



## بهینه کردن نرخ حفاری در سیستم‌های حفاری با استفاده از ساختار جدید کنترل کننده پیش بین مقاوم

محمدامین علی‌اصغری‌پور<sup>1</sup>، کریم سلحشور<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی ابزار دقیق و اتوماسیون، دانشگاه صنعت نفت، اهواز  
2- استاد، مهندسی ابزار دقیق و اتوماسیون، دانشگاه صنعت نفت، اهواز  
\*اهواز، صندوق پستی 61991-71183، salahshoor@put.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 01 اسفند 1395  
پذیرش: 19 فروردین 1396  
ارائه در سایت: 25 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

سیستم‌های حفاری  
کنترل بهینه  
کنترل کننده پیش بین  
کنترل مقاوم  
نرخ حفاری

### چکیده

حفاری یکی از فرآیندهای مکانیکی بسیار حیاتی در صنعت نفت و گاز است که کنترل پارامترهای عملیاتی آن جهت افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های گران قیمت در این فرآیند تنظیم می‌شود. هدف اصلی در این مقاله ارائه یک راه کار نوین جهت تنظیم و بهینه‌سازی نرخ حفاری با بهره‌گیری از گشتاور موتور گردان در سیستم حفاری است. در این مقاله پیکربندی جدیدی بر مبنای کنترل کننده‌های مقاوم پیش‌بین برای ردیابی مقادیر کاری مرجع تک‌اوی- ثابت معرفی می‌شود. برای این منظور یک کنترل کننده پیش‌بین مقاوم مبتنی بر ایده تیوب مطرح می‌شود که تیوب‌های آن بر مبنای مجموعه‌های قابل دسترس سیستم ارائه شده است. یک سیستم حفاری شامل موتور گردان، لوله‌های حفاری و مته به عنوان بستر تست نمونه برای ارزیابی عملکرد این روش کنترلی در نظر گرفته شده است. این سیستم حفاری با استفاده از ساختار مدل بورگین و یانگ به عنوان یک مدل ریاضی کامل حفاری به صورت یک سیستم خطی توأم با عدم قطعیت‌های محدود و جمع‌شونده مدل‌سازی می‌شود. مهم‌ترین بخش نوآورانه در این مقاله مربوط به ادغام مساله رگولاتوری با مساله ردیابی است. مزایای روش کنترلی معرفی شده نسبت به رویکردهای کنترلی معمول برحسب خصوصیات پایداری و مقاوم در سیستم حفاری شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار داده می‌شود و برتری نتایج حاصل در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است.

## Optimizing the Rate of Penetration (ROP) in Rotary Drilling Systems by using new Robust Model Predictive Control

Mohammad Amin Aliasgharpour, Karim Salahshoor\*

Department of Instrumentation and Automation Engineering, Petroleum University of Technology, Ahvaz, Iran.  
\* P.O.B. 61991-71183 Ahvaz, Iran, salahshoor@put.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 19 February 2017  
Accepted 08 April 2017  
Available Online 15 May 2017

#### Keywords:

Model predictive control  
Optimal control  
Rate of penetration (ROP)  
Robust control  
Rotary drilling control

### ABSTRACT

Drilling is one of the most critical mechanical process in oil and gas industry and its operational parameters should be properly tuned to reduce drilling time and consequently enhance efficiency of the drilling process. The main objective in this paper is to present a new method to regulate and optimize the Rate of Penetration (ROP) of the system with top drive rotary motor torque in drill string. The paper presents a formulation of a robust receding horizon controller to track piecewise constant references. To achieve this, a tube-based Robust Model Predictive Control (RMPC) is introduced in which the tubes are based on reachable sets. A drilling system is assumed as a test bed for evaluating the performance of the proposed control scheme. The assumed drilling system is modeled as a linear system with additive bounded uncertainties by using Bourgoyne and Young model which is known as a complete mathematical drilling model. The most important novelty of this manuscript corresponds to integration of both tracking and regulatory objectives in one control framework. Simulations demonstrate the effectiveness of the stability and robust characteristics of the proposed RMPC scheme in terms of its stability and robust characteristics with respect to the usual control approaches.

### 1- مقدمه

صنعت حفاری است که کنترل پارامترهای کنترلی آن برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های گران این فرآیند اجرا می‌شود. برای این منظور نرخ حفاری<sup>1</sup> به عنوان کلیدی‌ترین پارامتر در صنعت حفاری که به مفهوم میزان عمق حفاری شده بر زمان است مورد مطالعه و بررسی قرار داده می‌شود. مقدار ROP برای کاهش زمان حفاری باید افزایش یابد. افزایش این

روابط دینامیکی پیچیده بین ورودی و خروجی‌های فرآیندهای نفت و گاز و لزوم کنترل چنین فرآیندهای حیاتی به یک مساله جدی در صنعت و محیط‌های آکادمی تبدیل شده است. مهم‌ترین دلیل بر پیچیدگی این فرآیندها داشتن ماهیت غیرخطی و تغییرپذیر با زمان دینامیک این فرآیندها است. یکی از فرآیندهای بسیار حیاتی و گران قیمت نفتی و گازی مربوط به

<sup>1</sup> Rate of Penetration (ROP)

