

### مقاله علمی - پژوهشی

## مقایسه روش‌های دمپستر - شافر ارتقاء یافته (یاگر) و فیلتر کالمن در تلفیق داده‌های حسگرها برای موقعیت‌یابی یک تراکتور مدل در محیط‌های کشاورزی

فرهاد چابک<sup>۱</sup>، علیرضا رضائی<sup>۲\*</sup> و میلاد اسدپور<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: کارشناسی ارشد؛ استادیار؛ و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه بین رشته‌ای فناوری، بخش مکترونیک و ممز، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۹

### چکیده

موقعیت‌یابی وسیله نقلیه با هر ساختار، فضای کاری و وظیفه، یکی از اساسی‌ترین مسائل در حوزه اتوماسیون ماشین‌های کشاورزی و پیش‌نیاز حرکت وسیله نقلیه است که همواره دارای چالش و مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش، روش دمپستر-شافر ارتقاء یافته (یاگر) و فیلتر کالمن به عنوان دو ابزار اصلی تلفیق و پردازش داده‌های حسگرهای موقعیت‌یابی یک تراکتور مدل، برای دستیابی به بهترین تخمین در موقعیت‌یابی با توجه به شرایط محیطی متغیر مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین با ارائه روشی جدید، وزن‌دهی ابتدایی به اطلاعات هر یک از حسگرها شامل حسگر موقعیت‌یابی جهانی، حسگر اثر ماند و دورسنج چرخ‌ها با توجه به میزان اطمینان از صحت هر یک انجام شد. معادلات هندسی حاکم بر تراکتور مدل استخراج شده و از یک کنترلر تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر برای کنترل سینماتیکی تراکتور مدل در شبیه‌ساز مکانیکی Sim-Mechanics نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شد. همچنین با استفاده از دو معیار آشکارساز مغناطیسی و میانگین مربع خطا میزان خطای موقعیت‌یابی در دو روش فیلتر کالمن و دمپستر-شافر ارتقاء یافته (یاگر) مقایسه شد. در حالت اعمال نوفه نرمال گوسی، فیلتر کالمن با متوسط خطای ۲/۸۲ درصد عملکرد بهتری از روش دمپستر-شافر ارتقاء یافته (یاگر) با ۴/۸۸ درصد خطا در معیار میانگین مربع خطا، داشت. اما در شرایط اعمال نوفه غیرگوسی که در محیط واقعی نیز وجود دارد، فیلتر کالمن با خطای ۴/۲ درصدی همراه بود، حال آنکه رفتار روش دمپستر-شافر در مواجهه با این شرایط بهبود یافته و میانگین خطایی برابر ۳/۱ درصد داشت. در شرایط محیطی واقعی و آزمایش عملی نیز روش دمپستر-شافر ارتقاء یافته (یاگر) نسبت به فیلتر کالمن عملکرد دقیق‌تری دارد. در انتها لازم به ذکر است که با توجه به میزان خطای اندک روش دمپستر-شافر ارتقاء یافته در محیط واقعی، تجهیزات تراکتور مدل را می‌توان در مقیاس صنعتی و برای تراکتورهای کشاورزی واقعی استفاده نمود که گامی بلند در راستای اتوماسیون ماشین‌های کشاورزی است.

### کلمات کلیدی

اتوماسیون ماشین‌های کشاورزی، سنسورهای موقعیت‌یابی، ربات متحرک، روش‌های تلفیق داده

### مقدمه

واحد سطح، به حداقل رساندن شرایط کاری سخت، خطرزا و طولانی، همراه با نظارت و کنترل دقیق امری اجتناب‌ناپذیر در کشاورزی مدرن است. این سامانه‌ها

استفاده از سامانه‌های خودکار و هوشمند در بخش کشاورزی برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها، تولید بیشتر در

آخر در زمینه تلفیق داده‌ها انجام شده است اما هنوز فاصله زیادی بین سیستم‌های هوشمند در این زمینه با توانایی موجودات زنده به خصوص توانایی مغز انسان وجود دارد (Hall & Llinas, 1997). شبکه عصبی مصنوعی از جمله ابزارهای تلفیق داده است که در سطوح مختلف داده می‌توان از آن بهره جست (Denoeux *et al.*, 2017) همچنین استفاده از منطق فازی به عنوان ابزار تلفیق داده خطای برآورد و وضعیت سامانه را کاهش می‌دهد و خروجی سامانه تلفیق داده را می‌توان در موقعیت‌یابی بهتر و دقیق‌تر وسایل نقلیه به کار گرفت (Panl & Deng, 2018).

در بحث موقعیت‌یابی وسایل نقلیه استفاده از تلفیق داده‌های حسگرهای با مکانیزم‌های متفاوت در کنار هم نتایج دقیق‌تری نسبت به استفاده از داده‌های یک نوع حسگر به دست می‌دهد، چرا که در این صورت منابع داده مختلف، نقاط ضعف یکدیگر را به خوبی پوشش می‌دهند (Subramanian *et al.*, 2016). از جمله بهترین حسگرها در موقعیت‌یابی ربات‌های سیار می‌توان ژيروسکوپ ارتعاشی و شیب‌سنج (Lu *et al.*, 2016) و سیستم موقعیت‌یاب جهانی و حسگر اثر ماند (Gazavati *et al.*, 2015) نام برد.

در سال ۱۹۷۶ گلن شافر (Shaffer, 1976) تئوری شواهد را که بعدها با نام تئوری دمپستر-شافر شناخته شد معرفی کرد. اساس این روش تلفیق داده بر نظر و یا اعتقاد شواهد می‌باشد که می‌تواند نقص اطلاعات را مدیریت نماید. این نظریه تفسیری مجدد از پژوهش‌های آرتور دمپستر (Dempster, 1967) است که شافر آن را تا حد زیادی اصلاح نموده است. نظریه دمپستر شافر تعمیمی از نظریه بیزین<sup>۱</sup> است که به صورت گسترده در علوم کامپیوتر و هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گرفته است و شباهت‌هایی با مجموعه‌های فازی دارد (Shi *et al.*, 2019) و می‌توان از منطق فازی در وزن‌دهی نظریه دمپستر شافر بهره برد (Liu *et al.*, 2018).

می‌توانند میزان تولید محصولات کشاورزی را به مقدار قابل توجهی افزایش دهند از این‌رو یکی از ایده‌های اصلی برای ریشه‌کنی فقر و گرسنگی در جهان، گسترش این تجهیزات است. بنابراین تحقیق و پژوهش در این زمینه از اهمیت بسیار ویژه و خاصی برخوردار است و در بسیاری از کشورهای پیشرفته جهان، اتوماسیون تجهیزات کشاورزی به طور جدی پیگیری می‌شود. ایده وسایل نقلیه کشاورزی خودران و نمونه آزمایشی یک تراکتور کشاورزی مدل بدون راننده که از طریق یک کابل کنترل می‌شد، به دهه ۱۹۶۰ میلادی برمی‌گردد. مورگان (Morgan, 1958) در صدد ساخت تراکتوری خودکار برای انجام کارهای کشاورزی به مانند برداشت و شخم‌زنی بود. در دهه ۱۹۸۰ میلادی با گسترش علوم رایانه و توانایی استفاده از حسگرهای بینایی، موقعیت‌های جدیدی حوزه ربات‌های خودران ایجاد نمود که برای اولین بار توسط محققین دانشگاه میشیگان و دانشگاه تگزاس مورد استفاده قرار گرفت و در همین دهه برای اولین بار ربات کشاورزی برداشت پرتقال توسط محققین دانشگاه فلوریدا طراحی و ساخته شد (Edan, 1995). با گسترش تحقیقات در این حوزه و توسعه ابزارهای مورد استفاده در هدایت ربات‌ها از جمله حسگرهای نوری، فراصوتی و رادیویی، مساله افزایش دقت و سرعت عمل این ربات‌ها مورد توجه قرار گرفت (Xiao, 2020). همچنین برای شبیه‌سازی و کنترل تراکتور مدل، یوتانگ و سانگ (Yutang & Yong, 2019) از یک مدل سینماتیکی چهار چرخ با جزئیات کامل استفاده کردند.

تلفیق داده ابزاری است برای ترکیب داده‌های چند منبع اطلاعات و یا داده که برای به دست آوردن یک تصویر کلی روشن‌تر از مساله مورد بررسی و اندازه‌گیری به کار می‌رود. در سال ۱۹۹۳ تعریفی از تلفیق داده‌های حسگری ارائه شد که در آن به تلفیق داده‌های حسگری، چه از یک نوع و چه از منابع مختلف داده پرداخته شده است (Klein, 1993). تحقیقات زیادی به خصوص در سال‌های

هدف از انجام این پژوهش، اتوماسیون تجهیزات کشاورزی با استفاده از تلفیق داده موقعیت یاب جهانی و واحد اندازه‌گیری ماند به کمک نظریه دمپستر شافر ارتقاء یافته و هم‌چنین فیلتر کالمن است. این پژوهش با ارائه روشی جدید برای وزن‌دهی ابتدایی اطلاعات از دقت مناسبی در کاربردهای عملی برخوردار است که نتایج به دست آمده بر روی تراکتور مدل ساخته شده نیز گواه این مسله می‌باشد. لذا با وجود چنین دستاوردهایی می‌توان به ساخت تراکتورهایی در مقیاس صنعتی امیدوار بود که روشی مؤثر برای افزایش تولید محصول، کاهش هزینه‌های تولید و در نتیجه ریشه‌کنی فقر می‌باشد.

