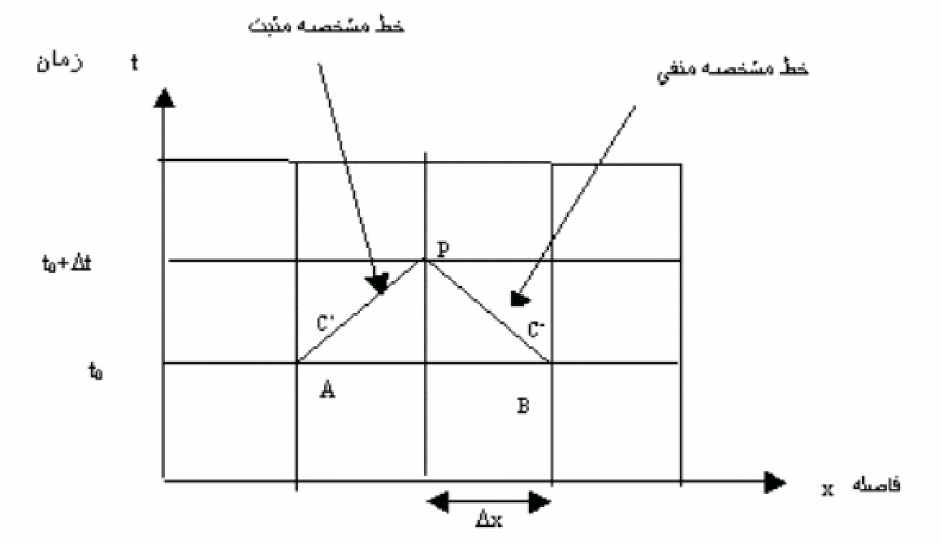
$$Q_P - Q_B - \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + \frac{f\Delta t Q_B |Q_B|}{2DA} = 0 \quad (۱۱)$$

که در آن A مساحت مقطع لوله بوده و H ارتفاع نظير فشار را در لحظه t_0 به ترتيب در نقاط A و B نشان ميدهند. H_p, Q_p نيز اين کميتها را در لحظه $t_0 + \Delta t$ در نقطه P بيان مي کند. روابط (۱۰) و (۱۱) در طول خط لوله (0<x<L) معتبرند و براي نقاط مرزي بايد از روابط ويژهاي استفاده کرد. در اينجا بهعنوان شرايط مرزي، در بالادست خط انتقال لوله رانش، ۱۲ دستگاه پمپ سانتريفوژ ۵ طبقـه با اتصال موازي (۸ دستگاه در حال کارکرد و ۴ دستگاه ذخيره) مجهز بهشير يکطرفه و محفظه هوايي و در پايين دست، مخزن رانشي با ارتفاع ثابت $(z_u = 1640\ \text{m})$ در نظر گرفته شده است. گفتني است که پمپها در بلافاصله پايين دست مخزن مکشي با ارتفاع ثابت $(z_d = 1478\ \text{m})$ مستقر گرديدهاند.

براي نيل به پايداري و همگرايي در تحليل معادلات ضربه قوچ از شرايط پايداري کورانت بهشرح زير استفاده شده است:

$$\frac{a\Delta t}{\Delta x} \le 1 \quad (۱۲)$$

شرط ياد شده اين محدوديت را ايجاد ميکند که خطوط مشخصه مثبت و منفي گذرنده از نقطه P در شکل (۱) نبايد خارج از پاره خط AB قرار گيرند. در اين تحقيق بررسيهاي مربوط به همگراييها نشان ميدهند که بهترين پاسخها بازاء $\frac{a\Delta t}{\Delta x} = 1$ بهدست مي آيند.



شکل ۱- نمايش خطوط مشخصه در صفحه مختصات x و t

۳- تجزيه و تحليل دادهها

متعاقب قطع نيروي محرکه پمپ، بهترتيب چهار مرحله کارکرد عادي پمپ، استهلاک انرژي پمپ، عملکرد توربيني و بالاخره استهلاک انرژي توربين بهوقوع ميپيوندد.