#### Please cite this article using:

M. A. Aliasgharpour<sup>1</sup>, K. Salahshoor, Optimizing the Rate of Penetration (ROP) in Rotary Drilling Systems by using new Robust Model Predictive Control, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 411-416, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مساله بهینه‌سازی در زمان‌های پیش‌بینی‌شده خروجی در لحظات آینده به‌دست می‌دهد. از آن‌جایی که در عملکرد اصلی این ساختار کنترلی از مدل سیستم برای پیش‌بینی لحظات آینده استفاده می‌شود، سیگنال کنترلی حاصل به شدت به کیفیت و اعتبار مدل بستگی دارد. مقاومت کنترل‌کننده‌های MPC در مقابل عدم قطعیت پارامتریک و ماهیت تغییرپذیر با زمان بودن آن به صورت یک اغتشاش محدود اضافه شده به مدل در نظر می‌گیرند که به صورت مستقیم حالت<sup>۷</sup>‌های سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد [9,8].

یکی از تکنیک‌های بسیار مؤثر در پیاده‌سازی کنترل‌کننده MPC مقاوم، استفاده از روش کنترل‌کننده MPC مبتنی بر تیوب است که در آن لفظ تیوب برای استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر نظریه مجموعه‌ای برای دستیابی به بهینه‌ترین پاسخ ممکن برای سیگنال کنترلی در حضور تمامی عدم قطعیت‌های پیش‌بینی شده است [10]. تنظیم کردن حالت‌های سیستم حول مبدا در حضور تمامی عدم قطعیت‌های سیستم ایده اصلی این روش است [11].

## 2- مدل حفاری بورگین و یانگ

یکی از کامل‌ترین مدل‌های ریاضی حفاری که مبتنی بر آنالیزهای گذشته سازند و رشته حفاری، توسط بورگین و یانگ معرفی شده است [12]. آن‌ها به این نتیجه رسیده بودند که رفتار ROP به شدت به پارامترهای زیر بستگی دارد:

- نوع مته حفاری
- مشخصات سازند
- شرایط کاری مته حفاری
- ضریب سایش دندانه‌های مته
- هیدرولیک مته
- ضرایب هیدرواستاتیکی
- چگالی گل حفاری

بر این اساس رابطه (1) برای معرفی مدل حفاری ارائه شده است [12].

$$ROP = \frac{\partial D}{\partial t} = e^{(a_1 + \sum_{j=2}^n a_j x_j)} \quad (1)$$

در آن  $a_j$  ویژگی‌های لیست شده در بالا را نشان می‌دهد. نخستین آرایه  $(e^{a_1})$  مربوط به ضریب قابلیت حفاری<sup>۸</sup> سیستم که ناشی از عمق سازند و نوع مته حفاری است. ترم‌های  $(e^{a_2 x_2})$  و  $(e^{a_3 x_3})$  میزان فشردگی سازند را نشان می‌دهد که با توجه به رابطه (2) قابل بیان است.

$$ROP = \frac{\partial D}{\partial t} = e^{(a_1 + \sum_{j=2}^n a_j x_j)} \quad (2)$$

در آن TVD عمق مؤثر عمودی<sup>۹</sup> سازند است. ترم  $(e^{a_4 x_4})$  تغییرات فشاری در عمق سازند را نشان می‌دهد که مطابق رابطه (3) است.

$$x_4 = TVD \times (EMW_{pore} - ECD) \quad (3)$$

در این رابطه  $EMW_{pore}$  گرادیان فشار سیال داخل چاه<sup>۱۰</sup> و  $ECD$  چگالی گل حفاری<sup>۱۱</sup> را نشان می‌دهد. عبارت  $(e^{a_5 x_5})$  مربوط به تأثیر وزن مته و قطر مته حفاری است که با توجه به رابطه (4) معادل می‌شود.

$$x_5 = \ln \left[ \frac{\left( \frac{\omega}{d_B} \right) - \left( \frac{\omega_0}{d_B} \right)}{4 - \left( \frac{\omega_0}{d_B} \right)} \right] \quad (4)$$

پارامتر موجب تحمیل هزینه‌های گزاف خواهد شد [1]؛ بنابراین توصیه می‌شود که عملیات حفاری با نرخ ثابت و بهینه ROP انجام شود. با توجه به اصطکاک موجود بین رشته حفاری و سازند و همچنین تغییرات مشخصات خود سازند نظیر ضریب نفوذ آن، مقدار ROP ثابت نخواهد بود و موجب بروز نوسانات گیر و لغزش<sup>۱</sup> در رشته حفاری خواهد شد. این نوع از نوسانات رشته حفاری موجب بروز رخدادهای زیر خواهد شد [2].

- خرابی در مته حفاری
  - شکست در نقاط اتصال رشته حفاری
  - کاهش ROP
  - عملکرد نامناسب در کنترل جهت حفاری
  - رفتار متغیر رشته حفاری
  - ارتعاشات و ضربات واردشده به رشته حفاری
- لزوم استفاده از روش‌های کنترلی پیشرفته برای کنترل و تثبیت این پارامتر حول یک مقدار بهینه و ایمن برای سیستم از اهداف اولیه این پژوهش بوده است.