داده‌های واقعی منطبق نباشد. اما تئوری دمپستر- شافر ارتقاء یافته با نقص مدل یا نقص اطلاعات قبلی محدود نمی‌شود. در این روش، که شباهت زیادی به روش بیزین دارد (Rezaee, 2017) شواهد صرفاً بر اساس داده‌های به دست آمده تعیین می‌شود و داده‌های مفروضی وجود ندارد. در انتها نیز با توجه به میزان قابلیت اعتماد هر یک از سنسورها ضریب اطمینانی به داده‌های هر یک از شواهد اضافه می‌شود. این ضریب می‌تواند مسئله تضاد در بین شواهد را از میان بردارد. و به هر چه واقعی‌تر شدن تصمیمات کنترلی تراکتور مدل کمک نماید (برای درک هرچه بهتر مسئله تضاد کفایت شرایطی را فرض کنید که یکی از سنسورها خراب شده و اطلاعاتی کاملاً غلط ارسال می‌نماید. در این صورت با قرار دادن ضریب اطمینان و استفاده از روش یاگر می‌توان به حرکت صحیح تراکتور ادامه داد). بنابراین این روش ابزاری سریع و دقیق برای تلفیق داده‌های ناقص می‌باشد. مزیت حیاتی نظریه شواهد آن است که این روش به نحوی طراحی شده است تا بتواند در سطوح مختلفی از مقادیر اعتقادی شواهد، با موفقیت به جمع‌بندی آنها بپردازد و در این زمینه نیازی به تحصیل و تزریق اطلاعات اضافه ندارد. بر اساس این نظریه مجموعه‌ای از برآوردهای شواهد از یک سوژه که کمی شده و سپس در ضریب اطمینان مربوطه خود ضرب گردیده سپس برای ایجاد هم‌افزایی و تحصیل برآوردی دقیق‌تر با هم تلفیق می‌شود.

#### وزن‌دهی اولیه منابع حسگری در روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته

برای تلفیق داده‌های حسگری توسط روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته بایستی به هر کدام از منابع داده به صورت آنلاین یک وزن اختصاص داد. به همین منظور در ابتدا به کمک انحراف معیار داده‌ها و با استفاده روابط ۱ و ۲ برای هر  $n$  داده آخر تولید شده، میزان اعتبار داده‌های هر حسگر مشخص می‌شود. بدین نحو که اگر انحراف معیار  $n$  داده

هدف از انجام این پژوهش، اتوماسیون تجهیزات کشاورزی با استفاده از تلفیق داده موقعیت یاب جهانی و واحد اندازه‌گیری ماند به کمک نظریه دمپستر شافر ارتقاء یافته و هم‌چنین فیلتر کالمن است. این پژوهش با ارائه روشی جدید برای وزن‌دهی ابتدایی اطلاعات از دقت مناسبی در کاربردهای عملی برخوردار است که نتایج به دست آمده بر روی تراکتور مدل ساخته شده نیز گواه این مسله می‌باشد. لذا با وجود چنین دستاوردهایی می‌توان به ساخت تراکتورهایی در مقیاس صنعتی امیدوار بود که روشی مؤثر برای افزایش تولید محصول، کاهش هزینه‌های تولید و در نتیجه ریشه‌کنی فقر می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش نظریه شواهد دمپستر- شافر ارتقاء یافته به عنوان ابزار تلفیق داده‌های حسگرهای موقعیت استفاده شد. این داده‌ها قبل از اعمال این ابزار، مورد تحلیل قرار گرفته و وزن‌دهی شدند. با ارائه روشی جدید، وزن‌دهی ابتدایی به اطلاعات هر یک از این حسگر موقعیت‌یابی جهانی و دورسنج چرخ‌ها با توجه به میزان اطمینان از صحت هر یک انجام شد و از یک کنترلر PID جهت کنترل سینماتیکی و اطمینان از صحت الگوریتم‌های موقعیت‌یابی ربات استفاده شد و در محیط شبیه‌سازی MATLAB پیاده‌سازی گردید. در ادامه یک تراکتور چهارچرخ قابل کنترل در سرعت، زاویه فرمان و مرکز ثقل در نرم‌افزار Solid شبیه‌سازی، طراحی شد که در طی این پژوهش نتایج شبیه‌سازی از مدل طراحی شده و نتایج عملی از تراکتور ساخته شده، استخراج شده است.

#### نظریه دمپستر- شافر ارتقاء یافته (یاگر)

اکثر ابزارهای تلفیق داده در مواجهه با بی‌اطلاعی و نقص داده‌های حسگری عملکرد قابل اعتمادی ندارند؛ چرا که در این حالت، این روش‌ها بایستی فرض‌هایی در مورد داده‌های حسگری در نظر بگیرند که ممکن است با

هر چه میزان آنتروپی داده‌های یک حسگر بزرگ‌تر باشد، میزان اعتماد به آن کمتر بوده و در نتیجه وزن اختصاص داده شده کمتر خواهد بود. در این پژوهش مقدار  $n$  برابر با ۵۰ در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن این نکته که فاصله نمونه‌برداری حسگرهای موقعیت ربات در مجموع ۰/۴ ثانیه است و در هر بار محاسبه مقادیر وزن حداقل از ۵۰ درصد داده جدید استفاده شد، بنابراین مقادیر وزن دهی اولیه در هر یک ثانیه یک بار به روزرسانی می‌شد.

### روش فیلتر کالمن

فیلتر کالمن یکی از بهترین الگوریتم‌های پیش‌بینی‌کننده حالت سیستم در آینده است. این مدل، خطی دارای کمترین ضریب خطا و نیز بهترین روش در شرایط دریافت سیگنال‌های نویزی است. فیلتر کالمن به طور موفقیت‌آمیزی در پیش‌بینی رخداد عیوب ناگهانی در ماشین‌ها به کار رفته است. در این روش رابطه بین حالت سیستم، نویز و داده‌های خروجی به شکل رابطه ۶ در نظر گرفته می‌شود:

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (6)$$

که در آن،  $X$  = تمام اطلاعات حال حاضر سیستم؛  $h$  = تابعی غیرخطی که حالت  $X$  را به خروجی مربوط می‌سازد؛ و  $Z$  = خروجی و یا داده‌های اندازه‌گیری شده.

داده‌های اندازه‌گیری شده تابعی از حالت سیستم است. از این‌رو با استفاده از نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌ها توسط فیلتر کالمن به حدس درباره چگونگی حالت سیستم در حال حاضر و نیز پیش‌بینی حالت آن در آینده پرداخته می‌شود. تعیین وضعیت کنونی و پیش‌بینی آن در آینده در فیلتر کالمن با استفاده از داده‌های حالات گذشته و با تاکید بیشتر بر داده‌های نزدیک‌تر به زمان حال انجام می‌گیرد. رابطه ۷ بیان می‌کند که حالت کنونی سیستم،

آخر از مقدار مشخص  $\alpha$  کوچک‌تر باشد یعنی پرش‌های ناگهانی کمتری رخ داده و اطمینان ما به حسگر مورد نظر بیشتر است و اگر انحراف معیار بزرگ‌تر از آن مقدار باشد قابلیت اطمینان کمتر خواهد بود. مقادیر  $\alpha$  و  $n$  به صورت تجربی و بر اساس رفتار داده‌های حسگری و نظر خبره تعیین می‌گردد. در ابتدا واریانس داده‌های هر یک حسگر از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Highly reliable level } (c_1=1) & \quad \sigma^2 \leq \alpha \\ \text{Poorly reliable level } (c_2=2) & \quad \sigma^2 > \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

با هر داده جدید واریانس  $n$  داده آخر به روزرسانی شده و سطوح اعتماد بالا و پایین مشخص می‌شود. مقادیر به دست آمده در رابطه ۲ در روابط شانون<sup>۱</sup>، مطابق رابطه ۳ استفاده می‌شوند (Lu et al., 2016).

$$P_{1t}^c = \frac{\int c_{1t}}{\int c_{1t} + \int c_{2t}}, \quad P_{2t}^c = \frac{\int c_{2t}}{\int c_{1t} + \int c_{2t}} \quad (3)$$

پس از به دست آمدن ضرایب آنتروپی از رابطه ۳، معیار آنتروپی با استفاده از رابطه ۴ برای هر یک از حسگرها به صورت زیر به دست می‌آید:

$$H_{it} = \sum_{c=1}^2 p_{it}^c \log_2 p_{it}^c \quad (4)$$

در نهایت به کمک آنتروپی به دست آمده برای هر حسگر وزن آن از رابطه ۵ مشخص خواهد شد.

$$W_{it} = \frac{1}{(H_{it})^2 \sum_{i=1}^I (H_{it})^{-2}} \quad (5)$$

$$v_x = v, v_y = 0 \quad (8)$$

که در آن،

$$v = \text{سرعت کلی تراکتور مدل.}$$

برای محاسبه سرعت زاویه‌ای از فاصله تراکتور تا مرکز دوران و همچنین سرعت خطی تراکتور استفاده شد. رابطه ۹ نشان‌دهنده سرعت زاویه تراکتور در هنگام دوران است. با توجه به شکل سینماتیکی تراکتور مدل و روابط هندسی به جای  $R_1$  از مقدار  $\frac{L}{\tan\gamma}$  استفاده شد. که  $L$  نشان‌دهنده طول کلی تراکتور مدل است.

$$\theta = \frac{V}{R_1} \quad (9)$$

برای استخراج معادلات سینماتیکی تراکتور مدل، سرعت خطی به دست آمده در رابطه ۸ و سرعت زاویه‌ای به دست آمده در رابطه ۹ در دستگاه اقلیدسی  $\{O\}$  نوشته شد. روابط ۱۰ تا ۱۲ نشان‌دهنده روابط سینماتیکی کلی تراکتور مدل در این دستگاه مختصات است.

$$\dot{x} = v \cos(\theta) \quad (10)$$

$$\dot{y} = v \sin(\theta) \quad (11)$$

$$\theta = \frac{V}{L} \tan\gamma \quad (12)$$

با توجه به رابطه ۱۲، چنان چه سرعت خطی تراکتور مدل صفر باشد، سرعت زاویه آن نیز صفر می‌گردد. لذا این نتیجه حاصل می‌شود که تراکتور برای حرکت چرخشی خود نیازمند حرکت انتقالی رو به جلو است. از روابط ۱۰ تا ۱۲ برای شبیه‌سازی در محیط Simulink استفاده شد.

