





دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده برق و رباتیک  
گروه کنترل

# روایاتی غیرفعال تک هدف زیر آب با استفاده از صافی کاملن توسعه یافته

## فازی

دانشجو:

امیر حسین ناصری صلحدار

استاد راهنما:

حیدر طوسیان ساندیز

استاد مشاور:

علی انزودی پور

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهار ۱۳۹۳



تقدیم بہ

مادر مہربانم،

پدر نزرگوارم،

وبرادر عزیزم

## تقدیر و تشکر:

سپاس و ستایش بی انتهای خدایی را منراست که در همه زیبایی ها و معرفت های جهان هستی متجلی است. پایان نامه حاضر نیز قطره ای از دریای بیکران رحمت اوست و گرنه بی لطف آن یگانه عالم " این راه نه آغازی بود و نه انجامی " پروردگارتو بی نیاز از ستایش " اما لطف ذکر نامت و لذت تشکر از نعمت هایت " این بنده را بر آن داشت تا سر آغاز سخن را با نام و یاد تو زیور دهم.

## من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق

پنجمین از زحمات پدرانه و راهنمایی های ارزنده و دلسوزانه استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر حیدر طوسیان شانزید در طول دوره کارشناسی ارشد، به ویژه در انجام این پایان نامه کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم.

# تعهد نامه

اینجانب امیر حسین ناصری صلحدار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق – کنترل دانشکده مهندسی

برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ردیابی غیرفعال تک هدف زیر آب با استفاده از

صافی کالمن توسعه یافته تحت راهنمایی دکتر حیدر طوسیان شاندریز متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده:

بخش عمده‌ی کره‌ی زمین منابع آبی است. اهمیت غیر قابل انکار دریاها و اقیانوس‌ها در کاربردهای تجاری، تفریحی و دفاعی سبب شده تشخیص و ردیابی اجسام موجود در دریاها به عنوان یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهم، مطرح گردد. به همین علت در این پایان نامه به ردیابی غیرفعال یک هدف زیر آب پرداخته شده است که تخمین موقعیت هدف متحرک در زیر آب صرفاً براساس سیگنال‌های آکوستیکی ساطع شده از هدف به کمک الگوریتم صافی کالمن توسعه یافته فازی شبیه سازی شده است که در این صافی با تنظیم ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری توسط سیستم فازی باعث بهبود عملکرد صافی کالمن شده است. معادلات حالت توصیف کننده این سیستم تشکیل شده از موقعیت و سرعت هدف متحرک در راستاهای مختلف می‌باشد که حرکت هدف با سرعت ثابت فرض شده است و بردار اندازه گیری مدل مذکور در دو حالت مورد بررسی قرار گرفته است، حالت اول شامل اختلاف زمانی رسیدن سیگنال آکوستیکی ساطع شده از هدف به حسگر از مسیر انعکاس از سطح آب و نیز از مسیر انعکاس از کف دریا نسبت به مسیر مستقیم، می‌باشد و در حالت دوم بردار اندازه گیری مدل مذکور فقط زاویه سمت هدف بوده است. در نهایت صافی کالمن توسعه یافته فازی با انجام شبیه سازی گوناگون در ردیابی آزمایش می‌شود و با صافی کالمن توسعه یافته مرسوم و صافی کالمن بی‌رد مقایسه می‌شود که نتایج نشان دهنده این است که صافی کالمن توسعه یافته فازی دارای برآورد بهتری نسبت به صافی کالمن توسعه یافته مرسوم و صافی کالمن بی‌رد بوده و دارای خطای کمتری نسبت به آن‌ها می‌باشد.

## کلمات کلیدی:

ردیابی اهداف زیر آب، تخمین موقعیت، صافی کالمن فازی، بهینه سازی، اندازه گیری فقط سمت

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱- امیر حسین ناصری، حیدر طوسیان شاندیز و علی ایزدی پور "ردیابی غیر فعال هدف زیر آب با استفاده از الگوریتم اندازه گیری فقط سمت" اولین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران ، معماری، برق و مکانیک ایران " (Accepted)

۲- حیدر طوسیان شاندیز، امیر حسین ناصری و علی ایزدی پور "ردیابی غیر فعال هدف زیر آب با استفاده از الگوریتم اندازه گیری تاخیر زمانی و صافی کالمن توسعه یافته فازی در فضای سه بعدی" مجله علمی و پژوهشی کنترل - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی (Revised)

۳- امیر حسین ناصری، حیدر طوسیان شاندیز و علی ایزدی پور "بهبود عملکرد صافی کالمن با استفاده از منطق فازی و الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و رقابت استعماری" مجله علمی و پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها - دانشگاه صنعتی شاهرود (Submitted)



# فهرست

- فصل اول - مقدمه ای بر ردیابی غیرفعال ..... ۱
- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- تاریخچه ..... ۳
- ۳-۱- کاربردهای سونار ..... ۴
- ۱-۳-۱- انواع دسته بندی سونار ..... ۴
- ۲-۳-۱- سونار فعال ..... ۵
- ۳-۳-۱- سونار غیر فعال ..... ۸
- ۴-۱- نویز در محیط زیر آب ..... ۹
- ۱-۴-۱- نویز هایی که به وسیله شناورهای دریایی تولید می شوند ..... ۱۰
- ۱-۱-۴-۱- نویز تولید شده توسط موتور خانه ..... ۱۱
- ۲-۱-۴-۱- نویز تولید شده توسط گردش پروانه کشتی ها و زیردریایی ها ..... ۱۳
- ۳-۱-۴-۱- نویز تولید شده توسط اثرات هیدرو آکوستیک ..... ۱۴
- ۴-۱-۴-۱- نویز تولید شده توسط منابع مختلف تولید صدا در کشتی ..... ۱۴
- ۲-۴-۱- نویز هایی پس زمینه ..... ۱۴
- ۱-۲-۴-۱- مداخلات انسانی ..... ۱۵
- ۲-۲-۴-۱- اختلال سطحی ..... ۱۵
- ۳-۲-۴-۱- جانداران دریایی ..... ۱۵
- ۴-۲-۴-۱- فعالیتهای زمین لرزهای ..... ۱۶
- ۵-۲-۴-۱- شکستن یخ ..... ۱۶
- ۶-۲-۴-۱- صدای بارش باران ..... ۱۶
- ۷-۲-۴-۱- نویز حرارتی و مولکولی ..... ۱۶
- ۸-۲-۴-۱- تقسیم بندی نویزهای پس زمینه ای در طیف فرکانسی ..... ۱۶
- ۳-۴-۱- مشخصه های آکوستیکی کلی متعلق به متحرک های دریایی ..... ۱۷
- ۵-۱- سیستم ردیابی تک هدفی (Single Target Tracking System) ..... ۱۹
- ۱-۵-۱- سیستم ردیابی غیر فعال ..... ۲۰
- ۶-۱- هدف پایان نامه ..... ۲۵

۷-۱- ساختار پایان نامه ..... ۲۵

## فصل دوم - صافی کالمن خطی و توسعه یافته ..... ۲۷

۱-۲- مقدمه ..... ۲۸

۲-۲- صافی کالمن خطی ..... ۲۸

۱-۲-۲- الگوریتم صافی کالمن خطی ..... ۳۰

۲-۲-۲- پایداری صافی کالمن ..... ۳۳

۳-۲-۲- سازگاری صافی کالمن ..... ۳۵

۴-۲-۲- شرایط اولیه ی صافی کالمن ..... ۳۵

۳-۲- صافی کالمن توسعه یافته ..... ۳۷

## فصل سوم - صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده ..... ۴۱

۱-۳- مقدمه ..... ۴۲

۲-۳- مقدمه‌ای بر بهینه سازی ..... ۴۳

۱-۲-۳- الگوریتم بهینه سازی ژنتیک (GA) ..... ۴۴

۲-۲-۳- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) ..... ۴۶

۳-۲-۳- الگوریتم رقابت استعماری (ICA) ..... ۴۷

۳-۳- سیستمهای فازی (FIS) ..... ۵۰

۴-۳- صافی کالمن فازی بهینه سازی شده (OFKF) ..... ۵۰

۱-۴-۳- باقی مانده یا دنباله ابداع ..... ۵۱

۲-۴-۳- بهبود صافی کالمن توسط سیستم فازی بهینه سازی شده با تنظیم R و فرض Q ثابت ..... ۵۲