نرخ حفاری در حالت کلی تابع پنج پارامتر کلی زیر است [3].

- ویژگی‌های فیزیکی سازند
- نوع مته حفاری
- گل حفاری
- سرعت چرخشی مته حفاری
- وزن روی مته<sup>۲</sup>

امروزه کنترل چنین فرآیندهای پیچیده در صنعت حفاری را می‌توان به دو روش کلی کنترل کلاسیک نظیر کنترل‌کننده‌های تناسبی- انتگرالی و مشتقی<sup>۳</sup> (PID) و کنترل پیشرفته مانند کنترل‌کننده‌های پیش‌بین<sup>۴</sup> (MPC) تقسیم کرد [4-6]. از سوی دیگر درخواست برای افزایش بهره‌وری، امنیت و همچنین کاهش هزینه‌های حفاری، صنایع را مجبور به استفاده از روش‌های کنترلی پیشرفته مانند کنترل پیش‌بین مقاوم سوق می‌دهد.

در شرایطی که مشخصات فیزیکی سازند تغییر می‌کند، تغییرات اساسی در مدل و روابط نرخ حفاری ایجاد می‌شود که موجب تغییر شدید ROP می‌شود. به همین دلیل در موارد عملی مدل و ساختار ریاضی و روابط حاکم بر این پارامترها دارای عدم قطعیت است که این قضیه لزوم استفاده از الگوریتم‌های کنترلی پیشرفته جهت کنترل این عدم قطعیت‌ها را در دو چندان می‌کند. در حالت کلی تمامی اغتشاشات وارد بر سیستم حفاری می‌تواند از منابع شناخته شده مثل تغییرات ایجاد شده در لایه‌های مختلف سازند یا منابع ناشناخته مثل تغییرات ایجادشده در پارامترهای مدل حفاری باشد. در شرایطی که مدل استفاده شده در ساختار کنترلی مدام در حال تغییر باشد، کنترل‌کننده‌های کلاسیک مانند PID مقاومت لازم در برابر این تغییرات را نداشته و قادر به تنظیم ROP از طریق گشتاور ایجاد شده در موتور DC واقع در سطح روان<sup>۵</sup> روی سطح زمین نخواهند بود.

کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل<sup>۶</sup> (MPC) از جمله روش‌های کنترلی که با توجه به ماهیت بهینه‌بودن سیگنال کنترلی در حضور محدودیت‌های عملی از محبوبیت بیشتری در محافل علمی برخوردار است [8,7]. این روش کنترلی سیگنال‌های کنترلی بهینه را با استفاده از حل

<sup>1</sup> Stick-slip oscillation

<sup>2</sup> Weight on bit (WOB)

<sup>3</sup> Proportional- Integral- Derivative (PID)

<sup>4</sup> Model Predictive Control (MPC)

<sup>5</sup> Rotary Table

<sup>6</sup> Model Predictive Control (MPC)

<sup>7</sup> State

<sup>8</sup> Drillability constant

<sup>9</sup> True Vertical Depth (TVD)

<sup>10</sup> Pore pressure fluid gradient

<sup>11</sup> Mud density

جدول 1 اطلاعات یک سازند نمونه

مقدار	پارامتر حفاری	سمبل
10,850 ft	عمق عمودی سازند	TVD
5,200 psi	فشار ته چاه	$P_0$
10.0 lbm/gal	چگالی معادل گردان	
7 7/8 in.	سایز مته	
42,000 lbf	وزن مته	
1,200 lbf	ضریب اثر نیروی هیدرولیکی	
2.68	ضریب حفاری	$a_1$
0.0002	ضریب حفاری	$a_2$
0.0003	ضریب حفاری	$a_3$
0.00003	ضریب حفاری	$a_4$
1.0	ضریب حفاری	$a_5$
0.6	ضریب حفاری	$a_6$
0.7	ضریب حفاری	$a_7$
0.5	ضریب حفاری	$a_8$
0.31	ضریب میرایی رشته حفاری	$D$
200.0 kgm <sup>2</sup>	اینرسی رشته حفاری	$J$
2.73·10 <sup>4</sup>	وزن رشته حفاری	$M$
27 kN	وزن روی مته	WOB
0.707	ضریب میرایی نامی	$\zeta$
0.05 Hz	فرکانس نواسانات طبیعی سیستم	$\omega_n$

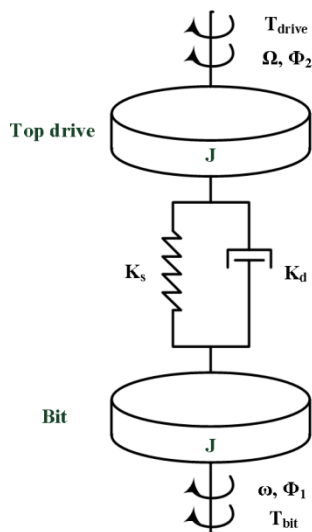


Fig. 1 Torsional model of the drill string

شکل 1 مدل چرخشی رشته حفاری

در آن  $\Delta T = T_{drive} - T_{bit}$  و  $\alpha = \dot{\Omega} - \omega$  است.

