

## تحلیل و بررسی تغییرات ضریب میرایی در ارتعاشات پمپ های الکتریکی درون چاهی (ESP)<sup>۱</sup> نفت و گاز و تغییر عملکرد آن

علی مکوندی

کارشناسی ارشد مکانیک دانشگاه جامی فولاد شهر

ali.makvandi021@gmail.com

### چکیده

در این مقاله پمپ های الکتریکی درون چاه های نفت و گاز که مورد استفاده برای تولید نفت و گاز می باشند مورد بررسی قرار می گیرد. در ابتدا به معرفی پمپ های الکتریکی درون چاه پرداخته می شود سپس مدل فیزیکی یک پمپ را طراحی کرده و آنالیز مربوطه انجام می گیرد. از آنجاییکه این گونه پمپ ها در صنایع نفت و گاز بسیار مورد توجه می باشند بنابراین ساخت، آنالیز و نتیجه گیری از نحوه کارکرد این نوع پمپ ها از اهمیت قابل توجهی برخوردار می باشد. این پژوهش پس از معرفی پمپ های درون چاهی توسط نرم افزار MATLAB برنامه نویسی می شود و آنالیز ارتعاشاتی اجزای مکانیکی سیستم را مورد تحلیل قرار می دهد. بدین منظور مدل (ESP String) را با ۳ دیسک صلب شبیه سازی کرده و توسط اجزای فنی و میرایی به صورت پشت سرهم متصل می شوند. ابتدا معادلات حرکت سیستم را به دست آورده و پس از حل توسط نرم افزار MATLAB تحلیل کرده و نتایج بصورت نمودارهای ارتعاشی استخراج می شوند.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت مقاله: آذرماه ۱۴۰۰

تاریخ پذیرش مقاله: آذرماه ۱۴۰۰

### واژگان کلیدی

پمپ های الکتریکی درون چاهی نفت و گاز

ارتعاشات

ضریب میرایی

نفت و گاز

تولید نفت

ازدیاد برداشت

### نحوه ارجاع به این مقاله:

ع. مکوندی، تحلیل و بررسی تغییرات ضریب میرایی در ارتعاشات پمپ های الکتریکی درون چاهی (ESP) نفت و گاز و تغییر عملکرد آن، ماهنامه رهیافتی در مدیریت نفت و گاز، دوره ۲، شماره ۷، ص ۱-۹، آذر ۱۴۰۰.

<sup>1</sup> Electrical Submersible Pump

## ۱. مقدمه

پمپ های الکتریکی درون چاهی به صورت گسترده برای ازدیاد برداشت و احیای چاه های نفت و گاز استفاده می شوند. این نوع پمپ ها در میداین نفتی با موتورهای ۳ فاز و چند مرحله ای بصورت متوالی نصب می گردند و (ESP string) شامل اجزای مختلفی می باشد که در این پژوهش ۳ قسمت اصلی پمپ مدل و تحلیل می شود. پمپ های درون چاهی به صورت مؤثرترین متد تولید نفت و گاز در دسته ی احیای چاه های نفت و گاز قرار می گیرند و هنگامی مؤثرتر هستند که در موقعیت های فشار کم درون چاه، نسبت گاز به نفت پایین (GOR)، نقطه شبیم کم (Bubble point) و نسبت آب به سیال (WCT) پایین یا API پایین کار می کند.

در سالهای اخیر این نوع پمپ ها که دارای جابجایی مثبت هستند و به عنوان تکنولوژی که مقرون به صرفه بوده و همچنین نیاز به تعمیرات کمی دارند و کاربرد بسیار زیادی در انتقال سیال درون چاه به سطح زمین را دارند شناخته شده است. در کشور ایران نیز تاکنون فقط در یک میدان نفتی استفاده شده اند که در سالهای آینده نیز میتوان در میداین بیشتری از این نوع پمپ ها استفاده کرد.