براي نمايش منحنيهاي مشخصه پمپها بهصورت بدون بعد، ابتداء کميتهاي دبي Q، ارتفاع پمپاژ H، سرعت دوراني N و گشتاور چرخشي T با استفاده از مقادير متناظر آنها در حالت

جريان پايدار كه در اينجا با زير نويس[1] R نشان داده شدهاند. بهشرح زير بهصورت بدون بعد بيان ميگردند:

$$h = \frac{H}{H_R} \;;\quad \alpha = \frac{N}{N_R} \;;\quad v = \frac{Q}{Q_R} \;;\quad \beta = \frac{T}{T_R}$$

از آنجا:

$$\frac{\alpha}{v} = \frac{Q_R}{Q} \cdot \frac{N}{N_R} = cte \;;$$

$$\frac{\beta}{\alpha^2} = \frac{T}{T_R} \cdot \frac{N_R^2}{N^2} = cte \;;$$

$$\frac{h}{\alpha^2} = \frac{H}{H_R} \cdot \frac{N_R^2}{N^2} = cte.$$

با توجه به اينكه بازاء $\alpha = 0$، مقدار $\frac{h}{\alpha^2} = \infty$ ميگردد، بنابراين براي احتراز از آن، بجاي $\frac{h}{\alpha^2}$ عبارت $\frac{h}{\alpha^2+v^2}$ مورد استفاده و مطالعه قرار ميگيرد. علامتهاي α و v تابع ناحيه عملكرد پمپ بوده و بازاء $v = 0$ نيز $\frac{\alpha}{v} = \infty$ ميگردد، در نتيجه براي اجتناب از اين نارسائي، پارامتر جديد بهصورت زير تعريف و در محاسبات اعمال ميگردد:

$\theta = Arctg\frac{\alpha}{v}$ ، كه مقدار θ بين صفر تا ۳۶۰ درجه در ناحيه چهارگانه عملكرد پمپ مطابق جدول (۱) تغيير ميكند.

تغييرات منحني مشخصه ارتفاع پمپاژ $\frac{h}{\alpha^2+v^2}$ و گشتاور چرخشي $\frac{\beta}{\alpha^2+v^2}$ بهصورت بدون بعد نسبت به θ بازاء سرعتهاي مخصوص N_s مختلف مطابق روش مارتين [۱۱]، در شكل (۲) ارائه شده است كه در آن مقادير سرعت مخصوص در سيستم SI محاسبه گرديده اند [۹و۱۰].

1- Rated Values

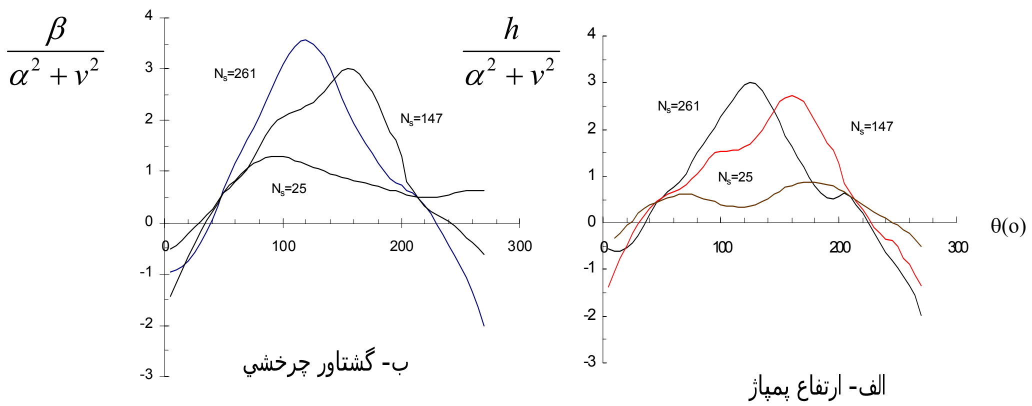
براي ذخيره كردن دادههاي شكل (۲) در رايانه، منحنيها بهصورت تعدادي قطعات خطوط مستقيم در نظر گرفته ميشوند. تغييرات θ در محدودهٔ هر پاره خط برابر ۵ درجه انتخاب شده است. با استفاده از دادههاي شكل (۲) مقداري براي v و α انتخاب ميگردد و با سعي و خطا آن قدر تغيير داده ميشوند تا دو پارامتر مزبور در كلية معادلات اعم از معادلات مشخصة مربوط بهلولة رانش، معادلات دوران پمپ، پيوستگي جرم و شرايط مرزي پمپ صدق نمايند، بالاخره با استفاده از مقادير نـهـايي vو α مقادير h و β مـحاسبه ميشوند. بدين ترتيب مقادير دبي Q، ارتفاع پمپاژ H، سرعت دوراني N و گشتاور چرخشي T براي زمان t معين حاصل ميگردند. اين كار توسط برنامة رايانهاي تهيه شده براي اين تحقيق صورت پذيرفته است. براي فواصل زماني بعدي نيز محاسبات به همين منوال تكرار ميگردند [۱۲].

