

## بهبود عملکرد یک میز شبیه‌ساز زلزله با استفاده از فیلترینگ تطبیقی تکاملی و کنترل کننده PID

نیما رجبی نمینی<sup>۱</sup>، رمضان هاونگی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه بیرجند، بیرجند

صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، Havangi@Birjand.ac.ir

### چکیده

میز شبیه‌ساز لرزه یکی از ابزارهای موثر برای تحلیل رفتار سازه‌ها در برابر زلزله است. مهمترین بخش این میز سیستم کنترلی آن است که پروفیل‌های جابجایی، سرعت و شتاب یک زلزله واقعی را با استفاده از داده‌های سنسورهای کدکننده و شتاب‌سنج، ردیابی می‌کند. با وجود این، عدم قطعیت‌هایی مانند تغییر لختی میز به لحاظ نصب سازه‌های مختلف بر روی آن، دینامیک‌های مدل نشده و نویز سنسورهای میز باعث کاهش دقت سیستم کنترلی می‌شود. برای حل این مشکلات، در این مقاله، عملکرد میز لرزه با ترکیب خروجی سنسورها بوسیله فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF و دو کنترل کننده PID سری بهبود داده شده است. در روش پیشنهادی، از فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF برای کاهش عدم قطعیت‌ها، نویز سنسورها و تخمین پارامترهای میز استفاده شده است. کنترل کننده‌های PID سری از سرعت خطی تخمین زده شده توسط فیلترها به منظور پایدار سازی، ردیابی ورودی مرجع و حذف اغتشاشات بیرونی میز استفاده می‌کنند. عملکرد روش پیشنهادی در محیط شبیه‌سازی و آزمایشگاهی ارزیابی شده است. نتایج نشان دهنده موثر بودن روش پیشنهادی است.

### کلیدواژه

میز شبیه ساز لرزه، فیلتر تطبیقی تکاملی، فیلتر کالمن، کنترل کننده PID

### مقدمه

لرزه آزمایشگاهی را ساختند میز لرزه به طور قابل ملاحظه‌ای توسعه یافته است [۸]. یک میز لرزه یک درجه آزادی [۹]، یک میز لرزه ۴۰ تنی [۱۰] و یک میز لرزه در فضای باز [۱۱]، تنها چند نمونه‌ی مورد استفاده از این فن‌آوری در سطح صنعتی هستند. اصلی‌ترین هدف یک سیستم کنترلی در میز لرزه بازسازی شتاب ورودی به میز می‌باشد، این شتاب ورودی ممکن است در طول یک زلزله واقعی ضبط شده باشد و یا به طور مصنوعی از مطالعات زلزله شناسی<sup>۲</sup> استخراج شده باشد. به دلیل ساختار غیرخطی، ناپایدار و غیر قابل رویت میز لرزه (مثلا سرعت حرکت ثابت را نمی توان توسط داده‌ی شتاب‌سنج شناسایی کرد) امکان فیدبک کردن شتاب و طراحی کنترل-کننده به طور مستقیم وجود ندارد، از طرف دیگر، شتاب خروجی میز لرزه به دلایلی مانند غیرخطی بودن عملگرها (مخصوصا عملگرهای هیدرولیکی-الکتریکی)، فعل و انفعالات ساختار کنترلی، عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی سیستم، نویز

میز شبیه‌ساز زلزله که به نام میز لرزه معروف است یکی از تجهیزات در مهندسی سازه به شمار می‌رود [۱]. برای بررسی پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله‌های مختلف به منظور بررسی استحکام آنها، از میز شبیه‌ساز لرزه استفاده می‌شود [۲]. این میز دستگاهی است که حرکات شدید یک زلزله را بسته به اندازه و بار آن شبیه‌سازی می‌کند [۳]. در سال‌های اخیر میز شبیه‌ساز لرزه به طور گسترده برای تحلیل و کنترل سازه‌ها به کار گرفته شده است [۴]. میز لرزه از نظر محرکه به کار رفته به دو نوع الکتریکی یا هیدرولیکی تقسیم بندی می‌شوند [۵]. میز لرزه هیدرولیکی توانایی تولید نیروهای بزرگ را داراست از این رو برای آزمون سازه‌های سنگین کاربرد دارد [۶]. از سوی دیگر، میز لرزه الکتریکی که از یک موتور الکتریکی به عنوان عملگر خود بهره می‌برد، معمولا برای آزمایش سازه‌های سبک استفاده می‌شود [۷]. از سال ۱۸۹۰ زمانی که میلن و اموری<sup>۱</sup> اولین میز

<sup>۲</sup> Seismological

<sup>۱</sup> Milen and Amori

اندازه‌گیری و ... نیاز به بازسازی و اصلاح دارد، وجود این عوامل کنترل شتاب برای یک میز لرزه را بسیار مشکل می‌کند.

به منظور کنترل و پایدارسازی سیستم حلقه بسته می‌شود میز لرزه به طور معمول از فیدبک جابجایی استفاده می‌شود ولی به دلیل وجود عدم قطعیت و نویز اندازه‌گیری، عملکرد سیستم مطلوب نخواهد بود. معمولا داده‌های دو سنسور شتاب‌سنج و کدکننده<sup>۳</sup> در دسترس هستند ولی شتاب‌سنج در فرکانس‌های پایین خطای زیادی دارد و استخراج شتاب از سنسور کدکننده همواره با خطا همراه خواهد بود. در [۱۲] یک ساختار کنترلی بر اساس فیدبک مستقیم شتاب ارائه شده است، در [۱۳] یک ساختار کنترلی بر اساس جبران‌سازی دینامیک غیرخطی عملگرها ارائه شده است. در [۱۴] از عملگرهای هیدرولیکی برای تنظیم یک میز لرزه از نوع الکترو هیدرولیک استفاده شده است و همچنین از یک کنترل‌کننده جامع سه حلقه‌ای استفاده می‌شود که حلقه اول شامل کنترل فیدبک برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده، حلقه دوم فیلتر کالمن برای تخمین مقدار فیدبک و حلقه سوم یک بلوک تاخیر خالص پیشخور برای افزایش کارایی کنترل‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است.

از فیلتر کالمن به منظور کاهش نویز اندازه‌گیری، ترکیب و تخمین پارامترهای سیستم استفاده می‌شود [۱۵]. در مراجع بسیاری از جمله [۱۲-۱۶] از فیلتر کالمن خطی به منظور تخمین پارامترهای فضای حالت سیستم میز لرزه استفاده کرده‌اند و در ادامه از پارامترهای تخمینی به منظور پایدار سازی سیستم حلقه بسته و استخراج مشخصات مطلوب بهره گرفته شده است. برای استفاده از فیلتر کالمن خطی نیاز به خطی‌سازی سیستم می‌باشد و چنین کاری در مورد سیستم‌هایی که دارای جمله غیرخطی غالب باشند به خطای زیادی در پارامترهای تخمین زده شده می‌انجامد، در مدل غیرخطی میز لرزه به دلیل حساسیت بالای تخمین داده‌ها بهتر است از فیلتر کالمن غیرخطی EKF و یا UKF استفاده شود و سپس از داده‌های تخمینی به منظور طراحی کنترل‌کننده استفاده کنیم.

