



شبیه‌سازی غیر دایم حرکت توپک در خطوط لوله گاز

◀ مسعود داودیان^۱، مهران عامری^۲

چکیده

نیاز به تمیزکاری، خارج کردن آب و واریسی خط لوله، توپکرانی را به یک استاندارد مشخص تبدیل کرده است. توپکرانی منظم باعث می‌شود که خط لوله خالی از میعانات گازی بوده، از افت فشار کلی جلوگیری کرده و از این رو راندمان جریان را افزایش می‌دهد. در این مقاله به تحلیل دینامیکی توپک در خطوط لوله نفت و گاز پرداخته می‌شود. معادلات اساسی جریان شکل دیفرانسیلی معادلات بقای جرم، ممنتیم خطی، انرژی و معادله حالت می‌باشند. معادلات دیفرانسیل پاره‌ای هذلولی غیر خطی جریان، همراه با معادله حرکت توپک همزمان به روش مقدار مشخصه‌ها حل می‌شوند. با توجه به حرکت توپک، در هر مرحله زمانی شرایط مرزی در دم و دماغه توپک محاسبه می‌شود.

شرایط اولیه جریان، با حل معادلات جریان در حالت پایدار با استفاده از روش «رانگ-کوتا» محاسبه می‌گردد. از حل این معادلات سرعت توپک، فشار خط در نقاط مختلف خط و مدت زمانی رسیدن توپک به انتهای خط به دست می‌آید. مقایسه نتایج با نتایج تجربی نشان از کارایی مدل در پیش‌بینی شرایط عملیات توپکرانی دارد.

کلید واژه‌ها: توپکرانی، جریان گذرا، جریان تراکم پذیر، روش مقدار مشخصه‌ها.

۱. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲. استادیار بخش مهندسی مکانیک - دانشگاه شهید باهنر کرمان

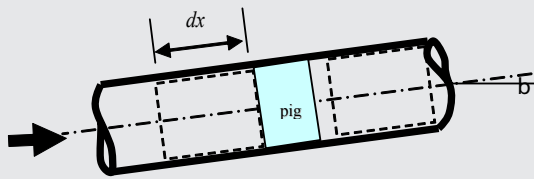
در این مقاله برای حل معادلات از روش مقدار مشخصه‌ها (Method of Characteristics) استفاده شده است. از این روش برای تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای به معادلات دیفرانسیل معمولی استفاده می‌شود. سپس از معادلات دیفرانسیل معمولی در طول خطوط مشخصه متناظر انتگرال گیری می‌شود. این روش برای جریان‌های گذرای بسیار سریع مفید می‌باشد [۷].

۱- مدل سازی و روش حل

حرکت توپک درون خط لوله می‌تواند با حل معادله جریان همراه با معادله حرکت توپک توصیف شود. سیال می‌تواند مایع یا گاز باشد و در اینجا سیال نیوتنی فرض می‌شود. شکل ۱- نشان دهنده یک مقطع از خط لوله همراه با توپک می‌باشد. فرض شده است که خط لوله دارای زاویه β با خط افق باشد. مقطع خط لوله ثابت و جریان یک بعدی می‌باشد. به منظور شبیه‌سازی حرکت توپک درون لوله، خط لوله به دو قسمت تقسیم می‌شود:

- بالادست جریان از ورودی خط لوله تا توپک و
- پائین‌دست جریان از توپک تا خروجی خط لوله.

شکل ۱- حجم کنترل برای جریان ناپایدار یک بعدی سیال همراه با توپک



۱-۱ معادلات جریان

در به دست آوردن معادلات، فرضیات، زیر انجام شده است: جریان تک فازی و یک بعدی است؛

- قطر داخلی خط لوله ثابت و ضخامت دیواره خط لوله به قدر کافی است، به طوری که می‌توان از تغییر شکل شعاعی صرف نظر کرد؛
- ضریب اصطکاک تابعی از زبری سطح و "عدد رینولدز" می‌باشد؛
- جریان گرما از خط لوله به صورت شبه تعادلی است؛
- برای جریان گاز فرض شده است که گاز ایده‌آل بوده و معادله حالت گاز ایده آل برقرار می‌باشد:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1)$$

