مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۸۹، صفحه ۴۳-۳۶

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

پوریا سرحدی[۱]، نعمت‌ا... قهرمانی[۲]، رضا میریوسفی‌اول[۳]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشگاه آزاد واحد تهران‌جنوب، pouria.sarhadi@gmail.com

[۲] استادیار، مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، ghahramani@aut.ac.ir

[۳] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل، دانشگاه آزاد واحد تهران‌جنوب، 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 شناسائی 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 تخمین‌زده 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

عملگرها یکی از اجزای مهم حلقه‌های کنترل اجسام پرنده می‌باشند. مدلسازی عملگر با دقت بالا، یکی از مراحل مهم در طراحی اتوپایلوت اجسام پرنده می‌باشد. برای طراحی یک کنترل‌کننده مطلوب، بایستی تمامی اجزای سیستم، به طور دقیق مدلسازی و شناسائی گردند. در طراحی، خطا در مدل عملگر می‌تواند کارآئی حلقه‌بسته سیستم را

نویسنده عهده دار مکاتبات: پوریا سرحدی

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]

کاهش داده و حتی آن را ناپایدار نماید[۱]. در مدلهائی که برای طراحی کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند، به مدلسازی جزءبه‌جزء 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 شناسائی 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 کارآئی خود را از دست می‌دهند. این عناصر غیرخطی می‌توانند یک اشباع[۱]، ناحیه مرده[۲]، لقی[۳] 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 انرژی 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 توانائی 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 اتوپایلوت ایجاد می‌کند. محدودیت‌های دیگر مانند سطح کوانتیزاسیون سیگنال ورودی و پسماند[۴] در عملگرها، نقش ضعیفتری در میان این غیرخطی‌گریها 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)[۵]، یا مدل خطی درجه دو همراه با تأخیر(SOPDT)[۶] در نظر گرفته می‌شود[۷-۴]. 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. همانطورکه گفته شد عملگرهای مورد استفاده در این تحقیق از نوع هیدرولیکی و 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 شناسائی 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 تخمین‌زده 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 شناسائی مدل عملگرهای هیدرولیکی اجسام پرنده استفاده نموده و در طراحی اتوپایلوت 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

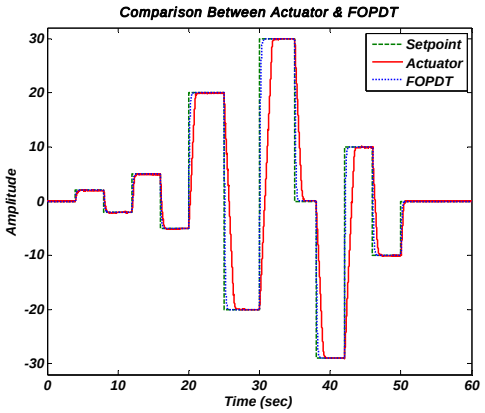
اغلب برای سادگی، عملگرها با مدلهای FOPDT یا SOPDT مدلسازی می‌شوند. اما این مدلها معمولاً تا زمانی که عملگر در ناحیه خطی عمل می‌کنند، معتبر می‌باشند. در عملگر بکار رفته در این مقاله نیز، با افزایش دامنه فرامین عملگر وارد ناحیه غیرخطی شده و رفتار دینامیکی و سرعت پاسخ‌دهی آن تغییر می‌کند. با توجه به نتایج 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:

$$G(s)=\frac{e^{-0.01s}}{0.1s+1} \qquad (۱)$$

[1] *Saturation*
[2] *Dead Zone*
[3] *Backlash*
[4] *Hysteresis*
[5] *First Order Plus Dead Time*
[6] *Second Order Plus Dead Time*

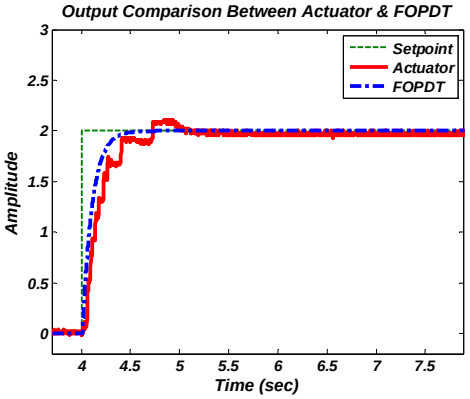
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]

