

## مدلسازی غیرخطی یک عملگر هیدرولیکی با در نظر گرفتن عامل اشباع در دامنه و سرعت فرامین

پوریا سرحدی<sup>۱</sup>، نعمت... قهرمانی<sup>۲</sup>، رضا میریوسفی اول<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، pouria.sarhadi@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ghahramani@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، miryousefi.reza@gmail.com

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۹/۴/۱۸، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۹/۶/۱۲)

**چکیده:** در این مقاله مدل غیرخطی یک عملگر هیدرولیکی با در نظر گرفتن عامل اشباع دامنه و سرعت شناسایی شده است. ابتدا مدل عملگر با یک تابع تبدیل درجه یک و توابع غیرخطی اشباع با پارامترهای مجهول در نظر گرفته شده، سپس با تعریف دو تابع هدف مناسب و بهینه‌سازی عددی آنها، پارامترهای مجهول تخمین زده شده‌اند. مدل معرفی شده به خوبی رفتار غیرخطی عملگر را نشان داده و نسبت به مدل‌های مرسوم خطی دقت بالاتری دارد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی غیرخطی با استفاده از مدل جدید و آزمایشات تجربی، صحت مدل جدید را به اثبات می‌رساند. این مدل در طراحی اتوپایلوت برای اجسام پرنده کاربرد فراوانی دارد، بعلاوه می‌توان از آن، در آزمایشگاه شبیه‌سازی به جای عملگرهای گران‌قیمت واقعی استفاده نمود.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی غیرخطی، اشباع، عملگر، اتوپایلوت.

### Nonlinear Modeling of a Hydraulic Actuator Considering Saturations in Amplitude and Rate Commands

Pouria Sarhadi, Nemat Ollah Ghahramani, Reza Miryousefi Aval

**Abstract:** In this paper, nonlinear model of a hydraulic actuator considering amplitude and rate saturations is identified. First actuator model with a first order transfer function and nonlinear functions of saturation with unknown parameters are taken in account, then by defining two suitable destination functions and numerically optimization of them, unknown parameters are estimated. Introduced model appropriately has described the nonlinear behavior of the actuator and has higher accuracy due to conventional linear models. Comparison between nonlinear simulation results using new model and the experimental tests, show the fidelity of this model. This model has large applications in flying systems autopilot designing, also it could be used as the costly real actuators in simulation laboratory.

**Keywords:** Nonlinear Modelling, Saturation, Actuator, Autopilot.

#### ۱- مقدمه

اتوپایلوت اجسام پرنده می‌باشد. برای طراحی یک کنترل کننده مطلوب، بایستی تمامی اجزای سیستم، به طور دقیق مدلسازی و شناسایی گردند. در طراحی، خطا در مدل عملگر می‌تواند کارآئی حلقه بسته سیستم را

عملگرها یکی از اجزای مهم حلقه‌های کنترل اجسام پرنده می‌باشند. مدلسازی عملگر با دقت بالا، یکی از مراحل مهم در طراحی

دارای اشباع در دامنه و سرعت ورودی یا فرامین می‌باشند. مواجهه با دینامیک این نوع از عملگرها جزء موضوعات مورد علاقه در نوشتجات کنترل می‌باشد [۱، ۸-۱۳]، اما در بیشتر مراجع از مدل ساده خطی برای مدلسازی و طراحی استفاده شده است [۴-۷]. در مراجعی هم که از مدل‌های غیرخطی استفاده شده، در مورد چگونگی شناسایی پارامترهای مدل مانند میزان اشباع، کمتر بحث شده است.

در این مقاله یک مدل ورودی-خروجی دقیق برای عملگر هیدرولیکی سیستمهای پرواز، پیشنهاد گردیده و با استفاده از بهینه‌سازی عددی، پارامترهای مدل مذکور تخمین زده شده و کارائی این مدل جدید در آزمایشگاه به اثبات رسیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان از بهبود تقریباً دو برابری عملکرد مدل جدید نسبت به مدل‌های معمول خطی داشته و خروجی مدل جدید تا ۹۶٪ بر خروجی سیستم واقعی انطباق دارد. از این روش می‌توان برای شناسایی مدل عملگرهای هیدرولیکی اجسام پرنده استفاده نموده و در طراحی اتوپیلوت مورد استفاده قرار داد.

در بخش ۲ این مقاله، با بیان صورت مسأله یک مدل جدید معرفی شده است. در بخش ۳، روش عددی تخمین معرفی شده و نتایج آن با خروجی مدل عملگر مقایسه شده است. در بخش ۴، از مدل جدید در شبیه‌سازی غیرخطی یک جسم پرنده استفاده شده و نتایج آن با حالت استفاده از یکی از مدل‌های مرسوم مقایسه شده است.