بهمنظور انتقال آب سد نهند بهتبريز در قسمتي از مسير نياز بهايجاد ايستگاه پمپاژ ميباشد. ايستگاه پمپاژ مزبور بايد دبي يك مترمكعب در ثانيه را توسط خط لولهاي بهطول ۳۰۵۵ متر از محل تصفيه خانه (ايستگاه پمپاژ) بهگردنة جادة قديم اهر- تبريز انتقال دهد. تعداد و مشخصات پمپها و قطعـات خـط انـتـقال ايستگاه پـمپـاژ در جدول (۲) ارائـه شدهاند [۱۳].

تحليل رايانهاي پديده ضربه قوچ با اعمال روش مشخصه با برنامهاي كه بهزبان C براي همين منظور تدوين گرديده و كارائي آن در ايستگاه پمپاژ سد نهند- تبريز مورد ارزيابي قرار گرفته، بيانگر آن است كه در نبود تأسيسات كنترل فشار (محفظه هوايي) مقدار حداكثر ارتفاع نظير فشار پس از مدت زمان ۱۲ ثانيه از لحظه توقف ناگهاني پمپها افزون بر ۲۷۶ متر بوده، در حاليكه مقدار حداقل ارتفاع نظير فشار پس از مدت زمان ۴ ثانـيه از لحـظه توقف ناگهاني پمپها بهمقدار ۱۳۲ - متر تنزل يافته است. در شكل (۴) پروفيل خط لوله رانش و نتايج محاسبات مربوط بهتغييرات حداكثر و حداقل فشار در طول مسير جريان در نبود تأسيسات كنترل فشار (محفظه هوايي) نشان داده شده است. از بررسي اين شكل چنين استنباط ميگردد كه در حوالي نقطه E از مسير جريان كه خط لوله رانش داراي تحدب شديد مـيباشد كمترين مقـدار فشار در آن نقطـه (H= -۱۳۲m) بوقوع ميپيوندد كه خود ميتواند عامل وقوع پديده مخرب خلاءزايي در لوله رانش گردد [۱۲].

جدول ۱- نواحي عملكرد پمپ از لحظه قطع نيروي محركه پمپ تا توقف كامل [۹ و ۱۰]

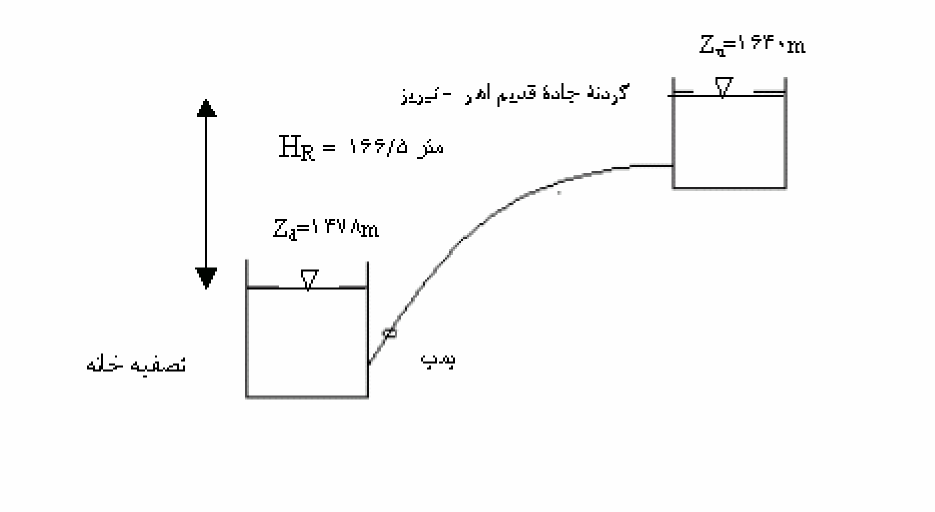
محدوده تغييرات θ برحسب درجه	علامت v	علامت α	عملكرد پمپ
$0^\circ \le \theta \le 90^\circ$	+	+	كاركرد عادي پمپ
$90^\circ \le \theta \le 180^\circ$	-	+	استهلاك انرژي پمپ
$180^\circ \le \theta \le 270^\circ$	-	-	عملكرد توربيني پمپ
$270^\circ \le \theta \le 360^\circ$	+	-	استهلاك انرژي توربين