برای بیان موضوع، یک سری ورودی پله با دامنه‌های مختلف به عملگر اعمال می‌کنیم. با مقایسه مدل (۱) و خروجی عملگر در تصویر۱، 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:

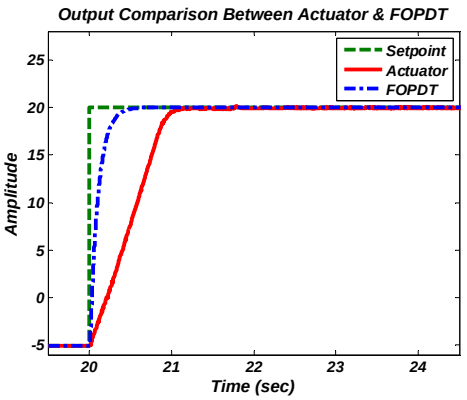


تصویر۱- مقایسه خروجی مدلهای عملگر واقعی و مدل(۱)

در تصاویر۲ و ۳، به ترتیب بزرگنمائی شده ناحیه خطی و غیرخطی عملگر با خروجی مدل خطی مقایسه شده‌اند.



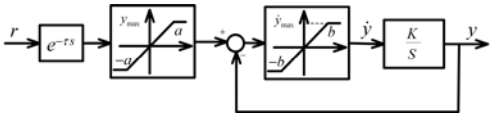
تصویر۲- مقایسه خروجی عملگر واقعی و مدل(۱) در ازای فرمان ۲ درجه



تصویر۳- 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(تصویر۲). اما همیشه این مدل مناسب نیست. در تصویر۳، خروجی عملگر و مدل(۱) در ازای اعمال فرمان با دامنه۲۵ بزرگنمائی 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 تصویر۱ رجوع نمود.

در نظر نگرفتن این رفتار در طراحی، می‌تواند باعث ناپایداری کنترل‌کننده بشود[۱][۱]. 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:



تصویر۴- مدل در نظر گرفته‌شده برای عملگر به همراه اشباع سرعت و دامنه

در تصویر۴، 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 τ میزان تأخیر عملگر می‌باشند. ساختاری مشابه با مدل تصویر۴ در مقالات مختلف مورد استفاده قرار گرفته، اما راجع به نحوه بدست آوردن پارامترهای آن بحث نشده است[۱۳-۸]. نکته جالب اینکه اگر توابع اشباع از تصویر۴

[۱] در صورت طراحی کنترل‌کننده با استفاده از مدل FOPDT و در شرایط عملکرد در ناحیه غیرخطی، احتمال بروز این اتفاق زیاد می‌باشد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]

حذف گردند، 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 مدل 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[۱۴،۱۵]. معمولاً برای شناسائی اینگونه از سیستمها، آنها را به صورت مدلهای وینر[1] یا هامرستین[2] 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[3])**

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:

$$J = \sum_{i=1}^{t} e(t)^2 \qquad (۲)$$
$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$$

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

- **درصد انطباق(FIT)**

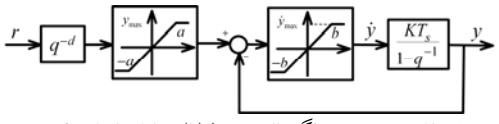
این معیار برای بدست آوردن درصد مطابقت خروجی دو مدل در جعبه‌ابزارهای شناسائی سیستم و کنترل پیش‌بین نرم‌افزار MATLAB مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۷] و به صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن $\|\ \|$ نرم دو یک بردار و $\mu(.)$ 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 تصویر۴ بلوک دیاگرامی مانند تصویر۵ بدست می‌آید.



