

شناسایی چاپگر الکتروهایدرودینامیک و کنترل آن با روش ADRC و رویت گر توسعه یافته

ساسان محمدی^۱ و محمد حائری^۲

^۱دانشکده برق - دانشگاه صنعتی شریف، mohammadi.sasan@ee.sharif.edu

^۲دانشکده برق - دانشگاه صنعتی شریف، haeri@sharif.ir

چکیده - چاپگرهای الکتروهایدرودینامیک یک فناوری نوظهور است که از میدان الکتریکی قوی برای رساندن جوهر سیال از مواد مختلف رسانا به سطح زیرین، استفاده می‌کند. مدل‌سازی این سیستم بعثت تاثیر متغیرهای مختلف بر عملکرد آن، پیچیده می‌باشد. در این مقاله با توجه به دینامیک سیستم ابتدا یک مدل ساده شده برای آن پیشنهاد و در ادامه کنترل‌کننده ADRC مبتنی بر ESO برای این سیستم طراحی شده است.

کلیدواژه - چاپگر الکتروهایدرودینامیک، کنترل‌کننده ADRC، رویت گر حالت توسعه یافته (ESO).

۱- مقدمه

قطره و بهبود ارتقاء مکانیزم چاپگر صورت گرفته است [10, 11]. بیشتر مطالعات گذشته در حوزه تجربی دنبال شده است و با انجام آزمایشات پی در پی به نواحی پایدار جت تیلور دست یافته‌اند [12].

در این چاپگر دست یافتن به قطراتی با قطر یکسان و اندازه کوچک، مهم‌ترین دست‌آورد به حساب می‌آید. برای این منظور، نیاز به حلقه بسته کردن فرایند چاپ با کنترل‌کننده‌های مختلف و مناسب این فرایند داریم. در [13] سعی شده است که با فیدبک از تصویر و تنظیم ضرایب کنترل‌کننده با سعی و خطا به ناحیه پایدار جت تیلور و قطراتی با قطر یکسان و تا حد امکان کوچک دست یابد. مقاله [14] به بررسی کنترل حلقه بسته سیستم چاپگر الکتروهایدرودینامیک می‌پردازد. این مقاله ابتدا روش جدیدی برای فیدبک گرفتن از فرکانس چکاندن قطره، بدون در نظر گرفتن ارتفاع به عنوان خروجی سیستم، معرفی کرده است. سپس الگوریتم کنترلی که بتواند ولتاژ مناسب را برای تشکیل قطره با اندازه مورد نظر، ایجاد کند ارائه می‌کند.

در این مقاله، ابتدا در بخش دوم توضیحاتی در مورد این چاپگر و متغیرهای تاثیرگذار بر فرایند قطره‌چکانی و تعریف ورودی-خروجی مناسب جهت شناسایی سیستم ارائه می‌شود و سپس در بخش سوم بر اساس ورودی-خروجی تعریف شده، شناسایی سیستم صورت می‌گیرد و در نهایت در بخش چهارم کنترل‌کننده ADRC مبتنی بر رویت گر ESO برای این سیستم طراحی می‌گردد.

۲- چاپگر الکتروهایدرودینامیک

در این چاپگر ماده اصلی قابل چاپ، به شکل جوهر بوده و برای انجام فرایند چاپ، از جوهر پایداری استفاده می‌کنند که خود محلولی است، که از حل کردن فلز مورد نظر در حلالی فرار بدست می‌آید. این جوهر در محفظه‌ای ریخته می‌شود و سپس با اعمال میدان و دبی، بر روی سطح