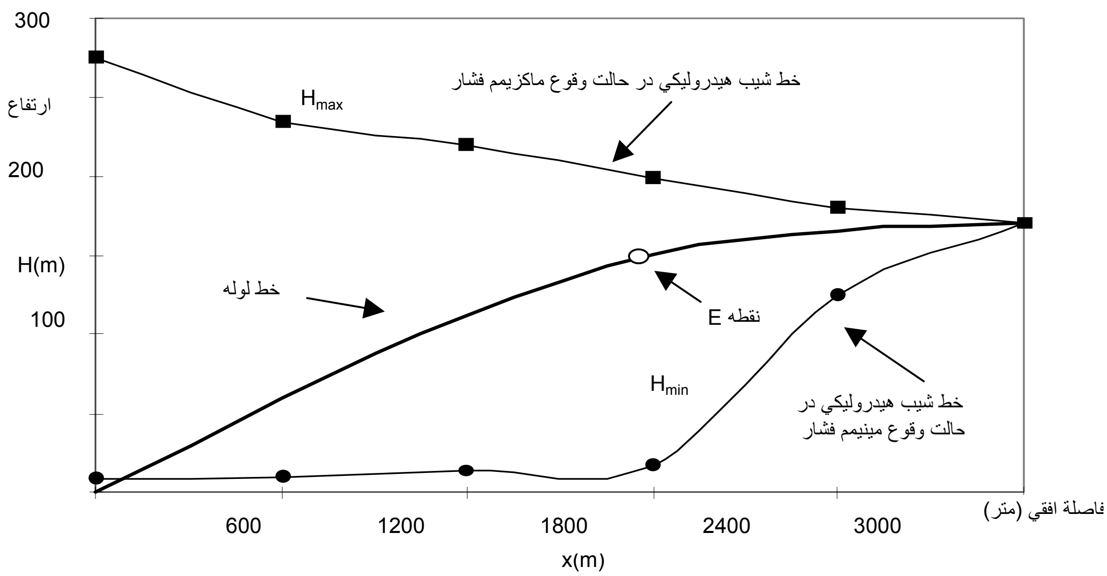
شكل ۲- نمايش بدون بعد تغييرات مشخصه ارتفاع پمپاژ و گشتاور چرخشي پمپ نسبت به θ در سرعتهاي مخصوص N_s مختلف [۱۱]

جدول ۲ : مشخصات پمپها و قطعات خط انتقال ابستگاه پمپاژ سد نهند تبريز [۱۳]

۱	طول قطعه پمپاژ (L)	۳۰۵۵ متر
۲	قطر لوله رانش (D)	۹۰۰ ميليمتر
۳	افت فشار (ΔH)	۱/۴ متر در كيلومتر
۴	تراز ابتداء پمپاژ (Z_d)	۱۴۷۸ متر
۵	تراز انتهاي پمپاژ (Z_u)	۱۶۴۰ متر
۶	ارتفاع پمپاژ با در نظر گرفتن افتهاي طولي و موضعي (H_R)	۱۶۶/۵ متر
۷	لوله رانش از جنس فولاد به ضخامت (e)	۱/۶ سانتي متر
۸	تعداد پمپها (در حال كاركرد + ذخيره)	۱۲ عدد (۴+۸)
۹	دبي پمپاژ در شرايط نرمال	۱ مترمكعب در ثانيه
۱۰	دبي هر پمپ در شرايط نرمال (Q_R)	۱۲۰ ليتر در ثانيه
۱۱	پمپ سانتريفوژ ۵ طبقه با مدل	K.S.B-W.K ۱۵۰/۵
۱۲	قدرت هر پمپ	۳۱۵ KW
۱۳	ممان اينرسي (پمپ، موتور و آب درون پمپ) (T_R)	۹۴/۲ N.m
۱۴	تعداد دوران پمپ در حالت نرمال (N_R)	۱۴۵۰ r.p.m



شکل ۳- پروفیل خط لولهٔ رانش ایستگاه پمپاژ سد نهند



شکل ۴- نمایش تغییرات خطوط شیب هیدرولیکی ماکزیمم و مینیمم فشار ناشی از توقف ناگهانی پمپ نسبت به مسیر جریان در نبود محفظهٔ هوایی