با انتخاب سرعت زاویه‌ای مته حفاری و مشتق آن به عنوان حالت‌های سیستم  $(z = [\omega \ \dot{\omega}]^T)$ ، گشتاور رشته حفاری به عنوان ورودی و سرعت زاویه‌ای به عنوان خروجی، مدل فضای حالت سیستم به صورت رابطه (12) به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cz(t) \end{aligned} \quad (12)$$

در آن ماتریس‌های  $A$  و  $B$  ماتریس‌های حالت و ورودی سیستم با ابعاد مناسب است که به صورت رابطه (13) بیان می‌شوند.

$\omega$  وزن مته،  $\omega_0$  وزن آستانه<sup>1</sup> مته و  $d_B$  ابعاد آن است. ترم  $(e^{a_6 x_6})$  سرعت دورانی رشته حفاری را نشان می‌دهد که با توجه به رابطه (5) محاسبه می‌شود.

$$x_6 = \ln\left(\frac{N}{60}\right) \quad (5)$$

ضریب  $N$  سرعت دورانی سیستم را برحسب تعداد دور بر دقیقه<sup>2</sup> (RPM) نشان می‌دهد. عبارت  $(e^{a_7 x_7})$  ضریب سایش مته را با توجه به ضریب حرارتی مته  $H$  با توجه به رابطه (6) بیان می‌کند.

$$x_7 = -H \quad (6)$$

در نهایت عبارت  $(e^{a_8 x_8})$  اثر هیدرولیکی مته را با توجه به ضریب اثر نیرو<sup>3</sup>  $(IF)$  به صورت رابطه (7) نشان می‌دهد.

$$x_8 = -\ln\left(\frac{IF}{1000}\right) \quad (7)$$

با توجه به این نکته که برای یک سازند مقادیر عمق عمودی سازند  $(TVD)$ ، وزن گل  $(MW)$ ، ضریب اصطکاک دندانها  $(H)$ ، ضریب اثر نیرو  $(IF)$  و نوع مته در رابطه (1) مشخص است، معادله ROP تابعی از پارامترهای متغیر دیگر مساله مانند سرعت دورانی مته  $(N)$  و وزن روی مته حفاری  $(WOB)$  خواهد بود. بنابراین:

$$ROP = f(N, WOB) \quad (8)$$

با توجه به روابط به دست آمده، به منظور کاهش هزینه های حفاری، پارامتر  $WOB$  به صورت بهینه مشخص و تعریف می‌شود. این مقدار بهینه با توجه به رابطه (9) به دست می‌آید:

$$\left(\frac{\omega}{d_B}\right)_{opt} = \frac{a_5 H_1 \left(\frac{\omega}{d_B}\right)_{max} + a_6 \left(\frac{\omega}{d_B}\right) t}{a_5 H_1 + a_6} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن این شرایط، رابطه ROP بیان شده توسط معادله (1)، تنها تابعی از سرعت دورانی سیستم خواهد بود که تمامی پارامترهای گفته شده را می‌توان با متغیر  $k$  که با توجه به جدول 1 برابر خواهد بود با مقدار 16.3 به صورت رابطه (10) نوشت:

$$ROP = \frac{\partial D}{\partial t} = k \times e^{\left(a_6 \times \ln\left(\frac{N}{60}\right)\right)} \quad (10)$$

با توجه به همین رابطه ROP به صورت یک تابع غیرخطی از سرعت دورانی موتور واقع در سطح لغزان سیستم حفاری است. در پژوهش [13] الگوریتم عصبی برای بهینه کردن این پارامتر معرفی شده است. ماهیت غیر خطی سیستم منجر به این خواهد شد که با تنظیم کردن مناسب سرعت دورانی، مقدار نرخ حفاری به صورت رگوله شده کنترل خواهد شد ولی یک تغییر کوچک در ساختار مدل و پارامترهای سازند منجر به تغییرات شدید در این رابطه شده و از حالت نهایی سیستم که به صورت بهینه تعریف شده بود، فاصله خواهد گرفت. همین امر، ایده اصلی این مقاله را شکل می‌دهد تا با طراحی یک سیستم کنترلی پیش‌بین مبتنی بر مدل مقاوم، خروجی سیستم که در واقع نرخ حفاری است در حضور عدم قطعیت های مدل دارای پاسخ درست و تنظیم شده باشد.

### 3- مدل دینامیکی رشته حفاری

با توجه به شکل 1 که ساختار اولیه و ساده‌ای از شماتیک یک رشته حفاری را نشان می‌دهد، رابطه حاکم بر دینامیک سیستم به صورت (11) خواهد بود:

$$\ddot{\alpha} + 2D\omega_0 \dot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = \frac{1}{J} \Delta T \quad (11)$$

<sup>1</sup> Threshold

<sup>2</sup> Revolution Per Minute (RPM)

<sup>3</sup> Impact Force

که این سیستم دارای محدودیت‌های عملیاتی به صورت رابطه (18) باشند.