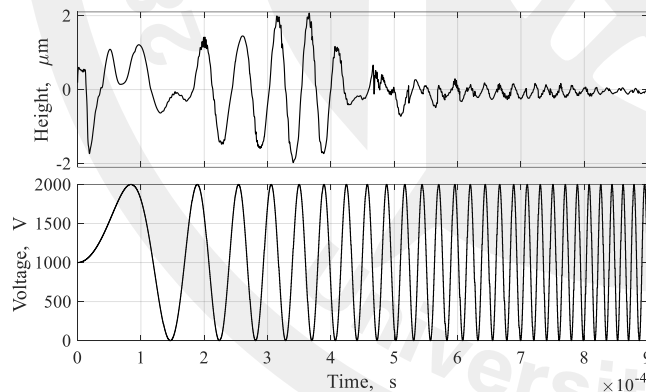
ساخت افزایشی در سال‌های اخیر، بخصوص سه دهه گذشته، همچون انقلابی در صنعت بوده است که رشد چشم‌گیری را داشته است [1]. ساخت افزایشی با هفت روش مختلف که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند، به ساخت قطعات به صورت لایه به لایه می‌پردازد. در میان هفت روش موجود مکانیزم چکاندن، قابلیت و پتانسیل خوبی برای چاپ در ابعاد میکرو و نانو، با طیف وسیعی از مواد (نظیر پلیمر، فلز و حتی سلول) را دارد. در این روش که بر مبنای چکاندن سیال مورد نظر به صورت قطره بر روی زیر لایه هدف است، سه مکانیزم تحریک حرارتی، پیزوالکتریک و الکتروهایدرودینامیک وجود دارد [2, 3]. در میان این مکانیزم‌ها چاپگر الکتروهایدرودینامیک قادر به تولید قطرات در ابعاد میکرون می‌باشد. این روش با قابلیت بالایی که دارد، در ساخت بایوسنسورها [4]، برد الکترونیکی انعطاف‌پذیر [5]، سلول‌های خورشیدی [6]، سلول‌های زنده بدن [7] و تعدادی دیگر از این قبیل [8]، به کار رفته است.

برای اولین بار تیلور در سال ۱۹۶۴ متوجه تاثیر میدان الکتریکی بر سیال شد و پس از بررسی بیشتر به نتایج مهمی در رابطه با تاثیرپذیری میدان بر سیال دست پیدا کرد. او با استفاده از مشاهدات تجربی مدلی ساده ارائه داد که اثر میدان الکتریکی بر سیال و تشکیل سیالی مخروطی شکل را بیان می‌کرد (این شکل از سیال را جت تیلور می‌نامند). چاپگر الکتروهایدرودینامیکی با الهام از پدیده فیزیکی جت تیلور در سال ۲۰۰۷ توسط راگرز و همکاران او در دانشگاه الینویز آمریکا اختراع شد. در این روش، اعمال میدان الکتریکی قوی در نوک نازل رسانا، شکل قطره در حال چاپ را تغییر داده و در شرایط خاصی می‌تواند قطر قطره را تا ده برابر از قطر نازل چاپ، کوچکتر کرده و به ابعاد میکرون و نانو برساند [9]. تحقیقات گسترده‌ای در جنبه‌های شبیه‌سازی، مطالعات تجربی تشکیل

نقطه اصلی و تعیین کننده در این چاپگر بکارگیری درست و مناسب همه متغیرها برای رسیدن به حالت پایدار جت تیولور می باشد. پارامتر ورودی اصلی در این چاپگر ولتاژ الکتریکی (میدان الکتریکی) می باشد که در صورت کنترل آن، می توان ارتفاع جت تیولور تشکیل شده را در شرایط پایدار مطابق شکل ۲ نگه داشت و در صورت کنترل ارتفاع، می توان قطر قطرات تولید شده را هم کنترل کرد. بنابراین ورودی کنترلی در این چاپگر ولتاژ الکتریکی و خروجی قابل تعریف، ارتفاع جت می باشد. بر اثر اعمال میدان الکتریکی به دو سر نازل، جت تیولور تشکیل می شود که مطلوب ما می باشد.

۳- شناسایی سیستم

در بحث شناسایی سیستم، انتخاب ورودی مناسب بسیار حائز اهمیت می باشد. ورودی ای مناسب است که غنی باشد و تمام مدهای سیستم را تحریک کند. یکی از سیگنال هایی که این خاصیت را دارا می باشد، سیگنال چیرپ (chirp) است که فرکانس این سیگنال با زمان تغییر می کند. در واقع با دادن این سیگنال به سیستم، انواع فرکانس های کاری آن را تحریک می کنیم. به عنوان مثال، در مقاله [16] سیگنال چیرپ و پله با دامنه و فرکانس مختلف را برای شناسایی سیستم استفاده کرده است. شکل ۳ ورودی-خروجی گرفته شده از چاپگر الکتروهیدروپدینامیک می باشد. این داده ها از شبیه ساز دستگاه چاپگر الکتروهیدروپدینامیک نرم افزار چند-فیزیکی کامسول گرفته شده است [10]. نکته ای که در مورد شکل های این بخش قابل بیان است، ارتفاع منفی می باشد. در واقع به هنگام اعمال میدان الکتریکی به قطره، بعثت نیروی گرانش زمین قطره ارتفاع اولیه دارد، که در این مقاله تمام شکل های خروجی ارتفاع اولیه جت را بعنوان مرجع گرفته ایم و ارتفاع منفی هم به همین علت می باشد.