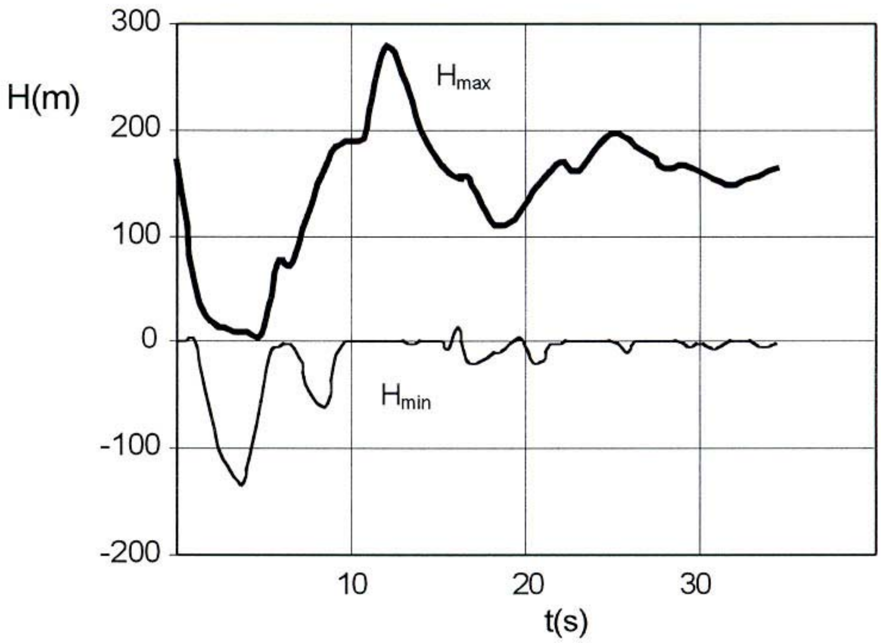
در شکل (۵) تـغـییرات حداکـثـر و حـداقـل فـشار نـسبـت بهزمـان در نبود تـأسیسـات کنتـرل فـشار (محـفـظه هـوایـي) پـس از تـوقـف ناگهانـي پمپها نمایـش داده شده اسـت. با توجه بهنتایج تحلیل پدیده و لحاظ کردن مشخصات خط لوله رانش در رابطه محاسبه تحمل حداکثر فشار لوله $(e = \frac{pd}{2\sigma})$ میتوان چنین استنتاج نمود که از نظر تحمل حداکثر فشار در لوله مشکلي احساس نمیگردد، ولیکن بهدلیل وقوع فشارهاي منفي شدید، وقوع پدیده خلاء زایي در لوله رانش بسیار محتمل خواهد بود، که براي کنترل این پدیده مخرب، طرح، محاسبه و جایگذاري محفظه هوایي در ایستگاه پمپاژ اجتنابناپذیر مینمایاند. بدین منظور محفظه هوایي با مشخصات مندرج در جدول (۳) در تحلیل رایانهاي پدیده ضربه قوچ براي هر مورد، بهطور جداگانه لحاظ و کارائي آنها در ایستگاه پمپاژ از نقطه نظر

تعديل و كنترل فشارهاي حداكثر و حداقل مورد ارزيابي قرار گرفته است. گفتني است كه براي محاسبه افت فشار در روزنه محفظه هوايي h_{Porf} از رابطه زير استفاده شده است:

$$h_{porf} = C_{orf} . Q_{porf} . \left| Q_{porf} \right| \qquad (۱۳)$$

كـه در آن Q_{porf} دبـي ورودي و يـا خروجـي از روزنه و C_{orf} ضـريب مقـاومـت مـوضـعي روزنـه محفظه هوايي را نشان ميدهد كه براي خـروج آب از محفظـه هـوايي و ورود آب به آن بـهترتيب مقادير ضرايب بـرابـر بـا ۲ و ۵ لحاظ گرديده است [۹ و ۱۱].

تحليـل رايانهاي با اعمال هر يك از چهار حالت محفظه هوايي بـا مشخصـات مندرج در جدول (۳)، حدود تغييرات فشارهاي حـداقل و حداكثر را مطابق جدول (۴) بهدست ميدهد. چنانچه از دادههاي جدول اخير پيداست، فشارهاي حداقل با كار گـذاشتن محفظه هوايي با حجم هواي $۴۰ m^3$ از مقدار m ۱۳۲ – بهحدود m ۷ – افزايش يافته است.