$$\begin{aligned} x &\in X \\ u &\in U \end{aligned} \quad (18)$$

$X$  فضای عملیاتی حالت‌های سیستم و  $U$  محدودیت‌های عملگرهای ورودی باشد. سیستم بیان‌شده در رابطه (17) را می‌توان توسط روش‌های شناسایی سیستم و یا از طریق مدل‌سازی ریاضی به صورت نامی رابطه (19) شناسایی کرد:

$$\bar{x}(t+1) = A\bar{x}(t) + Bu(t) \quad (19)$$

در این معادله با توجه به شناسایی سیستم یک بیان ریاضی از حالت نامی سیستم به دست می‌آید که بردار عدم قطعیت رابطه (17) در نظر گرفته نشده است. بردار حالت نامی به‌دست‌آمده، الزاما با بردار حالت اصلی سیستم برابر نیست و در کاربردهای عملی با توجه به در نظر گرفته‌نشدن عدم قطعیت سیستم دارای اختلاف است. کنترل‌کننده MPC که به صورت گسترده در صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد، با توجه به مدل نامی سیستم در رابطه (19) پیکربندی می‌شود. به همین دلیل در شرایطی که در ساختار این کنترل‌کننده عملیات بهینه‌سازی انجام شود، سیگنال‌های کنترلی  $\bar{u}(t)$  به‌دست می‌آید که ناشی از معادله نامی سیستم است. در شرایطی که سیستم واقعی در معرض اغتشاشات خارجی و یا تغییرات سیستمی داخلی می‌شود، مدل واقعی سیستم تغییر کرده و این معادله نامی اعتبار خود را از دست خواهد داد و سیگنال کنترلی ناشی از آن نیز دیگر قادر به کنترل سیستم واقعی نخواهد بود. برای مقابله با این شرایط از طراحی مقاوم بر مبنای تیوب استفاده می‌کنند که در آن قرار دادن سیگنال کنترلی در محدوده خاص و مشخصی از سیستم نامی هدف کنترلی است که سیگنال کنترلی به‌دست‌آمده در حضور تمامی اغتشاشات و عدم قطعیت‌های سیستم دارای عملکرد درست است. این سیگنال کنترلی با توجه به رابطه (20) به‌دست می‌آید.

$$u(t) = \bar{u}(t) + K(x(t) - \bar{x}(t)) \quad (20)$$

$K$  به عنوان یک کنترل‌کننده محلی است که در هر لحظه از زمان به دنبال جبران اختلاف سیستم واقعی با مدل نامی سیستم است. در [11] نویسندگان در پی ایده مطرح شده در [14, 10] به این مورد اشاره کرده‌اند که این کنترل‌کننده محلی در صورت گارانتی کردن پایداری سیستم منجر به مجموعه قابل دسترس<sup>1</sup> برای سیستم خواهد شد. از نقطه نظر پیاده‌سازی زمان حقیقی این کنترل‌کننده می‌توان تمام محاسبات مجموعه قابل دسترس را به صورت آفلاین انجام داد و سپس کنترلر MPC با محدودیت‌های به‌روز شده برای سیستم نامی عمل کرده و با توجه به رابطه (20) سیگنال کنترلی به‌دست آید.

مراحل کلی پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم مبتنی بر تیوب به صورت زیر بیان می‌شود:

- به‌دست‌آوردن مدل نامی از سیستم با توجه به خطای مدل‌سازی و تمام عدم قطعیت‌های موجود مطابق رابطه (19)
- به‌دست‌آوردن بهره کنترلر محلی ( $K$ ) برای گارانتی کردن پایداری حلقه بسته سیستم
- محاسبه مجموعه‌های قابل دسترس برای پیش‌بینی‌های آینده کنترلر MPC
- اصلاح محدودیت‌های سیستمی و عملی
- حل کردن مساله بهینه‌سازی برای مدل نامی
- به‌دست‌آوردن سیگنال کنترلی مطابق رابطه (20)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2D\omega_0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ J \end{bmatrix}^T$$

$$C = [1 \quad 0] \quad (13)$$

با توجه به رابطه‌های (12,10) می‌توان دریافت که با توجه به رابطه خطی بین گشتاور و سرعت دورانی می‌توان با استفاده از طراحی کنترل‌کننده مناسب با قابلیت مقاومت در برابر عدم قطعیت‌های سیستم به کنترل نرخ حفاری دست یافت. حل مساله کنترل پیش‌بین با توجه به ساختار رابطه (12) و حالت‌هایی انتخابی از سیستم تبدیل به مساله رگولاتوری می‌شود که در آن حالت‌های سیستم به نقطه پایدار خود میل می‌کند. یک متغیر حالت بر مبنای خطای بین خروجی (سرعت دورانی) و نقطه مرجع برای افزودن قابلیت ردیابی به سیستم به صورت رابطه (14) اضافه می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cz(t) \\ e(t) &= y(t) - r(t) \end{aligned} \quad (14)$$

سیگنال  $r(t)$  به عنوان سیگنال مرجع سیستم تعریف می‌شود که به صورت تکه‌ای-ثابت است. با تعریف متغیر حالت جدید به صورت رابطه (15) خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} x(t) &= [z(t) \quad e(t)]^T \\ \dot{x}(t) &= A_m x(t) + B_m u(t) \end{aligned} \quad (15)$$

ماتریس‌های  $A_m$  و  $B_m$  جدید به صورت رابطه (16) خواهد بود.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ CA & I_m \end{bmatrix} \\ B &= [B \quad CB]^T \end{aligned} \quad (16)$$

با توجه به مبانی عملیاتی سیستم‌های کنترلی استفاده از مدل پیوسته در کنترلرها دقت و کارایی مناسبی را نخواهد داشت. دلیل این امر گسسته بودن پردازش در پردازنده‌هایی است که در کنترلرها استفاده می‌شود. برای این منظور در بخش بعد مبانی طراحی کنترل پیش‌بین مقاوم در حوزه گسسته مطرح شده و در بخش شبیه‌سازی مدل به‌دست‌آمده از رابطه (16,15) با توجه به نرخ نمونه‌برداری مناسب گسسته‌سازی شده و در ساختار کنترلی استفاده می‌شود.