## ۲- بیان مسئله

اغلب برای سادگی، عملگرها با مدل‌های FOPDT یا SOPDT مدلسازی می‌شوند. اما این مدل‌ها معمولاً تا زمانی که عملگر در ناحیه خطی عمل می‌کنند، معتبر می‌باشند. در عملگر بکار رفته در این مقاله نیز، با افزایش دامنه فرامین عملگر وارد ناحیه غیرخطی شده و رفتار دینامیکی و سرعت پاسخدهی آن تغییر می‌کند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان دریافت که بزرگ شدن دامنه فرامین، باعث افزایش خطای مابین خروجی مدل و خروجی عملگر واقعی می‌باشد. زمان صعود افزایش یافته و پاسخ حالت گذرا مانند یک تابع شیب می‌شود. برای بررسی مدل خطی عملگر مدل FOPDT، را بصورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$G(s) = \frac{e^{-0.01s}}{0.1s + 1} \quad (1)$$

کاهش داده و حتی آن را ناپایدار نماید [۱]. در مدل‌هایی که برای طراحی کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند، به مدلسازی جزء به جزء عملگر احتیاج نبوده و مدل بکاربرده شده هرچه ساده‌تر و دقیق‌تر باشد، می‌تواند مطلوب طراحی قرار گیرد. وجود نویز، عدم قطعیت در سطوح کوانتیزاسیون و وجود مشخصات غیرخطی از جمله اشباع در دامنه و نرخ زاویه عملگر، عملاً شناسایی دقیق یک عملگر را با مشکلاتی مواجه می‌کند. اگر محدوده غیرخطی در یک سیستم کوچک باشد، مدل‌های خطی می‌توانند آن را به خوبی توصیف نمایند، با افزایش این محدوده مدل‌های خطی کارآیی خود را از دست می‌دهند. این عناصر غیرخطی می‌توانند یک اشباع<sup>۱</sup>، ناحیه مرده<sup>۲</sup>، لقی<sup>۳</sup> و... باشند. در اغلب اوقات نبود این عناصر غیرخطی در مدل، باعث خشنودی مهندسان کنترل می‌گردد [۲]. اشباع در دامنه عملگرها، از عناصر غیرخطی می‌باشد که همواره در سیستمهای واقعی وجود دارند. عدم وجود اشباع در دامنه یک عملگر به معنی داشتن اثرژی کنترل بینهایت می‌باشد. علاوه بر اشباع دامنه ورودی، برخی از عملگرها دارای اشباع بر روی سرعت ورودی عملگر نیز می‌باشند [۳]. این دو اشباع باعث ایجاد محدودیت در توانایی سیستم کنترل بر اجرای فرامین و دفع اغتشاشات می‌گردند. معمولاً اشباع سرعت در مدل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود و این مسأله مشکلاتی را در طراحی اتوپیلوت ایجاد می‌کند. محدودیت‌های دیگر مانند سطح کوانتیزاسیون سیگنال ورودی و پسماند<sup>۴</sup> در عملگرها، نقش ضعیفتری در میان این غیرخطی‌گriها دارند [۳]. برای مدل‌سازی دقیق عملگرها، ابتدا یک ساختار مناسب برای آن انتخاب شده، سپس سعی بر تخمین پارامترهای آن با استفاده از توابع هدف گوناگون می‌باشد.

اغلب در مدلسازی عملگرها، یک مدل ساده خطی درجه یک همراه با تأخیر زمانی (FOPDT)<sup>۵</sup>، یا مدل خطی درجه دو همراه با تأخیر (SOPDT)<sup>۶</sup> در نظر گرفته می‌شود [۴-۷]. خواهیم دید این انتخاب برای مدلسازی تمامی عملگرها مناسب نمی‌باشد. در این مدل‌ها با بزرگتر شدن فرامین، خروجی مدل خطی و عملگر واقعی از هم فاصله گرفته و خطای مدلسازی افزایش می‌یابد. در این حالت زمان صعود افزایش یافته و رفتار دینامیکی حالت گذرا کاملاً عوض می‌شود. همانطور که گفته شد عملگرهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع هیدرولیکی و

<sup>1</sup> Saturation

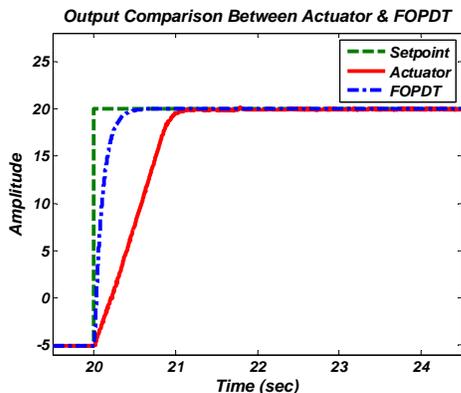
<sup>2</sup> Dead Zone

<sup>3</sup> Backlash

<sup>4</sup> Hysteresis

<sup>5</sup> First Order Plus Dead Time

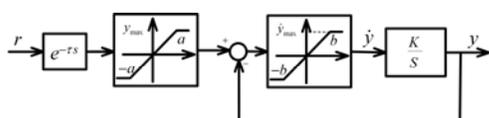
<sup>6</sup> Second Order Plus Dead Time



تصویر ۳- مقایسه خروجی عملگر واقعی و مدل (۱) در ازای فرمان ۲۵ درجه

می‌توان گفت که تقریباً مدل FOPDT در فرامین با دامنه کم (فرامینی با دامنه کوچکتر از ۴) تقریب مناسبی از عملگر واقعی می‌باشد (تصویر ۲). اما همیشه این مدل مناسب نیست. در تصویر ۳، خروجی عملگر و مدل (۱) در ازای اعمال فرمان با دامنه ۲۵ بزرگنمایی شده است. با توجه به این تصویر، تغییر در رفتار عملگر به وضوح قابل مقایسه می‌باشد. هم رفتار حالت گذرا تغییر یافته و هم زمان صعود تقریباً دو برابر شده است. برای مقایسه بیشتر، می‌توان دوباره به تصویر ۱ رجوع نمود.