در مواردی که بیش از یک سنسور اندازه‌گیری داشته باشیم و بهبود و تخمین داده‌های اندازه‌گیری شده مهم باشد از ترکیب داده‌های سنسورها استفاده می‌کنیم. مبحث ترکیب داده‌های سنسورها دارای کاربردهای زیادی در حوزه‌های حمل و نقل، هوا فضا، ردیابی و ... است [۱۷]. اگر از چندین سنسور برای اندازه‌گیری پارامترهای سیستم استفاده شده باشد، در بحث ترکیب آنها غیر هم فرکانسی و داشتن کواریانس نویز متفاوت سنسورها از مشکلات اساسی به شمار می‌آید [۱۸]. اگر برای اندازه‌گیری هر پارامتر سیستم حداکثر یک سنسور در دسترس باشد می‌توان فرآیند ترکیب داده‌های این سنسورها را

در خود فیلتر کالمن غیرخطی EKF و UKF انجام داده و از داده‌های ترکیبی به منظور تخمین سایر پارامترهای فضای حالت استفاده کرد [۱۹]. در فیلترهای کالمن باید از ماتریس-های کواریانس نویز اطلاع دقیق داشت به همین دلیل از روش-های بهینه‌سازی استفاده می‌شود [۲۰]. در مراجع [۲۱] و [۲۲] برای تطبیق کواریانس‌های نویز سیستم و اندازه‌گیری از منطق فازی استفاده شده است. نبود روش‌های مناسب برای تعیین قوانین و توابع تعلق فازی از ضعف‌های این روش است. در [۲۳] برای غلبه بر نامعینی کواریانس‌های نویز سیستم و اندازه‌گیری از یک روش تطبیقی بازگشتی مبتنی بر شدیدترین فرود استفاده شده است. روش دیگری که برای رفع این مشکل استفاده می‌شود ترکیب فیلتر کالمن و فیلترهای مقاوم است [۲۴].

در این مقاله، یک میز لرزه یک درجه آزادی<sup>۴</sup> با یک عملگر الکتریکی، موتور سنکرون آهنربای دائم<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده است که دو سنسور شتاب‌سنج و کدکننده خطی<sup>۶</sup> بترتیب میزان شتاب و جابجایی خطی میز را اندازه‌گیری می‌کنند. عملکرد میز لرزه با ترکیب خروجی سنسورها بوسیله فیلترهای کالمن تطبیقی تکاملی EKF و UKF و دو کنترل‌کننده PID<sup>۷</sup> سری بهبود داده شده است. در روش پیشنهادی، از فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF برای کاهش عدم قطعیت‌ها و نویز سنسورها و تخمین پارامترهای میز استفاده شده است. یکی از ملزومات فیلترهای EKF و UKF اطلاع داشتن از ماتریس‌های کواریانس نویز سیستم و اندازه‌گیری است که در عمل نامعلومند. در صورت انتخاب نامناسب آنها عملکرد فیلترها تحت تأثیر قرار می‌گیرد و حتی امکان واگرایی آنها وجود دارد. برای این منظور در روش پیشنهادی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی، ماتریس‌های کواریانس نویز فرآیند و اندازه‌گیری بصورت تطبیقی تنظیم شده است. سرعت خطی تخمین زده شده توسط فیلترهای تطبیقی تکاملی با سرعت خطی مرجع (مطلوب) مقایسه شده و خطای بین آنها وارد دو کنترل‌کننده PID سری به منظور پایدار سازی، حذف اغتشاشات بیرونی و ردیابی ورودی مرجع می‌شود.

ساختار بقیه این مقاله به صورت زیر است: بخش دو به استخراج مدل غیرخطی میز می‌پردازد. فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF در بخش سه ارائه شده است. در بخش چهار به طراحی کنترل‌کننده پرداخته می‌شود. تحلیل عملکرد

<sup>۴</sup> Uniaxial Earthquake Simulator  
<sup>۵</sup> Permanent Magnet Synchronous Motor-PMSM  
<sup>۶</sup> Linear Encoder  
<sup>۷</sup> Proportional-Integral-Derivative

<sup>۳</sup> Encoder

در این روابط  $j$  ترکیب لختی روتور و بار،  $\beta$  ترکیب اصطکاک لزوج روتور و بار،  $\theta$  موقعیت زاویه‌ای روتور،  $T_l$  گشتاور مکانیکی وارد شده بر محور می‌باشد. هرگاه وزنه‌های مختلفی روی شفت گذاشته شود میزان گشتاور مکانیکی اعمالی روی شفت موتور تغییر می‌نماید و لذا این عدم قطعیت باید در طراحی کنترل‌کننده و فیلترها مورد توجه قرار گیرد.

### تبدیل پارک در مدل‌سازی

معادلات بدست آمده برای ولتاژهای  $V_d$  و  $V_q$  در مختصات  $q$  و  $d$  هستند، به منظور تبدیل ولتاژ سه فاز روتور ( $V_a, V_b, V_c$ ) و جریان به مختصات  $q$  و  $d$  از تبدیل پارک<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود. این کار با تبدیل ولتاژ سه فاز  $V_{abc}$  به  $V_{dq0}$  در مختصات روتور ( $d$  و  $q$ ) به صورت معادله زیر انجام می‌شود:

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} = A_{d,q}^{a,b,c} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

ماتریس تبدیل بین این دو مختصات به صورت زیر است [۲۵]:

$$A_{d,q}^{a,b,c} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120) & \cos(\theta_r + 120) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r - 120) & \sin(\theta_r + 120) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

که  $\theta_r$  موقعیت روتور است. لازم به ذکر است که فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF و کنترل‌کننده بر اساس مدل مطرح شده در این بخش دو طراحی می‌شوند به همین منظور باید تاثیر تبدیل پارک در طراحی‌ها مد نظر قرار گیرد.

### طراحی فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF

فیلتر کالمن یک روش تحلیل در حوزه‌ی زمان است که از نظر محاسباتی بسیار پربازده بوده و عملکرد پایداری دارد. برای سیستم‌های خطی که در حوزه‌ی زمان تشریح می‌شوند، پاسخ فیلتر کالمن بر اساس سری محاسبات بازگشتی و بر طبق اصل حداقل مربعات خطا شکل می‌گیرد [۲۶]. در این فیلتر در هر مرحله فقط به داده‌ی تخمینی قبلی و ورودی همان لحظه نیاز است و به کمک این داده‌ها می‌توان پارامترها را بروز رسانی کرد [۲۷]. چون معادلات میز لرزه غیر خطی هستند امکان استفاده از فیلتر کالمن خطی (KF) وجود ندارد، برای استفاده از فیلتر کالمن خطی نیاز به خطی‌سازی سیستم می‌باشد و به خطای زیادی در پارامترهای تخمین زده شده می‌انجامد.

روش پیشنهادی در محیط شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در بخش پنچ داده شده است. نتیجه‌گیری در بخش شش آمده است.

### مدل‌سازی میز لرزه

مدل ریاضی سیستم به شرح زیر است. روابط مربوط به موتور الکتریکی در سیستم مختصات  $q$  و  $d$  با استفاده از تبدیل پارک به فرم روابط یک تا سه صورت می‌پذیرد. سیستم مختصات  $q$  و  $d$  یک تبدیل‌کننده ریاضی جهت تحلیل و مدل‌سازی مدارهای سه فاز است.