برای حجم کنترل نشان داده شده معادله بقای جرم عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho A}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho A u) = 0 \quad (2)$$

با فرض ثابت بودن سطح مقطع و یک بعدی بودن جریان معادله به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

معادله مومنتم خطی برای جریان به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{F_x}{A} + \rho g \sin \beta = 0 \quad (4)$$

خطوط لوله، متداول‌ترین و ایمن‌ترین روش برای انتقال فرآورده‌های نفت و گاز هستند. طی استفاده از خط، دیواره خط لوله به رو به خرابی نهاده و شرایط خط خراب می‌شود. بنابراین راندمان هیدرولیکی خط کاهش یافته و منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی ناشی از پمپ کردن می‌شود. کاهش راندمان از دو فاکتور ناشی می‌شود: افزایش زبری سطح لوله و کاهش قطر داخلی.

تقاضای روز افزون برای استفاده از توپک‌رانی باعث شده است که سازنده‌های مختلف، طیف وسیعی از مدل‌های مختلف را تولید کنند. مشکلی که هنوز یک مهندس در طراحی با آن مواجه می‌باشد، فقدان ابزار قابل اعتماد برای پیش‌بینی بسیاری از متغیرهای مرتبط با حرکت توپک در خط لوله می‌باشد. بسیاری از اطلاعات موجود مبنای تجربی دارند. از این رو، انتخاب بهترین توپک و تخمین سرعت آن اغلب بر اساس حدس‌هایی بوده و لذا دارای خطای بسیار می‌باشد.

علی‌رغم آنکه عدم قطعیت‌های زیادی در زمینه مهندسی حرکت توپک وجود دارد، به نظر می‌رسد که کارهای عملی بیشتری باید در این زمینه صورت گیرد. با مروری بر کارهای انجام شده در می‌یابیم که تحقیقات کمی در زمینه حرکت توپک در خطوط لوله انجام شده است.

"مک دونالد" و "باکر" در سال ۱۹۶۴ از روشی محاسباتی برای پیش‌بینی پارامترهایی نظیر فشار در هنگام توپک‌رانی استفاده کردند [۱]. آنها برای ساده‌سازی، جریان را شبه تعادلی و بدون تغییر فاز فرض کردند.

"هان" دینامیک توپک‌های ساده در خطوط لوله گاز را بررسی کرد [۲]. "کردل" در سال ۱۹۸۶ راه‌کارهایی درباره طراحی و ساخت توپک‌ها ارائه کرد [۳].

"کدا"، "سوزاکاوا" و "فوروکاوا" در سال ۱۹۸۸ روشی جدید برای آنالیز پدیده گذرای ایجاد شده به وسیله توپک‌رانی در جریان دو فازی گاز-مایع ارائه کردند [۴]. هرچند که محدودیت اصلی روش آنها، یعنی تعادلی بودن برطرف نشد.

در سال ۱۹۹۵ "مینامی" و "شوهام" مدلی برای دینامیک گذرای توپک‌رانی در خطوط لوله با سیال دوفازی ارائه کردند [۵]. آنها همچنین پس از آزمایش، نتایج را با نتایج مدل مقایسه کردند.

در سال ۲۰۰۵ "جینگ جانگ" به شبیه‌سازی حرکت توپک در خط لوله‌های افقی با میعانات گازی کم پرداخت [۶]. در مدل ارائه شده به وسیله او وابستگی مدل هیدرو-ترمودینامیکی (Hydro-thermodynamic) و مدل رفتار فازی (Phase behavior) وجود دارد. این مدل توانایی ردیابی توپک و میزان افزایش طول بسته میعانات (Slug) را نیز دارد.

توپک به وسیله اختلاف فشار جریان گاز در دم (Tail) و دماغه (Nose) توپک به حرکت در می‌آید. به منظور تخمین سرعت توپک باید مدل ریاضی گذرای برای تحلیل جریان گذرای گاز در پشت و جلوی توپک و دینامیک حرکت توپک ارائه گردد.