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

در تصویر۵، 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 تصویر۱ 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

[1] Wiener
[2] Hammerstein
[3] Mean Square Error

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]

سیستم مرتبه اول، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا سیستم به ٪۶۳ مقدار نهائی خود برسد. همانطور که اشاره شد مدل در نظر گرفته‌شده در ناحیه خطی یعنی ناحیه‌ای که اشباع‌های دامنه و سرعت وارد مدل نمی‌شوند، رفتاری مانند مدل FOPDT بیان‌شده 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 نظرگرفته 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 همگرائی 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:

مرحله۱- پارامترهای اولیه را انتخاب می‌کنیم. بدین منظور یک مقدار از بازه‌های معرفی‌شده در جدول۱ را به دلخواه برمی‌گزینیم:

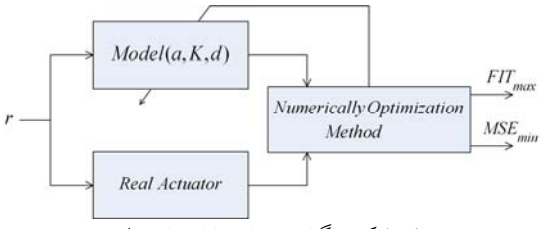
جدول۱- بازه تغییرات برای پارامترهای مجهول

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

مرحله۲- 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؛

مرحله۳- مرحله۲ را برای بقیه پارامترها تکرار می‌کنیم؛

مرحله۴- مراحل ۲ و ۳ را با کوچکتر نمودن گامها، آنقدر تکرار می‌کنیم تا مقادیر آستانه تعریف‌شده برای توابع هدف را ارضاء نمایند. بلوک دیاگرام این الگوریتم در تصویر۶ آمده است.



تصویر۶- بلوک دیاگرام بهینه‌سازی پارامترهای مدل

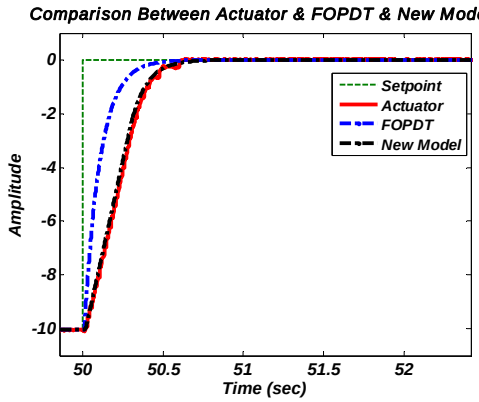
این الگوریتم بهینه‌سازی در عین سادگی، توانائی زیادی برای تخمین پارامترهای مجهول این مسئله دارد و استفاده از الگوریتمهای پیشرفته‌تر تنها به پیچیدگی عمل تخمین می‌افزاید. خواهیم دید که این روش در عین سادگی، کارآئی خیلی خوبی دارد. با اعمال روش تخمین ارائه شده برای عملگر، پارامترهای مجهول به صورت زیر تخمین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

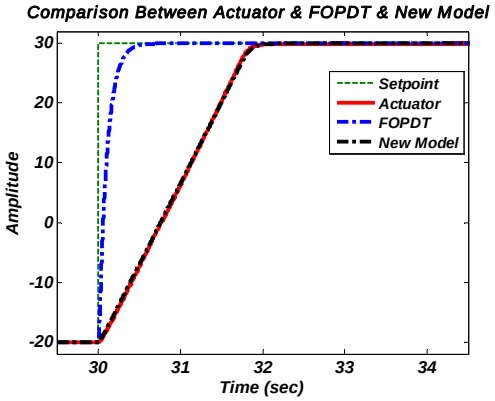
۳-۳- مقایسه مدل بدست آمده با عملگر واقعی و مدل FOPDT:

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.