۳-۴-۳- بهبود صافی کالمن توسط سیستم فازی بهینه سازی شده با تنظیم Q و فرض R ثابت ..... ۵۴

۴-۴-۳- سیستم فازی جهت تنظیم R و Q ..... ۵۵

۵-۴-۳- شبیه سازی و مقایسه KF و OFKF ..... ۵۷

۶-۴-۳- مقایسه بین KF و OFKF با فرض ثابت بودن ماتریس Q و تنظیم ماتریس R ..... ۵۷

۷-۴-۳- مقایسه بین KF و OFKF با فرض ثابت بودن ماتریس R و تنظیم ماتریس Q ..... ۶۵

۵-۳- خلاصه ..... ۷۲

## فصل چهارم - ردیابی غیر فعال هدف زیر آب با استفاده از الگوریتم اندازه گیری تاخیر زمانی ..... ۷۳

۱-۴- مقدمه ..... ۷۴

۲-۴- معادلات حاکم بر سیستم ردیاب غیر فعال ..... ۷۴

۱-۲-۴- خطی سازی مدل اندازه گیری ..... ۷۸

۳-۴	مراحل شش گانه شبیه‌سازی سیستم ردیابی تک هدف و دو حسگر ثابت	۸۰
۴-۴	شبیه‌سازی سیستم ردیاب تک هدف و دو حسگر ثابت:	۸۴
۵-۴	خلاصه	۹۴
<b>فصل پنجم - ردیابی غیر فعال هدف زیر آب با استفاده از الگوریتم اندازه گیری فقط سمت ۹۷</b>		
۱-۵	مقدمه	۹۸
۲-۵	معادلات حاکم بر سیستم ردیاب غیر فعال با الگوریتم اندازه گیری فقط سمت	۹۸
۱-۲-۵	خطی سازی مدل اندازه گیری	۱۰۱
۳-۵	مراحل چهار گانه شبیه‌سازی سیستم ردیابی تک هدف و دو حسگر ثابت	۱۰۱
۴-۵	شبیه‌سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب، با دو حسگر ثابت	۱۰۴
۵-۵	شبیه‌سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب، با دو حسگر متحرک دارای سرعت ثابت	۱۱۲
۶-۵	شبیه‌سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب، با دو حسگر متحرک دارای سرعت متغیر (مانوردار)	۱۱۷
۷-۵	خلاصه	۱۲۲
<b>فصل ششم - نتیجه گیری و پیشنهاد ۱۲۵</b>		
۱-۶	نتیجه گیری	۱۲۶
۲-۶	پیشنهادات	۱۲۷
<b>مراجع ۱۲۸</b>		

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- بلوک دیاگرام کلی سونار فعال ..... ۷
- شکل ۲-۱- بلوک دیاگرام کلی سونار غیر فعال ..... ۹
- شکل ۳-۱- نمایش منابع تولید نویز در کشتی و زیردریایی ..... ۱۱
- شکل ۴-۱- طیف مربوط به نویز آکوستیکی در سه باند ..... ۱۷
- شکل ۵-۱- طیف مربوط به محدوده نویزهای آکوستیکی تولید شده توسط متحرک‌های دریایی ..... ۱۹
- شکل ۶-۱- مشخصه طیف مربوط به یک زیردریایی ..... ۱۹
- شکل ۱-۲- چرخه الگوریتم صافی کالمن خطی ..... ۳۳
- شکل ۲-۲- چرخه الگوریتم صافی کالمن توسعه یافته ..... ۳۹
- شکل ۱-۳- فرآیند تا تابعی که بهینه سازی میشود ..... ۴۴
- شکل ۲-۳- مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک ..... ۴۵
- شکل ۳-۳- مراحل اجرای الگوریتم ازدحام ذرات ..... ۴۷
- شکل ۴-۳- نحوه تخصیص کشورهای مستعمره به کشورهای استعمارگر مرجع [۴۳] ..... ۴۸
- شکل ۵-۳- چگونگی جابجایی کشورهای مستعمره در راستای سیاست جذب مرجع [۴۳] ..... ۴۹
- شکل ۶-۳- مراحل اجرای الگوریتم رقابت استعماری ..... ۵۰
- شکل ۷-۳- نحوه تنظیم R برای از بین بردن اختلاف بین SK و  $Crk^{\wedge}$  ..... ۵۴
- شکل ۸-۳- مقایسه بین GA، PSO، ICA در بهینه سازی ..... ۶۰
- شکل ۹-۳- مقدار RMSE تخمین حالت  $X_1$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۰
- شکل ۱۰-۳- مقدار RMSE تخمین حالت  $X_2$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۱
- شکل ۱۱-۳- مقدار RMSE تخمین حالت  $X_3$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۲
- شکل ۱۲-۳- مقدار RMSE تخمین  $Y_1$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۲
- شکل ۱۳-۳- مقدار RMSE تخمین  $Y_2$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۲
- شکل ۱۴-۳- مقادیر  $SK(1,1)$ ،  $Crk(1,1)$ ،  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای KF ..... ۶۳
- شکل ۱۵-۳- مقادیر  $SK(2,2)$ ،  $Crk(2,2)$ ،  $R(2,2)$  و  $DOM(2,2)$  برای KF ..... ۶۳
- شکل ۱۶-۳- مقادیر  $SK(1,1)$ ،  $Crk(1,1)$ ،  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای ICAFKF ..... ۶۳
- شکل ۱۷-۳- مقادیر  $SK(2,2)$ ،  $Crk(2,2)$ ،  $R(2,2)$  و  $DOM(2,2)$  برای ICAFKF ..... ۶۴
- شکل ۱۸-۳- توابع تعلق ورودی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم R ..... ۶۵
- شکل ۱۹-۳- توابع تعلق خروجی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم R ..... ۶۵
- شکل ۲۰-۳- مقایسه بین GA، PSO، ICA در بهینه سازی ..... ۶۷
- شکل ۲۱-۳- مقدار RMSE تخمین حالت  $X_1$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۸
- شکل ۲۲-۳- مقدار RMSE تخمین حالت  $X_2$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۸
- شکل ۲۳-۳- مقدار RMSE تخمین حالت  $X_3$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۸
- شکل ۲۴-۳- مقدار RMSE تخمین  $Y_1$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۹
- شکل ۲۵-۳- مقدار RMSE تخمین  $Y_2$  برای KF و ICAFKF ..... ۶۹