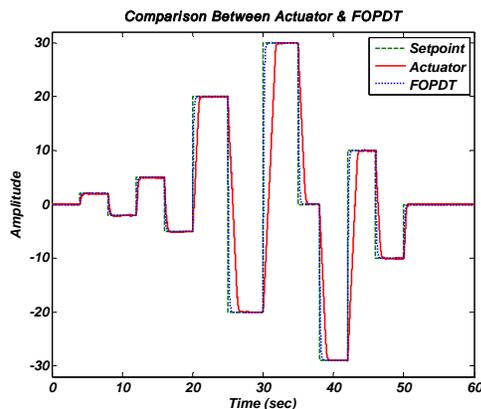
در نظر نگرفتن این رفتار در طراحی، می‌تواند باعث ناپایداری کنترل‌کننده بشود [۱].<sup>۱</sup> برای جلوگیری از این مشکل مدلی غیرخطی به صورت تصویر ۴ در نظر گرفته شده که شامل دو عنصر اشباع دامنه و سرعت است که با یک تابع تبدیل خطی به همراه یک تأخیر در هم آمیخته شده است:



تصویر ۴- مدل در نظر گرفته شده برای عملگر به همراه اشباع سرعت و دامنه

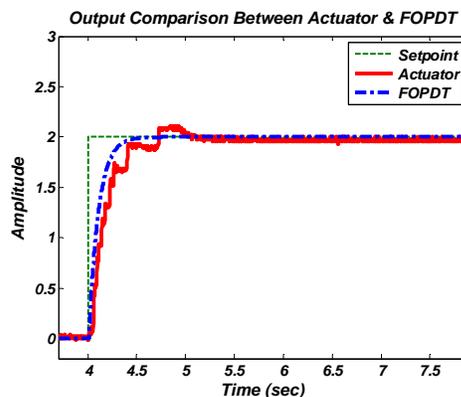
در تصویر ۴،  $r$  ورودی مطلوب به عملگر و  $y$  پاسخ عملگر به آن می‌باشد. همچنین  $k$  برابر با ثابت زمانی مدل در حالت عملکرد خطی،  $a$  میزان اشباع دامنه،  $b$  میزان اشباع سرعت و  $\tau$  میزان تأخیر عملگر می‌باشند. ساختاری مشابه با مدل تصویر ۴ در مقالات مختلف مورد استفاده قرار گرفته، اما راجع به نحوه بدست آوردن پارامترهای آن بحث نشده است [۸-۱۳]. نکته جالب اینکه اگر توابع اشباع از تصویر ۴

برای بیان موضوع، یک سری ورودی پله با دامنه‌های مختلف به عملگر اعمال می‌کنیم. با مقایسه مدل (۱) و خروجی عملگر در تصویر ۱، می‌توان مشاهده نمود که در فرامین با دامنه کوچک، مدل با رفتار عملگر تطبیق دارد. اما با بزرگتر شدن دامنه پله‌ها، عملگر وارد ناحیه غیرخطی شده و اختلاف زیادی مابین خروجی آن و خروجی مدل (۱) بوجود می‌آید:



تصویر ۱- مقایسه خروجی مدل‌های عملگر واقعی و مدل (۱)

در تصاویر ۲ و ۳، به ترتیب بزرگنمایی شده ناحیه خطی و غیرخطی عملگر با خروجی مدل خطی مقایسه شده‌اند.



تصویر ۲- مقایسه خروجی عملگر واقعی و مدل (۱) در ازای فرمان ۲ درجه

<sup>۱</sup> در صورت طراحی کنترل‌کننده با استفاده از مدل FOPDT و در شرایط عملکرد در ناحیه غیرخطی، احتمال بروز این اتفاق زیاد می‌باشد.

این معیار برای بدست آوردن درصد مطابقت خروجی دو مدل در جعبه‌ابزارهای شناسائی سیستم و کنترل پیش‌بین نرم‌افزار MATLAB مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷] و به صورت زیر بیان می‌شود:

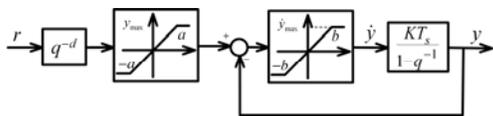
$$FIT = 100 \left( \frac{1 - \|\hat{y} - y\|}{\|y - \mu(y)\|} \right) \quad (۳)$$

که در آن  $\|\cdot\|$  نرم دو یک بردار و  $\mu(\cdot)$  میانگین آن بوده و برای بردار  $y$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mu(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

$$\|y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N y_i^2}$$

بنابراین سعی بر آن است که پارامترهای مجهول به طریقی بدست آید تا به طور همزمان معیار  $MSE$  حداقل و معیار  $FIT$  حداکثر شود. در اینجا پارامترهای مجهول را به دلیل استفاده برای شبیه‌سازی، در فضای گسسته بدست خواهیم آورد. بدین سبب با گسسته کردن رابطه ورودی-خروجی تصویر ۴ بلوک دیاگرامی مانند تصویر ۵ بدست می‌آید.