خطای مدل‌سازی و اختلاف مدل با سیستم واقعی تحت عنوان عدم قطعیت یا نامعینی شناخته می‌شود. یکی از عوامل این عدم قطعیت در گسسته‌سازی مدل سیستم به وجود می‌آید که رابطه مستقیمی با انتخاب نرخ نمونه‌برداری دارد. هرچه نرخ نمونه‌برداری کمتری انتخاب شود، دقت مدل به حالت پیوسته نزدیک‌تر خواهد بود، ولی پردازش و حجم محاسباتی پیچیده‌تر و سرعت کاری کنترلر کاهش می‌یابد. از عوامل دیگر به وجود آمدن نامعینی در سیستم می‌توان به نویز اندازه‌گیری و همچنین اغتشاشات واردشده به سیستم اشاره کرد. برای بررسی این نامعینی‌ها در کنترل پیش‌بین و تضمین پایداری سیستم حلقه بسته در حضور این نامعینی‌ها، ساختار کنترل پیش‌بین مقاوم ارائه می‌شود.

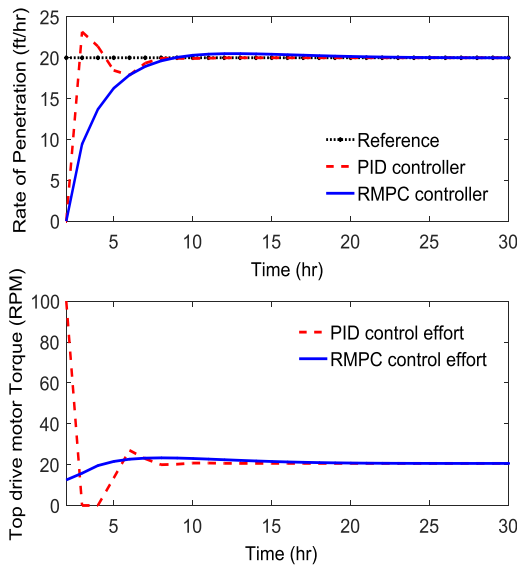
#### 4- طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم بر پایه تیوب

سیستم نا معلوم با عدم قطعیت به فرم یک ترم اضافه شونده به فرم (17) است:

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + w \quad (17)$$

در آن  $x$ ،  $u$  و  $w$  به ترتیب نمایانگر بردار حالت سیستم، بردار ورودی و بردار عدم قطعیت یا به صورت کلی بردار اغتشاشی سیستم است. فرض کنید

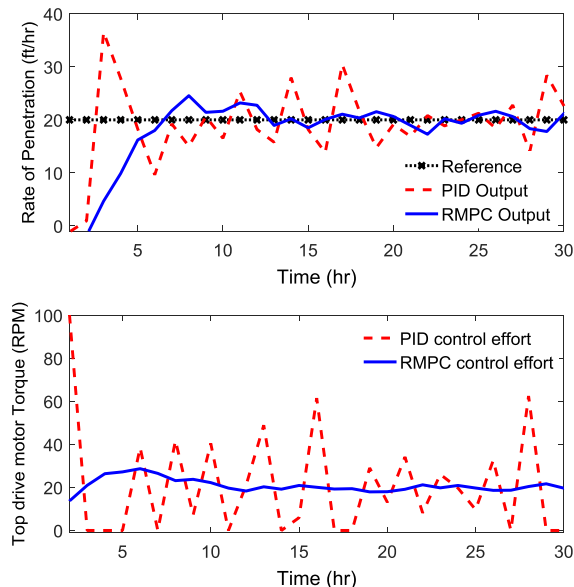
<sup>1</sup> Reachable set



**Fig. 2** Reference tracking test of classical and advanced control scheme. The output response of the system (top), and respectively their control signal (bottom) which is implemented on systems

شکل 2 آزمایش ردیابی کنترل کننده کلاسیک و پیشرفته، خروجی (ROP) در نمودار بالا و سیگنال کنترلی اعمال شده به سیستم در نمودار پایین رسم شده است.