شکل ۳. ورودی-خروجی گرفته شده جهت شناسایی سیستم (چیرپ با فرکانس 0-200kHz).

قبل از پرداختن به اعمال روش های شناسایی، داشتن دید مناسب از عملکرد سیستم و تحلیل فیزیکی آن، این کمک را به ما می کند که مدل ساده تری با دقت بیشتری بدست آوریم. مطابق شکل ۴ این سیستم دارای رفتار غیرخطی می باشد. زیرا ورودی یک سینوسی با فرکانس 2.5 kHz است و فرکانس خروجی در حالت پایا، 5 kHz می باشد. ضمناً همین ورودی سینوسی را برای فرکانس های 5 kHz و 7.5 kHz تکرار نمودیم که در خروجی در حالت پایا به ترتیب، فرکانس 10 kHz و 15 kHz را دریافت نمودیم. بنابراین

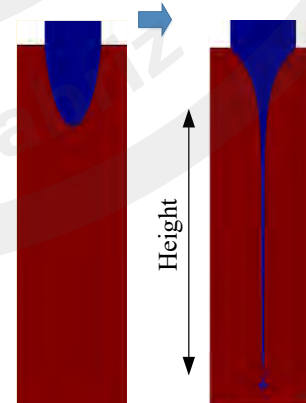
زیرین چاپ شده و سپس با حرارت دادن به بستر، حلال تبخیر شده و ذرات ماده اصلی روی بستر باقی می ماند. در شکل ۱ اجزا تشکیل دهنده این نوع چاپگر نمایش داده شده است. دبی سیال ورودی به نازل بوسیله پمپ سرنگی دقیق کنترل می شود و سپس میدان الکتریکی توسط تقویت کننده ولتاژ به نازل اعمال می گردد. بدلیل پدیده الکتروهیدروپدینامیک، قطره به صورت جت مخروطی (تیولور) تغییر شکل می دهد و پس از آن در صورت اعمال میدان به صورت پالسی قطرات ریز را می توان از جت تشکیل شده بدست آورد. حال این قطرات تولید شده بر روی سطح زیرین که در شکل مشخص است فرود می آیند و با تکرار این فرآیند، الگوی مورد نظر بر روی سطح زیرین ساخته می شود. در طول فرآیند چاپ، برای درک بهتر رفتار این پدیده توسط دوربین فیلم برداری با سرعت بالا، ضبط می شود.



شکل ۱. اجزاء چاپگر الکتروهیدروپدینامیک.

متغیرهای تاثیرگذار بر این نوع چاپگر، چگالی، ویسکوزیته، کشش سطحی، رسانایی الکتریکی، نفوذپذیری، ولتاژ، دبی سیال و قطر نازل می باشد. رسیدن به شرایط پایدار در چاپ نیازمند تنظیم صحیح این متغیرها می باشد. به طور مثال عدم تنظیم صحیح فاصله نازل تا سطح، ولتاژ الکتریکی و دبی سیال منجر به ناپایداری در جت سیال و عدم رسیدن به جت تیولور که مطلوب ما می باشد، می شود. حالت های مختلف جت در اثر میدان الکتریکی و دبی سیال در مقاله [15] بررسی شده است.

بعد از اعمال میدان الکتریکی



شکل ۲. ورودی-خروجی تعریف شده برای سیستم.