تابعی از حالت گذشته، اعمال کنترل در ورودی و نیز میزان نویز است.

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (7)$$

که در آن،

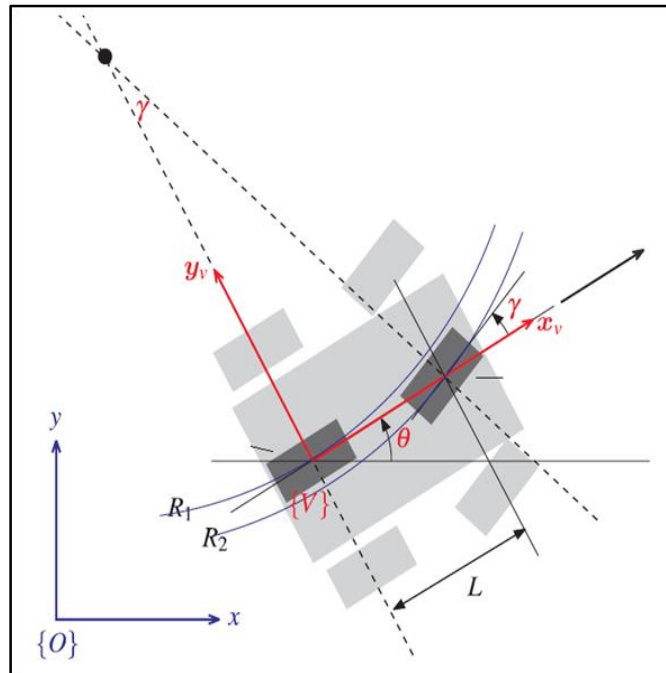
$u$  به اعمال کنترل در ورودی (ورود عمده‌های آشنا به سیستم) و  $w$  به نویز مربوط هستند.

شبیه‌سازی حالت سیستم با یک جابجایی گوسی با کواریانس مشخص  $Q_k$  است. با استفاده از روابط ۶ و ۷ و فرض یک تابع خطی برای پارامتر  $f$  می‌توان به تلفیق داده‌های مختلف  $z$  سگرها پرداخت و نتیجه حاصل از این تلفیق را به عنوان پارامتر  $z$  یا همان داده خروجی در نظر گرفت.

#### مدل‌سازی سینماتیکی تراکتور

با توجه به این‌که در تراکتور مدل مورد بررسی در این پژوهش تنها دو چرخ جلو فرمان‌گیر هستند، از مدل سینماتیکی دوچرخه‌ای مطابق شکل ۱ استفاده شد. پیکربندی مدل نیز به وسیله مختصات عمومی  $q=(x, y, \theta) \in C$  که در آن  $C$  یک فضای دو بعدی اقلیدسی است تعریف شد و با توجه به شکل یک مدل غیر هولونومیک<sup>۱</sup> از تراکتور مدل به دست آمد.

حرکت تراکتور مدل در راستای طولی  $v_x$  و راستای عرضی تراکتور  $v_y$  فرض شد. تراکتور مدل در راستای عرضی خود لغزشی ندارد و همچنین به دلیل سرعت پایین حرکت از لغزش‌های طولی و نیروهای مجازی گریز از مرکز وارده بر تراکتور مدل صرف‌نظر شد. با توجه به توضیحات ارائه شده رابطه ۸ نشان‌دهنده سرعت حرکت تراکتور در هر زمان کاری است.



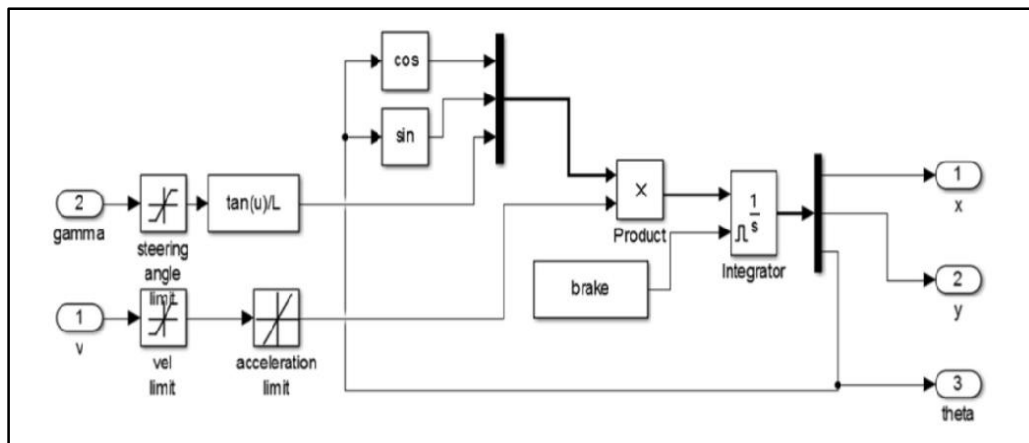
شکل ۱- مدل دوچرخه‌ای برای تحلیل سینماتیکی تراکتور مدل

Fig. 1- Bike model in four wheel tractor for kinematic analysis

خروجی مختصات طولی و عرضی و زاویه نسبی تراکتور می‌باشد. سرعت و زاویه فرمان‌گیری در مدل واقعی دارای محدودیت‌هایی است که در شبیه‌سازی نیز لحاظ شد. در شکل ۲ شمای کلی سینماتیکی رسم شده در محیط شبیه‌ساز Simulink نمایش داده شده است در این شکل می‌توان ورودی‌ها، خروجی‌ها و محدودیت‌های اعمال شده را مشاهده نمود.

تراکتور مدل دارای محدودیت سرعت یک متر بر ثانیه (۳٫۶ کیلومتر بر ساعت) در حالت حرکت انتقالی و محدودیت زاویه‌ای ۴۵ درجه ( $\gamma_{max} = \frac{\pi}{8}$ ) برای چرخ‌های جلو و حرکت دورانی است.

با توجه به مدل سینماتیکی تراکتور، شبیه‌سازی آن در محیط Simulink نرم‌افزار Matlab انجام شد. مدل اولیه تراکتور دارای دو ورودی سرعت و زاویه فرمان و سه



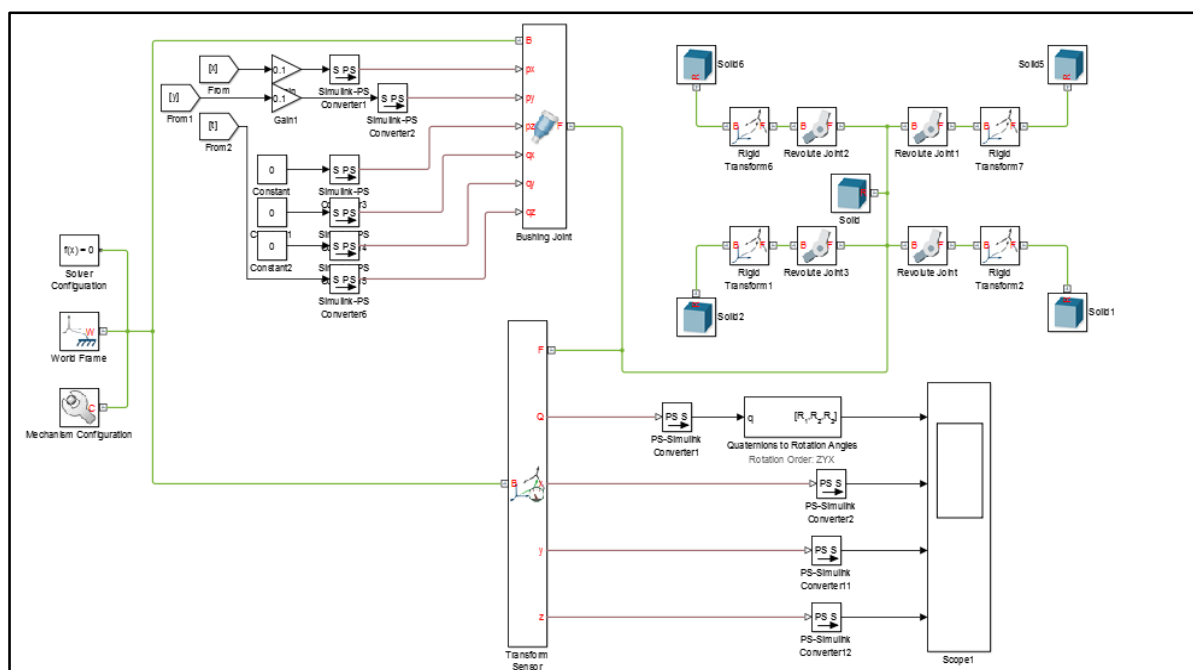
شکل ۲- شبیه‌سازی سینماتیکی تراکتور مدل

Fig. 2- Kinematic simulation of model tractor

وجود دارد. در شکل ۴ تصویری کلی از تراکتور مدل شبیه‌سازی شده در محیط SimMechanics به همراه توضیحات هر یک از اجزا رسم شده در Solidworks ارائه شده است (لازم به توضیح است که هر دو شکل ۳ و ۴ دارای یک مضمون بوده و شکل ۴ صرفاً برای درک بهتر از شبیه‌سازی هر یک از اجزا تراکتور مدل آورده شده است).