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} V_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \rho \omega i_q \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} V_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} \rho \omega i_d - \frac{\lambda \rho \omega}{L_d} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \rho [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

در این روابط  $L_d$  و  $L_q$  اندوکنانس محورهای  $q$  و  $d$  هستند،  $R$  مقاومت سیم‌پیچ استاتور است،  $i_d$  و  $i_q$  جریان محورهای  $q$  و  $d$  می‌باشند،  $V_d$  و  $V_q$  ولتاژ محورهای  $q$  و  $d$  هستند،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای روتور،  $\lambda$  دامنه‌ی شار القا شده توسط آهنرباهای دائم روتور بر روی فازهای استاتور،  $\rho$  تعداد جفت قطبها و  $T_e$  گشتاور الکترومغناطیسی است. لازم به ذکر است که در معادلات بالا، همه‌ی کمیت‌ها در سیستم مختصات روتور به استاتور برمی‌گردند و مدل مطرح شده با فرض‌های زیر است:

۱. اشباع اتفاق نمی‌افتد.
  ۲. جریان بازگشتی و خاصیت هیستریزس قابل صرف نظرند.
  ۳. هیچ دینامیک میدان جریانی<sup>۸</sup> وجود ندارد [۲۵].
- در ادامه مکانیزم بال اسکرو<sup>۹</sup> نیز به شکل زیر مدل شده است:

$$T = \frac{Fh}{2\pi\epsilon} \quad (4)$$

در روابط بالا  $T$  گشتاور وارد شده بر محور،  $F$  نیروی خطی،  $h$  گام بال اسکرو،  $\epsilon$  بازدهی می‌باشد. برای یک بال اسکرو عادی بازدهی در حدود ۹۰ درصد است. در نهایت، روابط مکانیکی مربوط به شفت موتور به صورت زیر است [۲۵]:

$$j \frac{d}{dt} \omega = T_e - \beta \omega - T_l \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (6)$$

<sup>۱۰</sup> Viscous Friction  
<sup>۱۱</sup> Parks Transformation

<sup>۸</sup> Field Current Dynamics  
<sup>۹</sup> Ball-Screw

ترتیب باقیمانده اندازه‌گیری و کواریانس خطای تخمین آن است. ماتریس‌های  $H_x(m, k)$  و  $F_x(m, k-1)$  ژاکوبی  $h_i$  و  $f_i$  بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} [F_x(m, k-1)]_{j, j'} &= \frac{\partial f_j(x, k-1)}{\partial x_{j'}} \Big|_{x=m} \\ [H_x(m, k)]_{j, j'} &= \frac{\partial h_j(x, k)}{\partial x_{j'}} \Big|_{x=m} \end{aligned} \quad (14)$$

به منظور ترکیب داده‌های سنسورها و کاهش نویز اندازه‌گیری، خروجی سنسورها را به صورت مجزا و به همراه نویز مخصوص همان سنسور در سری روابط فوق قرار می‌دهیم.

### تخمین پارامترهای میز با استفاده از UKF

فیلتر EKF به تابع خطی شده‌ی سیستم نیاز دارد و برای سیستم‌های پیچیده‌ای نظیر میز لرزه استخراج توابع خطی شده پیچیده و زمان‌بر است. علاوه، خطی‌سازی و تقریب از پیوسته به گسسته دارای خطا می‌باشد و این خطا با افزایش پیچیدگی سیستم افزایش می‌یابد و ممکن است عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار دهد [۲۹]. بنابراین به روشی سریع‌تر و پربازده‌تر در تخمین پارامترهای میز لرزه نیاز است. فیلتر UKF یک جایگزین مناسب برای فیلتر EKF است، این فیلتر به جای خطی‌سازی معادله‌ی دیفرانسیل و سپس استفاده از روش کالمن کلاسیک برای تخمین داده‌ها، از تبدیل بی‌رد<sup>۱۳</sup> برای ایجاد مقادیر متوسط و کواریانس‌ها به طور مستقیم استفاده می‌کند. جزئیات مربوط به الگوریتم UKF به شرح زیر است:

#### • شرایط اولیه

$$\begin{aligned} \hat{x}_0 &= E[x_0] \\ P_0 &= E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \\ W_0 &= \frac{\lambda}{(L + \lambda)} \\ W_i &= \frac{1}{[2(L + \lambda)]}, i = 1, \dots, 2L \\ \lambda &= \alpha^2(L + K) - L \end{aligned} \quad (15)$$

در روابط بالا  $\lambda \in R$  بیانگر بردار وزن‌ها که بر روی نقاط سیگما<sup>۱۴</sup> قرار می‌گیرد،  $L$  ابعاد بردار حالت،  $W_0$  و  $W_i$  ضرایب وزنی،  $\alpha$  گسترش نقاط سیگما را تعیین می‌کند و معمولاً روی یک مقدار مثبت کوچک تنظیم می‌شود. ماتریس نقاط سیگما برای  $K \geq 1$  به فرم زیر تشکیل می‌شود:

$$\begin{aligned} x_{k-1} &= \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-1} \\ \hat{x}_{k-1} + \sqrt{L + \lambda}(\sqrt{P_{k-1}})_i \\ \hat{x}_{k-1} - \sqrt{L + \lambda}(\sqrt{P_{k-1}})_i \end{bmatrix} \\ i &= 1, 2, \dots, n \\ \sqrt{P_{k-1}} &= \text{chol}\{E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]\} \end{aligned} \quad (16)$$

مدل میز لرزه که در بخش دو بررسی شد یک مدل پیوسته است، در این تحقیق از روش رونگ کوتاه<sup>۱۲</sup> مرتبه چهار به منظور منظور تخمین پاسخ یک معادله‌ی دیفرانسیل معمولی از مرحله‌ی  $n$  به مرحله‌ی  $n+1$  استفاده شده است.

برای مدل میز لرزه، پارامترهای فضای حالت و ماتریس خروجی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} x_k &= [\dot{d}, \dot{q}, \theta, \omega, \dot{\omega}]^T \\ y_k &= [y_{Encoder} + \Gamma_{Encoder} y_{Acceleration} + \Gamma_{Acceleration}] \end{aligned} \quad (9)$$

خروجی سیستم توسط دو سنسور کدکننده و شتاب‌سنج با مقدار نویزهای متفاوت ( $\Gamma_{Encoder}$  و  $\Gamma_{Acceleration}$ ) در دسترس است و مطابق روابط ارائه شده جهت یک تخمین با حداقل خطا ترکیب می‌شوند. بطور مختصر معادلات گسسته سیستم به صورت زیر است:

$$x_k = f(x_{k-1}, k-1) + q_{k-1} \quad (10)$$

$$y_k = h(x_k, k) + r_k \quad (11)$$

در این دو رابطه  $x_k \in R^n$  بیانگر پارامترهای فضای حالت،  $y_k \in R^m$  بردار اندازه‌گیری شده،  $q_{k-1} \approx N(0, Q_{k-1})$  نویز سیستم،  $r_k \approx N(0, R_k)$  نویز اندازه‌گیری،  $f$  سیستم غیرخطی مورد نظر و  $h$  مدل اندازه‌گیری است [۲۸]. به کمک روابط استخراج شده در این بخش برای مدل میز لرزه فیلتر EKF طراحی می‌شود.

### تخمین پارامترهای میز با استفاده از EKF

فیلتر EKF از دو مرحله‌ی پیش بینی و بروز رسانی به صورت زیر تشکیل می‌شود:

#### • پیش بینی

$$\begin{aligned} m_k^- &= f(m_{k-1}, k-1) \\ P_k^- &= F_x(m_{k-1}, k-1)P_{k-1}F_x^T(m_{k-1}, k-1) + Q_{k-1} \end{aligned} \quad (12)$$

که  $m_k^-$  و  $P_k^-$  به ترتیب تخمین بردار حالت و کواریانس خطای تخمین قبل از اندازه‌گیری است.