شكل ۵ – نمايش تغييرات ماكزيمم و مينيمم فشار نسبت به زمان پس از توقف ناگهاني پمپ در نبود محفظه هوايي

جدول ۳- مشخصات محفظة هوایی مفروض

رديف	حجم هواي محفظه هوايي (متر مكعب)	مساحت مقطع افقي محفظه هوايي (متر مربع)	تراز آب محفظه هوايي در حالت نرمال از خط لوله (متر)	حجم كل محفظه هوايي (متر مكعب)
۱	۴۰	۵	۳	۵۵
۲	۵۵	۵	۳	۷۰
۳	۶۵	۵	۳	۸۰
۴	۷۵	۵	۳	۹۰

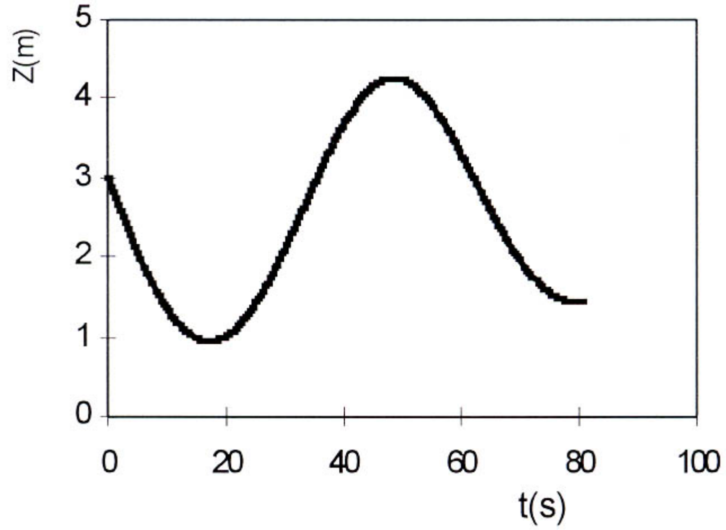
چنانجه از جدول (۴) پيداست در هر چهار حالت، فشارهاي ماكزيمم در محدودة مجاز قرار دارند، اما فشارهاي مينيمم در هر چهار حالت مقادير منفي بهخود ميگيرند كه احتمال وقوع خلاءزايي را براي هر چهار حالت فوق بايد مد نظر قرار داد. با مراجعه به جدول (۴) ملاحظه ميگردد با افزايش حجم هوا به مقادير زياد، ارتفاع نظير فشار مينيمم بهميزان كمي اصلاح ميشوند، وليكن مقدار آن همواره منفي ميباشد، كه علت اين امر بهشكل پروفيل خط لوله (تحدب شديد بهسمت بالا) برميگردد. با توجه به توضيحات مذكور، حالت اول بهعنوان گزينة برتر انتخاب ميشود و طراحي ، ساخت و نصب محفظة هوايي با حجم هواي ۴۰ m^3 پيشنهاد مي شود.

جدول ۴- محدودة تغييرات ارتفاع نظير فشار ماكزيمم و مينيمم در طول خط لولة رانش ايستگاه پمپاژ سد نهند تبريز

حالت	حجم هواي محفظه هوايي (متر مكعب)	محدودة ارتفاع نظير فشار ماكزيمم H_{max} (m)	محدودة ارتفاع نظير فشار مينيمم H_{max} (m)
اول	۴۰	$121/81 < H_{max} < 208/02$	$-7/02 < H_{min} < 0$
دوم	۵۵	$127/17 < H_{max} < 199/46$	$-5/56 < H_{min} < 0$
سوم	۶۵	$129/64 < H_{max} < 195/61$	$-4/81 < H_{min} \leq 0$
چهارم	۷۵	$131/7 < H_{max} < 192/64$	$-4/3 < H_{min} \leq 0$

جهت رفع فشار منفي از لوله كه فقط در محدودة كوچكي (حوالي نقطه E) در شكل (۴) روي ميدهد به كار بردن يك تانك ضربه گير يك طرفه توصيه ميشود [۱۴].