تصویر ۵- مقایسه خروجی عملگر واقعی و مدل (۱) در ازای فرمان ۴۰ درجه

در تصویر ۵،  $q$  اپراتور شیفت زمانی و  $d$  میزان تأخیر می‌باشد. حال بایستی به طریقی پارامترهای مجهول بدست آیند. در این مدل میزان اشباع دامنه برابر با  $y_{\max} = \pm 30$  بوده و از قبل مشخص می‌باشد به همین علت نیازی به تخمین آن نیست. در آزمایش تصویر ۱ نیز ورودی با دامنه بزرگتر از ۳۰ به عملگر اعمال نشده است. دلیل این امر اثرات مخربی است که اینکار می‌تواند بر روی عملگر باقی بگذارد. از اینرو  $Model(b, K, d)$  مدلی با پارامترهای مجهول دامنه اشباع ( $b$ )، بهره ( $K$ ) و تأخیر ( $d$ ) می‌باشد.

حال با یک حدس اولیه از پارامترهای مجهول و با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی تکرارکننده، می‌توان به پارامترهای نزدیک بهینه دست یافت. حالت نزدیک بهینه حالتی است که در آن معیار  $MSE$  حداقل و معیار  $FIT$  حداکثر گردد. انتخاب اولیه برای پارامترهای مجهول به سادگی از طریق مشاهده پاسخ پله سیستم امکان پذیر می‌باشد. به عنوان مثال ثابت زمانی یک سیستم با رفتاری مشابه با یک

حذف کردند، این مدل تبدیل به ساختار خطی FOPDT می‌شود. این مزیت باعث می‌شود تا بتوان مدل خطی سیستم را با تقریب و دقت خوبی از روی آزمایشات در ناحیه خطی عملگر بدست آورد. مدل در نظر گرفته شده شاید مدلی واقعی داخلی و جزء به جزء سیستم نباشد اما اینگونه از مدلها به مدلهای شبه فیزیکی شهرت دارند که قابلیت بیان مناسب رابطه ورودی-خروجی سیستم را دارا می‌باشند [۱۵، ۱۴]. معمولاً برای شناسائی اینگونه از سیستمها، آنها را به صورت مدلهای وینر<sup>۱</sup> یا هامرستین<sup>۲</sup> در نظر گرفته و از این طریق مدلسازی می‌کنند. اما بایستی در نظر گرفت که شناسائی مدل این سیستمها مشکلاتی مواجه می‌باشد. وجود دو عامل غیرخطی باعث می‌شود تا نتوان این مدل را به صورت یک مدل غیرخطی اما خطی در پارامتر بیان نموده و با استفاده از روشهای مرسوم شناسائی به تخمین پارامترهای آن پرداخت. همچنین مشخصات نویز متغیربازمان و سطوح کوانتیزاسیون بر مشکلات شناسائی سیستم می‌افزاید. در قسمت بعدی روشی ارائه شده که در آن پارامترهای مدل جدید به نحو مناسبی شناسائی شده است.

### ۳- روش تخمین پارامترهای مدل جدید

#### ۳-۱- روش تخمین

بیشتر روشهای شناسائی پارامتری با تعریف یک تابع هدف طوری بهینه‌سازی را انجام می‌دهند که پارامترها به مقادیر واقعی خود همگرا شده و خروجی مدل مشابه با خروجی سیستم واقعی گردد. در این تحقیق نیز از دو تابع هدف کاربردی زیر استفاده شده است:

#### • مجموع مربعات خطا ( $MSE$ )<sup>۳</sup>

استفاده از این تابع هزینه در اکثر روشهای شناسائی سیستم مرسوم بوده و روشهای حداقل‌سازی مختلف آن، الگوریتمهای تخمین متفاوتی را بوجود می‌آورد [۱۶-۱۴]. این تابع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \sum_{i=1}^t e(t)^2 \quad (۲)$$

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$$

که در آن  $y(t)$  خروجی و  $\hat{y}(t)$  تخمین زده شده مدل در هر لحظه از زمان می‌باشند.

#### • درصد انطباق (FIT)

<sup>۱</sup> Wiener  
<sup>۲</sup> Hammerstein  
<sup>۳</sup> Mean Square Error

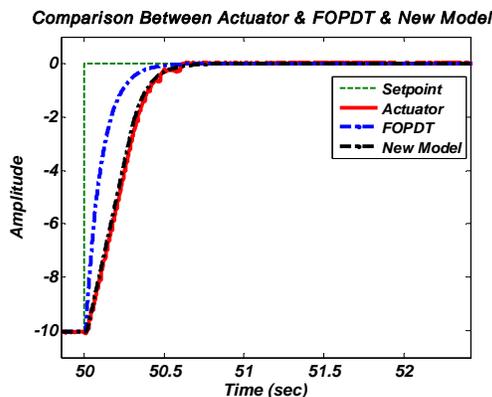
این الگوریتم بهینه‌سازی در عین سادگی، توانایی زیادی برای تخمین پارامترهای مجهول این مسئله دارد و استفاده از الگوریتمهای پیشرفته‌تر تنها به پیچیدگی عمل تخمین می‌افزاید. خواهیم دید که این روش در عین سادگی، کارآیی خیلی خوبی دارد. با اعمال روش تخمین ارائه شده برای عملگر، پارامترهای مجهول به صورت زیر تخمین زده می‌شوند:

$$K = 10, q = 2, \dot{y}_{\max} = 2.71, y_{\max} = 30$$

لازم به ذکر است که به دلیل سادگی الگوریتم و نرم‌افزاری بودن آن، می‌توان مشخصات عملگرهای مشابه را نیز از طریق آن بدست آورد.