به منظور فهم رفتار دینامیکی توپک باید معادلات دیفرانسیل پاره‌ای هذلولی غیر خطی جریان را همراه با معادله حرکت توپک حل کرد.

در خروجی خط لوله از مشخصه پیش رو برای محاسبه فشار در نقطه P از داده‌های معلوم نقاط N و L نشان داده شده در شکل ۲- استفاده می‌شود. از حل معادله (۱۵) داریم:

$$p_p = p_R + \frac{\gamma P_R}{c_R} [-(u_p - u_R) + E_{1R} \Delta t] \quad (۳۳)$$

۱-۶ فشار در ورودی و خروجی خط لوله مشخص

هنگامی که شرایط مرزی فشار مشخص باشد، سرعت جریان u_p در ورودی و خروجی خط لوله به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$u_p = u_S + \frac{c_S}{\gamma P_S} (p_p - p_S) + E_{2S} \Delta t \quad (۳۴)$$

$$u_p = u_R - \frac{c_R}{\gamma P_R} (p_p - p_R) + E_{1R} \Delta t \quad (۳۵)$$

۱-۷ شرایط مرزی در دم و دماغه توپک

با فرض آنکه جریان‌های بالادست و پائین دست کاملاً به وسیله توپک از هم جدا شده‌اند، سرعت‌های جریان در دم و دماغه توپک با سرعت آن برابر است. اگر توپک به نقطه تقسیمات بعدی جابجا نشود، مطابق شکل ۳- می‌توان برای به دست آوردن سرعت نقطه P به صورت زیر میانجی‌یابی کرد:

$$u_p = u_{p-1} + \frac{x_{p-1} - x_p}{x_{p-1} - x_{tail}} (v_{pig} - u_{p-1}) \quad (۳۶)$$

با استفاده از مقدار محاسبه شده و معادله (۳۲) می‌توان فشار را در نقطه P محاسبه کرده، سپس می‌توان برای محاسبه فشار در دم توپک به صورت زیر برون یابی کرد:

$$p_{tail} = p_{p-1} + \frac{x_{p-1} - x_{tail}}{x_{p-1} - x_p} (p_p - p_{p-1}) \quad (۳۷)$$

همان طور که در شکل ۴- نشان داده شده است، توپک می‌تواند به نقطه تقسیمات بعدی جابجا شود. در این صورت بعد از محاسبه فشار در دم توپک، پارامترهای جریان در نقطه P_{+1} باید برای محاسبات مرحله بعدی محاسبه شوند. روش محاسبه پارامترها در دماغه توپک همانند روشی است که برای دم توپک گفته شد. سرعت جریان در نقطه P' و فشار در دماغه توپک به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$u_{p'} = v_{pig} + \frac{x_{pig} - x_{p'}}{x_{pig} - x_{p'+1}} (u_{p'+1} - v_{pig}) \quad (۳۸)$$

$$p_{nose} = p_{p'} + \frac{x_{p'} - x_{pig}}{x_{p'} - x_{p'+1}} (p_{p'+1} - p_{p'}) \quad (۳۹)$$

اگر توپک از نقطه تقسیمات بعدی بگذرد، پارامترهای جریان در نقطه P' را با استفاده از معادلات (۲۲) تا (۲۷) محاسبه می‌شوند و سپس از معادله (۳۸) برای محاسبه فشار دماغه توپک استفاده می‌گردد.

$$X_S = X_N - (X_N - X_O) \frac{(u_N - c_N) \Delta t}{\Delta x} \quad (۲۴)$$

$$p_p = \frac{\gamma}{\frac{c_R}{P_R} + \frac{c_S}{P_S}} \times \left[(u_R - u_S) + \frac{c_R + c_S}{\gamma} + (E_{1R} - E_{2S}) \Delta t \right] \quad (۲۵)$$

$$u_p = u_R + \frac{c_R}{\gamma P_R} (p_p - p_R) + E_{1R} \Delta t \quad (۲۶)$$

$$\rho_p = \rho_M + \frac{1}{c_M} [p_p - p_M - E_{3M} \Delta t] \quad (۲۷)$$

در معادلات (۲۲) تا (۲۴)، X محاسبه شونده مطلوب P ، ρ یا u جایگزین می‌شود. در معادلات (۲۵) تا (۲۷)، E_{2S} و E_{3M} از معادلات (۱۸) تا (۲۰) با جایگزین کردن مقادیر متناظر در نقاط R ، S و M به دست می‌آیند.