روش های برداشت مصنوعی به ۳ گونه زیر تقسیم می شوند:

۱- استفاده از تجهیزات مکانیکی درون چاه مثل پمپ های درون چاهی.

۲- کاهش وزن سیال با افزایش فشار گاز.

۳- بهبود ازدیاد از طریق چاههای مجاور.

بیش از ۶۰ درصد از چاههای نفت از روش های مصنوعی برای احیای چاه نفت استفاده می کنند. روش های مصنوعی برداشت به صورت : plunger lift, beam/sucker rod pump (SRP), gas lift, progressive cavity pump (PCP) و submersible pump electric (ESP) استفاده می شوند.

حدود ۲۰-۱۵ درصد از تعداد تقریباً ۱ میلیون چاه نفت در سراسر دنیا از ESP ها برای تولید نفت بهره می برند همچنین ESP ها سریع ترین تکنولوژی تولید مصنوعی نفت محسوب می شوند.

ESP ها تطبیق پذیری در تولید نفت دارند و محدوده تولید بین ۶۴۰۰۰-۷۰ بشکه نفت در روز را می توانند پوشش دهند و همچنین تا عمق ۱۵۰۰۰ ft نفت را به سطح زمین ارسال کنند. این نوع پمپ ها می توانند تا سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه دوران داشته باشند.

پمپ های شناور در نفت در انتهای رشته تکمیلی نصب می شوند و همچنین می توان آنها را در لوله جداری ۴/۵ Inch وجود مواد آلوده کننده و خورنده در نفت مثل دی هیدروژن سولفید (H<sub>2</sub>S) و کربن دی اکسید (CO<sub>2</sub>) مورد استفاده قرار داد.

این نوع پمپ ها در چاههای عمودی و افقی نفت قابل استفاده می باشند و همچنین آزمایش های انجام شده نشان می دهد افزایش نسبت آب به سیال (WCT) تأثیری روی کارکرد مؤثر ESP ها نمی گذارد.

در سیستم های ESP، موتور الکتریکی پمپ چند مرحله ای گریز از مرکز در امتداد رشته تکمیلی رانده می شود و به وسیله ی کابل برق به پنل VSD که بر روی سطح زمین قرار دارد متصل می شود.

پمپ چند مرحله ای شامل پره های دورانی و قسمت ثابت می باشد و جنس دیفیوزرها از نیکل-آهن هستند که دارای خاصیت ضد خوردگی و ضد خراش می باشند، ساخته شده اند.

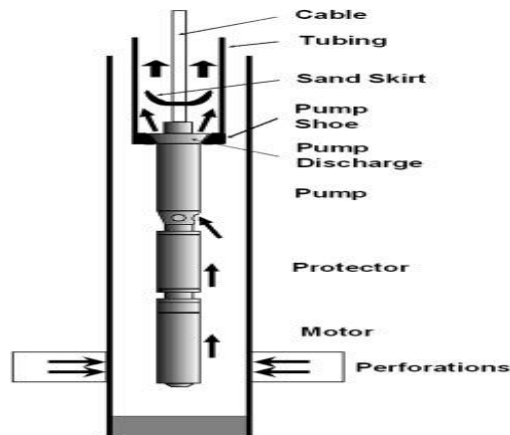
یاتاقان های پمپ از نوعی خاص Coated bearing ساخته شده اند که باعث افزایش مقاومت در مقابل خراش های تند، نمک مخلوط در نفت، پارافین و آسفالت را موجب می شود. مواد مورد نیاز ساخت اجزای پمپ به خوردگی و خراش های موجود در محیط چاه بستگی دارد.

پره های نصب شده بر روی shaft از آلیاژ نیکل-مس یا آلیاژهای مقاوم دیگر یا فولاد زنگ نزن ساخته می شوند.