همان طور که بیان شد، کیفیت و دقت قطعه تولید شده کاملاً به این موضوع بستگی دارد که تولید قطره در حالت پایدار جت تیولور باشد. لذا

۴- طراحی کنترل کننده ADRC

در حالت کلی می‌توان معادلات دینامیکی حاکم بر یک سیستم مرتبه n غیرخطی متغیر با زمان را به صورت زیر در نظر گرفت.

$$y^{(n)} = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, w(t), t) + bu(t) \quad (3)$$

در این رابطه $f(\cdot)$ تابع متغیر با زمان و غیرخطی تشریح کننده سیستم، $w(t)$ اغتشاش خارجی، $u(t)$ ورودی کنترلی، b بهره ورودی کنترلی و $y(t)$ نیز خروجی اندازه‌گیری شده است. $f(\cdot)$ ناشناخته می‌باشد و آن را اغتشاش کلی می‌نامیم. حال اگر بتوان اغتشاش کلی را تخمین زده و حذف کرد، آن‌گاه سیستم به یک سیستم انتگرالی مرتبه n کاهش پیدا خواهد کرد. در واقع ADRC بجای پیروی کردن از شیوه مدل‌سازی مرسوم موجود و یافتن یک عبارت ریاضی دقیق برای $f(\cdot)$ ، آن را به صورت فعال و زمان واقعی تخمین زده و با استفاده از قانون کنترلی زیر آن را حذف می‌کند.

$$u = \frac{1}{b}(-\hat{f}(\cdot) + u_0),$$

در این رابطه $\hat{f}(\cdot)$ تخمین $f(\cdot)$ و u_0 سیگنال کنترلی اعمالی برای کنترل مدل ساده شده است. با استفاده از قانون کنترل فوق و اعمال آن به مدل، معادله (۳) به یک سیستم انتگرال‌گیر مرتبه n تبدیل خواهد شد.

$$y^{(n)} = f(\cdot) - \hat{f}(\cdot) + u_0 \cong u_0 \quad (4)$$

کاهش سیستم پیچیده اولیه به یک سیستم انتگرال‌گیر ایده کلیدی روش ADRC می‌باشد. اما نکته مهم در اینجا تخمین مناسب $f(\cdot)$ است که این وظیفه بر عهده رویه‌گر ESO می‌باشد [17].

۴-۱- رویه‌گر حالت توسعه یافته (ESO)

برای تخمین اغتشاش کلی $f(\cdot)$ از یک رویه‌گر حالت توسعه یافته با یک متغیر اضافی استفاده می‌شود. بردار رابطه سیستم را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_{n+1}]^T = [y \ \dot{y} \ \dots \ y^{(n-1)} \ f]^T \quad (5)$$

که $n+1$ عضو دارد. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم برای یک سیستم مرتبه n رویه‌گر ESO از مرتبه $n+1$ می‌باشد. در واقع متغیر حالت جدید $\hat{x}_{n+1} = f(\cdot)$ برای تخمین اغتشاش کلی سیستم در نظر گرفته می‌شود. معادلات رویه‌گر به صورت زیر می‌باشد.

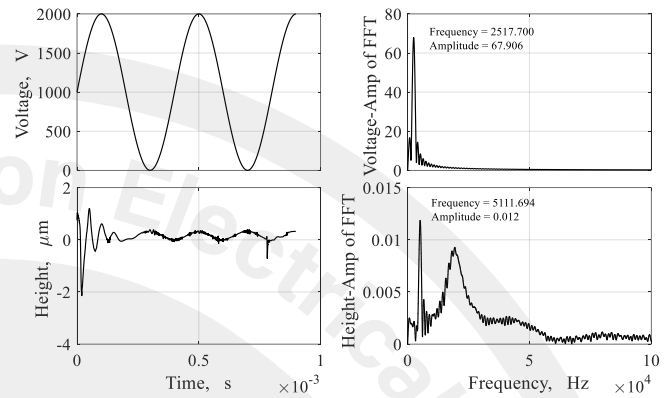
$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i = \hat{x}_{i+1} + l_i(y - \hat{x}_1), & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{\hat{x}}_n = \hat{x}_{n+1} + l_n(y - \hat{x}_1) + bu \\ \dot{\hat{x}}_{n+1} = l_{n+1}(y - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (6)$$

که \hat{x}_i تخمین x_i می‌باشد و l_i پارامترهای تنظیمی رویه‌گر است که باید مقادری شوند. با توجه به دینامیک رویه‌گر می‌توان دید که اغتشاش خارجی و دینامیک‌های مدل سیستم شامل دینامیک‌های مدل نشده و عدم قطعیت، تخمین زده می‌شود و تنها درجه نسبی و اطلاعات محدودی از سیستم برای طراحی این رویه‌گر لازم است.

۴-۲- طراحی ADRC بر اساس ESO برای سیستم مرتبه دوم

فرض کنید که سیستم مرتبه دوم به صورت زیر باشد.