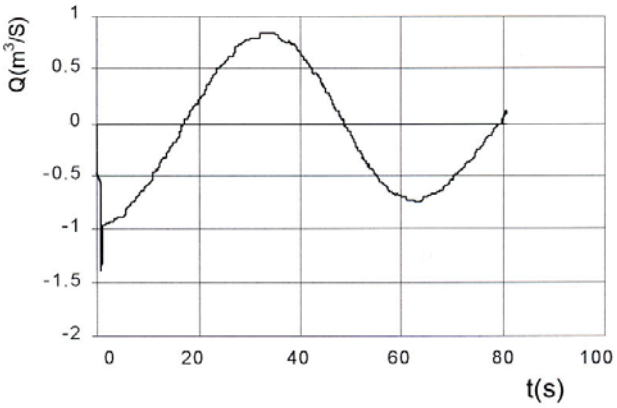
شكل (۶) تغييرات رقوم آب محفظه هوايي را با سپري شدن زمان و شكل (۷) دبي گذرنده از روزنه محفظه هوايي را نسبت به زمان نشان ميدهند.



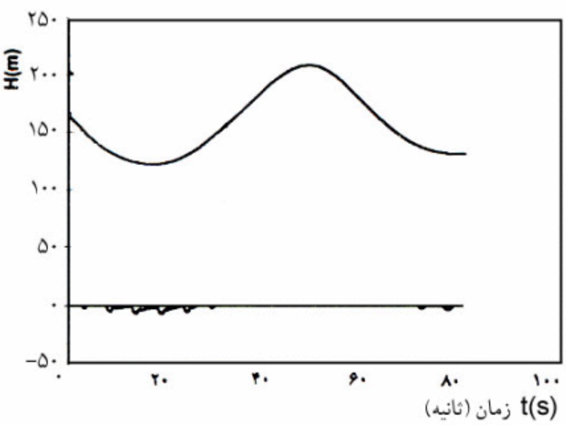
شكل ۶- تغييرات رقوم آب محفظه هوايي نسبت به زمان

تغييرات ارتفاع نظير فشار ماكزيمم و مينيمم نسبت به زمان نيز براي محفظة هوايي پيشنهادي در شكل (۸) آمده است. شكل (۹) نيز وضعيت خطوط شيب هيدروليكي را هنگام وقوع فشار مينيمم براي چهار حالت قبلي (محفظه با حجمهاي ۴۰ ، ۵۵،

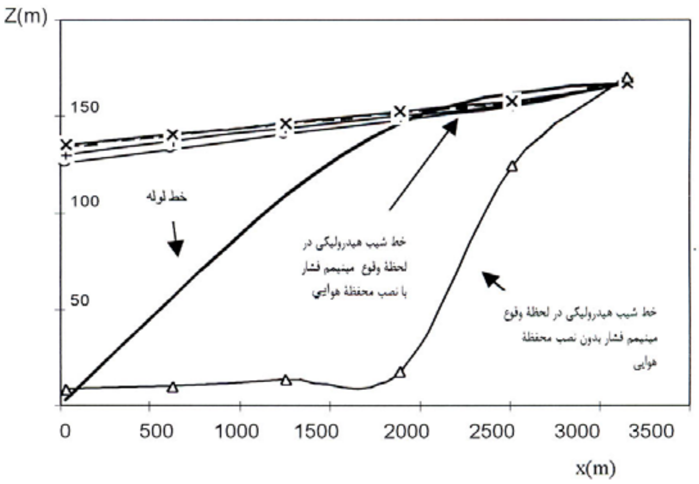
۶۵ و ۷۵ مـترمکعب) نشان می‌دهد. ملاحظه می شود که در مسیر کوتاهی از خط لوله فشار منفی جزیی ایجاد می‌شود.



شکل ۷- تغییرات دبي عبوري از روزنه محفظة هوايي نسبت به زمان



شکل ۸- تغییرات فشار ماكزيمم و مينيمم نسبت به زمان پس از نصب محفظة هوايي



شكل۹- موقعيت خطوط شيب هيدروليكي نسبت به خط لوله رانش در حالت مينيمم فشار براي چهار محفظه با حجمهاي مختلف

۴- نتیجه گیری

از آنچه بیان شد نتایج زیر عاید میگردد:

-در تحليل پديدهٔ ضربه قوچ ميتوان از روش مشخصه بهدليل داشتن دقت بالا و صرفهجويي در وقت بهعنوان يك روش كارآمد استفاده نمود.