#### • بروز رسانی

$$\begin{aligned} V_k &= y_k - h(m_k^-, k) \\ S_k &= H_x(m_k^-, k)P_k^-H_x^T(m_k^-, k) + R_k \\ k_k &= P_k^-H_x^T(m_k^-, k)S_k^{-1} \\ m_k &= m_k^- + k_k V_k \\ P_k &= P_k^- + k_k S_k k_k^T \end{aligned} \quad (13)$$

که  $m_k$  و  $P_k$  به ترتیب تخمین بردار حالت و کواریانس خطای تخمین آن بعد از اندازه‌گیری،  $k_k$  بهره فیلتر،  $V_k$  و  $S_k$  به

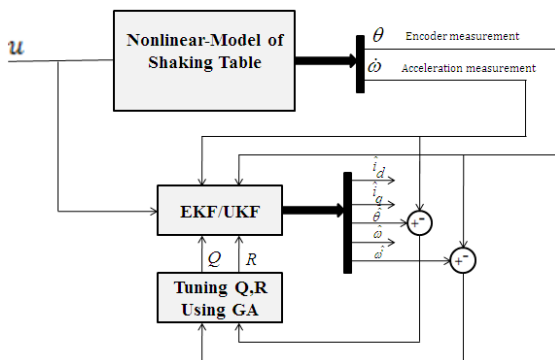
<sup>۱۳</sup> Unscented Transform  
<sup>۱۴</sup> Sigma-points

<sup>۱۲</sup> Runge-Kutta

می‌کند. برای مقابله با این مشکل روش‌های متفاوتی ارائه شده است. در این مقاله، از الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای تنظیم تطبیقی این ماتریس‌ها استفاده شده است. تاکنون الگوریتم‌های فراابتکاری مختلفی ارائه شده‌اند که در این مقاله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این روش همزمان با تخمین حالت، کواریانس‌های  $R$  و  $Q$  به صورت بازگشتی تطبیق می‌شوند تا خطای تخمین حالت کاهش یابد. برای تنظیم پارامترهای فیلتر کالمن بهینه‌سازی شده، ماتریس‌های کواریانس نوپز به صورت زیر مقدار دهی اولیه می‌شوند.

$$Q = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} \sigma & 0 \\ 0 & \sigma \end{bmatrix} \quad (19)$$

که  $\alpha$  و  $\sigma$  مقادیر اولیه اختصاص یافته به ماتریس‌های  $R$  و  $Q$  است. جهت تنظیم ماتریس‌های  $R$  و  $Q$  از یک الگوریتم ژنتیک مبتنی بر کد واقعی<sup>۱۶</sup> استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک کد واقعی برتری‌های زیادی نسبت به الگوریتم ژنتیک باینری دارد که از جمله می‌توان به نیاز به حافظه کمتر و از دست ندادن دقت در هنگام تبدیل بین مقادیر باینری و حقیقی اشاره کرد. برای تنظیم تطبیقی  $R$  و  $Q$  یک کروموزوم شامل عناصر قطری ماتریس‌های  $R$  و  $Q$  تعریف می‌شود. سپس، این عناصر قطری از هر رشته به صورت جداگانه به فیلترها فرستاده می‌شود.



شکل ۱. ارتباط موازی بین سیستم و فیلتر کالمن تطبیقی تکاملی

با توجه به اینکه هدف از بهینه‌سازی کاهش هم‌زمان خطای ردیابی جابجایی و شتاب زلزله مطابق شکل یک است، داده‌های کدکننده و شتاب‌سنج که آغشته به نویز هستند وارد فیلتر کالمن تطبیقی تکاملی شده و برای تنظیم  $R$  و  $Q$  سیگنال واقعی سیستم و سیگنال تخمین زده شده وارد واحد تطبیقی

برای محاسبه  $\sqrt{P_{k-1}}$  از تجزیه چالسکی<sup>۱۵</sup> استفاده می‌شود و زیرنویس  $i$  نشان دهنده ستون ماتریس است.

• پیش بینی

$$\begin{aligned} X_{k|k-1} &= f(X_{k-1}, k-1) \\ \hat{x}_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i X_{i,k|k-1} \\ P_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i [X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-][X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-]^T + Q_k \\ y_{k|k-1} &= h(X_{k|k-1}, k) \\ \hat{y}_k^- &= \sum_{i=0}^{2L} W_i y_{i,k|k-1} \end{aligned} \quad (17)$$

در رابطه فوق  $X_{k|k-1}$  و  $y_{k|k-1}$  به ترتیب ماتریسی از تبدیل نقاط سیگما از طرق تابع غیرخطی  $f$  و تابع مشاهدات  $h$  است و زیرنویس  $k|k-1$  بر اساس اطلاعات به دست آمده از مرحله زمانی گذشته است،  $\hat{x}_k^-$  و  $P_k^-$  به ترتیب مقدار تخمینی متوسط هر پارامتر و مقدار کواریانس پیش بینی شده است.

• بروز رسانی

$$\begin{aligned} P_k^{\hat{y}\hat{y}} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i [y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-][y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-]^T + R_k \\ P_k^{\hat{x}\hat{y}} &= \sum_{i=0}^{2L} W_i [X_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-][y_{i,k|k-1} - \hat{y}_k^-]^T \\ K_k &= P_k^{\hat{x}\hat{y}} P_k^{\hat{y}\hat{y}-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k [y_k - \hat{y}_k^-] \\ P_k &= P_k^- - K_k P_k^{\hat{y}\hat{y}} K_k^T \end{aligned} \quad (18)$$

که  $P_k^{\hat{y}\hat{y}}$  کواریانس اندازه‌گیری،  $P_k^{\hat{x}\hat{y}}$  کواریانس بین حالت و اندازه‌گیری،  $K_k$  ضریب بهره فیلتر،  $m_k$  مقدار متوسط بروز رسانی شده پارامترهای فضای حالت و  $P_k$  کواریانس پارامترهای فضای حالت بروز رسانی شده است.

تنظیم تطبیقی تکاملی EKF و UKF

در فیلترهای EKF و UKF باید از ماتریس‌های کواریانس نوپز سیستم  $Q$  و کواریانس نوپز اندازه‌گیری  $R$  اطلاع دقیق داشت. افزایش ماتریس  $R$  بدان معنی است که دقت داده‌های اندازه‌گیری کم است، بنابراین تاثیر کمتری در بروز رسانی حالت‌ها دارد. افزایش ماتریس  $Q$  به این معنی است که اعتماد به مدل سیستم کم است. هر چه  $R$  و  $Q$  از مقدار حقیقی خود فاصله داشته باشد، بهره  $K$  نامناسب‌تر است که این مسئله فرآیند تخمین حالت در روابط مرحله بروز رسانی را با مشکل مواجه

جدول ۱. پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی

پارامتر	مقدار	واحد
$L_d = L_q$	۰.۰۰۵۲۵	H
$R$	۰.۹۵۸۵	Ohm
$\rho$	۸	-
$\beta$	۰.۰۰۰۳۰۳۵	Nm/rad/s
$\lambda$	۰.۱۸۲۷	v/rad/s
$\xi$	٪۹۰	-
$j$	۰.۰۰۸۰۵۵۱۲	kgm <sup>2</sup>
$h$	۲۰	Mm
$m$	۱۶.۷۵	Kg
$m_1$	۱۰	Kg

## نتایج

برای ارزیابی روش پیشنهادی، عملکرد آن در محیط شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بررسی می‌شود. مقایسه‌ای بین عملکرد دو کنترل کننده PID سری در حضور فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF در حلقه کنترلی و بدون حضور آنها در ردیابی مشخصات زلزله شبیه‌سازی شده انجام گردیده است.

## شبیه‌سازی

ابتدا مطابق شکل یک در حالت حلقه باز و بدون وجود کنترل کننده عملکرد فیلتر تطبیقی تکاملی EKF و UKF برای تخمین پارامترهای میز  $[\dot{i}_d \ i_q \ \theta \ \omega \ \hat{\omega}]^T$  ارزیابی می‌شود. ورودی سیستم حلقه باز (شامل درایور و موتور) سرعت خطی حرکت زمین است که در زلزله چالفانت ثبت شده است. خروجی سیستم توسط دو سنسور کدکننده و شتاب‌سنج با مقدار نویزهای متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مورد نیاز میز برای شبیه سازی مطابق جدول یک انتخاب شده‌اند.

پارامترهای زاویه و شتاب زاویه‌ای تخمین زده شده به ترتیب در شکل‌های سه و چهار نشان داده شده‌اند. در هر نمودار مقدار واقعی، مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار تخمین زده شده توسط EKF و UKF نشان داده شده است. مطابق نتایج حاصله نویزهای اندازه‌گیری کاملاً حذف شده و مقدار تخمینی هر پارامتر با مقدار واقعی آن تطابق دارد. در شکل‌های سه و چهار سیگنال‌های نویزی به ترتیب همان خروجی‌های کدکننده و شتاب‌سنج هستند. پارامتر سرعت زاویه‌ای در شکل پنج نشان داده شده است. در شکل پنج با توجه به اینکه سنسور سرعت نداریم مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده توسط EKF و UKF نشان داده شده است.