۱-۳ شرایط اولیه

به علت نامشخص بودن شرایط اولیه خط، جریان پایدار برای شرایط اولیه فرض شده است. این مقادیر می‌تواند با استفاده از معادلات (۳)، (۴) و (۶) در حالت پایدار به دست آیند:

$$\rho u = \text{const} \tan t \quad (۲۸)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + u \frac{du}{dx} = -\frac{F_f}{\rho A} - g \sin \beta \quad (۲۹)$$

$$u \frac{dp}{dx} + \gamma p \frac{du}{dx} = \frac{\gamma - 1}{A} [(F_f + A \rho g \sin \beta) u] \quad (۳۰)$$

برای حل دستگاه معادلات فوق از روش "رانگ-کوتا" مرتبه چهار استفاده می‌شود تا شرایط اولیه جریان $\rho(0, x)$ ، $u(0, x)$ و $p(0, x)$ در تمام نقاط جریان بالادست و پائین دست محاسبه شوند.

۱-۴ شرایط مرزی

شرایط مرزی در ورودی و خروجی لوله به دو روش می‌تواند تعیین شود:

۱- تحت شرایط دبی جریان $Q(t)$ یا

۲- فشار $p(t)$ همراه با دمای سیال $T(t)$.

شرایط مرزی در دم توپک برای جریان بالادست و در دماغه آن در جریان پائین دست به رفتار دینامیکی توپک، از قبیل موقعیت توپک، $x_{pig}(t)$ و سرعت آن، $v_{pig}(t)$ بستگی دارد. در مرز تنها یکی از مشخصه‌ها وجود دارد به عنوان مثال در جریان بالادست مشخصه پس رو و در جریان پائین دست مشخصه پیش رو وجود دارد. انتخاب شرایط مرزی به طور صحیح بسیار مهم است. در ادامه شرایط مرزی در ورودی و خروجی خط لوله و در دم و دماغه توپک شرح داده می‌شود.

۱-۵ دبی جریان در ورودی و خروجی خط لوله مشخص

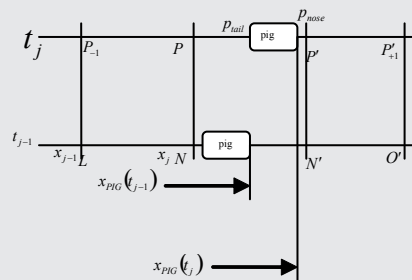
سرعت جریان را می‌توان از دبی جریان محاسبه کرد:

$$u(t) = \frac{Q(t)}{A} \quad (۳۱)$$

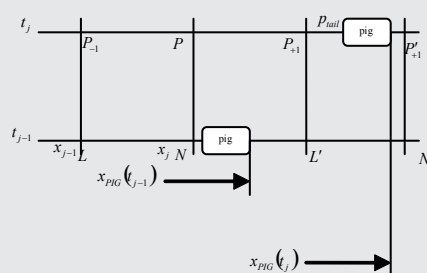
در ورودی خط لوله از مشخصه پس رو برای محاسبه فشار p_p در نقطه P از داده‌های معلوم نقاط N و O نشان داده شده در شکل ۲- استفاده می‌شود. از حل معادله (۱۶) داریم:

$$p_p = p_S + \frac{\gamma P_S}{c_S} [(u_p - u_S) - E_{2S} \Delta t] \quad (۳۲)$$

شکل (۳) توپک در نقطه تقسیمات قبلی باقی می ماند



شکل (۴) توپک به نقطه تقسیمات جدید جابجا شده است



از دیفرانسیل فشار دم و دماغه توپک در هر مرحله محاسباتی از دینامیک جریان بالادست و پائین دست حاصل می شود. موقعیت و سرعت توپک را می توان با حل معادله (۴۰) به روش رانگ-کوتا مرتبه چهار به دست آورد.