### ۳-۳- مقایسه مدل بدست آمده با عملگر واقعی و مدل FOPDT:

در این قسمت خروجی مدل جدید بدست آمده را با خروجی عملگر و مدل FOPDT مقایسه خواهیم نمود. در ناحیه خطی فرامین پاسخ مدل جدید و مدل (۱) عیناً مانند هم و نزدیک به خروجی عملگر می‌باشد. ولی با بزرگتر شدن فرامین عملگر، خروجی مدل (۱) از خروجی عملگر فاصله گرفته و خطای مدلسازی افزایش می‌یابد. در تصاویر ۷-۱۰ این مقایسه به نمایش گذاشته شده است.



تصویر ۷- مقایسه خروجی عملگر واقعی، مدل (۱) و مدل جدید در ازای اعمال فرمان ۱۰ درجه

سیستم مرتبه اول، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا سیستم به ۶۳٪ مقدار نهائی خود برسد. همانطور که اشاره شد مدل در نظر گرفته شده در ناحیه خطی یعنی ناحیه‌ای که اشباع‌های دامنه و سرعت وارد مدل نمی‌شوند، رفتاری مانند مدل FOPDT بیان شده در رابطه (۱) دارد. با توجه به تصاویر ۲ و ۳ مقدار ثابت زمانی مدل در حدود ۰/۱ ثانیه می‌باشد این مقدار با توجه به مقایسه این تصاویر با رفتار تابع تبدیل (۱) قابل نتیجه‌گیری می‌باشد. میزان تأخیر نیز برابر با تأخیر مدل ۱ در نظر گرفته می‌شود. در هر صورت صحت انتخاب‌های اولیه با آزمایش توابع هزینه معلوم خواهد شد و این تنها یک حدس اولیه برای الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد. لازم به ذکر است، انتخابی دور از پارامترهای واقعی، تنها سرعت همگرایی الگوریتم را کاهش می‌دهد. حال با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده بر پایه الگوریتم تکرارکننده زیر، پارامترهای نزدیک بهینه بدست می‌آیند:

### ۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی عددی تخمینگر

در این بخش مراحل بهینه‌سازی معیارهای MSE و FIT را برای این مورد خاص توضیح می‌دهیم:

مرحله ۱- پارامترهای اولیه را انتخاب می‌کنیم. بدین منظور یک مقدار از بازه‌های معرفی شده در جدول ۱ را به دلخواه برمی‌گزینیم:

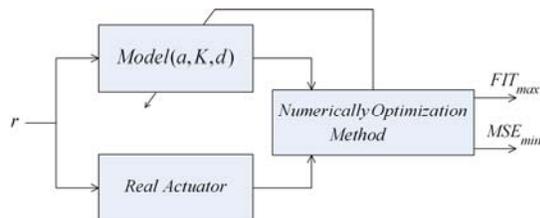
جدول ۱- بازه تغییرات برای پارامترهای مجهول

$0.5 < K < 1.5$	ثابت زمانی
$0 < q < 3$	میزان تأخیر
$0.5 < b < 5$	دامنه اشباع سرعت

مرحله ۲- یک پارامتر را متغیر و بقیه پارامترها را ثابت در نظر گرفته، پارامتر متغیر را در بازه مربوطه (با گام‌های معین) تغییر می‌دهیم و نقطه‌ای را که در آن توابع هدف بهینه می‌باشند می‌یابیم؛

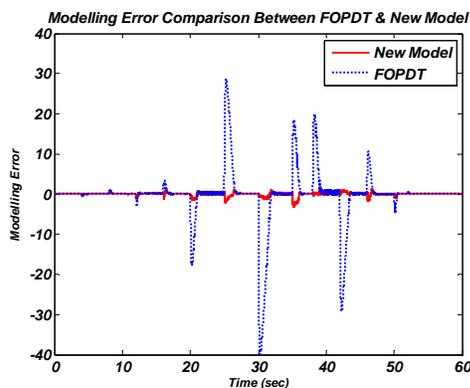
مرحله ۳- مرحله ۲ را برای بقیه پارامترها تکرار می‌کنیم؛

مرحله ۴- مراحل ۲ و ۳ را با کوچکتر نمودن گامها، آنقدر تکرار می‌کنیم تا مقادیر آستانه تعریف شده برای توابع هدف را ارضاء نمایند. بلوک دیاگرام این الگوریتم در تصویر ۶ آمده است.