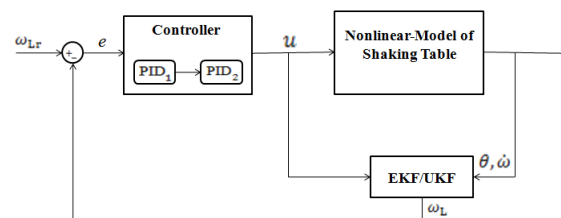
می‌شود. تابع هدف در اینجا میانگین مربع خطای (MSE) جابجایی و خطای شتاب در نظر گرفته شده است:

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} (y - \hat{y})(y - \hat{y})^T} \quad (20)$$

در این رابطه n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده،  $y = [\theta \ \hat{\omega}]^T$  سیگنال واقعی سیستم و  $\hat{y} = [\hat{\theta} \ \hat{\omega}]^T$  سیگنال تخمین زده شده می‌باشد.

## طراحی کنترل کننده

در این بخش کنترل کننده مناسبی طراحی می‌شود که در برابر عدم قطعیت و ورودی اغتشاشی مقاوم باشد و البته هدف اصلی طراحی کنترل کننده ردیابی ورودی شتاب مرجع است. اگر فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF به درستی طراحی شوند تمام پارامترهای فضای حالت شامل جابجایی زاویه‌ای، سرعت زاویه‌ای، شتاب زاویه‌ای و جریان‌های موتور در دسترس خواهند بود و هر کدام می‌توانند برای پایدار سازی و کنترل حلقه بسته مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله سرعت خطی زلزله به عنوان ورودی مطلوب در نظر گرفته شده است و سرعت خطی میز لرزه که توسط فیلترها تخمین زده شده است فیدبک می‌شود (دقت شود که سرعت زاویه‌ای موتور و سرعت خطی رفت و برگشت میز لرزه با ضرایب عددی به هم مرتبط می‌شوند). ساختار کنترلی مورد استفاده در شکل دو نشان داده شده است. در این شکل  $\omega_L$  سرعت خطی تخمین زده شده توسط فیلترهای کاملن EKF و UKF است،  $\omega_L$  از سرعت خطی مرجع  $\omega_{Lr}$  کم شده و خطای محاسباتی e وارد کنترل کننده می‌شود. کنترل کننده PID مورد نظر پس از قرار گیری در مسیر مورد نظر تنظیم می‌شود. جهت افزایش پایداری و عملکرد سیستم از دو کنترل کننده PID به صورت سری استفاده شده است. کنترل کننده PID دوم پس از طراحی کنترل کننده PID اول در سیستم قرار می‌گیرد.



شکل ۲. ساختار پیاده‌سازی فیلتر کاملن تطبیقی تکاملی و کنترل کننده

حال مطابق شکل دو عملکرد حلقه بسته سیستم در حضور کنترل کننده‌های PID طراحی شده و فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF یا UKF در حلقه کنترلی در ردیابی مشخصات زلزله شبیه‌سازی شده ارزیابی می‌شود. پارامترهای کنترل کننده PID معمولا در محل انجام آزمایش تنظیم می‌شود. معادله کلی کنترل کننده PID زمان پیوسته به فرم زیر است:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (21)$$

که  $u(t)$  سیگنال کنترلی،  $K_p$  بهره تناسبی،  $T_i$  زمان انتگرالگیر،  $T_d$  زمان مشتقگیر و مطابق شکل دو متغیر  $e$  سیگنال خطا می‌باشد که به کنترل کننده فرستاده می‌شود. کنترل کننده، مشتق و انتگرال سیگنال خطا و همچنین حاصلضرب بهره تناسبی در سیگنال خطا را محاسبه می‌کند.

ضرایب کنترل کننده PID از روش زیگلر نیکولس [۳۰] و انجام آزمایش بر روی سیستم تعیین می‌شود. ابتدا بلوک‌های مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر جدا شده و در کنترل کننده تنها بلوک تناسبی قرار می‌گیرد. سپس  $K_p$  را از صفر زیاد می‌کنیم تا به مقدار بحرانی برسیم، در اینصورت مقدار بهره‌ی بحرانی  $ku$  و زمان تناوب متناظر با آن  $tu$  بدست می‌آید.

جدول ۲: قواعد تنظیم زیگلر نیکولس بر اساس بهره‌ی بحرانی و زمان تناوب بحرانی [۳۰]

نوع کنترل کننده/ضرایب	PID	PI
$K_p$	$0.6.ku$	$0.45.ku$
$T_i$	$0.5.tu$	$0.85.tu$
$T_d$	$0.125.tu$	

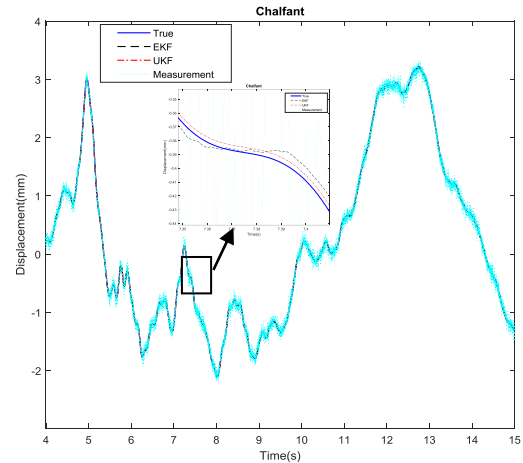
تابع تبدیل کنترل کننده PID استفاده شده به شکل زیر است:

$$u(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{N} \right) \quad (22)$$

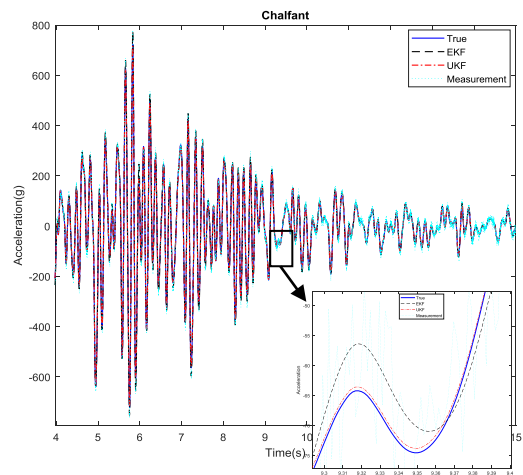
رابطه فوق فرم استاندارد کنترل کننده PID به همراه فیلتر مشتق‌گیر مرتبه اول است. ضرایب  $K_p$ ،  $T_i$ ،  $T_d$  بر اساس جدول دو محاسبه می‌شوند و  $N$  ضریب فیلتر می‌باشد. کنترل کننده‌های طراحی شده به فرم زیر است:

$$PID_1 = -0/44 \left( 1 + \frac{91/04}{s} + \frac{2/253s}{s+1408/17} \right) \quad (23)$$

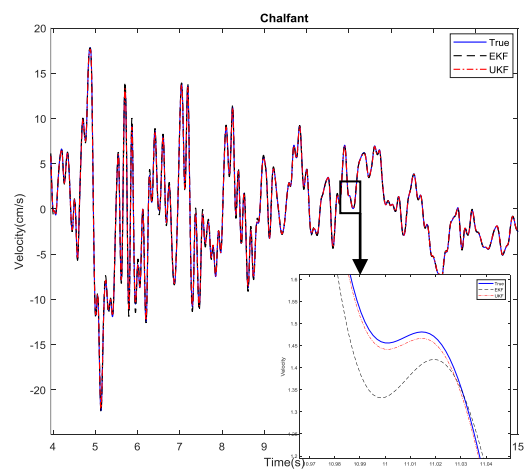
$$PID_2 = 2/5 \left( 1 + \frac{6/67}{s} + \frac{203/3s}{s+50390/6} \right)$$