این سیستم دارای غیرخطی‌گری مرتبه دوم بر روی ورودی کنترلی می‌باشد. در شکل ۴ تبدیل فوریه خروجی در دو مقدار فرکانس پیک دارد که پیک اول مربوط به حالت گذار سیستم و پیک دوم مربوط به حالت پایا سیستم است که مقدار آن گزارش شده است.



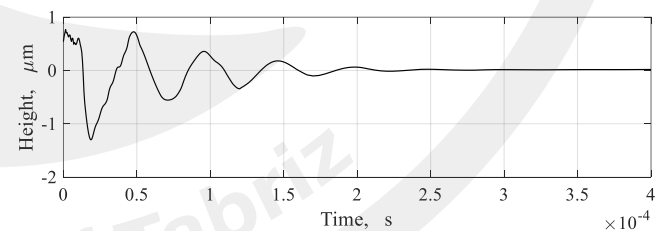
شکل ۴. پاسخ سیستم به ورودی سینوسی با فرکانس 2.5 kHz

با توجه به غیرخطی‌گری بیان شده و مشاهده شکل ۵ که فقط ارتعاش آزاد ارتفاع قطره با شرایط اولیه را نمایش می‌دهد، به نظر می‌رسد که این پدیده رفتاری همچون فنر-دمپر دارد که معادله حاکم بر آن را می‌توان به صورت زیر تخمین زد.

$$\frac{y}{\bar{u}} = \frac{b_0}{s^2 + b_1s + b_2}, \bar{u} = u^2 \quad (1)$$

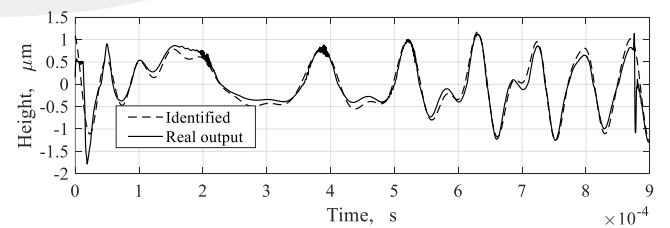
برای شناسایی ضرایب مدل از جعبه‌افزار شناسایی متلب استفاده می‌کنیم. شناسایی سیستم را با استفاده از داده‌های ورودی-خروجی شکل ۳ و اعتبارسنجی مدل بدست آمده از داده‌های چیرپ که این‌بار فرکانس آن 0-50kHz است، انجام می‌دهیم. بهترین مدل با مقدار انطباق 70.42% و $FPE = 0.0408$ که نشان‌دهنده شناسایی مناسبی است، بدست می‌آید. ضرایب مدل به دست آمده به صورت زیر می‌باشند.

$$b_0 = 4230, b_1 = 2.715 \times 10^4, b_2 = 1.516 \times 10^{10} \quad (2)$$



شکل ۵. ارتعاش آزاد سیستم با شرایط اولیه و بدون ورودی.

اعتبارسنجی این مدل با داده‌های جدید در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶. اعتبارسنجی مدل بدست آمده با ورودی چیرپ با فرکانس 0-50kHz

در این روابط، T_s ، k_{ob} ، s^{cl} و s^{ESO} به ترتیب زمان نشست، ضریب رویت‌گر، قطب حلقه‌بسته و قطب رویت‌گر می‌باشند. حال طبق روابط بالا، برای سیستم چاپگر الکتروهایدرودینامیک، در حالت پیوسته شبه‌سازی‌های لازم را در نرم‌افزار متلب انجام می‌دهیم [18].