جریان در بالادست و پائین دست توپک به تعدادی ایمن با طول مساوی تقسیم می شود. به منظور همگرایی روش عددی گام مکانی و زمانی انتخاب شده باید سازگار با معیار «سی-اف-ال» باشند. برای هر ایمن گاز معادلات اساسی به منظور به دست آوردن تغییر دینامیک جریان گاز بعد از هر گام زمانی حل می شوند. سپس فشار در دم و دماغه توپک محاسبه می شود. با استفاده از این مقادیر فشار نیروی محرک توپک محاسبه شده معادله دینامیک توپک به منظور به دست آوردن موقعیت و سرعت آن حل می شود. با مقادیر به دست آمده برای دینامیک توپک، شرایط مرزی در دم و دماغه توپک را بدست می آوریم و با استفاده از این مقادیر دینامیک جریان را حل می کنیم. محاسبات دینامیک جریان و توپک تا رسیدن توپک به انتهای خط لوله تکرار می شوند.

۳- نتایج شبیه سازی

شبیه سازی بر روی قطعه ای از خط لوله گاز درخت "یوجونگ بو-سنگی" (Ueijungboo-Sangye) در کره که در مقاله "تن تین گوین" (Tan Tien Nguyen) و "سنگ بنگ کیم" (Sang Tien Nguyen) انجام شده است [۷].

مقادیر عددی مورد نیاز برای شبیه سازی مطابق با جدول ۱- بر مبنای اطلاعات موجود در شرکت گاز کره (Korea Gas Corporation) می باشد [۷]. در شبیه سازی فرض شده است که توپک در وسط خط لوله به وسیله مانعی، براده ها یا تنه شین ها گیر کرده است.

۲- مدل دینامیکی توپک

نیروهایی که بر توپک عمل می کنند در شکل ۱- نشان داده شده اند، معادله دینامیک توپک با استفاده از قانون دوم نیوتن می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_p(t) + F_{fp}(t) \quad (40)$$

در معادله بالا، نیروی حرکت دهنده توپک $F_p(t)$ با استفاده

جدول (۱- مقادیر عددی مورد نیاز برای شبیه سازی [۷])

واحد	مقدار	پارامتر	واحد	مقدار	پارامتر
m^2/s	$1/45_e - 5$	v	m	۱۴۸۰۰	l
J/kgK	۵۱۸/۳	R	m	۰/۷۳۶۶	d
-	۱/۴	γ	mm	۰/۰۴۵	ε
kg	۲۳۲۰	M	$W / m^2 K$	۲	h
Ns/m	۰/۷۴	C	C°	۱۵	T_{ext}
N/m	۰	K	bar	۸	P_0
m	۲/۰۰	L_{PIG}	m^3/s	۱/۱۶	Q_0
m	۷۴۰۰	x_{PIG0}	kg / m^3	۵/۴۴	ρ_0
m/s	۰	v_{PIG0}	bar	۷/۶۵	P_1
bar	۲	F_{fpsta}	m^3/s	۱/۱۶	Q_1
bar	۰/۳۳	F_{fpdyn}	kg / m^3	۵/۲	ρ_1
N	۰	F_b	$^\circ C$	۱۵	T

همان‌طور که در فصل مدل‌سازی شرح داده شد، گام زمانی و مکانی انتخاب شده باید با معیار سی-اف-ال سازگار باشند. شبیه‌سازی با گام زمانی $\Delta t = 0.05$ s و گام مکانی m $\Delta x = 40$ انجام شده است.