- شکل ۳-۲۶- مقادیر  $SK(1,1)$ ,  $Crk(1,1)$ ,  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای KF ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۷- مقادیر  $SK(2,2)$ ,  $Crk(2,2)$ ,  $R(2,2)$  و  $DOM(2,2)$  برای KF ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۸- مقادیر  $SK(1,1)$ ,  $Crk(1,1)$ ,  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای ICAFKF ..... ۷۰
- شکل ۳-۲۹- مقادیر  $SK(2,2)$ ,  $Crk(2,2)$ ,  $R(2,2)$  و  $DOM(2,2)$  برای ICAFKF ..... ۷۰
- شکل ۳-۳۰- توابع تعلق ورودی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم Q ..... ۷۱
- شکل ۳-۳۱- توابع تعلق خروجی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم Q ..... ۷۱
- شکل ۴-۱- ساختار هندسی سیستم ردیاب غیر فعال ..... ۷۵
- شکل ۴-۲- توصیف موقعیت مشاهده گر و هدف در فضای سه بعدی ..... ۷۶
- شکل ۴-۳- بلوک دیاگرام مراحل شش گانه شبیه سازی ..... ۸۲
- شکل ۴-۴- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_1$  ..... ۸۷
- شکل ۴-۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_2$  ..... ۸۸
- شکل ۴-۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_3$  ..... ۸۸
- شکل ۴-۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_4$  ..... ۸۸
- شکل ۴-۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_5$  ..... ۸۹
- شکل ۴-۹- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_6$  ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۱- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۲- مقادیر اندازه گیری شده  $T_1$  برای حسگر شماره یک قبل و بعد از اعمال نویز ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۳- مقادیر اندازه گیری شده  $T_2$  برای حسگر شماره یک قبل و بعد از اعمال نویز ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۴- مقادیر اندازه گیری شده  $T_1$  برای حسگر شماره دو قبل و بعد از اعمال نویز ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۵- مقادیر اندازه گیری شده  $T_2$  برای حسگر شماره دو قبل و بعد از اعمال نویز ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۶- مقادیر  $SK(1,1)$ ,  $Crk(1,1)$ ,  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای EKF ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۷- مقادیر  $SK(1,1)$ ,  $Crk(1,1)$ ,  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای UKF ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۸- مقادیر  $SK(1,1)$ ,  $Crk(1,1)$ ,  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای OFEKF ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۹- توابع تعلق ورودی سیستم فازی برای تنظیم R در صافی کالمن توسعه یافته فازی ..... ۹۳
- شکل ۴-۲۰- توابع تعلق خروجی سیستم فازی برای تنظیم R در صافی کالمن توسعه یافته فازی ..... ۹۳
- شکل ۴-۲۱- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی EKF، UKF و OFEKF ..... ۹۴
- شکل ۵-۱- نحوه قرار گیری هدف و حسگر در فضای سه بعدی و زوایای بدست آمده از هدف ..... ۹۷
- شکل ۴-۲- بلوک دیاگرام مراحل چهار گانه شبیه سازی ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۳- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_1$  ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۴- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_2$  ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_3$  ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_4$  ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_5$  ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_6$  ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۹- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۱- مقادیر اندازه گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز ..... ۱۱۰

- شکل ۵-۱۲- توابع تعلق ورودی و خروجی سیستم فازی برای تنظیم R در صافی کالمن توسعه یافته فازی ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۳- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی UKF، EKF و OFEKF ..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۴- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۱</sub> ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۲</sub> ..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۳</sub> ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۴</sub> ..... ۱۱۴
- شکل ۵-۱۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۵</sub> ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۱۹- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۶</sub> ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۲۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۲۱- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو ..... ۱۱۵
- شکل ۵-۲۲- مقادیر اندازه گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۳- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی UKF، EKF و OFEKF ..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۴- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۱</sub> ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۲</sub> ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۳</sub> ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۴</sub> ..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۵</sub> ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۹- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت X<sub>۶</sub> ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۳۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۳۱- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۳۲- مقادیر اندازه گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز ..... ۱۲۲
- شکل ۵-۳۳- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی UKF، EKF و OFEKF ..... ۱۲۲

# فهرست جداول

۵۹	جدول ۱-۳- مقایسه بین ICAFKF , PSOFKF ,GAFKF ,KF
۶۰	جدول ۲-۳- مقایسه بین ICA و PSO ,GA در بهینه سازی
۶۶	جدول ۳-۳- مقایسه بین ICAFKF , PSOFKF ,GAFKF ,KF
۶۷	جدول ۴-۳- مقایسه بین ICA و PSO ,GA در بهینه سازی
۸۷	جدول ۱-۴- مقایسه بین FEKF و UKF ,EKF در ردیابی غیر فعال
۱۰۶	جدول ۱-۵- مقایسه بین FEKF و UKF ,EKF در ردیابی غیر فعال
۱۱۲	جدول ۲-۵- مقایسه بین OFEKF و UKF ,EKF در ردیابی غیر فعال
۱۱۸	جدول ۳-۵- مقایسه بین OFEKF و UKF ,EKF در ردیابی غیر فعال





# مقدمه ای

## بر رویایی غیرفعال

## ۱-۱- مقدمه:

ردگیری اهداف یکی از مهم‌ترین قسمت‌های، بسیاری از سیستم‌های نظارتی، مراقبتی و راهبری است که کار آن تعیین موقعیت، سرعت و شتاب اهداف می‌باشد. برای آشکار سازی و ردگیری اهداف نیاز به یک سری ابزار جهت اندازه گیری خصوصیات حرکتی هدف می‌باشد که می‌توان از سونار به عنوان یکی از ابزارهای قوی جهت ردیابی اهداف زیرآب نام برد. واژه سونار (SONAR) مخفف عبارت Sound Navigation And Ranging بوده و به معنای فاصله یابی و ناوبری با صوت می‌باشد و تعریف علمی آن عبارتست از: سیستمی که در آن از انرژی انتشار یافته یا منعکس شده ( بصورت امواج آکوستیکی ) در زیرآب به منظور آشکار ساختن اهداف و اجسام از راه دور، تعیین فاصله، جهت و موقعیت آنها، ردیابی و ارتباطات استفاده می‌گردد. سونار چشم زبردیابی، در فضاهای تاریک دریاها و اقیانوس‌هاست و زبردیابی بدون برخورداری از آن نسبت به محیطی که در آن شناور است کاملاً بی اطلاع می‌باشد. بنابراین سونار مهم‌ترین سیستم ناوبری شناورهای سطحی و زیر سطحی می‌باشد چرا که به کمک آن نه تنها هدایت و کنترل شناورها انجام می‌پذیرد بلکه امکان آشکار سازی و ردیابی موانع و اهداف نیز فراهم می‌گردد. در یک تقسیم بندی کلی سونارها، شامل دو نوع متفاوت می‌باشد که عبارتند از:

الف ( سونار فعال

ب ( سونار غیرفعال

در سونار فعال، جهت آشکار سازی و ردیابی اهداف بترتیب ارسال امواج، بازگشت انعکاس از هدف و آشکار سازی انجام می‌شود، در صورتی که در سونارهای غیرفعال تنها از تحلیل، بررسی و پردازش امواج صادر شده از اهداف زیرآب جهت آشکار سازی و ردیابی استفاده می‌شود. پارامترهای مختلفی از اهداف متحرک زیرآب توسط سونار محاسبه و آشکار می‌شود که عبارت است از: برد، زاویه یا سمت، سرعت هدف . نکته قابل توجه در سونارها، استفاده از امواج آکوستیکی ( که از جنس امواج مکانیکی می‌باشند )، جهت آشکار سازی و ردیابی اهداف زیرآب می‌باشد. در حالی که در رادارها از امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شود به صورت عمده علت عدم استفاده از امواج الکترومغناطیسی برای عملیات ارسال و

دریافت زیرآب و متعاقبا آشکار سازی و ردیابی اهداف، میرا شدن فوق‌العاده سریع این امواج در زیرآب می‌باشد.