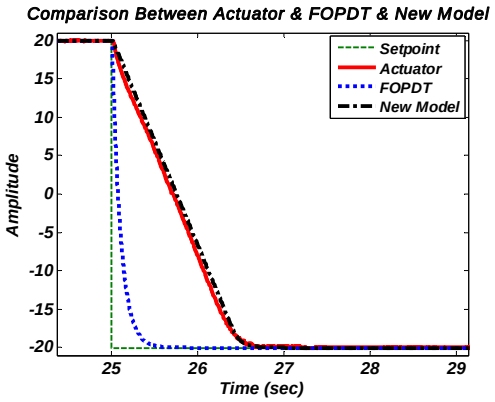


تصویر۷- مقایسه خروجی عملگر واقعی، مدل(۱) و مدل جدید در ازای اعمال فرمان ۱۰ درجه

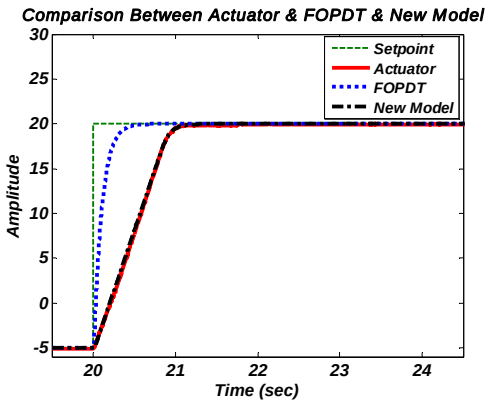
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]



تصویر۸- مقایسه خروجی عملگر واقعی، مدل(۱) و مدل جدید در ازای اعمال فرمان ۵۰ درجه



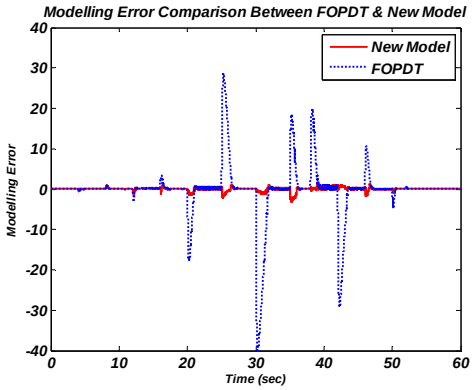
تصویر۹- مقایسه خروجی عملگر واقعی، مدل(۱) و مدل جدید در ازای اعمال فرمان ۴۰ درجه



تصویر۱۰- 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.

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 غیرخطی، به میزان قابل توجه‌ای مشاهده نمود.



تصویر۱۱- مقایسه خطای مدلسازی برای مدل FOPDT و مدل جدید

۳-۴- اعتبارسنجی مدل:

در اینجا برای اعتبارسنجی مدل جدید، از دو معیار تعریف‌شده 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.

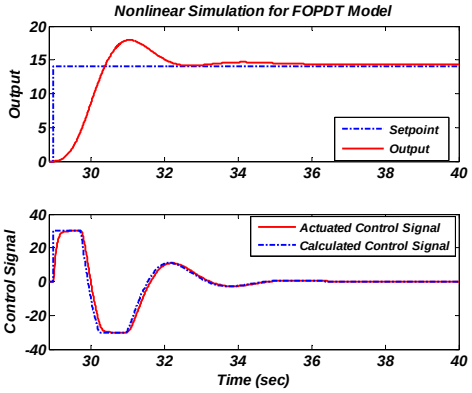
جدول۱- جدول مقایسه اعمال تغییرات در پارامترهای مجهول و توابع هدف متناظر

ردیف	پارامتر متغیر	مقدار اولیه	مقدار جدید	معیار MSE		معیار FIT (درصد)	
				مقدار قبلی	مقدار جدید	مقدار قبلی	مقدار جدید
۱	تأخیر (d)	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۹۷۵	۰/۲۰۳۱	۹۶/۶۵۳۹	۹۶/۶۴۳۶
۲	تأخیر (d)	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۱۹۷۵	۰/۲۲۲۶	۹۶/۶۵۳۹	۹۶/۶۰۹۶
۳	بهره (K)	۰/۱	۰/۰۹۵	۰/۱۹۷۵	۰/۳۵۴۹	۹۶/۶۵۳۹	۹۵/۵۸۴۶
۴	بهره (K)	۰/۱	۰/۱۰۵	۰/۱۹۷۵	۰/۳۵۴۲	۹۶/۶۵۳۹	۹۵/۵۴۶۷
۵	اشباع ($\dot{y}_{max}$)	۲/۷۱	۲/۷۲	۰/۱۹۷۵	۰/۲۰۷۲	۹۶/۶۵۳۹	۹۶/۶۱۱۱
۶	اشباع ($\dot{y}_{max}$)	۲/۷۱	۲/۷۰	۰/۱۹۷۵	۰/۲۰۷۹	۹۶/۶۵۳۹	۹۶/۶۰۳۶