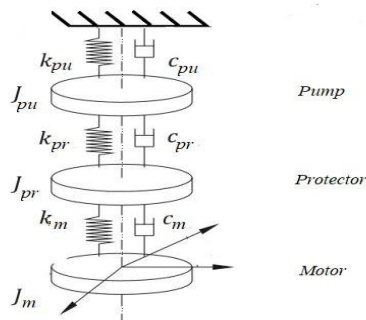
اجزای اصلی پمپ ها شامل: پمپ گریز از مرکز چند مرحله ای، موتور ۳ فاز، محفظه عایق، کابل برق و کنترلرهای سطحی می باشد. همچنین در این پژوهش ارتعاش وارد شده بر روی ESP string با عملیات واقعی سازگار شده است و مقادیر اولیه برای محاسبات براساس مقادیر واقعی گردآوری شده است.

## ۲. معادلات جنبشی مدل

در ابتدا شکل شماره (۱) مدل ساده شده ESP string را نشان می دهد.



شکل ۱: مدل ساده شده ESP string



شکل ۲: مدل تفکیک شده سیستم

شکل شماره ۲ مدل تفکیک شده با ۳ درجه آزادی در مسأله نشان داده شده است.

## ۳. معادلات دینامیکی مدل

انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل از روابط زیر بدست می آیند:

$$E = \frac{1}{2} J_{pu} \dot{\theta}_{pu}^2 + \frac{1}{2} J_{pr} \dot{\theta}_{pr}^2 + \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2 \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2} K_{pu} (\theta_{pu} - \theta_{pr})^2 + \frac{1}{2} K_{pr} (\theta_{pr} - \theta_m)^2 + \frac{1}{2} K_m \theta_m^2$$

E: انرژی جنبشی

U: انرژی پتانسیل

$\dot{\theta}$ : سرعت زاویه ای

$\theta$ : جابجایی زاویه ای

$pu$ : پمپ

$pr$ : پروتکتور

$m$ : موتور

ماتریس اینرسی برای سیستم به این صورت تعریف می شود:

$$\begin{bmatrix} J_{pu} & 0 & 0 \\ 0 & J_{pr} & 0 \\ 0 & 0 & J_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

همچنین ماتریس میرایی نیز به صورت زیر نشان داده می شود:

$$(3)$$

$$\begin{bmatrix} C_{pu} & -C_{pr} & 0 \\ -C_{pr} & C_{pr} + C_m & -C_m \\ 0 & -C_m & C_m \end{bmatrix}$$

و در نهایت ماتریس سختی به صورت زیر نشان داده می شود:

$$(4)$$

$$\begin{bmatrix} K_{pu} & -K_{pr} & 0 \\ -K_{pr} & K_{pr} + K_m & -K_m \\ 0 & -K_m & K_m \end{bmatrix}$$

فرایند آنالیز با معادلات لاگرانژ ساده سازی شوند:

$$(5)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial E}{\partial \theta_i} + \frac{\partial U}{\partial \theta_i} = Q_i$$

پس از ساده سازی و استفاده از معادلات (1) و (2) ماتریس کلی سیستم بصورت زیر به دست می آید:

$$(6)$$

$$\begin{bmatrix} J_{pu}S^2 + (C_{pu} + C_{pr}) * S + (K_{pu} + K_{pr}) & -C_{pr} * S - K_{pr} & 0 \\ -C_{pr} * S - K_{pr} & J_{pr}S^2 + (C_{pr} + C_m) * S + (K_{pr} + K_m) & -C_m * S - K_m \\ 0 & -C_m * S - K_m & J_mS^2 + C_m * S + K_m \end{bmatrix}$$

در ماتریس بالا ترم  $S$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$x = X e^{(-a + j\omega_d)t}$$

$$x = X e^{St}$$

$$S = -a + j\omega_d$$

با توجه به وجود میرایی در سیستم پاسخ ها دارای دو بخش نوسانی و میرایی هستند و:

$a$  معرف بخش میرایی

$j\omega_d$  معرف بخش نوسانی سیستم هستند

سختی معادل برای هر دیسک از معادله (4) به دست می آید:

$$(7)$$

$$K = \frac{GJ}{L}$$

که مقدار  $J$  برای هر دیسک از معادله زیر به دست می آید:

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (8)$$

برای به دست آوردن مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از معادله زیر استفاده می شود:

$$Y = \sum_{j=1}^4 C_j \phi_j e^{-\gamma_j t} \quad (9)$$

ماتریس مقادیر جابجایی اولیه و سرعتهای اولیه به صورت زیر تعریف می شود:

$$Y = \begin{bmatrix} X_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

برای به دست آوردن مقدار C در رابطه (۹) از معادله زیر استفاده می شود:

$$C = V^{-1} * Y \quad (11)$$

در معادله (۱۱) V شکل مودهای سیستم (مقادیر ویژه) می باشد.

برای به دست آوردن Y نیز از رابطه زیر استفاده می شود:

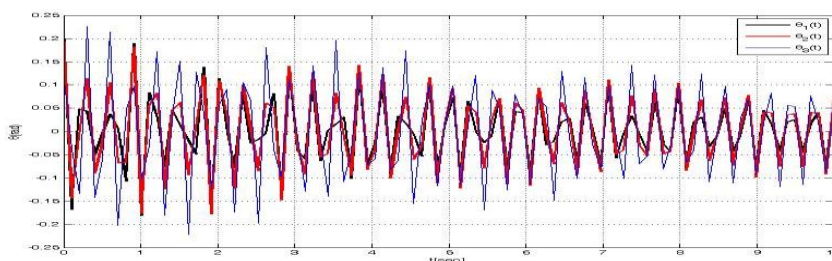
به عنوان مثال اگر Y به ازای جابجایی دیسک اول خواسته شود به شکل رابطه ی زیر نوشته می شود:

$$Y_4 = \text{Real}(C_4 \phi_4 e^{-\gamma_4 t}) \quad (12)$$

#### ۴. حل دینامیکی مدل

##### ۱- ضریب میرایی ۱ Ns/m برای موتور الکتریکی:

در این قسمت ابتدا با در نظر گرفتن ضریب میرایی برای دیسک سوم که همان پمپ الکتریکی می باشد مسئله مدل می شود. مدل ۳ دیسک صلب توسط نرم افزار MATLAB برنامه نویسی شده و برای مقدار جابجایی زاویه ای اولیه برای دیسک اول به میزان ۵/۱ rad و دیسک سوم به میزان ۱/۱ rad می باشند. با توجه به شماتیک دیسکها در شکل (۱) مشخص شد که دیسک ۱ نشان دهنده پمپ و دیسک سوم موتور را نشان می دهد بنابراین پروتکتور بین دیسک ۱ و ۳ قرار می گیرد و اثرات ۲ دیسک دیگر بر روی آن تأثیر می گذارند. شکل شماره (۳) نشان دهنده مقدار مقادیر جابجایی دیسک ها در واحد زمان می باشند.

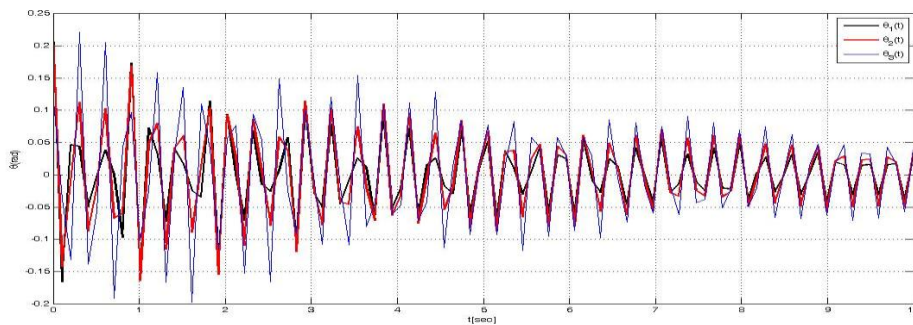


شکل ۳: جابجایی زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی ۱ Ns/m

در شکل (۳) مشاهده می شود با اعمال مقادیر اولیه برای دیسک های اول و سوم حرکت دیسک ها به صورت متناوب نوسان کرده و پس از مدتی به دلیل وجود میرایی در سیستم تمایل به میرا شدن دارند.