تراکتور مدل در این پژوهش دارای طول ۱۰۰ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر است و به همراه یک موتور بنزینی کوچک، یک سیستم انتقال قدرت تک سرعت و ساختار بدنه و شاسی فولادی ساخته شده است. در شکل ۵ نمای کلی تراکتور مدل و بخش‌های کلی آن شامل سیستم‌های پنوماتیکی، بدنه شاسی، نیروی محرکه و انتقال قدرت و بخش الکترونیکی ارائه شده است.

به منظور اضافه نمودن قیدهای حرکتی تراکتور مدل مورد بررسی که یک تراکتور مدل منحصر به فرد است، در محیط SimMechanics، ساختار تراکتور با لحاظ کردن جزئیات آن شبیه‌سازی شد. در شکل ۳ قسمت‌های مختلف تراکتور مدل که در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شده، به محیط SimMechanics توسط بلوک‌ها<sup>۱</sup> آورده شدند. بلوک‌ها در این محیط توسط مفاصل مناسب به یکدیگر مونتاژ می‌شوند تا بتوانند به خوبی رفتار وسیله نقلیه را نشان دهند. اتصال چرخ‌ها به محورها توسط مفاصل<sup>۲</sup> و اتصال محور به بدنه توسط مفاصل غلاف‌دار<sup>۳</sup> انجام گرفت. از اصطکاک بین این مفاصل به دلیل ناچیز بودن صرف‌نظر شد. همچنین با توجه به معادلات سینماتیکی برای حرکت چرخ‌ها بر روی زمین غلتش کامل در نظر گرفته شد. لذا بین چرخ‌های تراکتور مدل و زمین در محیط نرم‌افزار نیروی اصطکاک غلتشی

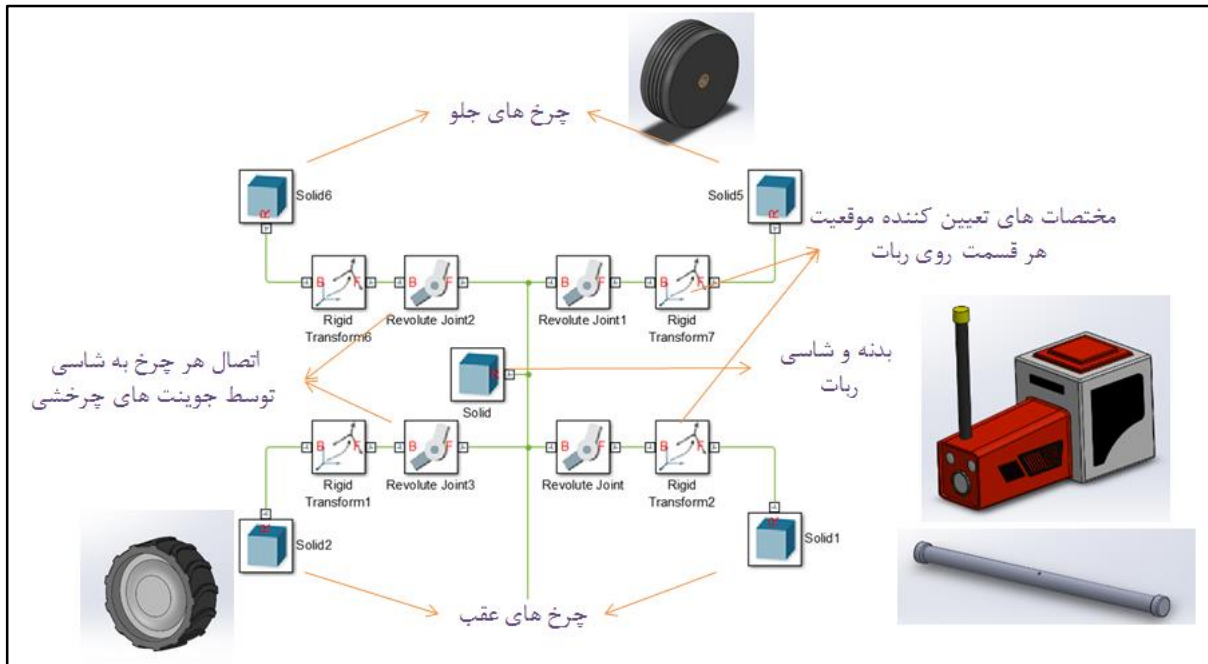


شکل ۳- شبیه‌سازی ساختار مکانیکی تراکتور مدل

Fig. 3- mechanical structure simulation of the tractor

- 1- Solid
- 3- Bushing Joint

- 2- Revolute Joint



شکل ۴- شبیه‌سازی ساختار مکانیکی تراکتور به همراه اجزای تشکیل‌دهنده آن  
 Fig. 4- Mechanical structure simulation of the tractor with its components



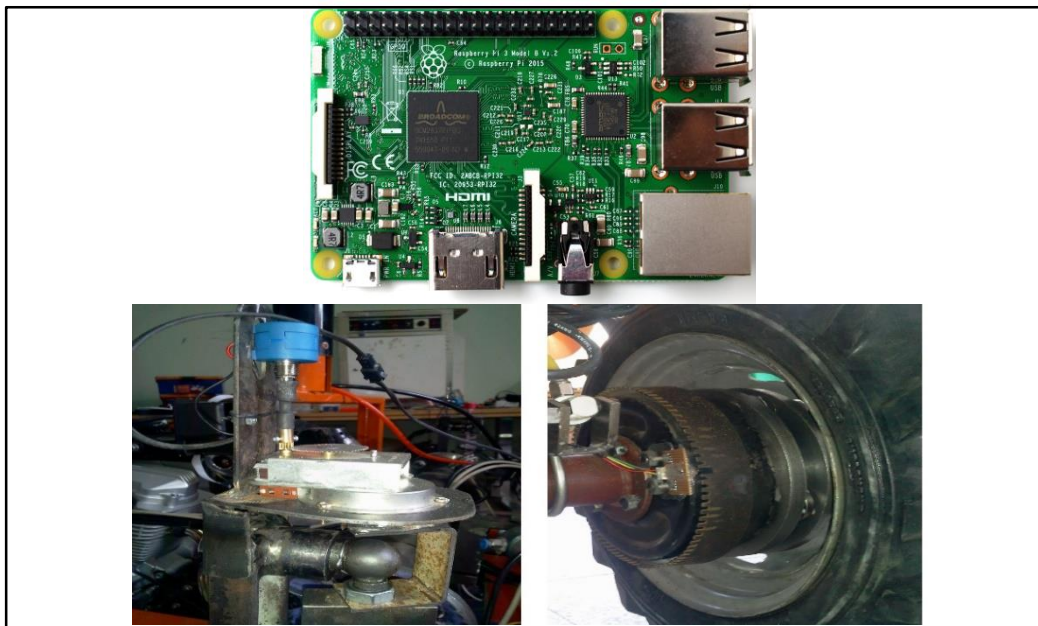
شکل ۵- نمایش اجزای تراکتور رباتیک به همراه شکل شبیه‌سازی شده آن  
 Fig. 5- Robotic tractor components along with its simulated shape



## داده‌برداری و پردازش اطلاعات

حسگرهای موقعیت‌یاب جهانی، قطب‌نمای دیجیتال بر روی بدنه تراکتور مدل (شکل سمت چپ) و حسگرهای موقعیت‌یاب و شمارنده نسبی در زیر تراکتور و در کنار چرخ (شکل وسط) قرار داده شد. در جدول ۱ لیست حسگرهای نصب شده بر روی تراکتور ارائه شده است.

مطابق شکل ۶ حسگرهایی بر روی تراکتور مدل نصب شد. این حسگرها به منظور گزارش موقعیت و زاویه تراکتور هستند. با استفاده از تلفیق داده‌های به دست آمده از هر چهار حسگر، موقعیت و زاویه تراکتور مدل قابل دست‌یابی است. لازم به توضیح است که



شکل ۶- کامپیوتر مجتمع و حسگرهای نصب شده بر روی تراکتور مدل  
Fig. 6- Integrated computer and sensors installed on the model tractor

جدول ۱- لیست حسگرهای نصب شده بر روی تراکتور

Table 1- Installed sensors on the tractor

کشور سازنده	مدل	نام لاتین	نام حسگر
تایوان	Ub1OX NEO-M5	GPS	حسگر موقعیت‌یاب جهانی
چین	ADXL345	IMU	حسگر اندازه‌گیری ماند
انگستان	HMC5883	Digital Compass	قطب‌نمای دیجیتال
چین	HY860	Incremental Encoder	شمارنده نسبی