۳-۴ طراحی کنترل‌کننده چاپگر الکتروهایدرودینامیک

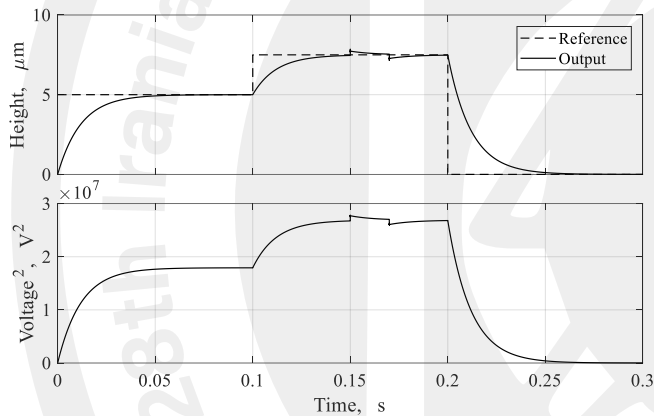
طبق روابط بخش ۴-۲ که در مورد طراحی کنترل‌کننده ADRC برای سیستم‌های مرتبه دوم بود، طراحی کنترل‌کننده و پیاده‌سازی آن را برای سیستم چاپگر الکتروهایدرودینامیک، انجام خواهیم داد. مدل به دست آمده برای سیستم به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -b_1x_2 - b_2x_1 + b_0u^2 \end{cases} \quad (14)$$

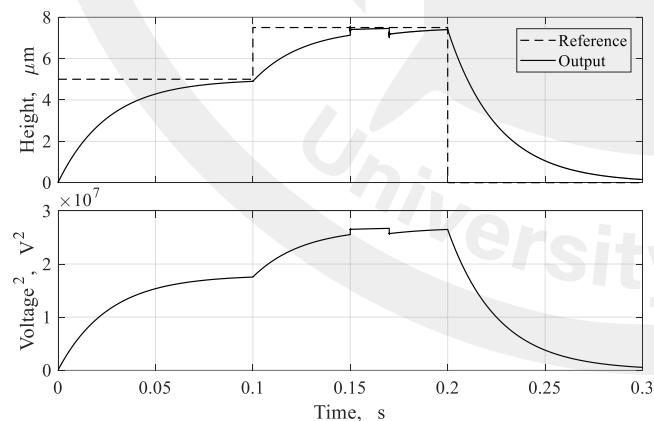
$$b_0 = 4230, b_1 = 2.715 \times 10^4, b_2 = 1.516 \times 10^{10}$$

در این طراحی زمان نشست را $T_s = 1 \times 10^{-3}$ ثانیه در نظر می‌گیریم. با تنظیم ضرایب کنترلی با توجه به روابط (۱۳)، به نتایج زیر می‌رسیم.

$$s^{cl} = -6000, k_p = 36 \times 10^6, k_D = 12000, s^{ESO} = 20s^{cl} \quad (15)$$



شکل ۸. اعمال کنترل‌کننده ADRC بر سیستم مذکور و دفع اغتشاش توسط این کنترل‌کننده.



شکل ۹. بررسی اثر ضریب رویت‌گر بر عملکرد کنترل‌کننده.

شکل ۸ نتیجه طراحی کنترل‌کننده را برای سیستم مذکور نشان می‌دهد. همان‌طور مشاهده می‌شود، ردیابی سیگنال مرجع بدرستی صورت گرفته است و این کنترل‌کننده بخوبی توانسته است اغتشاش وارد شده به سیستم را دفع کند. سیگنال اغتشاش در شکل ۸ پله‌ای با دامنه 10^6

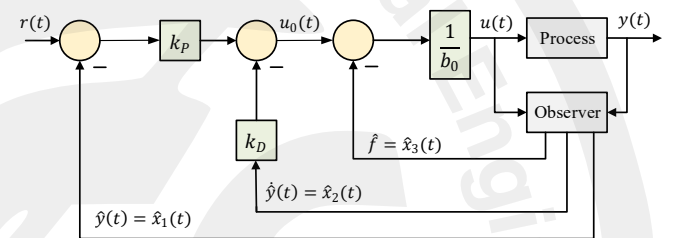
$$p(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k}{T^2s^2 + 2DTs + 1} \quad (7)$$

اغتشاش $w(t)$ را برای سیستم در نظر می‌گیریم. با تعریف $b = k/T^2$ منظور کردن عدم قطعیت برای آن $(b = b_0 + \Delta b)$ خواهیم داشت.

$$\dot{y} = \left(-\frac{2D}{T}\dot{y}(t) - \frac{1}{T^2}y(t) + \frac{1}{T^2}w(t) + \Delta bu(t) \right) + b_0u(t) = f(t) + b_0u(t) \quad (8)$$

در این رابطه $f(t)$ در واقع همان اغتشاش کلی است. که با در نظر گرفتن $u = \frac{1}{b}(-\dot{f}(\cdot) + u_0)$ روابط این سیستم مرتبه دوم به یک انتگرال‌گیر مرتبه دوم تبدیل می‌شود که بلوک دیاگرام کنترلی آن به صورت شکل ۷ می‌باشد. روابط مربوط به رویت‌گر ESO هم به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{x}}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 & 1 & 0 \\ -l_2 & 0 & 1 \\ -l_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} y(t) \quad (9)$$



شکل ۷. ساختار ADRC برای سیستم مرتبه دوم.