- وقوع پديده ضربه قوچ در اثر از كار افتادن ناگهاني پمپ، امواج فشاري مثبت و منفي در خط لوله رانش ايجاد ميكند كه در صورت عدم اتخاذ تدابير ايمني لازم ميتواند تخريب و انهدام تأسيسات را بهدنبال داشته باشد.

- در ايستگاه پمپاژ سد نهند تبريز بهدليل عبور خط لوله رانش از مسير كوهستاني و مالاً تحدب شديد آن ، احتمال وقوع پديده خلاءزايي در نبود محفظه هوايي بسيار محتمل مي باشد، ليكن با نصب محفظه هوايي با حجم هواي ۴۰ مترمكعب، با ملحوظ داشتن ملاحظات اقتصادي، ميتوان پديده را كنترل نمود.

نمادها

سرعت	V(m/s)
فشار	(N/m^2)
دبي پمپاژ	$Q(m^3/s)$
جرم مخصوص	$\rho(Kg/m^3)$
فاصله	x(m)
زمان	t(s)
شتاب ثقل	$g(m/s^2)$
قطر لوله	D(m)
ضخامت جدار لوله	e(m)
سرعت موج فشاري	a(m/s)
زاويه تمايل محور لوله نسبت به افق	$\phi(\circ)$
مدول كشساني حجمي آب	$K(N/m^2)$
مدول كشساني جدار لوله	$E(N/m^2)$
ضريب اصطكاك	f
مقاومت مجاز جدار لوله	$\sigma(N/m^2)$
ارتفاع پمپاژ	H(m)
ضريب مقاومت موضعي گلوگاه محفظه هوايي	C_{orf}
دبي ورودي و يا خروجي محفظه هوايي	$Q_{porf}\ (m^3/s)$
افت انرژي موضعي در گلوگاه محفظه هوايي	$h_{porf}(m)$
گشتاور چرخشي	T(N.m)
سرعت دوراني پمپ	N(r.p.m)
ارتفاع پمپاژ بدون بعد	h
سرعت دوراني بدون بعد	α
دبي پمپاژ بدون بعد	v
گشتاور چرخشي بدون بعد	B
پارامتر	θ (o)
سرعت مخصوص در سيستم SI	N_s
مساحت مقطع لوله	$A(m^2)$

مراجع

[1] Joukowski, N.E, Mem. Imperial Academy Soc. of St. Petersburg, 4, no. 1898.

[2] Schnyder, O. "Comparisons between calculated and tests on water hammer in pumping plants", Trans. ASME 59, P. 661, 1937.

[3] Bergeron, L., Waterhammer in hydraulics and wave surges in electricity, John Wily & Sons, Inc., NewYork, 1960.

[4] Parmakian, J., Waterhammer analysis, Dover publication, inc. NewYork,1963.

[5] Streeter, V.L., Wylie, E.B., Hydraulic transients, Mc Graw-Hill Book Co., NewYork, 1967.

[6] Almeida, A.B., Koelle, E., Fluid transients in pipe network, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1992.

[7] Zaruba, K., Water hammer in pipe- line systems, Elsevier, 1993.

[8] Axworthy, DH. And Kamey, B.W.,"Transient Aanalysis with Time-Decoupled pumping Station", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 124, No. 3, March, 1998.

[9] Chaudhry, M.H. "Applied Hydraulic Transient", Published by Van Nostrand Reinhold Company, 1979.

[10] Larry W.Mays "Hydraulic Design Handbook" McGraw Hill, 1999.

[11] Martin, C.S,"Representation of Pump Characteristics for Transient Analysis" ASME. Symposium/ Boston, Nov. 13-18-1983.

[۱۲] فاضلي پايداز، ر.، «آناليز پديدة ضربة قوچ در يك ايستگاه پمپاژ با استفاده از روش مشخصه»، پاياننامة كارشناسيارشد مهندسي عمران - سازههاي هيدروليكي، دانشگاه تبريز، دانشكده فني، ۱۳۷۸.

[۱۳] بي نام، گزارشات مطالعات مرحلة اول طرح آبرساني نهند، خطوط انتقال و ايستگاه پمپاژ (جلد سوم)، وزارت نيرو- سازمان آب منطقهاي آذربايجانشرقي.

[۱۴] حسنزاده، ي.، ماشينهاي آبي - جلد اول- پمپها- انتشارات دانشگاه تبريز، ۱۳۷۸.