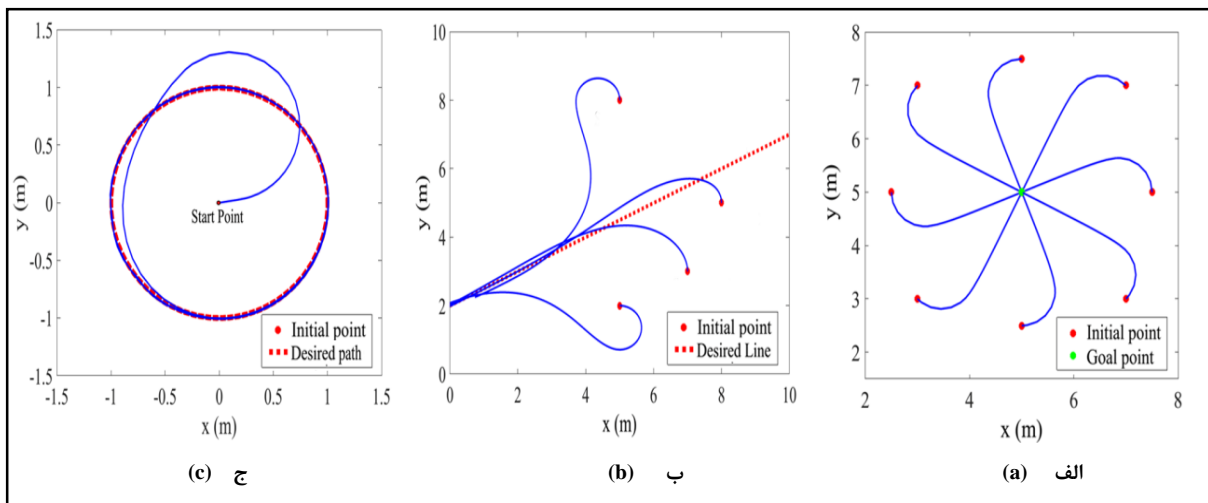
کنترلی در محیط Simulink با برد موردنظر از پکیج MATLAB® Support Package for Raspberry Pi® استفاده شد. این پکیج در سال ۲۰۱۴ به نرم‌افزار MATLAB اضافه شده و قابلیت برقراری ارتباط (اینترفیس) با کامپیوترهای مجتمع سری Raspberry Pi را دارد.

از یک کامپیوتر مجتمع مدل Raspberry Pi3 به عنوان برد پردازش اطلاعات استفاده شد. تمامی مراحل دریافت داده‌های حسگرها از طریق اتصالات روی این برد انجام شده و همچنین طراحی کنترلر در محیط برنامه‌نویسی ترمینال این کامپیوتر مجتمع صورت گرفته است. برای برقراری ارتباط و تطبیق اطلاعات

### ارزیابی کنترل تراکتور مدل

در این بخش حرکت تراکتور از یک نقطه اولیه به سمت یک نقطه هدف  $(x^*, y^*)$ ، به سمت خط مفروض  $ax+by+c=0$  و نهایتاً به سمت یک مسیر مفروض در صفحه  $xy$  مورد بررسی قرار گرفت. در بخش اول از یک کنترلر تناسبی<sup>۱</sup> برای اعمال ورودی به مدل سینماتیک تراکتور مدل استفاده شد و حرکت تراکتور از یک نقطه ابتدایی در صفحه به یک نقطه نهایی مشخص، بررسی شد. یکی دیگر از ماموریت‌های مهم تعریف شده برای تراکتور مدل حرکت به سمت یک خط مشخص و دنبال کردن آن بود. خط مفروض  $ax+by+c=0$  در نظر گرفته شده است و دو کنترل‌کننده برای کنترل فرمان و منطبق کردن جهت ربات با خط مفروض طراحی شده است. سناریوی دیگری که عملکرد سیستم کنترل تراکتور

را مورد بررسی قرار می‌دهد حرکت به سمت یک مسیر مشخص در صفحه  $xy$  است. در این حالت تراکتور از یک نقطه اولیه دلخواه شروع به حرکت نموده و در کوتاه‌ترین حالت ممکن در مسیر مشخص شده قرار می‌گیرد. این مسیر می‌تواند از پشت سر هم قرار دادن مختصات که تراکتور بایستی بپیماید حاصل شود. کنترل حرکت تراکتور در این حالت بسیار شبیه به حالتی است که تراکتور به یک نقطه هدف در حرکت است، با این تفاوت که در این حالت نقطه هدف متحرک می‌باشد و ربات همواره به فاصله کوتاهی  $(d^*)$  از نقطه هدف قرار دارد. در این بخش برای کنترل سرعت و زاویه فرمان از کنترل‌کننده PI استفاده شد. در شکل ۷ مسیر حرکت تراکتور به سمت اهداف مختلف و صحت عملکرد سیستم کنترل را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مسیر حرکت تراکتور از نقطه اولیه دلخواه به سمت اهداف مختلف

(الف) حرکت به سمت یک نقطه، (ب) حرکت به سمت یک خط مفروض و (ج) حرکت به سمت یک مسیر دلخواه

Fig.7 -The path of the tractor from an arbitrary point to different destinations  
 a) Move to a point, b) Move to an assumed line and c) Towards an arbitrary path

مطابق رابطه ۱۳ و ۱۴ و همچنین از معیار مجذور مربعات خطا<sup>۳</sup> مطابق رابطه ۱۵ برای قسمت عملی تحقیق استفاده شد:

به منظور ارائه معیاری برای مقایسه نتایج عملکرد این دو ابزار در تلفیق داده‌های دو حسگر، از دو معیار متوسط انحراف مطلق<sup>۱</sup> و میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup>

1- Proportional  
 3- Mean-Square Error

2- Median Absolute Deviation  
 4- Root Mean-Square Error

یک مسیر مشخص نیم‌دایره‌ای شکل مقادیر حسگری توسط دو ابزار فیلتر کالمن و دمپستر- شافر ارتقاء یافته با یکدیگر تلفیق شد و سه سری نمودار که هر کدام مربوط به یکی از پارامترهای مشخص‌کننده موقعیت تراکتور مدل است ارائه شد.

در شکل ۸ دو نمودار ابتدایی مقدار پارامتر مکانی x حاصل از داده‌های منبع حسگری اول و منبع حسگری دوم به همراه نوفه نمایش داده شده است و در دو نمودار بعدی حاصل تلفیق این داده‌ها با استفاده از دو ابزار فیلتر کالمن و روش دمپستر- شافر نمایش داده شده است. این نمودارها در شکل ۹ برای پارامتر مکانی y در شکل ۱۰ برای زاویه ربات در یک بازه زمانی و مسیر مفروض گزارش شده است.

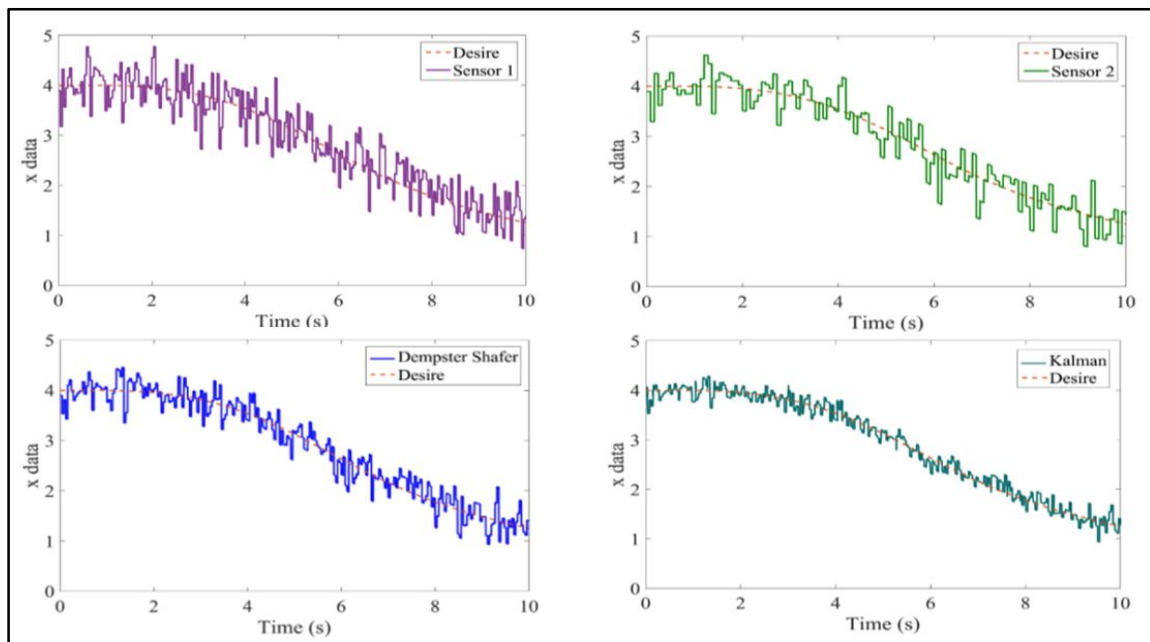
$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \sqrt{(x_t - x_{t,Actual})^2 + (y_t - y_{t,Actual})^2} \quad (13)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n ((x_t - x_{t,Actual})^2 + (y_t - y_{t,Actual})^2) \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (15)$$