با توجه به بخش‌های پیشین تغییرات سازند حفاری موجب تغییر در پارامترهای مدل شناسایی شده می‌شود. تغییر در پارامترهای مدل را می‌توان توسط اعمال اغتشاش به خروجی سیستم شبیه‌سازی کرد. در آزمایش دوم یک سیگنال تصادفی گوسی با میانگین صفر و واریانس 10% دامنه نقطه کار به سیستم اعمال شده است. این سیگنال در واقع به عنوان تغییرات پارامترهای مدل عمل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در شکل 3 نشان می‌دهند



**Fig.3** Regularity test of classical and advanced control scheme with respect to additive disturbances. The output response of the system (top), and respectively their control signal (bottom) which is implemented on systems

شکل 3 آزمایش رگولاتوری کنترل کننده کلاسیک و پیشرفته در حضور اغتشاش جمع‌شونده، خروجی (ROP) در نمودار بالا و سیگنال کنترلی اعمال شده به سیستم در نمودار پایین رسم شده است

بهره کنترلر محلی ( $K$ ) برای حفظ پایداری داخلی سیستم است که در این مقاله از روش LQR برای به‌دست‌آوردن این بهره استفاده شده است. برای به‌دست‌آوردن مجموعه‌های قابل دسترس از ایده اصلی [14] (21) استفاده می‌شود.

$$\mathbb{R}_k = \{0\}$$

$$\mathbb{R}_{k+i+1} \triangleq (A + BK)\mathbb{R}_{k+i} \oplus W \quad (21)$$

به ازای  $\forall i = 0, 1, \dots, N-1$  که در آن  $N$  بازه پیش‌بینی<sup>1</sup> کنترلر MPC است. در این رابطه  $\mathbb{R}_k$  مجموعه قابل دسترس،  $W$  مجموعه شامل عدم قطعیت موجود در رابطه (19) و عملگر  $\oplus$  نشان‌دهنده جمع مینکوفسکی است که به صورت رابطه (22) تعریف می‌شود.

$$\mathbb{R}_k = \{0\}$$

$$\mathbb{R}_{k+i+1} \triangleq (A + BK)\mathbb{R}_{k+i} \oplus W \quad (22)$$

در لایه نهایی این کنترل کننده، MPC به عنوان هسته مرکزی این ساختار از مدل نامی به‌دست‌آمده را استفاده کرده و با محدودیت‌های به‌روزرشده مطابق روابط (23) سیگنال کنترلی نامی را محاسبه می‌کند.

$$V_{MPC}^*(\bar{x}, \bar{u}) = \min_{\bar{u}} J(\bar{x}_k, \bar{u}_k)$$

$$J(\bar{x}_k, \bar{u}_k) = v_f(\bar{x}_N) + \sum_{i=0}^{N-1} \Gamma(\bar{x}_i, \bar{u}_i)$$

$$S.T: \bar{x}(i+1) = A\bar{x}(i) + B\bar{u}(i) \quad \forall i = 0, 1, \dots, N-1$$

$$\bar{x}_i \in \bar{\mathbb{X}} = \mathbb{X} \ominus \mathbb{R}_i$$

$$\bar{u}_i \in \bar{\mathbb{U}} = \mathbb{U} \ominus K\mathbb{R}_i$$

$$\bar{x}_f \in \bar{\mathbb{X}}_f \quad (23)$$

عملگر  $\ominus$  معادل تفریق پونتریگون<sup>2</sup> است که به صورت رابطه (24) تعریف می‌شود.

$$\mathbb{X} \ominus \mathbb{R}_i = \{x + y \mid x \in \mathbb{X}, y \in \mathbb{R}_i\}$$

$$\mathbb{U} \ominus K\mathbb{R}_i = \{x + y \mid x \in \mathbb{U}, y \in K\mathbb{R}_i\} \quad (24)$$

سیگنال کنترلی نامی محاسبه شده از حل مساله بهینه‌سازی رابطه (23)

( $\bar{u}(t)$ ) در رابطه (20) قرار گرفته و سیگنال کنترلی نهایی ( $u(t)$ ) به سیستم غیرخطی اعمال می‌شود.

### 5- شبیه‌سازی و بررسی عملکرد

هدف از این بخش اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهاد داده شده است. برای این منظور عملکرد کنترل کننده پیش‌بین مقاوم مبتنی بر تیوب که در این مقاله طراحی شده است را با الگوریتم‌های موجود در صنعت مانند PID مقایسه کرده و در شرایط کاری مختلف عملکرد آن‌ها را با هم مقایسه خواهیم کرد.

برای انجام تست‌های مختلف با توجه به دینامیک کند سیستم حفاری، زمان نمونه برداری 3 ساعت انتخاب شده است. با توجه به مدل معرفی شده برای سیستم حفاری، مدل گسسته از سیستم با توجه به پارامترهای مندرج در جدول 1 به‌دست آورده و به عنوان مدل نامی برای ساختار کنترلر پیش‌بین انتخاب می‌شود. با حل مساله بهینه‌سازی با توجه به رابطه (23) سیگنال کنترلی حاصل شده به سیستم واقعی و غیرخطی اعمال شده و نتایج بررسی می‌شوند.

در مرحله اول آزمون ردیابی<sup>3</sup> انجام شده است. براساس شکل 2 خروجی حاصل از کنترل کننده PID رفتار تندتری در خروجی و ورودی سیستم دارد در حالی که کنترل کننده پیش‌بین مقاوم ارائه شده در این مقاله روند پایدارتری را در خروجی و ورودی دنبال می‌کند.