## ۱-۲- تاریخچه:

چنانچه کشف لئوناردو داوینچی یا زمان آگاهی بشر نسبت به انتشار امواج آکوستیکی در زیرآب را نقطه سرآغاز علم آکوستیک زیرآب بدانیم، می‌توان گفت که تاریخ سونار در واقع به سال ۱۴۹۰ برمی‌گردد. هر چند که کشف داوینچی برای سال‌های متمادی مسکوت ماند، اما از اوایل قرن نوزدهم میلادی دانشمندان به شناخت بیشتر آکوستیک زیرآب و استفاده‌های عملی از آن روی آوردند. نیمه شب چهاردهم آوریل ۱۹۱۳ کشتی عظیم وایت استارلاین موسوم به تایتانیک، در حالیکه راه دریایی جدیدی به طرف شمال باز می‌کرد، ناگهان با اتفاق ناگواری مواجه گردید و آن اتفاق، تصادف وحشتناک این کشتی بزرگ بایک کوه یخی عظیم جداشده از دریاهاى منجمد بود. در نتیجه این تصادف ۱۵۰۰ نفر سرنشین آن غرق شدند. امروزه دیگر چنین حادثه تآثر انگیزی روی نخواهد داد چرا که در بین تجهیزات مختلف کشتی یا زیردریایی، دستگاه‌هایی وجود دارند که به کمک آنها می‌توان از وجود دشمن یا موانع غیر مترقبه در فواصل دور آگاه شد و بدین ترتیب از بروز هر حادثه ناخوشایندی جلوگیری کرد. پس از فاجعه تایتانیک دانشمندان و محققان در صدد بر آمدند تا با استفاده از دانش آن زمان راهی را برای پیشگیری از این گونه حوادث بیابند. مدت کمی بعد از این حادثه شخصی به نام ریچاردسون، طرحی را به اداره ثبت اختراعات انگلستان ارائه داد که محتوای این طرح چگونگی استفاده از امواج صوتی برای فاصله یابی بود. یک ماه بعد، این شخص همین روش را برای زیرآب مطرح نمود. این اختراع یکی از مهمترین موفقیت‌های بدست آمده در این زمینه، قبل از جنگ‌های جهانی بود. در همین ایام نیز فردی در آمریکا به نام فسندن طرحی را برای ارسال پیام و فاصله یابی در زیرآب ارائه نمود که به کمک آن امکان آشکارسازی کوه‌های یخی از فاصله ۲ مایلی فراهم گشت. در مجموع در فاصله ۱۸۲۶ تا ۱۹۰۰ آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های متعددی در زمینه آکوستیک زیرآب، توسط دانشمندان مختلف انجام

گرفت. وقوع جنگ جهانی اول خطرات ناشی از تحرکات زیردریایی‌های آلمان موجب تشدید این فعالیت-ها گردید به نحوی که تا پایان جنگ جهانی اول حدود سه هزار کشتی مجهز به سیستم‌های شنودی زیرآب شدند تا از طریق آنها به موقعیت زیردریایی دشمن پی ببرند و نیز در طول این جنگ تمام زیردریایی‌های آمریکا از طرح فسندن استفاده می‌کردند. این روند ادامه داشت تا جایی که در سال ۱۹۳۵ چندین سونار خوب ساخته شد و در سال ۱۹۳۸ در آستانه جنگ جهانی دوم، تولید انبوه سیستم‌های سونار در آمریکا آغاز گردید. و در جنگ جهانی دوم تب فعالیت در جهت توسعه سیستم‌های سونار بالا گرفت و تحقیقات گسترده‌ای در زمینه انجام شد که نتایج این تحقیقات همراه با تحولات به وجود آمده در پردازش سیگنال و کامپیوتر، پیشرفت‌های قابل توجهی را در کارهای طراحی و ساخت سونار فراهم آوردند و در حال حاضر سونارهای بسیار دقیق و پیشرفته‌ای ساخته شده است که توان بشر را در غلبه بر دریاها و اقیانوس‌ها دو چندان کرده است [۱].

### ۱-۳-۱- کاربردهای سونار:

سیستم‌های سونار بطور کلی کاربردهای نظامی و غیر نظامی متعددی را دارا می‌باشد. که از کاربردهای نظامی آن می‌توان به ناوبری، آشکار سازی هدف زیرآب، ردیابی هدف زیرآب، فاصله یابی، مین روب‌های آکوستیکی، اژدرهای هدایت شونده و ارتباطات و مخابرات اشاره نمود و از کاربردهای غیر نظامی موارد ناوبری، عمق یابی، نقشه برداری کف دریا، سرعت سنجی، ماهیگیری، غواصی و مکان یابی را بیان نمود [۲].

### ۱-۳-۱-۱- انواع دسته بندی سونار:

از لحاظ عملکرد و یا کاربرد سونارها به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که عبارتند از سونار فعال، سونار غیرفعال، سونار رهگیری، سونار تجسس، سونار مراقبت و حمله، سونار ویژه شکار مین، سونار ویژه آشکار سازی مین، سونار ماهی یاب، سونار کاوش، و سونار آبهای کم عمق. همچنین سونارها براساس محل استقرار و یا نوع وسیله حامل نیز تقسیم بندی می‌شوند که می‌توان به سونار نصب شده روی

کشتی کوچک، سونار زیردریایی، سونار شناور سطحی، سونار بالگرد، سونار غواصی، سونار کف خواب و سونار ویژه ناو از این تقسیم بندی اشاره نمود. علاوه بر تقسیم بندی های ذکر شده فوق، سونارها براساس محل و نحوه استقرار مبدل آنها نیز تقسیم بندی می شوند که نمونه ای از این تقسیم بندی عبارتند از [۱]:

الف ( سوناری که ترانسدیوسر آن روی بدنه کشتی نصب شده است.

ب ( سوناری که ترانسدیوسر آن روی سینه کشتی نصب شده است.

ج ( سوناری که ترانسدیوسر آن آرایه ای و کشتی است.

د ( سوناری که ترانسدیوسر آن آرایه ای و در پهلو کشتی نصب شده.

آخرین تقسیم بندی که در این جا بیان می شود، تقسیم بندی و نامگذاری سونارها براساس یکی از مشخصه های فنی و قابلیت های عملیاتی سیستم سونار می باشد، که نمونه ای از آن عبارتند از:

الف ( سونار فرکانس خیلی پایین<sup>۱</sup> / سونار فرکانس میانه<sup>۲</sup> / سونار فرکانس بالا<sup>۳</sup>

ب ( سونار ضد زیردریایی جنگی.

ج ( سونار افق نما.

### ۱-۳-۲- سونار فعال:

سونار فعال با ایجاد پالس های صوتی با مشخصات معین و ویژه (معروف به پینگ) و ارسال آن در محیط زیرآب و سپس گوش دادن به پالس های بازگشتی عمل می کند. برای تشخیص فاصله از هدف می توان مدت زمان بین دریافت و ارسال سیگنال را اندازه گیری کرد. برای اندازه گیری جهت و راستای هدف می توان از هیدروفون های متعددی استفاده کرد و سپس زمان دریافت توسط هر یک از این هیدروفون ها را اندازه گیری کرد. و با مقایسه این زمان ها به راحتی می توان جهت و راستای هدف را تعیین کرد. از اجزای مهم سونار فعال می توان به زیر سیستم های آنتن یا ترانسدیوسر، فرستنده، گیرنده، کنترل،

---

۱ = Very Low Frequencies Sonar

۲ = Mid Frequency Sonar

۳ = High Frequency Sonar

پردازش، نمایشگر تغذیه و ضبط اطلاعات اشاره نمود. در سونارهای فعال اطلاعات هدف زیرآب که شامل برد هدف و زاویه هدف می‌باشد، از طریق مکانیزم زیر بدست می‌آید.

۱- تولید سیگنال الکتریکی مناسب توسط جعبه فرستنده.

۲- ارسال این سیگنال به مبدل سیگنال الکتریکی به سیگنال آکوستیکی (Transducer).

۳- انتشار سیگنال آکوستیکی در محیط زیرآب.

۴- برخورد سیگنال آکوستیکی مذکور به موانع و اهداف زیرآب و متعاقباً بازگشت انعکاس از اهداف متناسب با قوت اهداف و نیز دوری یا نزدیکی اهداف به محل استقرار ترانسدیوسر.