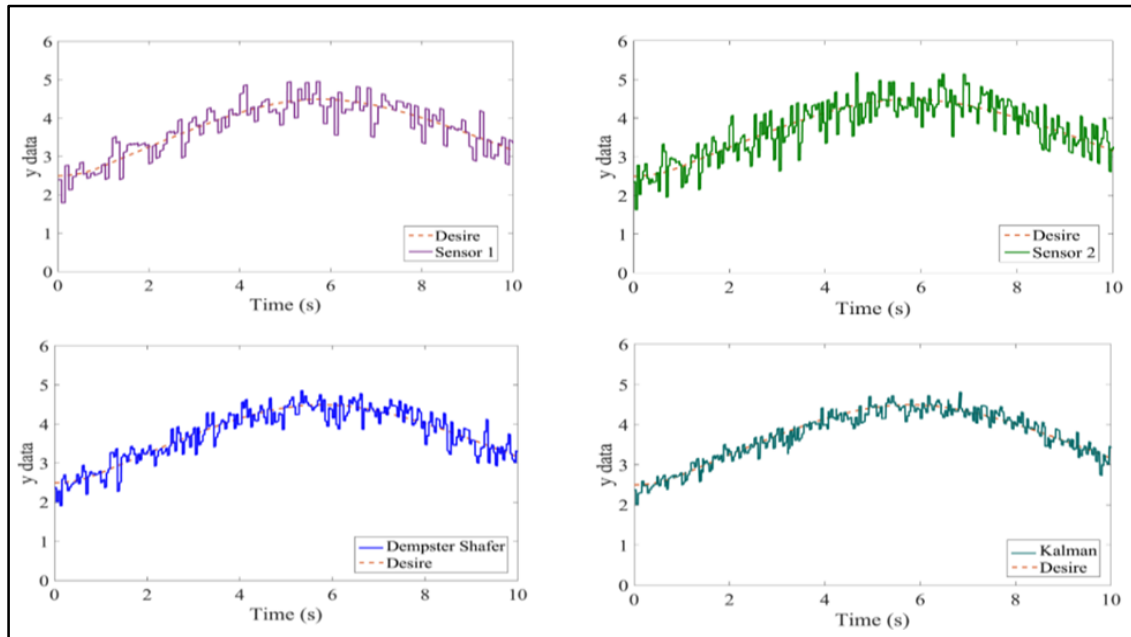
## نتایج و بحث

ابتدا داده‌های موقعیت‌یابی هریک دو منبع داده حسگری که یکی داده‌های حسگر موقعیت‌یابی جهانی و دومی مجموع داده‌های حسگر اثر ماند و دورسنج چرخ‌های عقب می‌باشد از بلوک‌های حسگری در محیط Simulink دریافت شده سپس ۱۰ در صد اغتشاش به عنوان نوفه و بایاس به داده‌های هر دو مجموعه اضافه شد. در ادامه برای



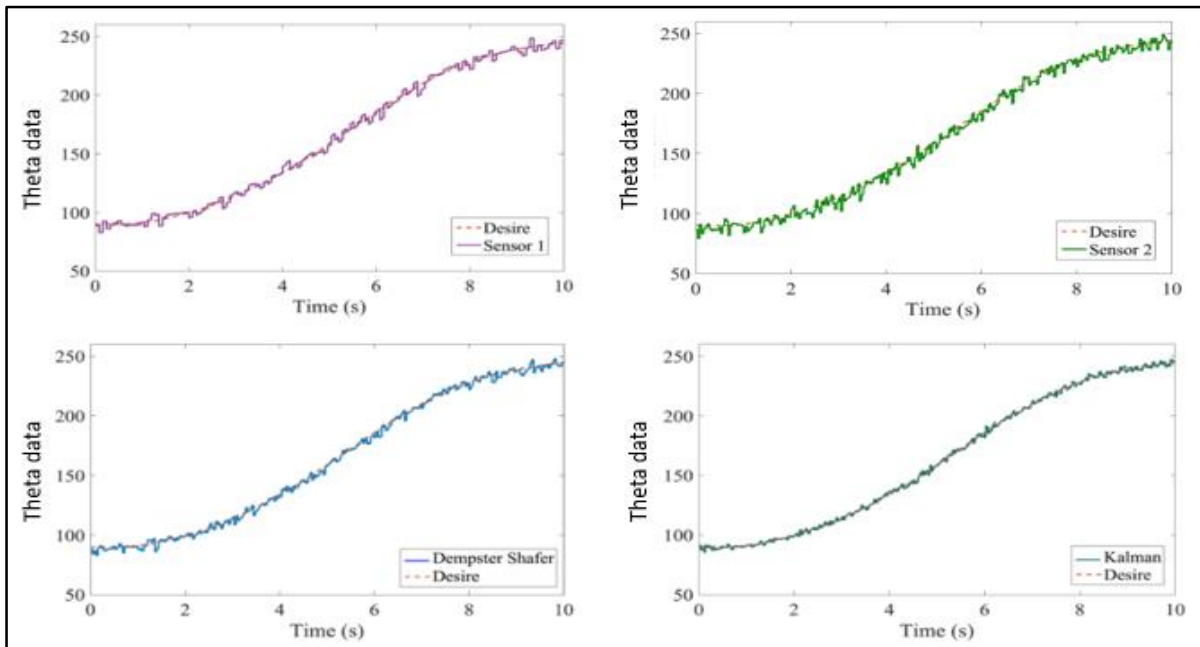
شکل ۸- مقدار پارامتر مکانی x حاصل از داده‌های منبع حسگری اول و منبع حسگری دوم به همراه نوفه (شکل‌های بالا) به همراه نتایج اعمال دو روش تلفیق داده در بهبود اندازه‌گیری این پارامتر (شکل پایین سمت چپ روش یاگر، شکل پایین سمت راست روش فیلتر کالمن)

Fig. 8- Values of parameter x of the two sensors' outputs with the results of two data fusion methods for improving parameter measurement



شکل ۹- مقدار پارامتر مکانی  $y$  حاصل از داده‌های منبع حسگری اول و منبع حسگری دوم به همراه نوفه (شکل‌های بالا) به همراه نتایج اعمال دو روش تلفیق داده در بهبود اندازه‌گیری این پارامتر (شکل پایین سمت چپ روش یاگر، شکل پایین سمت راست روش فیلتر کالمن)

Fig. 9- values of parameter  $y$  of the two sensors' outputs with the results of two data fusion methods for improving parameter measurement

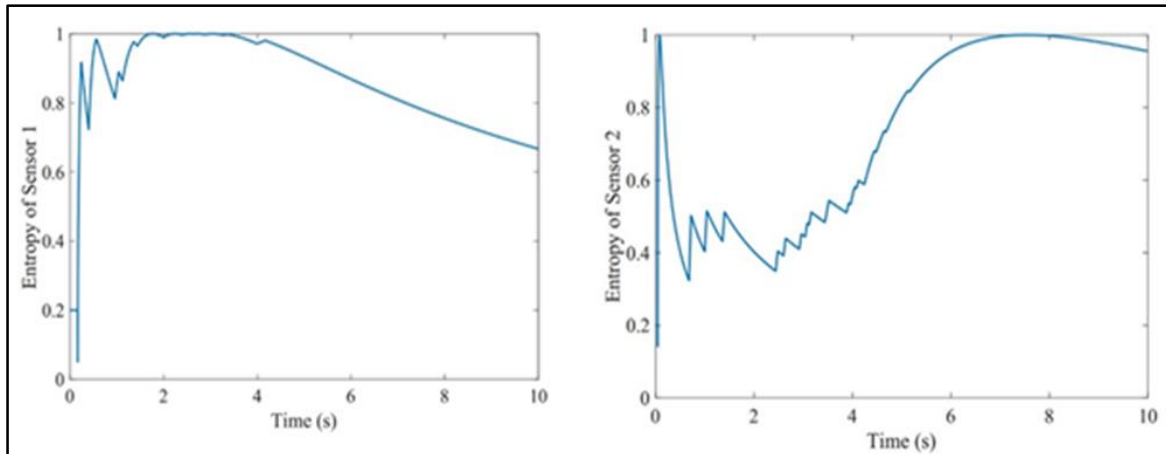


شکل ۱۰- مقدار پارامتر زاویه‌ریات حاصل از داده‌های منبع حسگری اول و منبع حسگری دوم به همراه نوفه (شکل‌های بالا) به همراه نتایج اعمال دو روش تلفیق داده در بهبود اندازه‌گیری این پارامتر (شکل پایین سمت چپ روش یاگر، شکل پایین سمت راست روش فیلتر کالمن)

Fig. 10- Values of parameter  $y$  of the two sensors' outputs with the results of two data fusion methods for improving parameter measurement

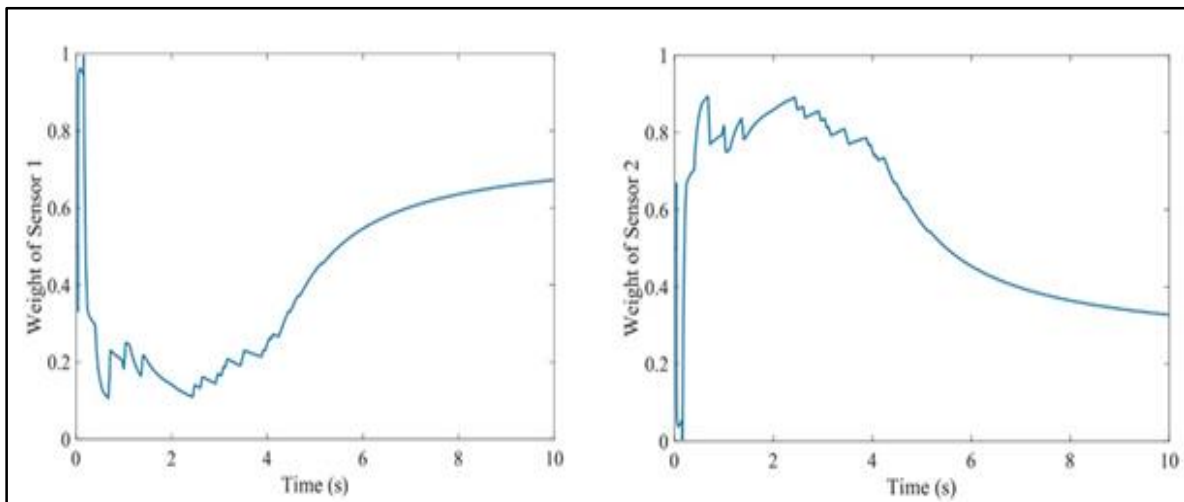
اشکال ۱۱ و ۱۲ در این روش هرچه بی‌نظمی داده‌های یک حسگر بیشتر باشد، اطمینان به آن کمتر و در نتیجه وزن اختصاص داده شده به آن حسگر کمتر خواهد بود. شکل ۱۱ نشان‌دهنده آنتروپی حسگرها با اعمال ۱۰ درصدی اغتشاش است.