شبیه‌سازی در دو حالت متفاوت با شرایط مرزی زیر انجام شده است:

- ۱) جریان ثابت در ورودی $u_0(t) = u_0$ و فشار ثابت در خروجی $p_l(t) = p_l$
- ۲) فشار ثابت در ورودی $p_0(t) = p_0$ و جریان ثابت در خروجی $u_l(t) = u_l$

شکل ۵- اختلاف فشار در دو طرف توپک بر حسب زمان را نشان می‌دهد. در هر دو شرط مرزی به کار برده شده، ابتدا اختلاف فشار در دو طرف توپک بر غلبه بر نیروی اصطکاک استاتیکی ما بین توپک و دیواره خط لوله افزایش می‌یابد و پس از حرکت و تبدیل نیروی اصطکاک استاتیکی به دینامیکی، اختلاف فشار سرعت کاهش پیدا می‌کند.

از شکل ۵- روشن است که هنگامی که شرط مرزی اول، $u_0(t) = u_0$ و $p_l(t) = p_l$ برقرار باشد؛ در زمان کمتری اختلاف فشار دوسر توپک به مقدار لازم برای غلبه بر نیروی اصطکاک می‌رسد. از این‌رو توپک زودتر شروع به حرکت کرده و زمان عملیات توپکرانی کاهش پیدا می‌کند.

در شکل ۵- پس از حرکت توپک، اختلاف فشار در یک مقطع زمانی به شدت کاهش می‌یابد؛ که به دلیل کاهش فشار دم توپک و افزایش فشار دماغه توپک، مطابق شکل‌های ۸- و ۹ می‌باشد. هنگامی که اختلاف فشار دو طرف توپک از مقدار نیروی اصطکاک دینامیکی کمتر می‌شود، توپک به دلیل اینرسی به حرکت خود ادامه می‌دهد.

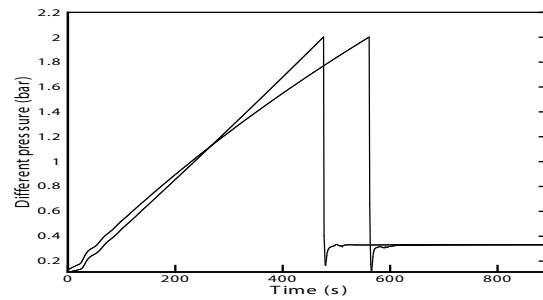
شکل ۶- سرعت توپک بر حسب زمان را نشان می‌دهد. مطابق شکل هنگامی که شرط مرزی اول برقرار باشد، توپک پس از مدت زمان کمتری به حرکت در آمده و سرعت ماکزیمم آن نیز کمتر است. شکل ۷- سرعت توپک را بر حسب موقعیت آن نشان می‌دهد. از شکل روشن است که وقتی شرایط مرزی اول برقرار باشد، به طور کلی سرعت توپک پس از حرکت نسبت به هنگامی که شرط مرزی دوم برقرار باشد کمتر است.

شکل‌های ۸- و ۹ به ترتیب تغییرات فشار دم و دماغه توپک بر حسب زمان، با شرط مرزی، $u_0(t) = u_0$ و $p_l(t) = p_l$ را نشان می‌دهند. از شکل (۸) روشن است که ابتدا فشار دم توپک برای غلبه بر نیروی اصطکاک استاتیکی افزایش پیدا کرده، بعد از حرکت کاهش یافته و ثابت می‌شود. در دماغه توپک، مطابق شکل ۹-، قبل از حرکت فشار ثابت، بعد از حرکت ابتدا افزایش و بعد رو به کاهش نهاده و ثابت می‌شود.