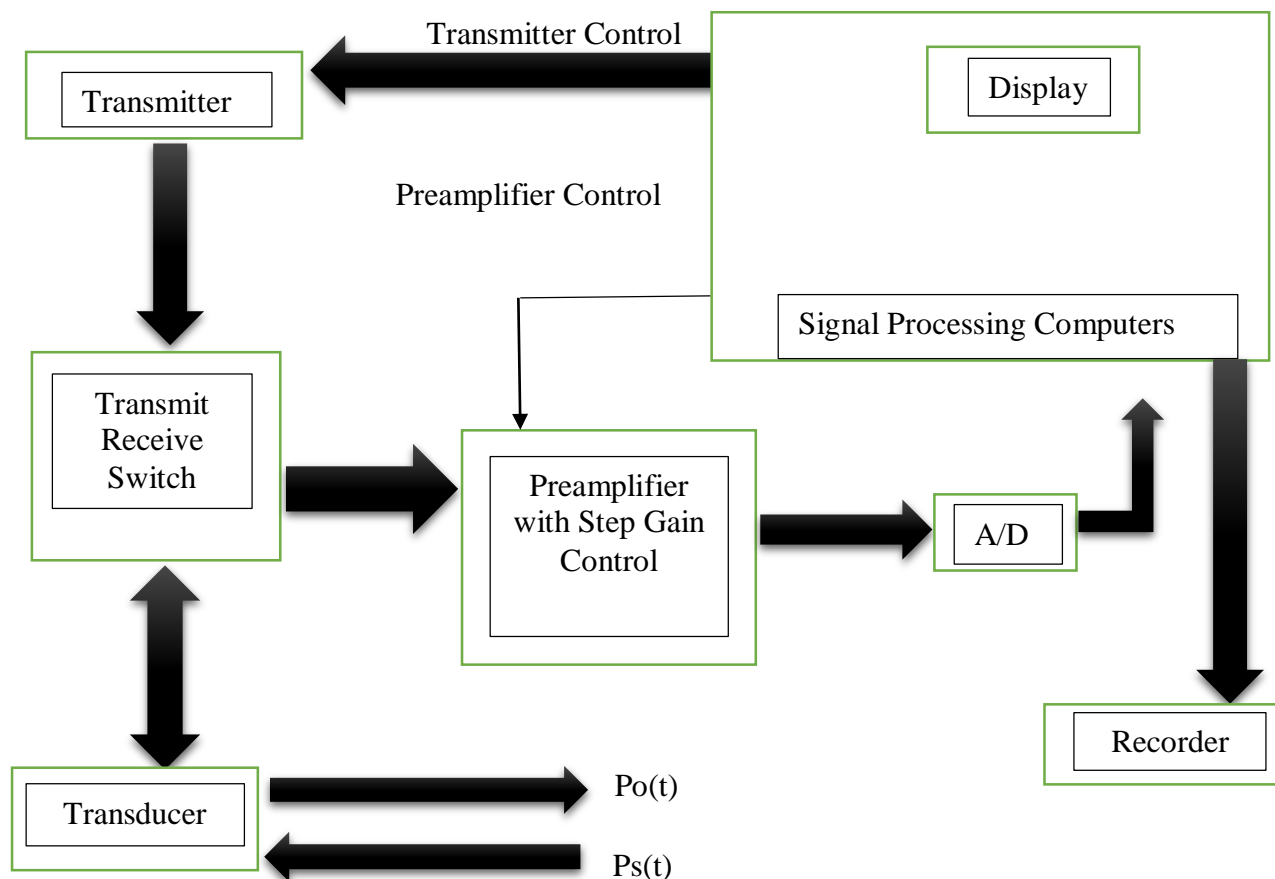
۵- دریافت اکوهای بازگشتی از موانع و اهداف توسط ترانسدیوسر در پیوند مخصوص گیرندگی سونار و تبدیل این اکوها ( که از جنس امواج آکوستیکی می‌باشند ) به سیگنال‌های الکتریکی متناسب توسط ترانسدیوسر.

۶- دریافت سیگنال الکتریکی اکو توسط گیرنده و اعمال تقویت‌های لازم به آن، متناسب با زمان دریافت اکو.

۷- انتقال این سیگنال به جعبه پردازش و اعمال الگوریتم‌های متنوع پردازشی آشکارسازی و ردیابی.

۸- انتقال اطلاعات استخراج شده از هدف روی صفحه نمایشگر.

۹- جعبه کنترل تمامی این مراحل را کنترل می‌کند [۱].



شکل ۱-۱- نمودار جعبه ای کلی سونار فعال

از نمونه‌های سونارهای فعال می‌توان به سونار عمق یاب و سونار داپلر اشاره کرد. سونار عمق یاب روی کشتی‌های نظامی و تجاری نصب شده و برای سنجش عمق بکار می‌رود و اساس کار آن بر مبنای ارسال و دریافت سیگنال صوتی می‌باشد. سونار داپلر نیز برای اندازه‌گیری سرعت کشتی نسبت به آب یا کف دریا استفاده می‌شود. همچنین به کمک این سونار می‌توان حرکت سطح آب دریا، اجسام شناور در آب یا امواج درونی آب را اندازه‌گیری کرد. از کاربردهای سونارهای فعال، استفاده در زیردریایی‌ها می‌باشد تا بدین ترتیب موقعیت و ویژگی موانع و اهداف اطراف زیردریایی فراهم گردد. استفاده از سونار فعال در زیردریایی، علیرغم استفاده موثر در آشکارسازی و ردیابی اهداف، باعث کشف موقعیت زیردریایی توسط سیستم‌های شنودی دشمن و یا سونارهای غیرفعال دشمن می‌گردد، زیرا استفاده از سونارهای فعال

مستلزم ارسال امواج آکوستیکی در زیرآب می‌باشد و این موضوع یکی از مهمترین عوامل محدود کننده استفاده از سونار فعال می‌باشد.

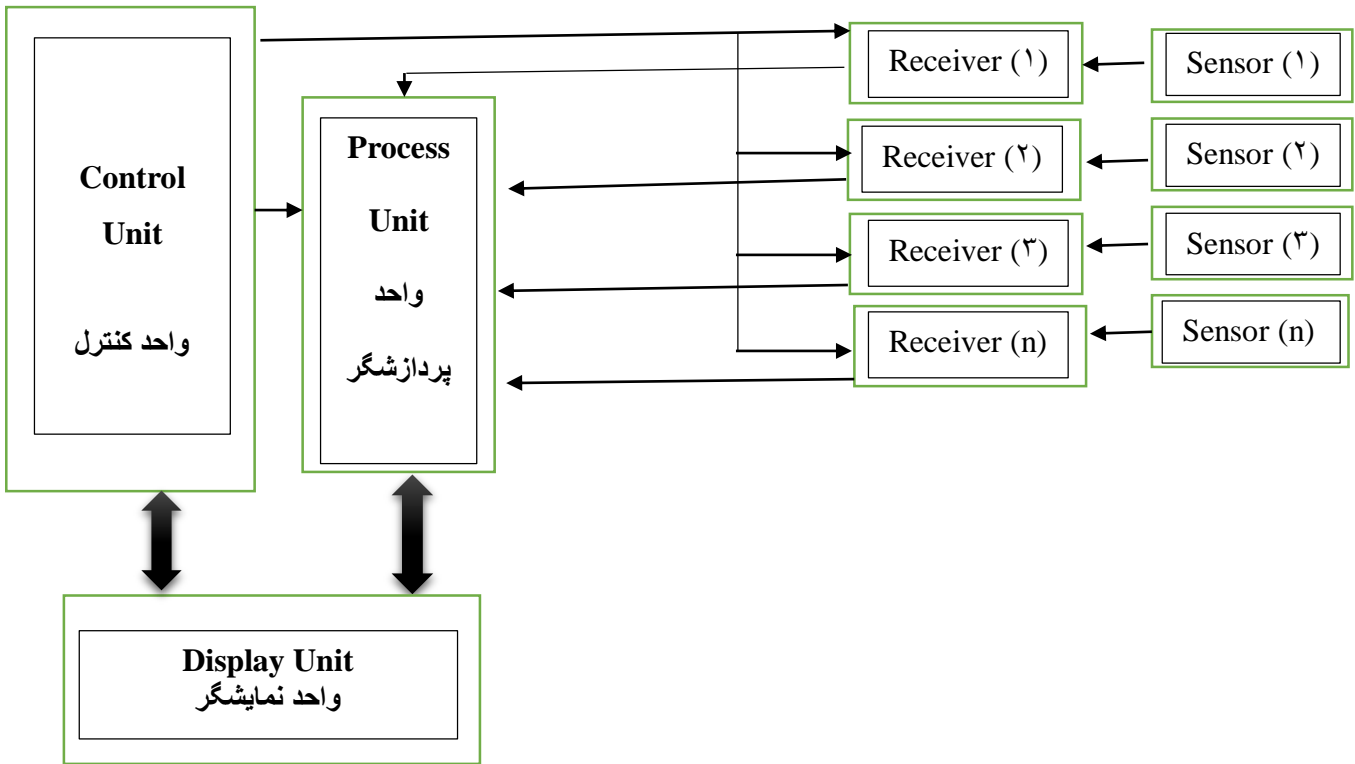
### ۱-۳-۳- سونار غیرفعال:

در سونار غیرفعال بدون ارسال سیگنال در محیط زیرآب و تنها از طریق پردازش سیگنال‌های دریافتی توسط حسگر و یا آنتن‌های سیستم، ردیابی اهداف انجام می‌شود. ویژگی مهم سونارهای غیرفعال عدم انتشار سیگنال آکوستیکی در محیط زیرآب می‌باشد و این مساله از مزایای این سونار محسوب می‌شود چرا که از کشف موقعیت آنها توسط سونارهای شنود دشمن جلوگیری می‌کند. در سیستم‌های آکوستیکی غیرفعال روش‌های کشف و آشکارسازی سیگنال‌های با معنی محیط و تشخیص آنها از نویز بسیار مشکل و پیچیده‌تر از سیستم‌های آکوستیکی فعال است. این موضوع از آنجایی ناشی می‌شود که سیستم چشم امید به دریافت سیگنال‌های دوخته است که از ماهیت آنها اطلاع چندانی ندارد. از اجزای مهم سونار غیرفعال می‌توان به زیر سیستم‌های آنتن یا هیدروفون، گیرنده، کنترل، پردازش، نمایشگر، تغذیه و ضبط اطلاعات اشاره نمود. بطور کلی در سونار غیرفعال، مکانیزم آشکار سازی و ردیابی اطلاعات اهداف زیرآب به شرح زیر انجام می‌شود [۳].

- ۱- دریافت سیگنال‌های آکوستیکی منتشر شده از تمامی اهداف زیرآب توسط حسگرها (هیدروفون‌ها) و تبدیل سیگنال‌های آکوستیکی به سیگنال‌های الکتریکی مناسب.
- ۲- برای هر حسگر (هیدروفون) در نظر گرفته شده یک گیرنده مناسب اختصاص یافته است که این گیرنده‌ها، وظیفه تقویت سیگنال‌های الکتریکی دریافت شده از هیدروفون‌ها را به عهده دارند.
- ۳- سیگنال‌های تقویت شده از گیرنده مذکور در واحد پردازش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و الگوریتم‌های متنوع آشکارسازی و ردیابی در رابطه با این سیگنال‌ها به اجرا در می‌آیند.
- ۴- نتیجه اطلاعات فراهم شده از اهداف زیرآب و در واقع خروجی واحد پردازشگر به واحد نمایشگر انتقال یافته و به نحو مناسب روی صفحه نمایشگر به نمایش در می‌آید.
- ۵- جعبه کنترل تمامی مراحل را مدیریت می‌نماید.



نمودار جعبه‌ای کلی سونار غیرفعال در شکل ۱-۲ رسم شده است.



شکل ۱-۲- نمودار جعبه‌ای کلی سونار غیر فعال

زیردریایی‌ها در استفاده از سونارهای غیرفعال، دچار محدودیتی نیستند، زیرا تحت هیچ شرایطی در زمان استفاده از سونارهای غیرفعال، توسط سیستم‌های شنودی زیرآب دشمن کشف نخواهد شد و بنابراین استفاده از سونارهای غیرفعال در بسیاری از موارد نسبت به سونارهای فعال ترجیح داده می‌شود. از نمونه سونار غیر فعال می‌توان به سونار رهگیری اشاره نمود این سونار به منظور آشکارسازی، دسته بندی و تعیین زاویه سمت سیستم‌های سونار دشمن به کار می‌رود.

#### ۱-۴- نوین در محیط زیرآب:

در این پروژه که هدف آن ردیابی و تعیین موقعیت و سرعت اهداف زیرآب می‌باشد روش‌های جدیدی را معرفی خواهیم کرد که در چند سال اخیر مورد تحقیق و پژوهش بوده است. این روش‌ها مبتنی بر تخمین گرهای صافی کالمن بوده که ما در فصل‌های بعدی به معرفی آن‌ها خواهیم پرداخت. هرچند

سعی داریم حداقل درگیری را با مسائل و مشکلات محیط زیرآب و سیستم‌های آکوستیکی زیرآب داشته باشیم و خود را موظف به ردیابی اهداف زیرآب بدانیم، اما ردیابی اهداف زیرآب بدون علم و آگاهی از نویزهای موجود در محیط زیرآب امکان پذیر نخواهد بود و شناخت کامل نویزها مقدمه‌ای، برای شناسایی و ردیابی غیرفعال اهداف زیرآب می‌باشد به این علت که ما از سونارهای غیرفعال جهت ردگیری استفاده می‌کنیم و چشم امید ما به دریافت سیگنال‌های ساطع شده از اهداف زیرآب بوده که این سیگنال‌ها آغشته به نویز هستند و در نتیجه شناخت این نویزها از ضرورت بالای برخوردار است. به همین علت به طور مختصر به بررسی نویزهای موجود در زیرآب می‌پردازیم. ماهیت نویز ذاتا بسیار پیچیده‌تر از آن است که بتوان مدلی قطعی برای آن برگزید و یا گذشته و آینده آن را با صراحت تعیین کرد ولیکن اگر بتوان منابع مولد نویز را شناسایی کرده و مدلی قراردادی برای آن وضع کرد، می‌توان در چارچوب این مدل اثرات ناشی از نویز را کاهش داد و طراحی سیستم را به سمتی سوق داد که بیداد گری و سرکشی نویز محیطی، کمترین اختلال را در عملکرد آن سیستم داشته باشد. در اغلب روش‌های گوناگون آشکار سازی سیگنال‌ها و ردیابی اهداف زیرآب نویز محیطی با یک فرض ثابت، به صورت نویز سفید گوسی با میانگین صفر فرض می‌شود و این فرضیه اگر چه یک مدل با قطعیت صد در صد نیست ولی با تکیه به آن می‌توان سیستمی طراحی کرد که تا حد امکان تاثیر نویز را کم نمود. در محیط زیرآب منابع مولد نویز به دو دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از:

الف) نویزهایی که به وسیله شناورهای دریایی تولید می‌شود.

ب) نویز پس زمینه.

### ۱-۴-۱- نویزهایی که به وسیله شناورهای دریایی تولید می‌شوند:

به طور کلی منابع تولید نویز صوتی در کشتی و زیردریایی‌ها را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد.