با توجه به مقادیر داده‌های هر یک از دو حسگر مفروض در بخش قبل و معادلات ۲، ۳ و ۴، آنتروپی مربوط به دو حسگر به نحو نمایش داده شده در شکل ۱۱ حاصل شد. همچنین با توجه به رابطه ۵، وزن هر حسگر به صورت نمودار شکل ۱۲ به دست آمد. با توجه به نمودارهای



شکل ۱۱- نمودار آنتروپی داده‌های حسگرها

Fig. 11- Entropy diagram of sensors data



شکل ۱۲- نمودارهای وزن اختصاص داده شده به منابع حسگرها

Fig. 12- Weight charts dedicated to sensors sources

تعیین شده برای آن نیز کمتر از سنسور شماره دو (سنسور IMU) است. در توضیح کلی دو شکل ۱۱ و ۱۲ می‌توان گفت که این دو شکل رابطه معکوس با یکدیگر دارند و هرچه آنتروپی سیستمی کمتر باشد سیستم سنسور را

با توجه به نمودارهای اشکال ۱۱ و ۱۲ می‌توان دریافت سنسور موقعیت یاب جهانی (سنسور شماره یک) آنتروپی بیشتری نسبت به سنسور IMU (سنسور شماره دو) دارد لذا این سنسور قابلیت اطمینان کمتری داشته و ضریب

به داده‌های ورودی گوسی بود، فیلتر کالمن تخمین بهتری از حالت سیستم به دست داد چرا که این نوفه را به خوبی در ساختار خود مدل کرد. در تکرار ۵ و ۶، نوفه اعمال شده به حسگرها، نوفه غیرگوسی از نوع تخمینی هابر<sup>۱</sup> در نظر گرفته شد. که نتایج حاصل از این دو آزمایش نشان داد در صورتی که این شرایط خاص در نوفه داده‌های ورودی برقرار نباشد، میزان خطا در هر دو روش افزایش می‌یابد اما در مجموع روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته با خطای کمتری همراه است چرا که همانند آزمایش‌های قبل فرضی در مورد نوفه داده‌های حسگری انجام نداده است.

قابل اعتمادتر تشخیص داده و وزن اختصاصی به آن را افزایش می‌دهد. شبیه‌سازی ذکر شده در بخش قبل شش بار برای مسیرهای مختلف انجام شد و نتایج آن در جدول ۲ ارائه گردید. در چهار آزمایش اول نوفه اعمال شده به حسگرها، نوفه گوسی با میانگین صفر یا نوفه سفید بود. در این آزمایش‌ها روش فیلتر کالمن عملکرد بهتری نسبت به روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته دارد چرا که عملکرد این فیلتر در مواجهه با نوفه داده‌های ورودی، شبیه‌سازی حالت سیستم با یک حباب گوسی با کواریانس مشخص  $Q_K$  است. با توجه به این که در این آزمایش‌ها نوفه اعمال شده

جدول ۲- درصد خطای ابزارهای تلفیق داده‌های حسگرها بر اساس دو معیار MAD و MSE

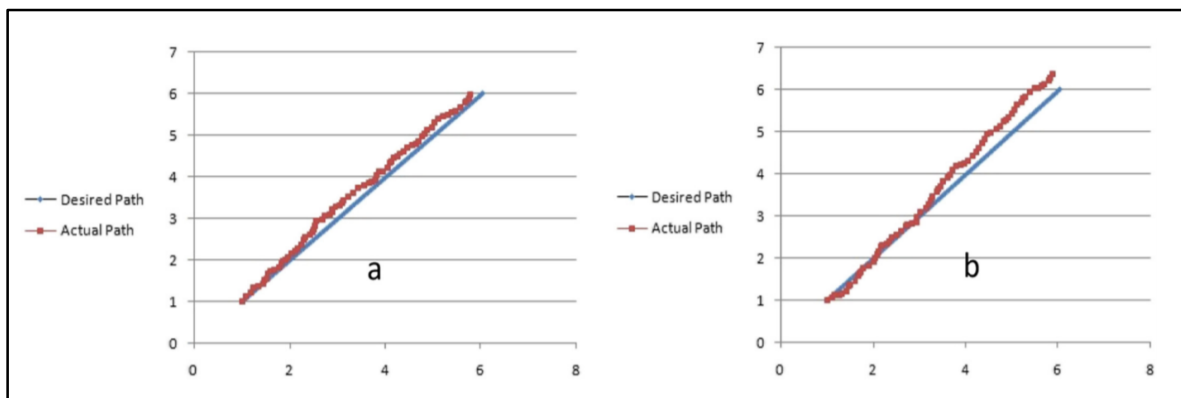
Table 2- The error percentage of the sensor data integration tools based on two MAD and MSE criteria

روش دمپستر - شافر ارتقاء یافته Dempster-Shafer method	روش کالمن Kalman method	معیار سنجش Benchmarking	شماره Number
1.97	1.45	MAD	1
4.75	2.59	MSE	
2.22	1.59	MAD	2
6.02	3.22	MSE	
1.93	1.42	MAD	3
4.76	2.62	MSE	
1.76	1.49	MAD	4
4.01	2.85	MSE	
1.77	2.03	MAD	5
3.45	5.23	MSE	
1.42	1.59	MAD	6
2.75	3.22	MSE	

مطلوب تراکتور مدل به همراه مقدار واقعی آن در مسیر دایره‌ای شکل نمایش داده شده است. برای مقایسه دو روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته و روش فیلتر کالمن از معیار مجذور میانگین مربعات خطا با توجه به رابطه ۱۵ استفاده شد. مقادیر این خطا در جدول ۳ ارائه شده است.

در آزمایش عملی تراکتور مدل، یک مسیر خطی و یک مسیر دایره‌ای به عنوان مسیر ایده‌آل حرکت تراکتور مدل به آن داده شد. در اشکال ۱۳ و ۱۴ مسیر ایده‌آل حرکتی و مسیری که به طور واقعی توسط تراکتور مدل پیموده شده، مشاهده می‌شود. همچنین در شکل ۱۵ زاویه جهت‌گیری

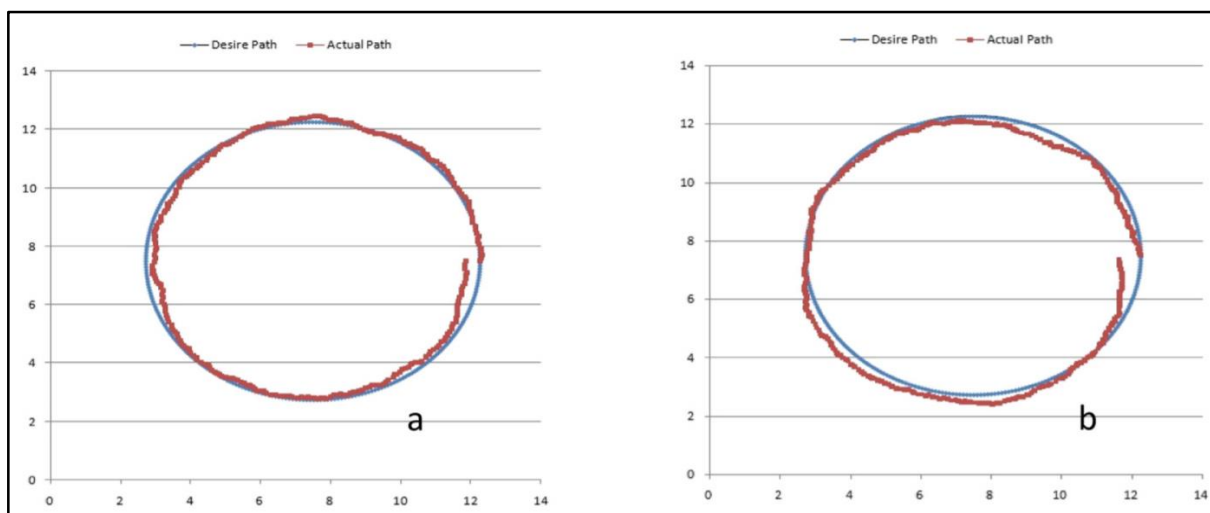
1- Huber Estimator with Robust Estimator Algorithm



شکل ۱۳- مسیر واقعی و مسیر ایده آل (a روش دمپستر شافر ارتقاء یافته و (b روش فیلتر کالمن

Fig. 13- Actual path and desired path

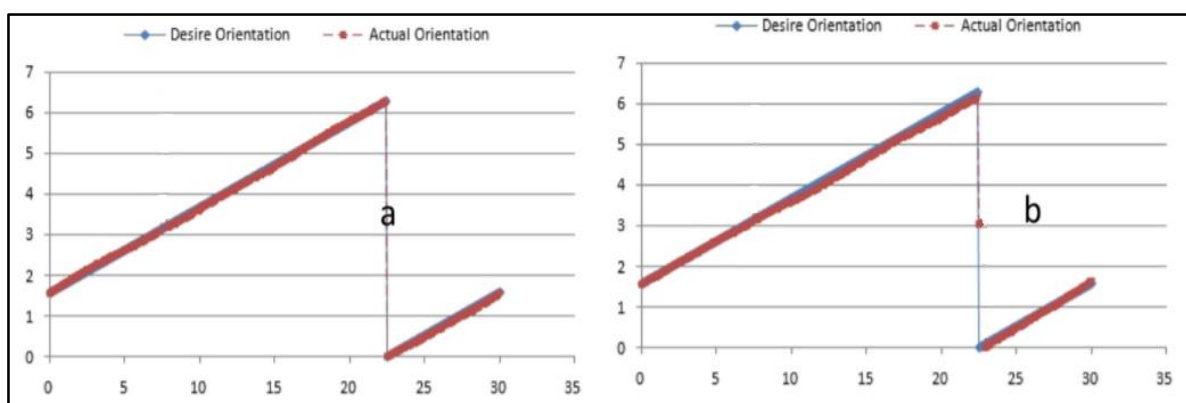
a) Dempster-Shafer method and b) Kalman Filter method