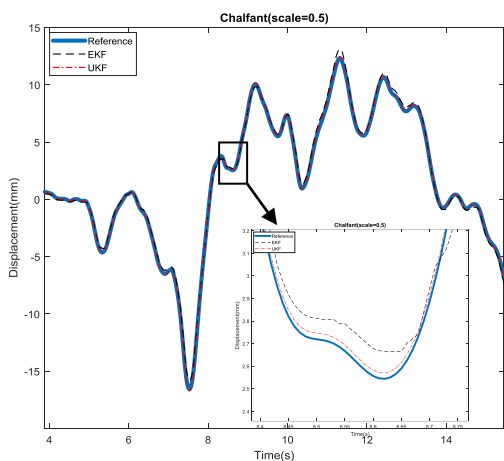
شکل ۳. مقدار واقعی، اندازه‌گیری و تخمین زده شده‌ی  $\theta$  توسط فیلتر EKF و UKF



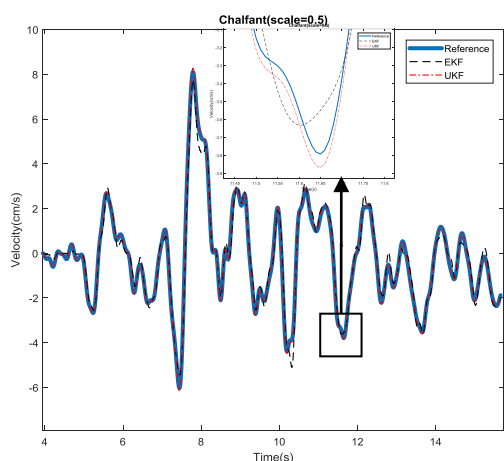
شکل ۴. مقدار واقعی، اندازه‌گیری و تخمین زده شده‌ی  $\ddot{u}$  توسط فیلتر EKF و UKF



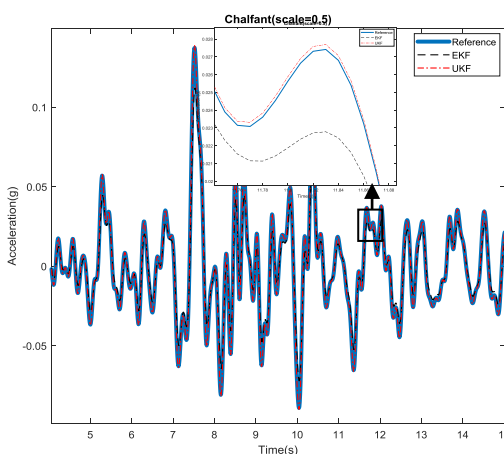
شکل ۵. مقدار واقعی و تخمین زده شده‌ی  $\dot{u}$  توسط فیلتر EKF و UKF



شکل ۷. ورودی جابجایی مرجع و مقادیر تخمین زده شده توسط EKF و UKF



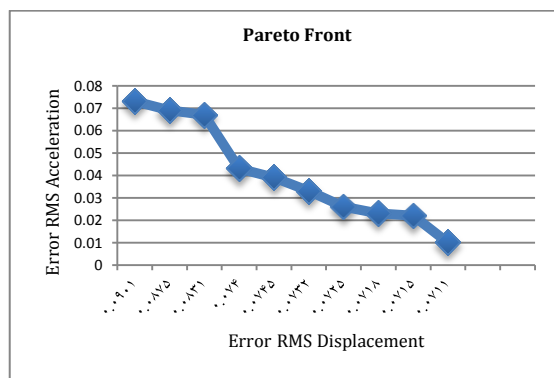
شکل ۸. ورودی سرعت مرجع و مقادیر تخمین زده شده توسط EKF و UKF



شکل ۹. ورودی شتاب مرجع و مقادیر تخمین زده شده توسط EKF و UKF

در این رابطه  $PID_1$  خروجی کنترل‌کننده اول و  $PID_2$  خروجی کنترل‌کننده دوم می‌باشد که به صورت سری قرار گرفته‌اند.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک برای تنظیم پارامترهای R و Q در شکل شش نشان داده شده است. در شکل شش نمودارهای پارتو فرانت<sup>۱۷</sup> برای بهینه‌سازی انجام شده با الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. در این اجرا تعداد جمعیت ۱۰۰ و تعداد تکرار ۱۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. نمودار پارتو در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک. محور افقی نشان دهنده تابع هدف اول و محور عمودی نشان دهنده تابع هدف دوم

با توجه به نتایج حاصل از اجرای الگوریتم ژنتیک و مقادیر بهینه بدست آمده، مقادیر قطر اصلی ماتریس‌های R و Q به صورت زیر است:

$$R = \text{Diag}[1 \times 10^{-7} \quad 1 \times 10^{-3}] \quad Q = \text{Diag}[10^{-4} \quad 10^{-4} \quad 10^{-7} \quad 10^{-5} \quad 10^{-2}]$$

شکل‌های هفت تا نه به ترتیب مقادیر تخمین زده شده‌ی پارامترهای جابجایی مرجع، سرعت مرجع و شتاب مرجع توسط UKF و EKF و مقدار واقعی‌شان نشان داده شده است. در هر شکل مقدار مرجع با مقادیر تخمین زده شده توسط فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF مقایسه شده‌اند. مطابق نتایج بدست آمده ردیابی ورودی مرجع به ازای هر دو فیلتر تطبیقی تکاملی EKF و UKF به خوبی صورت گرفته است. در جدول سه جذر میانگین مربع خطای<sup>۱۸</sup> ردیابی پارامترهای جابجایی، سرعت و شتاب توسط فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF با ورودی مرجع نشان داده شده است.

<sup>۱۷</sup> Pareto Front  
<sup>۱۸</sup> Root mean square error-RMSE

که در آن برنامه کنترلی شبیه‌سازی شده در نرم افزار لب ویو<sup>۲۰</sup> قرار دارد، ارسال می‌کند. علاوه بر این از دو سنسور مادون قرمز CNY70 برای امنیت میز لرزه هنگامی که جابجایی آن بیش از محدوده مجاز مثلاً  $\pm 90$  میلی‌متر است به عنوان سوئیچ برای توقف برنامه استفاده شده است. مشخصات میز لرزه به طور خلاصه در جدول چهار بیان شده است:

جدول ۴. مشخصات میز لرزه

مقادیر/تعاریف	تجهیزات/مشخصات
PMSM	نوع موتور
1kwat	توان موتور
(750x550)mm	ابعاد میز (BxL)
$\pm 90$	جابجایی (mm)
1000	بیشینه سرعت (mm/s)
2	بیشینه شتاب (g)
25	بیشینه بار (kg)
20	گام بال اسکرو (mm)
سنسور شتاب سنج دوجته با محدوده اندازه‌گیری $\pm 1.75$	سنسور شتاب سنج
5	رزولوشن سنسور شتاب سنج ( $\mu m$ )
16.75	وزن صفحه (kg)

به منظور ارزیابی عملی ساختار کنترلی ارائه شده به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی بر روی میز لرزه می‌پردازیم. مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل‌کننده PID در حضور فیلترکالمن تطبیقی تکاملی EKF و UKF در حلقه کنترلی و بدون حضور آن در ردیابی مشخصات زلزله شبیه‌سازی شده انجام شده است. برای این منظور مقیاسی از زلزله چالفانت استفاده شده است. مشخصات زلزله مذکور در جدول پنج آورده شده است [۳۲].