### ۲- ضریب میرایی $2 \text{Ns/m}$ برای موتور الکتریکی:

در این قسمت با توجه به اینکه ضریب میرایی تغییر می کند تغییرات به وجود آمده در شکل شماره ۴ مشاهده می شود.

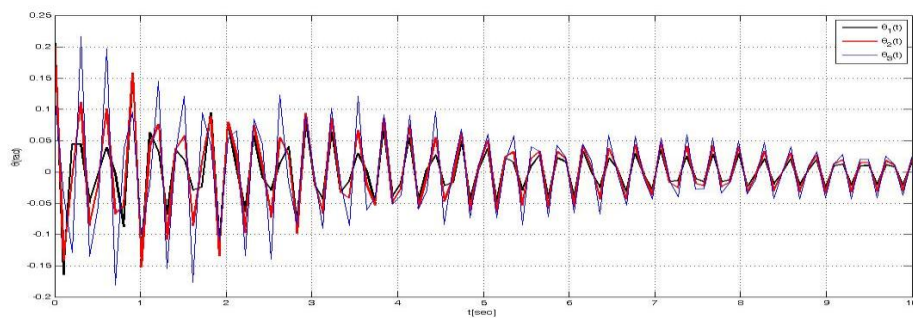


شکل ۴: جابجایی زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی  $2 \text{Ns/m}$

در شکل شماره ۴ تغییرات جابجایی زاویه ای اولیه اجزای سیستم به ازای ضریب میرایی  $2 \text{Ns/m}$  مشاهده می شود و همانطور که مشاهده می گردد با افزایش ضریب میرایی تمایل سیستم به میرا شدن بیشتر می شود.

### ۳- ضریب میرایی $3 \text{Ns/m}$ برای موتور الکتریکی:

در این بخش ضریب میرایی موتور الکتریکی به مقدار  $3 \text{Ns/m}$  تغییر داده می شود و نوسان اجزای سیستم در شکل ۵ مشاهده می گردد.

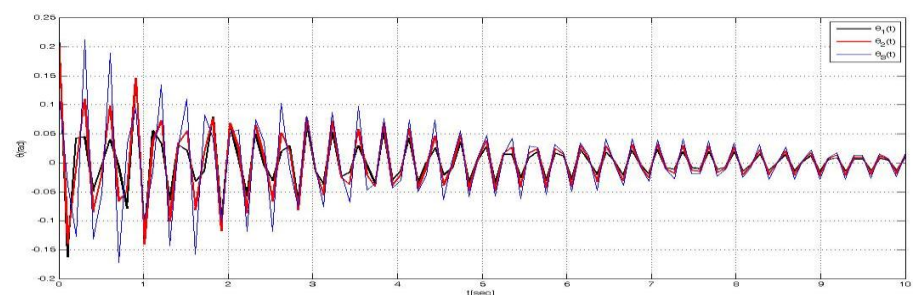


شکل ۵: جابجایی زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی  $3 \text{Ns/m}$

در شکل شماره ۵ تغییرات جابجایی زاویه ای اولیه اجزای سیستم به ازای ضریب میرایی  $3 \text{Ns/m}$  مشاهده می گردد و همچنین نوسان اجزای سیستم و تمایل آنها به میرا شدن نسبت به حالات قبل بیشتر می شود.

### ۴- ضریب میرایی $4 \text{Ns/m}$ برای موتور الکتریکی:

این قسمت ضریب میرایی برای موتور الکتریکی به میزان  $4 \text{Ns/m}$  لحاظ می گردد و نوسانات ناشی از آن در شکل شماره ۶ مشاهده می گردد.