شکل ۱۴- مسیر واقعی و مسیر ایده آل (a روش دمپستر شافر ارتقاء یافته و (b روش فیلتر کالمن

Fig.14- Actual path and desired path

a) Dempster-Shafer method and b) Kalman Filter method



شکل ۱۵- زاویه جهت گیری واقعی و مطلوب تراکتور مدل در حرکت دایره ای (a روش دمپستر شافر ارتقاء یافته و (b روش فیلتر کالمن

(محور افق بر حسب زمان (ثانیه) و محور عمود بر حسب رادیان)

Fig. 15- The error between actual and desire orientation angles

a) Dempster-Shafer method and b) Kalman Filter method

جدول ۳- مقایسه عملکرد دو روش تلفیق داده در آزمایش عملی بر اساس معیار RMSE  
Table 3- Comparison of the performance of two data fusion tools in experimental test

RMSE	مسیر	روش تلفیق داده
0.156	حرکت خطی	روش دمپستر - شافر ارتقاء یافته
0.172	حرکت دایره‌ای	
0.31	خطای جهت‌گیری	
0.203	حرکت خطی	روش کالمن
0.224	حرکت دایره‌ای	
0.4	خطای جهت‌گیری	

دمپستر- شافر تلقی می‌شود و مثال نقضی بر اکثر پژوهش‌هایی است که در شبیه‌سازی نوفه حسگرها را به صورت نوفه سفید و یا گوسی شکل در نظر می‌گیرند. با توجه به محیط کاری تراکتور کشاورزی مورد بررسی در این پژوهش، نمی‌توان خطای داده‌های ورودی را همواره گوسی در نظر گرفت. لذا می‌توان گفت روش دمپستر- شافر عملکرد بهتری در مواجهه با مسائل واقعی دارد که این مورد در مقایسه عملکرد ابزارهای تلفیق داده مورد بررسی در این پژوهش نیز دیده می‌شود. در شرایط شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت که دارای نوفه‌های غیرگوسی است. استفاده از روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته با تعیین ضرایب بر اساس آنتروپی حسگرها، دارای میانگین خطایی برابر ۱/۵۹۵ درصد بر اساس معیار MAD و ۳/۱ درصد بر اساس معیار MSE است. که این مقادیر در روش فیلتر کالمن ۱/۸۱ درصد در معیار MAD و ۴/۵۲۲ درصد در معیار MSE است. در شرایط واقعی نیز روش دمپستر شافر ارتقاء یافته در حرکت دایره‌ای میانگین خطایی برابر ۰/۱۷۲ و روش فیلتر کالمن خطایی برابر ۰/۲۲۴ در معیار RMSE دارد. لذا استفاده از روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته به وسیله تعیین ضرایب متغیر برای ربات‌هایی که در محیط‌های سخت مانند زمین‌های کشاورزی فعالیت می‌کنند، توصیه می‌شود.

نتایج بخش عملی حاکی از این است که فرض اعمال نوفه‌های غیرگوسی برای شبیه‌سازی محیط واقعی فرضی درست بوده و با توجه به نتایج حاصل از آزمایش عملی که در جدول ۱۳ شاره شده، روش دمپستر- شافر ارتقاء یافته عملکرد بهتری نسبت به روش فیلتر کالمن دارد. از این رو برای حرکت تراکتور مدل در مسیر مشخص در موارد عملی استفاده از این روش و با فرض نوفه‌های غیرگوسی برای شبیه‌سازی پیشنهاد می‌شود.

### نتیجه‌گیری

در بخش تئوری استفاده از نظریه شواهد دمپستر- شافر ارتقاء یافته در این حوزه به عنوان ابزار تلفیق داده و بهره بردن از نقاط قوت این روش و به طور هم‌زمان استفاده از فیلتر کالمن برای پوشش کامل مراحل جمع‌آوری و پردازش داده‌های حسگرها از مزیت‌های این پژوهش می‌باشد. برای اعمال وزن هر یک از حسگرها در این روش به عنوان نظر شواهد در سطح تصمیم از آنتروپی داده‌های حسگرها استفاده شد. بعد از پیاده‌سازی عملی روش‌های تلفیق داده و مشاهده بصری عملکرد بهتر روش دمپستر- شافر به نسبت فیلتر کالمن در عمل، اطلاعات موقعیتیابی این دو روش در شبیه‌سازی و عمل توسط دو معیار MAD و MSE بررسی شد که به عبارتی اعتبارسنجی روش



## مراجع

- Dempster, A. P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*, 38(2), 325–339.
- Dencœux, T., & Li, Sh., & Sriboonchitta, S. (2017). Evaluating and Comparing Soft Partitions: an Approach Based on Dempster-Shafer Theory. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, X, 1-14.
- Edan, Y. (1995). Design of an autonomous agricultural robot. *Applied Intelligence*, 5, 41-50.
- Xiao, F. (2020). A new divergence measure for belief functions in D–S evidence theory for multisensor data fusion. *Information Science*, 514, 462-483.
- Gazavati, J., Mohammadzamani, D., Abbasgolipour, M., Mohammadalasti, B., & Ranji, A. (2015). Preliminary design, construction and evaluation of robot of tomato seed planting for the trays of greenhouse. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(2), 242-250.
- Hall, D., & Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85, 6-23.
- Klein, L. A. (1993). *Sensor and data fusion concepts and applications*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Pub.
- Liu, Y., Pal, N., Marathe, A., & Lin, C. (2018). Weighted fuzzy dempster–shafer framework for multimodal information integration. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 26, 338-352.
- Lu, C. C., Ying, K. C., & Chen, H. J. (2016). Real-time relief distribution in the aftermath of disasters – A rolling horizon approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 93, 1-20.
- Morgan, K. (1958). A step towards an automatic tractor. *Farm Mechinary*, 10, 440-441.
- Panl, L., & Deng, Y. (2018). A new belief entropy to measure uncertainty of basic probability assignments based on belief function and plausibility function. *Entropy*, 20(11), 842. Doi:10.3390/e20110842.
- Rezaee, A. (2017). Model predictive controller for mobile robot. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 2, 18-23.
- Shafer, G. (1976). A mathematical theory of evidence. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 44, 322-339.
- Shi, H., Xuesi, Li., Pan, W., Hwang, K. S., & Li, W. (2019). A novel fuzzy three-dimensional grid navigation method for mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14, 1729881417710444.
- Subramanian, V., Burks, T. F., & Arroyo, A. (2016). Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 53, 130-143.
- Yutong, S., & Yong, D. (2019). A new method to measure the divergence in evidential sensor data fusion. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(4), 283-300.

## Research Paper

# Sensor Data Fusion for Positioning of Agriculture Mobile Robot using Dempster-Shafer Method

**F. Chabok, A. R. Rezaee\* and M. Asadpour**

\*Corresponding Author: Assistant Professor, Intelligent Mobile Robot Lab, Interdisciplinary Technology Group, Mechatronics and Mems Part, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.  
Email: [arrezaae@ut.ac.ir](mailto:arrezaae@ut.ac.ir)

Received: 19 October 2020, Accepted: 27 February 2021

[http://doi: 10.22092/AMSR.2021.352107.1365](http://doi:10.22092/AMSR.2021.352107.1365)

### Abstract

In recent year, using smart systems in agriculture in order to save costs, increase the production per unit area, minimize the hard working conditions as well as dangerous and long works, and also the precise control and supervision is unavoidable in the modern agriculture. The positioning of a mobile agriculture robot with any kind of structure and working role is one of the most fundamental and essential issues in the area of agricultural machines, and it is also a prerequisite of movement for any kind of mobile system in the farm. Therefore, this positioning always faces challenges and also is gotten a lot of attention from scholars working in this field of study. Sensor data fusion from several information sources and using various data fusion methods gives us a general precise image of the agriculture robot's position. The Dempster-Shafer theory is one of these mentioned methods which benefits from a better performance compared with other data fusion methods, regarding the variable and unspecified workspace of agricultural robots. In this study, the methods of Dempster-Shafer and Kalman filter were used as two major tools of positioning sensors fusion related to an agriculture controllable tractor, in order to achieve the best estimation of the positioning, regarding the environmental conditions. So as to use Dempster-Shafer method in the fusion of numerical data of global positioning system (GPS), inertial measurement unit (IMU) and wheel (shaft) encoder sensors, the data reliability of each sensor is firstly determined by the standard deviation of data for each last  $n$  generated data. Then, the weighting is accomplished by the Shannon entropy method. In the simulation section, the dominant geometric equations of the studied tractor are extracted, and a proportional integral derivative (PID) controller is used in order to kinematic control of the robot. Afterward, the simulation process is run in Sim-mechanics MATLAB software. Finally, the performance of two investigated methods in this work is assessed and then compared by addition of different noises into the data of each sensor.

**Keywords:** Agricultural Machinery Automation, Integrated Method, Mobile Robot, Positioning Sensors



© 2021 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)