جدول ۵: مشخصات زلزله مرجع

مشخصات	زلزله مرجع
ایستگاه: Zack Brothers دامنه: 5.9 منبع اطلاعات: CDMG	زلزله چالفانت

شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب نتایج جابجایی، سرعت و شتاب را نشان می‌دهند. همچنین در جدول شش جذر میانگین مربع خطای ردیابی (RMSE) پارامترهای جابجایی، سرعت و شتاب توسط فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF با ورودی مرجع نشان داده شده است.

جدول ۳. مقایسه RMSE ردیابی با EKF و UKF

شتاب	سرعت	جابجایی	RMSE
۰.۶۱۱۸	۰.۲۷۴۳	۰.۲۹۲۶	EKF
۰.۰۵۷۱	۰.۰۳۸۱	۰.۰۵۳۸	UKF

### آزمون آزمایشگاهی

به منظور بررسی میزان عملکرد ساختار کنترلی ارائه شده در واقعیت، از میز لرزه‌ی مرکز تحقیقات دانشگاه اراک استفاده کرده‌ایم. میز لرزه‌ی استفاده شده به همراه اجزای اصلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است [۳۱]. میز لرزه از نوع الکتریکی با یک درجه آزادی می‌باشد که در جهت افقی حرکت می‌کند و می‌تواند زلزله‌های متوسط (میانه) با سرعت ۱۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و شتاب دو برابرگانش زمین را شبیه‌سازی کند. این میز از یک موتور سنکرون آهنربای دائم و یک بال اسکرو به عنوان عملگر بهره می‌برد. علاوه بر این بال اسکرو حرکت دورانی موتور را به حرکت خطی تبدیل می‌کند. ابعاد این میز  $750 \times 550$  میلی‌متر و قابلیت جابجایی  $\pm 90$  میلی‌متر را داراست.



شکل ۱۰. نمای کلی از میز لرزه‌ی مورد استفاده [۳۱]

سنسورهای این میز شامل یک کدکننده خطی پنج میکرومتری است که جابجایی صفحه را اندازه‌گیری می‌کند، یک کدکننده شفتی نیز بر روی موتور نصب شده است که نمونه برداری فرکانس آن ۲۵۰۰ پالس در هر ورودی می‌باشد. یک شتاب‌سنج آنالوگ مدل ADXL203 که شتاب افقی میز را اندازه‌گیری می‌کند. علاوه بر این سخت افزار کنترل-کننده میز لرزه شامل یک درایور سروو، یک کارت اخذ اطلاعات<sup>۱۹</sup> از نوع ۱۷۱۶، یک میکروکنترلر ATMEGA32 و یک رایانه شخصی می‌باشد. ارتباط بین این اجزا به صورت زیر می‌باشد: کدکننده خطی اطلاعات خود را به میکروکنترلر ارسال می‌کند و میکروکنترلر بعد از محاسبه، موقعیت میز لرزه را از طریق کارت اخذ اطلاعات به رایانه ارسال می‌کند در همین حال شتاب میز لرزه نیز توسط کارت اخذ اطلاعات به رایانه شخصی،

<sup>۲۰</sup> LABVIEW

<sup>۱۹</sup> DAQ card

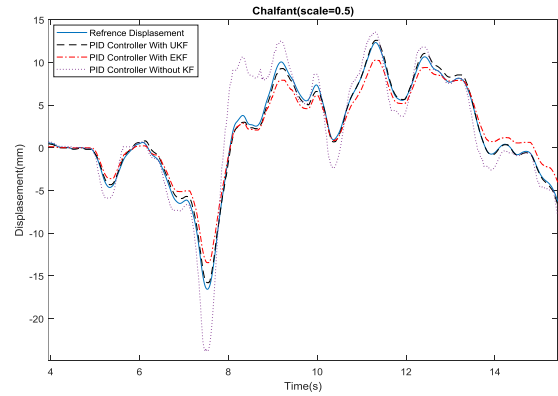
همان‌طور که از نمودارهای بالا پیداست سیستم مبتنی بر ترکیب اطلاعات به روش فیلترهای کالمن تطبیقی تکاملی EKF و UKF با استفاده از دو کنترل‌کننده PID به صورت سری توانسته پروفیل زلزله چالفانت را به خوبی ردیابی کند در حالی که بدون حضور فیلترها، کنترل‌کننده PID عملکرد مناسبی نداشته است. بیشترین خطا مربوط به زمانی است که تغییر جهت در ورودی مشاهده می‌شود.

### نتیجه‌گیری

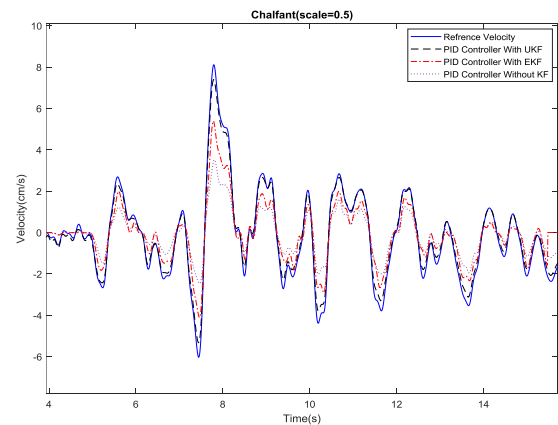
در این مقاله از دو کنترل‌کننده PID به صورت سری در کنار فیلترهای تطبیقی تکاملی EKF و UKF برای بهبود عملکرد ردیابی مشخصات زلزله ارائه گردیده است. تاثیر کنترل‌کننده PID پیشنهادی و فیلترهای کالمن تطبیقی تکاملی EKF و UKF روی عملکرد میز لرزه، در حالی که رفتار یک زلزله واقعی شبیه‌سازی شد، مورد بررسی قرار گرفت. برای کنترل میز به صورت بلادرنگ سه آزمایش طراحی شد. در آزمایش اول و دوم کنترل‌کننده از خروجی دو سنسور کدکننده و شتاب‌سنج که از فیلترهای EKF و UKF استخراج شده به عنوان بازخورد استفاده می‌کند و در آزمایش سوم تنها خروجی کدکننده بدون فیلترینگ به عنوان بازخورد جایگزین می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که کنترل‌کننده طراحی شده در کنار فیلترهای کالمن EKF و UKF در مقایسه با کنترل‌کننده PID عملکرد خوبی در ردیابی مشخصات زلزله داشته است و خطای ردیابی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و سیستم کنترلی به ورودی اغتشاشی، نویز و عدم قطعیت مقاوم است. همچنین تاثیر نوبزهای اندازه‌گیری و تنظیم پارامترهای R و Q در فیلتر کالمن بهینه‌سازی شده به روش الگوریتم ژنتیک بر میزان تخمین هر کدام از فیلترهای کالمن EKF و UKF مورد بررسی قرار گرفت، نتایج نشان دادند که فیلتر کالمن UKF در مواردی دارای خطای ردیابی کمتری است و در برخی موارد دارای خطای ردیابی یکسانی با فیلتر EKF می‌باشد. علاوه بر این عدم نیاز به سنسورهای گران قیمت، دقت مطلوب از دیگر مزایای روش مذکور می‌باشد.