تصویر ۶- بلوک دیاگرام بهینه‌سازی پارامترهای مدل

نکته مهمی که در مدلسازی مدل جدید وجود دارد آن است که، این مدل تا ۹۶/۶ درصد بر رفتار عملگر منطبق می‌باشد. این تطابق برای مدل قدیم ۵۲ درصد بوده که با مقایسه این نتایج، دقت بالای مدل جدید معلوم می‌شود. برای توضیح بیشتر این موضوع، خطای مدلسازی این آزمایش، برای مدل خطی و جدید در تصویر ۱۱ با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به این تصویر می‌توان کاهش خطا را در نواحی غیر خطی، به میزان قابل توجه‌ای مشاهده نمود.



تصویر ۱۱- مقایسه خطای مدلسازی برای مدل FOPDT و مدل جدید

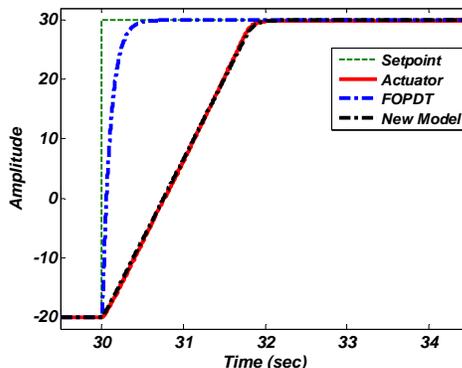
### ۴-۳- اعتبارسنجی مدل:

در اینجا برای اعتبارسنجی مدل جدید، از دو معیار تعریف شده MSE و FIT استفاده شده است. در این اعتبارسنجی، در هر یک از پارامترها به طور جداگانه تغییرات جزئی اعمال کرده و با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای دیگر دو معیار هدف با حالت قبل و بعد از اعمال تغییر مقایسه شده‌اند. نتایج در جدول ۱ آمده است. همانطور که از نتایج این جدول می‌توان مشاهده نمود، هر تغییر جزئی در پارامترهای نهائی باعث کاهش بهینگی در توابع هدف می‌شود. با توجه به این موارد صحت اعتبار مدل جدید، معلوم می‌گردد.

جدول ۱- جدول مقایسه اعمال تغییرات در پارامترهای مجهول و توابع هدف متناظر

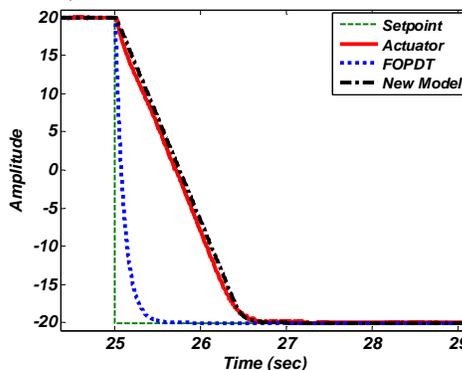
ردیف	پارامتر متغیر	مقدار اولیه	معیار MSE		مقدار جدید	مقدار اولیه	مقدار جدید	مقدار FIT (درصد)
			مقدار قبلی	مقدار جدید				
۱	تاخیر (d)	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۹۶.۶۴۴
۲	تاخیر (d)	۰.۰۲	۰.۰۲	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۳	۹۶.۹۰۶
۳	بهره (K)	۰.۱	۰.۱	۰.۰۹۵	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۹۵.۵۸۶
۴	بهره (K)	۰.۱	۰.۱	۰.۱۰۵	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۹۵.۵۴۶
۵	اشباع (J <sub>max</sub> )	۲.۷۶	۲.۷۶	۲.۷۲	۲.۷۶	۲.۷۶	۲.۷۶	۹۶.۶۱۱
۶	اشباع (J <sub>max</sub> )	۲.۷۶	۲.۷۶	۲.۷۰	۲.۷۶	۲.۷۶	۲.۷۶	۹۶.۶۴۶

Comparison Between Actuator & FOPDT & New Model



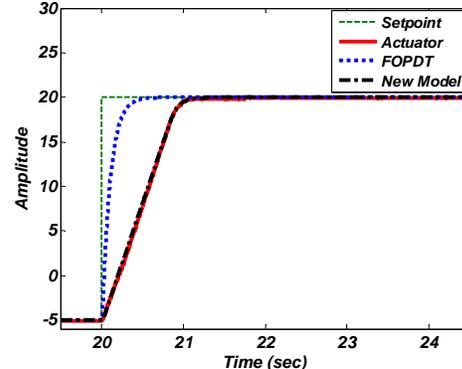
تصویر ۸- مقایسه خروجی عملگر واقعی، مدل (۱) و مدل جدید در ازای اعمال فرمان ۵۰ درجه

Comparison Between Actuator & FOPDT & New Model



تصویر ۹- مقایسه خروجی عملگر واقعی، مدل (۱) و مدل جدید در ازای اعمال فرمان ۴۰ درجه

Comparison Between Actuator & FOPDT & New Model

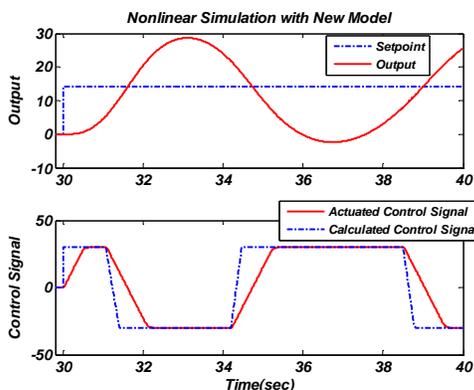


تصویر ۱۰- مقایسه خروجی عملگر واقعی، مدل (۱) و مدل جدید در ازای اعمال فرمان ۲۵ درجه

این تصاویر نشان می‌دهند که با افزایش دامنه ورودی، مدل جدید به خوبی با رفتار عملگر واقعی تطابق داشته و عملکردی عالی در تمامی نقاط کار غیرخطی به نمایش گذاشته است.