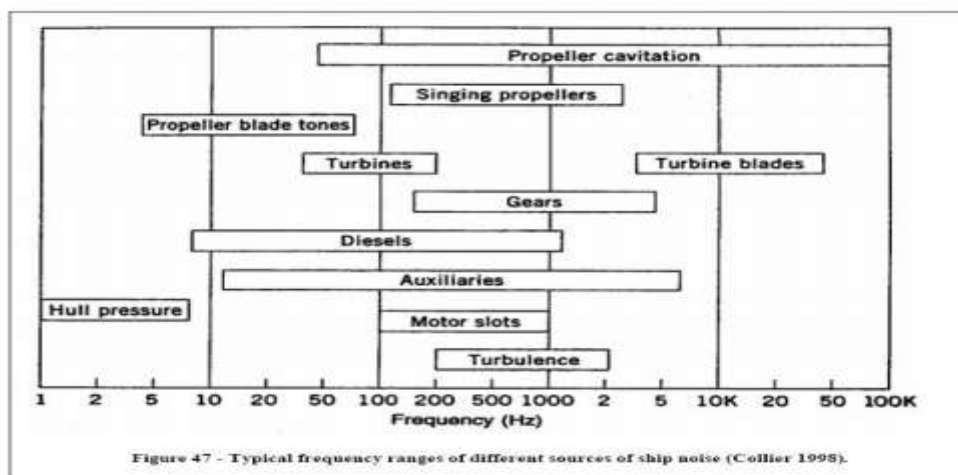
۱- نویز تولید شده توسط موتور خانه (منبع اصلی حرکت، محور و قطعات متحرک موتور کشتی)

۲- نویز تولید شده توسط گردش پروانه کشتی یا زیردریایی ( یا هر سیستمی که باعث پراکندگی آب شود )

۳- نویز تولید شده توسط اثرات هیدرو آکوستیک که در اثر عبور بدنه کشتی در آب ایجاد می‌شود.

۴- نویزهای تولید شده توسط منابع مختلف تولید صدا در کشتی و زیردریایی.

هر یک از این منابع تولید نویز، بیان شده دارای باند فرکانسی مخصوصی هستند و رفتارهای مختلفی را در شرایط مختلف از خود بروز می‌دهند. بیشترین اطلاعات در بازه ۱۰ هرتز تا ۲ کیلو هرتز وجود دارد که در شکل ۱-۳ میزان نویز تولیدی از هر بخش از کشتی و زیردریایی نشان داده شده است. البته در بقیه باندهای فرکانسی نیز اطلاعاتی وجود دارد.



شکل ۱-۳- نمایش منابع تولید نویز در کشتی و زیردریایی

### ۱-۱-۴-۱- نویز تولید شده توسط موتورخانه:

در حالت کار و در شرایط عادی نویز موتور خانه قوی‌ترین نویز یا به عبارتی نویز حاکم در بین منابع تولید کننده نویز در کشتی‌ها و زیردریایی‌ها است. انواع مختلف موتور خانه می‌تواند نویزهای گوناگونی را تولید کند. موتور دیزلی یکی از پرکاربردترین انواع سیستم‌های رانشی در بین کشتی‌ها است. در این نوع موتور تعدادی سیلندر با نرخ آتش مشخص وجود دارد. در این حالت نرخ آتش تعیین کننده فرکانس اصلی نویز در این قسمت است. در هر صورت همواره مقداری عدم تعادل در بین سیلندرها وجود خواهد

داشت و این باعث مشاهده پیک‌های کوچک در طیف فرکانس اصلی نرخ آتش سیلندرها خواهد بود [۴]. به وسیله مقایسه فرکانس‌های اصلی در طیف و استخراج این پیک‌ها می‌توان تعداد سیلندرها را در موتور تخمین زد. همچنین نوع دیگر سیستم‌های رانشی موتورهای توربینی می‌باشند که این موتورهای توربینی بیش از موتورهای دیزلی نویز صوتی تولید می‌کنند اما به صورت قوی‌تری نیز می‌توانند نویزهای تولیدی را دمپ کنند. عنصر اصلی تعیین کننده نویز موتورهای توربینی سرعت چرخش آنها است. در این حالت نیز به دلیل عدم تعادل در پره‌های توربین با کمی تعامل در بررسی فرکانس اصلی می‌توان تعداد پره‌ها را مشخص کرد، در حقیقت تعداد پره‌ها نیز یکی از اجزا اصلی در تولید فرکانس است، به نحوی که تعداد پره می‌تواند فرکانس اصلی را جا به جا کند. شاید به نوعی بتوان گفت فرکانس اصلی در این حالت برابر است با حاصل ضرب تعداد پره در سرعت گردش. همچنین جا به جایی هوای گرم نیز می‌تواند تولید کننده یکی دیگر از مولفه‌های فرکانسی باشد. البته نوع دیگر سیستم‌های رانشی در کشتی و زیردریایی موتورهای الکتریکی و ژنراتوری می‌باشند که این سیستم‌ها براساس چرخش محور کار می‌کنند. در این سیستم‌ها مبنای اصلی تولید نویز نرخ چرخش شفت می‌باشد. اما مولفه اصلی فرکانس برای این نوع موتورها عبارتند از حاصل ضرب چرخش شفت در تعداد قطب‌های آرماتور. در بین این سه نوع سیستم رانش، سیستم نوع موتور الکتریکی و ژنراتوری کمترین نویز صوتی را تولید می‌کند. معمولاً زیردریایی‌ها از این سیستم برای رانش استفاده می‌کنند. وقتی که زیردریایی در آب فرو می‌رود به دلیل تولید کم نویز صوتی این سیستم، آشکار سازی آن سخت‌تر می‌باشد. بعد از موتور یکی از مهمترین قسمت‌هایی که عامل تولید نویز در موتور خانه است، جعبه دنده می‌باشد. این قسمت در واقع واحد رابط بین سیستم رانش و پروانه است. در بعضی از حالات خاص این قسمت می‌تواند حتی بیش از سیستم رانش تولید نویز کند. مولفه اصلی فرکانس نویز تولیدی این سیستم با تعداد دندانه‌های درگیر در یک ثانیه رابطه مستقیم دارد. بعضی از سیستم‌های رانش مانند موتور الکتریکی می‌توانند با دور نسبتاً پایین پروانه کار کنند. در این حالت بیشترین نویز صوتی توسط این واحد تولید می‌شود. صوت تولید شده توسط قسمت موتور خانه بعد از عبور از ساختار اصلی توسط بدنه کشتی به اقبانوس

منتقل می‌شود. این انتقال با ضربات شدید صوتی همراه است. انتقال صوت از بدنه به اقیانوس یکی از قسمت‌های مهم در طراحی نظامی می‌باشد. به طور کلی تصور می‌شود که در پروسه این انتقال هارمونیک‌های زیادی به صورت غیر خطی به وجود می‌آید. منشاء این هارمونیک‌ها باعث بهم ریختگی شدید طیف فرکانسی می‌شود. اغلب نویزهایی که توسط موتور خانه تولید می‌شود در فرکانس‌های بالا و هارمونیک‌های آن‌ها متمرکز می‌شود. به این دسته نویزها تونال نویز یا نویزهای باند باریک نیز می‌گویند. این نویزها به صورت پیک‌هایی در طیف فرکانسی کشتی و زیردریایی مشاهده می‌شوند. موتور خانه به همراه سیستم رانش اصلی می‌توانند وقتی که سرعت کشتی بالا می‌رود نویزهای صوتی با فرکانس بالا تولید کنند، اما در اکثر موتور خانه‌ها قسمت‌های کمکی مانند ژنراتور ویا پمپ تغییری در فرکانس نویز تولیدی نخواهند داشت [۵].

### ۱-۴-۱-۲- نویز تولید شده توسط گردش پروانه کشتی‌ها و زیردریایی‌ها:

پروانه می‌تواند صداهای مختلفی را بسته به اینکه کاویتاسیون داشته باشد یا خیر و بسته به سطح کاویتاسیون در صورت وجود تولید می‌کند [۶]. پروسه کاویتاسیون وقتی اتفاق می‌افتد که یک تغییر فشار ناگهانی رخ دهد. در این حالت آب بخار شده و حباب‌های کوچکی تشکیل می‌شود، سپس این حباب‌ها دوباره به مایع تبدیل شده و با ترکیدن، باعث تولید صدا می‌شود. همچنین در عمل حذف کامل کاویتاسیون ممکن نیست و یا بسیار سخت است، به دلیل اینکه پروانه باید نیروی لازم برای رانش به سمت جلو تولید کند و برای تولید نیروی زیاد مجبور به تغییر فشار در محیط اطراف خود است. برای کاهش اثر کاویتاسیون، زیردریایی‌های مدرن دارای پروانه‌های بزرگ با تعداد پره‌های زیاد هستند. با افزوده شدن سرعت، هر پروانه شروع به کاویتاسیون می‌کند. و این باعث تولید یک نویز پهن باند و همچنین بزرگتر شدن حباب‌ها می‌شود. همچنین ترکیدن حباب‌ها صدای قوی‌تری تولید می‌کند. طراحی ضعیف یا صدمه دیدن پروانه و شفت و یا صدمه دیدن تیغه‌ها می‌تواند باعث تولید نویز صوتی مشخص با صدای بلند شود که معمولاً به آن Singing یا آواز خواندن می‌گویند. این عمل به خصوص در سرعت بالا بیشتر رخ می‌دهد.