<sup>1</sup> Prediction horizon

<sup>2</sup> Pontryagon difference

<sup>3</sup> Tracking

که کنترل‌کننده PID در مواجهه با تغییرات مدل رفتار غیریکنواخت و نوسانی دارد، ولی کنترل‌کننده پیشنهادی در این مقاله به خوبی توانسته است که این تغییرات مدل را در محدوده مطمئن نگه داشته و اثر آن را تا حدودی خنثی کند.

#### 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار جدید از کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مقاوم برای استفاده بر سیستم‌های پیچیده حفاری یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین فرآیند در صنعت نفت و گاز کشور طراحی و پیاده‌سازی شده است. نرخ حفاری (ROP) به عنوان کلیدی‌ترین پارامتر مطرح در کنترل این فرآیند با بهره‌گیری از مدل مرجع بورگین و یانگ به عنوان یکی از کامل‌ترین مدل‌های شناخته شده در ساختار جدید این کنترل‌کننده مدل‌سازی شده است. این پارامتر در خلال عملیات حفاری با توجه به تغییرات سازند چاه، دچار تغییر می‌شود و همین مساله موجب بروز خطا در دقت مدل سیستم و در نهایت عملکرد عملیات حفاری می‌شود. کنترل‌کننده‌های مرسوم در قبال این نوع تغییرات معمولاً تمهیدات مقاومی را در چارچوب روش طراحی در نظر نمی‌گیرند. برای رفع این مشکل کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم بر مبنای ایده تیوب در این مقاله طراحی و پیاده‌سازی شده است. این کنترل‌کننده در طراحی مرسوم خود امکان ردیابی خروجی از مقدار مرجع را ممکن نمی‌سازد. نوآوری‌های کار پژوهشی حاضر علاوه بر استفاده از مدل بورگین و یانگ در تعیین رابطه بین گشتاور موتور چرخان و نرخ حفاری در شاخه کنترلی هم صورت گرفته است به طوری که در ساختار کنترلی کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم، امکان ردیابی خروجی با تعریف یک مدل نوین که به صورت ادغام مساله رگولاتوری و ردیابی، به ساختار کنترلی اضافه شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی قابلیت کنترل کردن نرخ حفاری در مواجهه با تمامی اغتشاشات وارده بر سیستم و عدم قطعیت‌های مدل را داراست و نسبت به کنترل‌کننده‌های مرسوم کارایی و خصوصیت قوام

بهتری را نشان می‌دهد.

#### 7- مراجع

- [1] A. T. Bourgoyne Jr, F. S. Young Jr., A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 14, No. 4, pp. 371-384, 1974.
- [2] M. T. Bayliss, N. Panchal, J. F. Wildborne, Rotary steerable directional drilling stick/slip mitigation control, *IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, May 31-June 1, 2012.
- [3] S. Irawan, A. Rahman, S. Tunio, Optimization of weight on bit during drilling operation based on rate of penetration model, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 4, No.12, pp.1690-1695, ISSN: 2040-7467, 2012.
- [4] E. Lopez, R. Suarez, Practical approach to modeling and controlling stick/slip oscillation in oil well drill strings, *IEEE International Conference on Control Application*, Taipei, Taiwan, September 2-4, 2004.
- [5] E. Lopez, D. Coertes, Sliding-mode control of a multi-DOF oilwell drillstring with stick/slip oscillations, *American Control Conference*, New York City, USA, July 11-13, 2007.
- [6] R. I. Leine, D. H. Van Campen, W. J. G. Keultjes, Stick-slip whirl interaction in drillstring dynamics, *Vibration and Acoustics*, Vol. 124, No. 2, pp. 209-220, April, 2002.
- [7] M. N. Zeilinger, D. M. Raimondo, A. Domahidi, M. Morari, C. N. Jones, On real-time robust model predictive control, *Automatica*, Vol. 50, No. 3, pp. 683-694, 2014.
- [8] D. Q. Mayne, M. M. Seron, S. V. Rakovic, Robust model predictive control of constrained linear systems with bounded disturbances, *Automatica*, Vol. 41, No. 2, pp. 219-224, 2005.
- [9] A. Bemporad, M. Morari, *Robust Model Predictive Control: A Survey*, Robustness in identification and control, pp. 207-226, The Netherlands: Springer, 1999.
- [10] W. Langson, I. Cgryssochoos, S. V. Rakovic, D. Q. Mayne, Robust model predictive control using tubes, *Automatica*, Vol. 40, No. 1, pp. 125-133, 2004.
- [11] R. Gonzalez, M. Flacchini, T. Alamo, J. L. Guzman, F. Rodrigues, Online robust tube-based MPC for time-varying systems: A practical approach, *Control*, Vol. 84, No. 6, pp. 1157-1170, 2010.
- [12] A. T. Bourgoyne Jr, F. S. Young Jr. A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 14, No. 4, pp. 371-84, 1974.
- [13] R. Arabjamaloei, S. Shadizadeh, Modelling and optimization rate of penetration using intelligent system in an iranian southern oil field (ahvaz oil field), *Petroleum Science and Technology*, Vol. 29, No. 16, pp. 1637-1648, DOI:10.1080/10916460902882818, 2011.
- [14] L. Chisci, J. A. Rossiter, G. Zappa, Systems with persistent disturbances: predictive control with restricted constraints, *Automatica*, Vol. 37, No. 7, pp. 1019-1028, 2001.