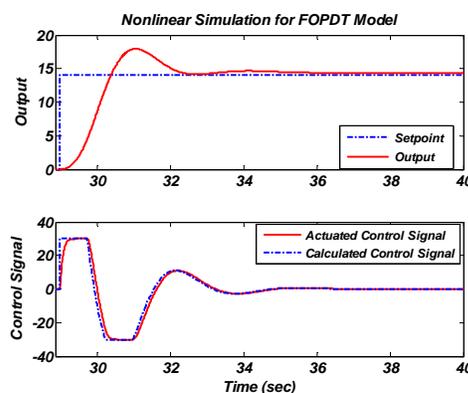
#### ۴- استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی در طراحی کنترل کننده و شبیه‌سازی پرواز

در این قسمت مدل جدید و قدیم عملگر در شبیه‌سازی غیرخطی دینامیک یک جسم پرنده در حضور حلقه‌های هدایت و کنترل آزمایش شده‌اند. اینجا می‌خواهیم تأثیر گمراه‌کننده مدلسازی غیردقیق عملگر را در طراحی اتوپیلوت یک جسم پرنده مشاهده نماییم. در اولین شبیه‌سازی در ثانیه ۲۹ پرواز به سیستم دارای عملگر خطی یک ورودی پله با دامنه ۱۴ درجه در کانال فراز اعمال شده است. نتایج در تصویر ۱۲ آمده است. لازم به تذکر است که در این تصاویر این بخش، شکل بالا مربوط به فرمان زاویه فراز و پاسخ خروجی سیستم به آن و شکل پائین سیگنال کنترل محاسبه شده و پاسخ عملگر به آن می‌باشد. همچنین زاویه فراز در حالت مانا صفر نبوده، اما برای درک بهتر موضوع، خروجی‌ها را به نقطه صفر انتقال داده‌ایم. با توجه به این تصویر اتوپیلوت توانسته است ورودی مرجع را به خوبی ردیابی نماید.



تصویر ۱۳- شبیه‌سازی غیرخطی برای ورودی پله با دامنه ۱۴ در کانال فراز(فرمان-خط‌چین و خروجی خط‌پر در تصویر بالا) و سیگنال کنترل(فرمان-خط‌چین و خروجی عملگر در تصویر پائین) با مدل غیرخطی جدید

حال اتوپیلوت را با در نظر گرفتن مدل جدید طراحی می‌نماییم. در عمل ممکن است فرامین هدایت خیلی افزایش یابد، بطوریکه بیشتر وارد ناحیه اشباع سرعت عملگر گردیم؛ بنابراین به عنوان یک راهکار می‌توانیم ورودی‌های هدایت را با شیب ملایم‌تری به اتوپیلوت اعمال می‌کنیم. به عنوان مثال در تصویر ۱۴، ورودی با در نظر گرفته شدن مدل جدید، به صورت یک تابع شیب‌دار به سیستم اعمال شده است. می‌توان ملاحظه نمود که به دلیل عدم ورود به ناحیه غیرخطی اشباع سرعت، در این حالت هیچ اشباعی رخ نداده و اتوپیلوت به خوبی سیستم را کنترل نموده است. با نگاهی به سیگنال کنترل در این حالت می‌توان عملکرد مناسب اتوپیلوت طراحی شده را در شرایط واقعی ملاحظه نمود.

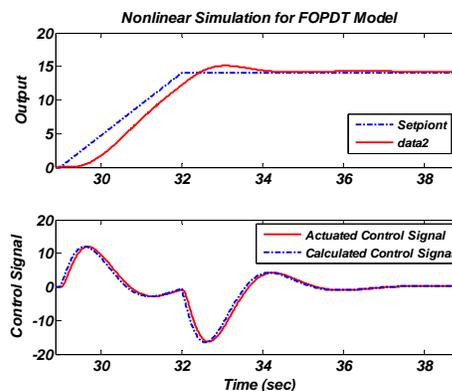


تصویر ۱۲- شبیه‌سازی غیرخطی برای ورودی پله با دامنه ۱۴ در کانال فراز(فرمان-خط‌چین و خروجی خط‌پر در تصویر بالا) و سیگنال کنترل(فرمان-خط‌چین و خروجی عملگر در تصویر پائین) با مدل خطی قدیم

اما با اعمال مدل غیرخطی (یعنی مدل تقریباً واقعی) در تصویر ۱۳ مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده نمی‌تواند به ورودی مذکور در آن لحظه پاسخ دهد و ناپایداری در اتوپیلوت رخ داده است<sup>۱</sup>. این اتفاق برای کنترل‌کننده‌هایی که با در نظر گرفتن شبیه‌سازی شش درجه آزادی همراه با مدل خطی طراحی شده و به آزمایشگاه می‌روند، به وفور مشاهده می‌شود. بایستی برای جلوگیری از این مشکل، راهکار دیگری در طراحی اتوپیلوت در نظر گرفته شود. این اتفاق لزوم مدلسازی با دقت بالا را در سیستم‌های کنترل را به نمایش می‌گذارد. در

<sup>۱</sup> به دلیل دقت بالای مدل بدست آمده، بروز این اتفاق در عمل نیز قابل انتظار است.