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]

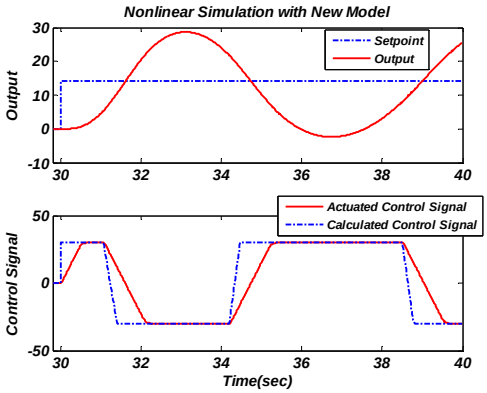
۴- استفاده از مدلهای خطی و غیرخطی در طراحی کنترل‌کننده و شبیه‌سازی پرواز

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 اتوپایلوت یک جسم پرنده مشاهده نمائیم. 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 اتوپایلوت توانسته است ورودی مرجع را به خوبی ردیابی نماید.



تصویر۱۲- 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 اتوپایلوت رخ داده است[1]. این اتفاق برای کنترل‌کننده‌هائی 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 اتوپایلوت در نظر گرفته شود. این اتفاق لزوم مدلسازی با دقت بالا را در سیستمهای کنترل را به نمایش می‌گذارد. در صورتی که طراحی بر پایه مدل خطی انجام پذیرد، یک خطای بزرگ به سیستم کنترل اضافه می‌شود و این خطا باعث می‌شود که در هنگام عملکرد واقعی، یا در آزمایشگاه سخت‌افزار در حلقه، کنترل‌کننده طراحی شده ناپایدار گردد. در این حالت می‌گوئیم که نتایج بدست آمده از طراحی اتوپایلوت در شبیه‌سازی، گمراه‌کننده است. بنابراین با انتخاب مدل جدید شبیه‌سازی‌ها واقعی‌تر شده و اتوپایلوت برای یک مدل دقیق از سیستم طراحی می‌شود.

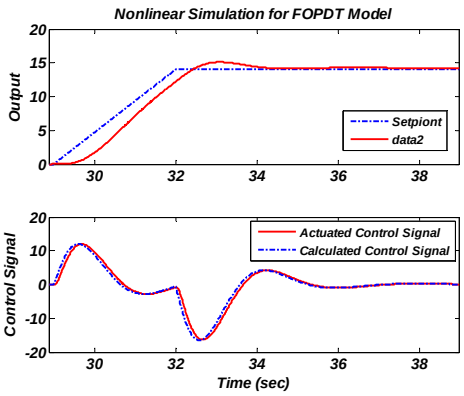


تصویر۱۳- شبیه‌سازی غیرخطی برای ورودی پله با دامنه ۱۴ در کانال فراز(فرمان-خط‌چین و خروجی خط‌پر در تصویر بالا) و سیگنال کنترل(فرمان-خط‌چین و خروجی عملگر در تصویر پائین) با مدل غیرخطی جدید

حال اتوپایلوت را با در نظر گرفتن مدل جدید طراحی می‌نمائیم. 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 اتوپایلوت اعمال می‌کنیم. به عنوان مثال در تصویر ۱۴، ورودی با در نظر گرفته‌شدن 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 اتوپایلوت به خوبی سیستم را کنترل نموده است. با نگاهی به سیگنال کنترل در این حالت می‌توان عملکرد مناسب اتوپایلوت طراحی شده را در شرایط واقعی ملاحظه نمود.

[1] به دلیل دقت بالای مدل بدست آمده، بروز این اتفاق در عمل نیز قابل انتظار است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]



تصویر۱۴- 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 و اعمال فرمان به صورت شیب‌دار

۸- نتیجه‌گیری

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 ارائه‌شده تا ۹۶ درصد بر دینامیک غیرخطی عملگرها تطبیق داشته و می‌توان از آن در طراحی اتوپایلوت 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 اتوپایلوت 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.

[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_∞ 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] Sodestrom, 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.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-09-14]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1389.4.2.7.7]