در این صورت رابطه $u(t)$ به صورت زیر خواهد بود.

$$u(t) = \frac{(k_p(r(t) - \hat{x}_1(t)) - k_D\hat{x}_2) - \hat{x}_3}{b_0} \quad (10)$$

با استفاده از متغیرهای تخمین زده شده، می‌توان اثر اغتشاش را دفع و یک کنترل‌کننده خطی برای قسمت باقیمانده که به صورت انتگرال‌گیر دوگانه است، طراحی کرد. در شکل ۷ از یک کنترل‌کننده فیدبک حالت (در این حالت معادل PD) برای این سیستم مرتبه دوم استفاده شده است. مطابق بلوک دیاگرام شکل ۷ داریم.

$$u = \frac{-\dot{f}(\cdot) + u_0}{b_0} \text{ with } u_0(t) = k_p(r(t) - \hat{y}(t)) - k_D\dot{y}(t) \quad (11)$$

برای یک تخمین خوب باید $\hat{x}_1(t) = \hat{y}(t) \approx y(t)$ ، $\hat{x}_2(t) = \dot{\hat{y}}(t) \approx \dot{y}(t)$ و در نهایت $\hat{x}_3(t) = \hat{f}(t) \approx f(t)$ صادق باشد. با جایگذاری معادلات در هم خواهیم داشت.

$$\dot{y}(t) = (f(t) - \hat{f}(t)) + u_0(t) \approx u_0(t) \approx k_p(r(t) - \hat{y}(t)) - k_D(\dot{y}(t)) \quad (12)$$

در این رابطه کافی است k_p و k_D را تعیین کنیم. یک راهکار عملیاتی برای این موضوع تنظیم این ضرایب در نزدیکی حالت بحرانی و با معیار دو درصد زمان نشست می‌باشد. به این معنی که معادله مشخصه حلقه‌بسته را $s^2 + k_p s + k_D$ است معادل $(s + s^{cl})^2$ قرار می‌دهند و قطب‌ها رویت‌گر را بر اساس آن تعیین می‌کنند. بر این اساس پارامترهای کنترل و بهره رویت‌گر به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$\begin{aligned} s^{cl} &= -\frac{6}{T_s}, k_p = (s^{cl})^2, k_D = -2s^{cl} \\ s^{ESO} &= k_{ob}s^{cl}, l_1 = -3s^{ESO}, l_2 = 3(s^{ESO})^2, l_3 = -(s^{ESO})^3 \end{aligned} \quad (13)$$

- [12]. A. Lee, H. Jin, H.W. Dang, K.H. Choi, and K.H. Ahn, "Optimization of experimental parameters to determine the jetting regimes in electrohydrodynamic printing," *Langmuir*, vol. 29, pp. 13630-13639, 2013.
- [13]. T.K. Nguyen, V.D. Nguyen, Trung Kien, B. Seong, N. Hoang, J.K. Park, and D. Byun, "Control and improvement of jet stability by monitoring liquid meniscus in electrospray and electrohydrodynamic jet" *Journal of Aerosol Science*, vol. 71, pp. 29-39, 2014
- [14]. B. Kira, S. Mishra, A. Alleyne, P. Ferreira, and J. Rogers. "Control of high-resolution electrohydrodynamic jet printing" *Control Engineering Practice*, vol. 19, no 11, pp. 1266-1273, 2011.
- [15]. M. Yu, K.H. Ahn, and S.J. Lee, "Design optimization of in electrohydrodynamic jet printing: Effect of viscoelasticity on the formation of Taylor cone jet," *Materials & Design*, vol. 89, no 11, pp. 109-115, 2016.
- [16]. M. Annabestani and N. Naghavi, "Nonlinear identification of IPMC actuators based on ANFIS-NARX paradigm," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 209, pp. 140-148, 2014.
- [17]. J. Han, "From PID to active disturbance rejection control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900-906, 2009.
- [18]. G. Herbst, "A simulative study on active disturbance rejection control (ADRC) as a control tool for practitioners," *Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 246-279, 2013.
- [19]. B. Ahi, and A. Nobakhti, "Hardware implementation of an ADRC controller on a gimbal mechanism" *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 2268-2275, 2017.