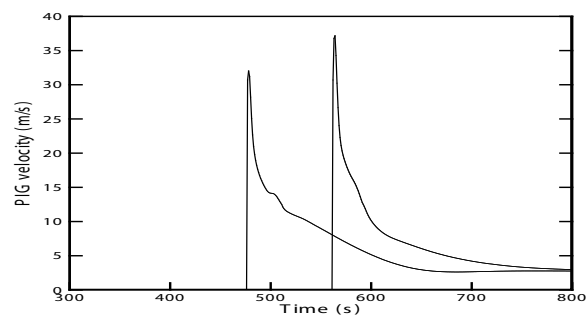
شکل ۱۰- فشار دماغه توپک بر حسب زمان، با شرط مرزی $p_0(t) = p_0$ و $u_l(t) = u_l$ را نشان می‌دهد. مطابق شکل به دلیل وجود شرط مرزی جریان ثابت در انتهای خط، باعث کاهش فشار دماغه توپک می‌شود، با حرکت توپک فشار دماغه توپک افزایش یافته، سپس به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد.

شکل ۱۱- موقعیت توپک بر حسب زمان را نشان می‌دهد. حرکت توپک در ابتدا به علت وجود شتاب غیر خطی است، سپس بعد از ثابت شدن سرعت توپک خطی می‌شود. با توجه به

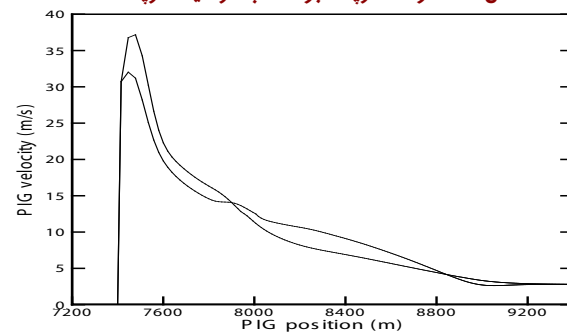
شکل- ۵) اختلاف فشار دوسر توپک بر حسب زمان



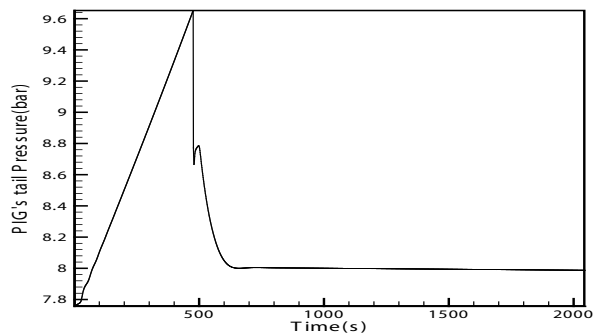
شکل- ۶) سرعت توپک بر حسب زمان



شکل- ۷) سرعت توپک بر حسب موقعیت توپک



شکل- ۸) فشار دماغه توپک بر حسب زمان



اینکه محدوده مجاز و مؤثر سرعت توپک در تمیز کاری، جریان گاز ۲ تا ۷ متر بر ثانیه می باشد؛ لذا می توان محدوده دبی ورودی را تعیین کرد [۷].
 در شکل-۱۲ دبی مجاز تا $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$ می باشد.