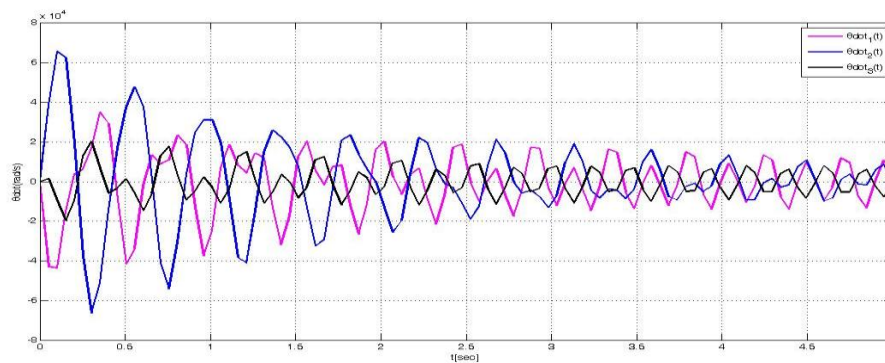
شکل ۶: جابجایی زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی  $4 \text{Ns/m}$

در شکل شماره ۶ تغییرات جابجایی زاویه ای اولیه ناشی از ضریب میرایی  $4 \text{ Ns/m}$  مشاهده می گردد. همانگونه که در شکل های ۳-۴-۵ و ۶ مشاهده گردید با افزایش میزان ضریب میرایی تمایل سیستم به میرا شدن بیشتر می گردد و خطرات ناشی از ارتعاشات موجود در ESP string کاهش می یابد.

در این بخش علاوه بر لحاظ کردن جابجایی زاویه ای اولیه که در قسمت قبل به صورت پیشفرض در نظر گرفته شد مقدار سرعت زاویه ای اولیه نیز برای موتور الکتریکی به میزان  $4 \text{ Rad/s}$  لحاظ می شود و سپس تغییرات ضریب میرایی برای اجزای سیستم بررسی می شود.

### ۱- ضریب میرایی $1 \text{ Ns/m}$ برای موتور الکتریکی:

ابتدا ضریب میرایی  $1 \text{ Ns/m}$  برای اجزای مجموعه لحاظ می گردد و همچنین سرعت زاویه ای اولیه به مقدار  $4 \text{ Rad/s}$  به موتور الکتریکی اعمال می شود.

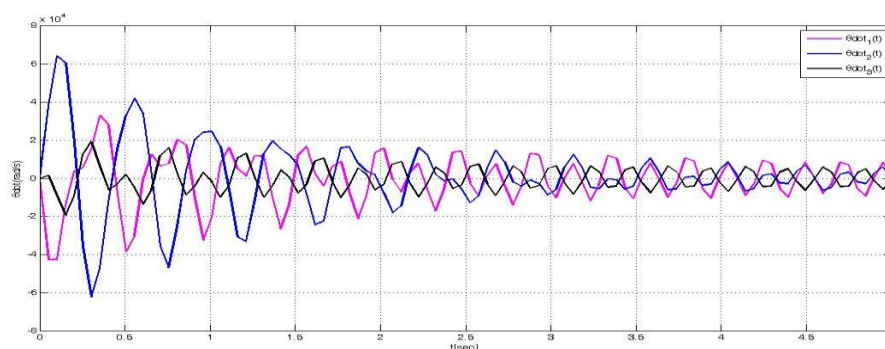


شکل ۷: سرعت زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی  $1 \text{ Ns/m}$

در شکل شماره ۷ تغییرات سرعت زاویه ای اجزای سیستم به ازای سرعت اولیه  $1 \text{ Ns/m}$  لحاظ می گردد و نوسان اجزای مجموعه مشاهده می شود.

### ۲- ضریب میرایی $2 \text{ Ns/m}$ برای موتور الکتریکی:

در این قسمت سرعت زاویه ای اجزای سیستم به ازای ضریب میرایی مقدار  $2 \text{ Ns/m}$  در نظر گرفته می شوند.