- [3] Bernsten, D.S., 1995, "A Chronological Bibliography on Saturating Actuators ", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 5, 375-380.
- [4] Roshanian, J., Saleh, A.R., 8 August 2006, "On the Design of Adaptive Autopilots for a Launch Vehicle", *Proceeding of IMechE, Part I: Systems and Control Engineering*, 221, 27-38.
- [5] Shamma, J. S., Cloutier, J.R., 1993, "Gain-scheduled missile autopilot design using LPV transformations", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.
- [6] Tsourdos, A., Hughes, E.J., White, B.A., 2004, "Lateral Acceleration Control Design of a Non-Linear Homing Missile using Multi-Objective Evolution Strategies", *American Control Conference*.
- [7] Berg, J.M., Hammet, K.D., Schwartz, C.A., 1996, "An Analysis of the Destabilizing Effect of Daisy Chained Rate-Limited Actuators", *IEEE Transaction On Control System Technology*.
- [8] Lauvdal, T., 1998, "Disturbance Stabilization of Linear Systems with Input Magnitude and Rate Saturations", PHD Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology.
- [9] Jabbari, F., 2001, "Disturbance Attenuation of LPV Systems with Bounded Inputs", *Dynamics and Control*, 11, 133-150.
- [10] Hardt, M., Helton J.W., Delgado, K.K., 2000, "Numerical Solution of Nonlinear  $H_2$  and  $H_\infty$  Control Problems with Application to Jet Engine Compressors", *IEEE Transaction on Automatic Control*.
- [11] Bruyere, L., Tsourdos, A., White, B.A., 2006, "Quasilinear Parameter-Varying Autopilot Design Using Polynomial Eigenstructure Assignment with Actuator Constraints", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.
- [12] Chen, P.C., Shamma, J.S, 2000, " Gain-scheduled  $L_1$  optimal control for boiler-turbine dynamics with actuator saturation ", *Journal of Process Control*.
- [13] Galeani, S., Onori, S., Teel, A.R., Zaccarian, L., 2008, "magnitude and rate saturation model and its use in the solution of a static anti-windup problem", *Systems & Control Letters*.
- [14] Soderstrom, T., Stoica, P., "System Identification", Prentice Hall, 1989.
- [15] Ljung, L., "System Identification: Theory for the user", 2nd ed., Prentice Hall, 1999.
- [16] Landau, I.D., Zito, G., " Digital Control Systems ", Springer:London, 2002.
- [17] MATLAB 7.9, Mathworks Inc, 2009.



تصویر ۱۴- شبیه‌سازی غیرخطی برای ورودی پله با دامنه ۱۴ در کانال فراز(فرمان-خروجی خطی و خروجی خطی در تصویر بالا) و سیگنال کنترل(فرمان-خروجی خطی و خروجی عملگر در تصویر پائین) با مدل غیرخطی جدید و اعمال فرمان به صورت شیب‌دار

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل غیرخطی مناسب برای عملگرهای هیدرولیکی سیستم‌های پرواز ارائه شده است. برای بدست آوردن این مدل ترکیبی از روش‌های شناسائی سیستم و روش‌های مهندسی در هم آمیخته شده است تا با استفاده از آن بتوانیم، یکی از مشکلات طراحی سیستم‌های کنترل اجسام پرنده را کاهش دهیم. مدل جدید می‌تواند در تمام بازه‌های ورودی عملگر رفتار آن را توصیف نماید. نتایج شبیه‌سازی شش درجه آزادی در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه کارآئی بالای این مدل را نشان می‌دهد. مدل ارائه شده تا ۹۶ درصد بر دینامیک غیرخطی عملگرها تطبیق داشته و می‌توان از آن در طراحی اتوپایلوته اجسام پرنده استفاده نمود، در حالیکه مدل‌های خطی متناظر، در نواحی غیرخطی عملگر، کمتر از ۵۰٪ با رفتار واقعی آنها تطابق دارند. از اینرو استفاده از مدل جدید، از میزان عدم قطعیت در طراحی کنترل‌کننده برای اجسام پرنده کاسته و دقت طراحی اتوپایلوته را در عمل افزایش می‌دهد. همچنین می‌توان از مدل بدست آمده به جای عملگرهای واقعی گران‌قیمت، در آزمایشگاه‌های سخت‌افزار در حلقه استفاده نمود. نتایج این تحقیق، در طراحی کنترل‌کننده واقعی نیز مورد استفاده قرار گرفته و کارآئی روش ارائه شده به اثبات رسیده است.

## مراجع

- [1] Kapila, V., Grigoriadis, K.M., "Actuator Saturation Control", Marcel Dekker, 2002.
- [2] Atherton, D.P., *Applied Nonlinear Control*, London, 1982.