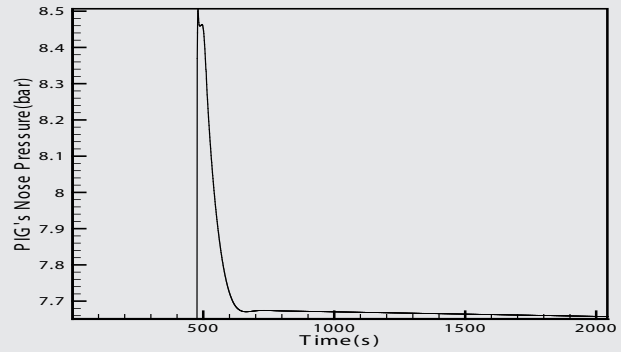
۴- نتیجه گیری

در این مقاله به شبیه سازی حرکت توپک در خطوط لوله گاز به روش مقدار مشخصه ها پرداخته شد. شبیه سازی عملیات توپکرانی با اعمال دو شرایط مرزی متداول نشان می دهد که شرایط مرزی جریان ثابت در ورودی $u_0(t) = u_0$ و فشار ثابت در خروجی $p_l(t) = p_l$ ، به علت کمتر بودن سرعت ماکزیمم توپک و حرکت زود هنگام آن، هم از نظر ایمنی و کارایی و هم از نظر زمان کلی عملیات دارای مزیت می باشد.
 با تخمین سرعت توپک در هر لحظه به وسیله شبیه سازی می توان روشی برای کنترل سرعت در جاهایی که بیش از مقدار مجاز است ارائه کرد. این مدل قادر به تعیین زمان عملیات توپکرانی است و از این ویژگی می توان برای برنامه ریزی عملیات استفاده کرد.
 بررسی اثر دبی جریان ورودی خط لوله نشان می دهد که برای فشارخروجی معین، دبی جریان ورودی باید از مقدار معینی کمتر باشد تا سرعت توپک در محدوده مجاز قرار گیرد. به این ترتیب می توان گفت که یک مقدار بهینه برای دبی جریان ورودی وجود دارد.

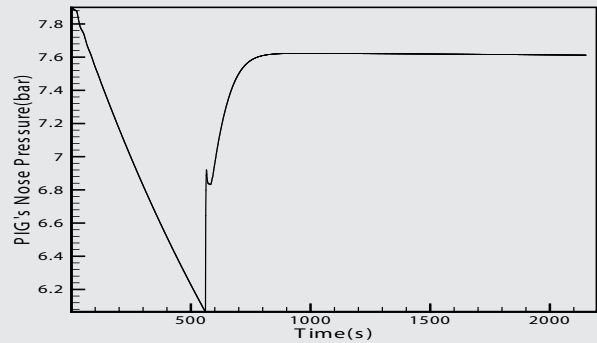
مراجع:

- McDonald, A.E. and Baker, o.: "A Method of Calculating Multiphase Flow in Pipe Lines Using Rubber Spheres to control liquid Holdup," Drill. & Prod Prac., API (1964) 56
- Hau, R. 1986, "Analysis and Modeling of Pipe Line Dewatering and startup, Part1," Pipeline industry, pp. 37-41.
- Cordell, J. L., 1986, "Design of Pigs for Subsea Systems," Proc., Conference on Subsea Pigging, Haugesund, Norway, Pipes & Pipelines International.
- Kohda, K., Suzukawa, Y. and Furukawa, H. "Pigging Analysis for Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipelines," presented at the 1998 ASME Annual Energy-Resources Technology Conference and Exhibition, New Orleans
- Minami, K., Shoham, O., 1991. Pigging dynamics in two-phase flow pipelines: experiment and modeling. SPE Prod. Facil. 10 (4), 225-231.
- Xiao-Xuan Xu, Jing Gong, 2005, "Pigging simulation for horizontal gas-condensate pipelines with low-liquid loading", Journal of Petroleum Science and Engineering 48 (2005) 272-280
- Nguyen, T. T., Kim, S. K., Yoo, H. Y., Rho, Y. W., 2001, "Modeling and Simulation for PIG Flow Control in Natural Gas Pipeline", KSME International Journal, Vol. 15, No. 8, pp. 1165-1173
- Anderson, D. A., Tannehill, J. C., Pletcher, R. H., 1984, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", Hemisphere Publication Corporation, New York

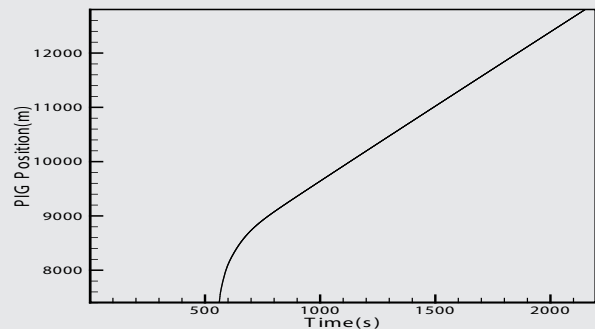
شکل -۹) فشار دماغه توپک بر حسب زمان



شکل -۱۰) فشار دماغه توپک بر حسب زمان



شکل -۱۱) موقعیت توپک بر حسب زمان



شکل -۱۲) سرعت توپک بر حسب زمان