(یعنی اغتشاش 1000 ولتی بر روی عملگر) در بازه زمانی $t = 0.15$ s تا $t = 0.17$ s می‌باشد. در این طراحی قطب رویت گر $(k_{ob} = 20)$ برابر قطب حلقه بسته در نظر گرفتیم، که به نسبت اعداد کوچکتر از آن عملکرد بهتری را دارد [19]. با انتخاب k_{ob} کوچکتر از این مقدار ردیابی به خوبی صورت نمی‌گیرد. نتیجه شبیه‌سازی برای $k_{ob} = 10$ در شکل ۹ نمایش داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

چاپگرهای الکتروهایدرودینامیکی یک تکنولوژی نوظهور در حوزه ساخت، در گستره وسیعی از مواد هستند. در این مقاله، ابتدا با بهره‌گیری از داده‌های مناسب مدل مرتبه ۲ ای برای این سیستم شناسایی شد. برای مدل شناسایی شده آزمون اعتبارسنجی با مجموعه داده‌های جدیدی انجام گرفت و نشان داده شد که نتیجه به دست آمده قابل قبول می‌باشد. سپس یک کنترل کننده ADRC مبتنی بر ESO طراحی و نشان داده شد که ردیابی ورودی مرجع و دفع اغتشاش به خوبی حاصل می‌شود. قرار است در آینده این کنترل کننده به صورت عملی مورد ارزیابی قرار گیرد.

سپاسگزاری: از آزمایشگاه ساخت دقیق دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های ورودی-خروجی سیستم آزمایشگاهی جهت شناسایی آن تشکر می‌کنیم.

مراجع

- [1]. M.K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R.I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, and F. Martina, "Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Annals*, vol. 65, pp. 737-760, 2016.
- [2]. K. Hon, L. Li, and I. Hutchings, "Direct writing technology-Advances and developments," *CIRP Annals*, vol. 57, pp. 601-620, 2008.
- [3]. R. Parashkov, E. Becker, T. Riedl, H.H. Johannes, and W. Kowalsky, "Large area electronics using printing methods," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, pp. 1321-1329, 2005.
- [4]. X. Cui and T. Boland, "Human microvasculature fabrication using thermal inkjet printing technology," *Biomaterials*, vol. 30, pp. 6221-6227, 2009.
- [5]. K. Wang, M.D. Paine, and J.P. Stark, "Fully voltage-controlled electrohydrodynamic jet printing of conductive silver tracks with a sub-100 μm linewidth," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, p. 024907, 2009.
- [6]. S.H. Eom, S. Senthilarasu, P. Uthirakumar, S.C. Yoon, J. Lim, C. Lee, H.S. Lim, S.H. Lee, "Polymer solar cells based on inkjet-printed PEDOT: PSS layer," *Organic Electronics*, vol. 10, pp. 536-542, 2009.
- [7]. J.Y. Lee, B. Choi, B. Wu, and M. Lee, "Customized biomimetic scaffolds created by indirect three-dimensional printing for tissue engineering," *Biofabrication*, vol. 5, p. 045003, 2013.
- [8]. L. Gonzalez Marcia, A. Morrin, M.R. Smyth, and A.J. Killard, "Advanced printing and deposition methodologies for the fabrication of biosensors and biodevices," *Analyst*, vol. 135, pp. 845-867, 2010
- [9]. J.U. Park, M. Hardy, S.J. Kang, K. Barton, K. Adair, D.K. Mukhopadhyay, C.Y. Lee, M.S. Strano, A.G. Alleyne, J.G. Georgiadis, P.L. Ferreira, and J.A. Rogers, "High-resolution electrohydrodynamic jet printing," *Nature materials*, vol. 6, p. 782, 2007.
- [10]. K. Mohammadi, M.R. Movahhedy, and S. Khodaygan, "A multi-physics model for analysis of droplet formation in electrohydrodynamic 3D printing process," *Journal of Aerosol Science*, vol. 135, pp. 72-85, 2019.
- [11]. Y. Han and J. Dong, "High-resolution electrohydrodynamic (EHD) direct printing of molten metal," *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 845-850, 2017.