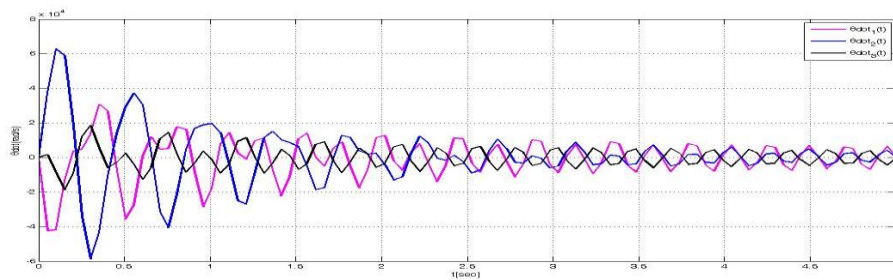


شکل ۸: سرعت زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی  $2 \text{ Ns/m}$

در شکل شماره ۸ تغییرات سرعت زاویه ای اجزای سیستم به ازای ضریب میرایی  $2 \text{ Ns/m}$  مشاهده می گردد.

### ۳- ضریب میرایی $3 \text{ Ns/m}$ برای موتور الکتریکی:

در این قسمت سرعت زاویه ای اجزای سیستم به ازای ضریب میرایی  $3 \text{ Ns/m}$  بررسی می گردد.

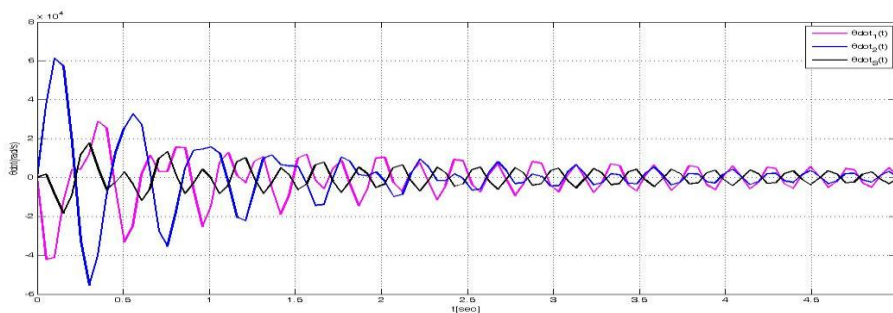


شکل ۹: سرعت زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی  $3 \text{ Ns/m}$

شکل شماره ۹ سرعت زاویه ای مجموعه به ازای ضریب میرایی  $3 \text{ Ns/m}$  مشاهده می گردد.

### ۴- ضریب میرایی $4 \text{ Ns/m}$ برای موتور الکتریکی:

در این حالت تغییرات سرعت زاویه ای اجزای سیستم به ازای ضریب میرایی  $4 \text{ Ns/m}$  بررسی می گردد.



شکل ۱۰: سرعت زاویه ای دیسک ها نسبت به زمان به ازای ضریب میرایی  $4 \text{ Ns/m}$

در شکل شماره ۱۰ تغییرات سرعت زاویه ای به ازای ضریب میرایی  $4 \text{ Ns/m}$  مشاهده می گردد.

جدول: پارمترهای موردنیاز

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
$J_{\text{pump}}$	.5365	$K_{\text{motor}}$	7.6294e9	$\theta_2$	0
$J_{\text{protector}}$	.376	$C_{\text{pump}}$	.01333	$\theta_3$	.1
$J_{\text{motor}}$	.7025	$C_{\text{protector}}$	.12345	$\dot{\theta}_1$	0
$K_{\text{pump}}$	6.2121e9	$C_{\text{motor}}$	variable	$\theta_2$	0
$K_{\text{protector}}$	10.6441e9	$\theta_1$	.5	$\theta_3$	.7

### ۵. نتیجه گیری

۱- در این پژوهش تغییرات ضریب میرایی برای موتور الکتریکی در پمپ های درون چاهی نفت و گاز (ESP) مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- سیستم ۳ درجه آزادی بصورت دیسک های صلب که توسط اجزای فنری و میرایی و پشت سرهم قرار دارند مورد مطالعه قرار گرفتند.