### مراجع

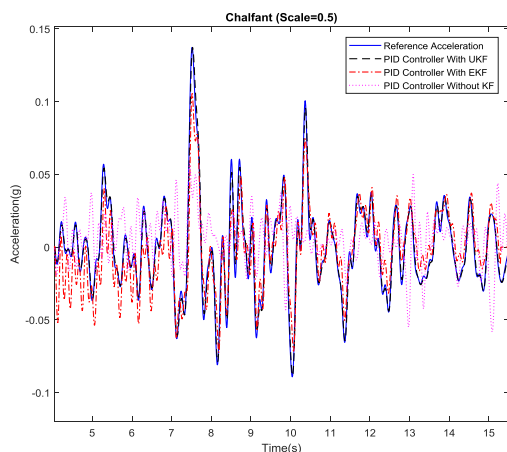
- [1] H. Kima, P. N. Roschke, P. Linc, and C. Loh, "Neuro-fuzzy model of hybrid semi-active base isolation system with FPS bearings and an MR damper", *Engineering Structures*, vol. 28, no. 7, pp. 947-958, 2006.
- [2] A. Barattal, I. Corbi, O. Corbi, R. C. Barros, and R. Bairrao, "Shaking Table Experimental



شکل ۱۱. مقایسه بین جابجایی مرجع برای زلزله چالفانت و نتایج آزمایشگاهی



شکل ۱۲. مقایسه بین سرعت مرجع برای زلزله چالفانت و نتایج آزمایشگاهی



شکل ۱۳. مقایسه بین شتاب مرجع برای زلزله چالفانت و نتایج آزمایشگاهی

جدول ۶. مقایسه RMSE ردیابی با EKF و UKF

RMSE	جابجایی	سرعت	شتاب
EKF	۰.۵۱۹۹	۰.۸۰۱۳	۰.۹۱۵۴
UKF	۰.۱۷۱۵	۰.۳۷۴۹	۰.۴۵۰۱

- [14] L. M. Jansen, S. J. Dyke, "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 126, no. 8, pp. 795-803, 2000.
- [15] F. Gustafsson, G. Hendeby, "Some Relations Between Extended and Unscented Kalman Filters", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 2, pp. 545-555, 2012.
- [16] J. Yao, D. Di, G. Jiang, S. Gao, and H. Yan, "Real-time acceleration harmonics estimation for an electro-hydraulic servo shaking table using Kalman filter with a linear model", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 794-800, 2013.
- [17] A.L. Klein, "Sensor and data fusion: a tool for information assessment and decision making", Bellingham WA: SPIE press, 2004.
- [18] Z. Donghua, X. Yngeng, and Z. Zhongjun, "Suboptimal fading extended Kalman filtering for nonlinear systems [J]", *Control and Decision*, vol. 5, no. 5, pp. 1-6, 1990.
- [19] C. Yang, Z. Yang, and Z. Deng, "Robust weighted state fusion Kalman estimators for networked systems with mixed uncertainties", *Information Fusion*, vol. 45, pp. 246-65, 2019.
- [۲۰] مجتبی معصوم نژاد، سیدعلی معافی، علی جمالی، نادر نریمان زاده، "طراحی بهینه فیلتر ترکیبی کالمن و H بینهایت، با استفاده از روش بهینه سازی چند هدفی"، ماهنامه مهندسی مکانیک مدرس، ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۲، ص ۱۲۸-۱۳۲.
- [۲۱] محمدعلی کاظمی، مجتبی معصوم نژاد، نعمت اله عسکری، "شناسایی متغیرهای حالت یک هواپرواز با استفاده از فیلتر ترکیبی کالمن / اچ بینهایت فازی"، فصلنامه علمی کارافن، ۱۳۹۹، دوره ۱۷، شماره ۴، ص ۵۹-۷۷.
- [۲۲] رمضان هاونگی، محمد تشنه لب، حبیب قنبرپور اصل، "تلفیق کامل GPS و INS و بهبود آن با فیلتر کالمن تطبیقی فازی"، فنی و مهندسی مدرس، ۱۳۸۳، شماره ۱۶، ص ۶۷-۸۰.
- [۲۳] مقصد محمدی، حسین قلی زاده نرم، "تطبیق کواریانس های نویز فیلتر کالمن توسعه یافته در ردیابی هدف از روی سمت به روش بازگشتی غیرمستقیم"، مجله کنترل، ۱۳۹۵، دوره ۱۰، شماره ۲، ص ۵۵-۷۲.
- [۲۴] رمضان هاونگی، "تخمین پارامترها و وضعیت شارژ باتری با استفاده از فیلتر تطبیقی مقاوم جذر مکعبی"، فصلنامه صنایع الکترونیک، ۱۳۹۹، دوره ۱۱، شماره ۴، ص ۲۵-۳۸.
- [25] E. L. C. Arroyo, "Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system", *University of puerto rico, Mayagüez Campus*, 2006.
- [26] X. Nie, "Detection of Grid Voltage Fundamental and Harmonic Components Using Kalman Filter Based on Dynamic Tracking Model", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019.
- [27] Haykin SS. "Adaptive filter theory", *Pearson Education India*, 2005.
- Researches Aimed at the Protection of Structures Subject to Dynamic Loading", *The Open Construction and Building Technology Journal*, vol. 6, pp. 355-360, 2012.
- [3] Y. M. Wu, B. Samali, "Shake table testing of a base isolated model", *Engineering Structures*, vol. 24, no. 9, pp. 102-1214, 2002.
- [4] X. L. Lu, H. J. Jiang, "Research and practice of response control of tall buildings in mainland China", *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 73-83, 2011.
- [5] R. T. Severn, "The development of shaking tables—A historical note", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 40, no. 2, pp. 195-213, 2011.
- [6] X. Yang, H. Hongxing, and H. Junwei, "Modeling and controller design of a shaking table in an active structural control system", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, no. 8, pp. 1917-1923, 2008.
- [7] P. Sinha, C. D. Rai, "Development and performance of single-axis shake table for earthquake simulation", *CURRENT SCIENCE*, vol. 96, pp. 1611-1620, 2009.
- [8] Z. Rakicevic, M. Garevski, I. Markovski, and N. Naumovski, "Upgrading of 5 DOF Seismic Testing System with the Newest Real-Time Three Variable Digital Control System", *In 15 th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal*, 2012.
- [9] T.Y. Yang, K. Li, J.Y. Lin, Y. Li, and D.P. Tung, "Development of high-performance shake tables using the hierarchical control strategy and nonlinear control techniques", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 44, no. 11, pp. 1717-1728, 2015.
- [10] L. Ascione, V. Berardi, L. Feo, F. Fraternali, and A.M. Tralli, "Experimental Investigation Of The Dynamic Performances Of The Leda Shaking Tables System" 2017.
- [11] A. Ebeido, M. Zayed, K. Kim, P. Wilson, and A. Elgamal, "Large Scale Geotechnical Shake Table Testing at the University of California San Diego", *In International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology "*, pp. 101-113, 2018.
- [12] G. Li, G. Shen, Z. C. Zhu, X. Li, and W. S. Zang, "Sine phase compensation combining an amplitude phase controller and a discrete feed-forward compensator for electro-hydraulic shaking tables", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 40, no. 11, pp. 3377-3389, 2018.
- [13] R. Zhang, B. M. Phillips, "Cyber-physical approach to the optimization of semiactive structural control under multiple earthquake ground motions", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019.

- [28]H. Xiong, M. Zhenzhen, T. Juan, and H. Fen, "Roust GPS/INS/DVL Navigation and Positioning Method Using Adaptive Federated Strong Tracking Filter Based on Weighted Least Square Principle", *IEEE Access*,2019.
- [29]K. Chen, L. Salah, and D. Abdesslem, "Fuel cell health prognosis using Unscented Kalman Filter: Postal fuel cell electric vehicles case study", *International Journal of Hydrogen Energy* , vol. 44, no. 3, pp. 1930-1939, 2019.
- [30]S. Chander, P. Agarwal, and I. Gupta, "Auto-tuned, discrete PID controller for DC-DC converter for fast transient response", *In India International Conference on Power Electronics*, pp. 1-7, 2011.
- [31]N. Rajabi, A.H. Abolmasoumi, and M. Soleymani, "Sliding mode trajectory tracking control of a ball-screw-driven shake table based on online state estimations using EKF/UKF", *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 25, no. 4, p.e2133, 2017.
- [32]Earthquake and Station Details. Retrieved from <http://www.peer.berkeley.edu>.