۳- پژوهش مورد نظر توسط نرم افزار MATLAB برنامه نویسی شده و نتایج خروجی بصورت نمودار استخراج شدند.  
۴- ماتریس جابجایی و سرعت زاویه ای اولیه یک ماتریس  $1 \times 6$  می باشد که ۳ درایه اول سرعت زاویه ای اولیه و ۳ درایه دوم جابجایی زاویه ای اولیه می باشند.

#### منابع و مراجع

- [1] Durham, M.O., Williams, J.H., and Goldman, D.J. 1990. Effect of Vibration on Electric-Submersible Pump Failures. J Pet Technol. 42 (2): 186–190. SPE-16924-PA. <https://doi.org/10.2118/16924-PA>
- [2] Pastre, L.F. and Fastovets, A. 2017. The Evolution of ESP Technology in the North Sea: A Reliability Study Based on Historical Data and Survival Analysis. Presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, 16–18 October. SPE-187735 MS. <https://doi.org/10.2118/187735-MS>.
- [3] V. F. Bocharnikov and Yu.V. Pakharukov, Vibrations and Faults of Electric Submersible Centrifugal Pumps for Oil Extraction (TyumGNGU Publ., Tyumen, 2005).
- [4] V. V. Petrukhin, "Research and Development of Procedures on Increasing the Performance of Submersible Electric Centrifugal Pumps for Oil Recovery," Cand. Diss., TyumGNGU, Tyumen, 2000.
- [5] Meng, M., Zamanipour, Z., Miska, S., Yu, M., Ozbayoglu, E.M., 2019, "Dynamic stress distribution around the wellbore influenced by surge/swab pressure", Journal of Petroleum Science and Engineering, 172, pp. 1077–1091
- [6] Zheng, Dezhi, 2013, "Three-Phase Erosion Testing and Vibration Analysis of an Electrical Submersible Pump," In M.S. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX 77843.
- [7] Basaran, B., 2017, "CFD Simulation for the Erosion on Electrical Submersible Pump due to Viscosity And Air presence," In MS thesis, Texas A&M University, College Station, Texas.
- [8] Chi, Y., Zhou, S., Daraboina, N. et al. 2018, "Experimental Study of Wax Deposition under Two-Phase Gas-Oil Stratified Flow. Proc.," The 11th North American Conference on Multiphase Production Technology, Banff, Alberta, Canada, June 6-June 8
- [9] Gulich, J., 2008, "Centrifugal Pumps", Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- [10] Zhu, J., Zhang, J., Zhu, H., Zhang, H.-Q., 2018a, "A Mechanistic Model to Predict Flow Pattern Transitions in Electrical Submersible Pump under Gassy Flow Condition," In SPE Artificial Lift Conference and Exhibition, Woodlands, Texas, USA.
- [11] Nowitzki, W., Webster, J., and Beck, D. 2018. Improving Electric Submersible Pump ESP Bearing System Reliability in Unconventional Applications. Presented at the SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition, Manama, Bahrain 28–29 November. SPE- 192502-MS. <https://doi.org/10.2118/192502-MS>.
- [12] Patil, A., Sundar, S., Delgado, A., and Gamboa, J., 2019, "CFD Based Evaluation of Conventional Electrical Submersible Pump for High-Speed Application," J. Pet. Sci. Eng., 182, p. 106287.
- [13] Vandevier, J., 2010, "ESP-Conclusion: Multiple Factors Affect Electrical Submersible Pump Run Life," Oil Gas J., 108(41), pp. 78–84.
- [14] Dong, C., Xun, D., and Qi-xiang, H., 2015, "Effect of Impeller Reflux Balance Holes on Pressure and Axial Force of Centrifugal Pump," J. Central South Univ., 22(5), pp. 1695–1706.