### ۱-۴-۱-۳- نوز تولید شده توسط اثرات هیدرو آکوستیک:

برش و قطع امواج در اطراف دماغه، بدنه و عقبه کشتی ها و زیردریایی ها یک سیگنال نوز آکوستیکی ایجاد می کند که ناشی از عوامل متعدد هیدرود آکوستیکی است. این سیگنال از حیث انرژی بعد از سیگنال حاصله از گردش پروانه کشتی قرار می گیرد.

### ۱-۴-۱-۴- نوز تولید شده توسط منابع مختلف تولید صدا کشتی:

تمامی صداهایی که در کشتی ایجاد می شود در نهایت وارد اقیانوس می شود. بعضی از این سرو صداها به دلیل انجام فعالیت های روزانه کارکنان کشتی و زیردریایی ها می باشد. لق بودن یا غلط بسته شدن وسایل آویزی مانند، کلیدهای امنیتی یا دستگاه خاموش کننده آتش یا هر وسیله آویزی دیگر که سر جای خود محکم بسته نشده باشد می تواند باعث تولید نوز قابل توجه صوتی مخصوصا در هنگام برخورد کشتی با یک موج شدید باشد. در آخر، لرزش لوله ها، دشارژ شدن آب سرد کن، تخلیه زیر سطحی یا رو سطحی گاز و یا اثرات دیگر می توانند باعث تولید نوز قابل توجهی شوند. این صداهای بی قاعده یا نامنظم که توسط کشتی یا زیردریایی تولید می شود می شود اطلاعات زیادی را در زمینه فعالیت کشتی یا زیردریایی آشکار می کند. به طور مثال صدای ایجاد شده توسط باز شدن در دهانه محفظه اژدرها نشان می دهد که یک زیردریایی قصد حمله را دارد. تصمیم آتش با استفاده از سلاح یک نوز مشخص را تولید می کند. یکی دیگر از صداهایی که به صورت گذرا تولید می شود و به سختی می توان از تولید آن جلوگیری کرد، صدای سکان و موتور خانه است. برای نگه داشتن کشتی و یا زیردریایی در یک مسیر ثابت باید سکان به صورت ثابت بماند و موتور را خاموش و روشن کرد. که این امر خود باعث تولید فشارهای مکانیکی در موتورخانه و انتقال آن به جریان آب می شود.

### ۱-۴-۲- نوزهایی پس زمینه:

بعد از اینکه صدای تولید شده به وسیله کشتی و زیردریایی به آب رسید باید در یک محیط بسیار خوب منتشر شود. در این مسیر این صدا با بسیاری از صداهای دیگر ترکیب می شود و سرانجام به تجهیزات

سونار می‌رسد، همان طور که می‌دانید دنیای ساکت یک روپا است. و محیط زیرآب به اصوات زیادی که از منابع مختلف ساطع می‌شود آغشته است. قصد داریم این اصوات را در ادامه مورد بررسی قرار دهیم. منابع نويز پس زمينه‌ای به ۷ دسته کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

### ۱-۲-۴-۱- مداخلات انسانی:

با توجه به این که انتشار صوت در آب بسیار آسان و سهل صورت می‌گیرد نويز حاصل از خطوط کشتیرانی حتی اگر در دور دست هم باشد احساس می‌شود. ولو اینکه کشتی‌ها قابل تشخیص نباشند. این امر باعث ترکیب نويزها با یک دیگر شده و یک نويز پهن باند مهمه وار تشکیل می‌دهند. تاسیسات ساحلی مانند مته‌های حفاری نیز یک صوت متمایز و مشخص تولید می‌کنند. طیف این اصوات به شدت تحت تاثیر تابع انتقال محیط انتشار که محیط اقیانوس است قرار گرفته و تغییر پیدا می‌کند. در واقع اقیانوس به مانند یک صافی پایین گذر عمل کرده و فرکانس‌های بالای این سیگنال را حذف می‌کند. پس تنها تاثیر این اصوات تولید یک اغتشاش با فرکانس پایین است که در صورت محدود بودن منابع دیگر به خوبی قابل تشخیص و جدا سازی است [۷]. بیشتری فرکانس این نويز ۱۰۰۰ هرتز است.

### ۱-۲-۴-۱- اختلال سطحی:

اختلال سطحی، معمولا از تداخل آب با پدیده‌های اتمسفری مانند باد به وجود می‌آید. بادهای شدیدتر صداهای قوی تری تولید می‌کنند و این صداها توسط اثراتی مانند تولید حباب ایجاد می‌شوند.

### ۱-۲-۴-۱- جانداران دریایی:

حیوانات دریایی و همین طور گیاهان دریایی می‌توانند باعث تولید صدای قابل توجهی شوند [۸]. بسیاری از این حیوانات دریایی عمدا صدای را از خود تولید می‌کنند. این صداها می‌توانند برای منظور خاصی همچون ناوبری و یا جذب جفت تولید شود. این صداها دارای فریم‌های مختلفی هستند از صدای خیلی کوتاه ماهی‌ها گرفته تا صدای بلند و کشیده‌ای که وال‌ها تولید می‌کنند. بسیاری از حیوانات دریایی دیگر، حرکاتی را به صورت منظم و از روی قاعده انجام می‌دهند. با حرکت و شنا کردن آن‌ها در آب از

کنار آبشش‌های آن‌ها صداهای مشخصی تولید می‌شود. فرکانس این نوع صداها بسیار متفاوت است به گونه‌ای که در وال‌های آبی، انرژی صوتی به حدود ۱۵۰ هرتز و در دلفین‌ها در حدود ۱۲ کیلو هرتز قرار دارد.

#### ۱-۴-۲-۴- فعالیت‌های زمین لرزه‌ای:

تعداد زیادی زمین لرزه و فعالیت آتشفشانی در زیر دریاها رخ می‌دهد. در حقیقت یک فعالیت کوچک لرزه‌ای در هر لحظه و در هر مکان که باشد در حال انجام است. به همین دلیل یکی از بخش‌های مهم اصوات پس‌زمینه‌ای که به ما می‌رسد را این صداها تشکیل می‌دهند [۹]. این فعالیت‌ها گاهی دارای انرژی فرکانسی تا ۳ کیلو هرتز نیز می‌باشند.

#### ۱-۴-۲-۵- شکستن یخ:

تغییرات دمایی در قطب‌ها باعث می‌شود که فشار مکانیکی به لایه‌های یخی وارد شده و قطعات بزرگ یخ آب شود و به اقیانوس بیفتند. این امر باعث تولید یک نویز بزرگ صوتی می‌شود.

#### ۱-۴-۲-۶- صدای بارش باران:

باران، برف و تگرگ می‌توانند صداهای قابل توجهی را در دریا تولید کنند. این صداها به گونه‌ای هستند که تمامی طیف فرکانسی را پوشش می‌دهند [۱۰]. یکی از مشکلاتی که در سونار پسیو با آن روبه‌رو هستیم، این خانواده از نویزهای پس‌زمینه هستند. این نویزها دارای انرژی فرکانسی تا ۱۵ کیلو هرتز بوده و به طور یک‌نواخت وجود دارند.

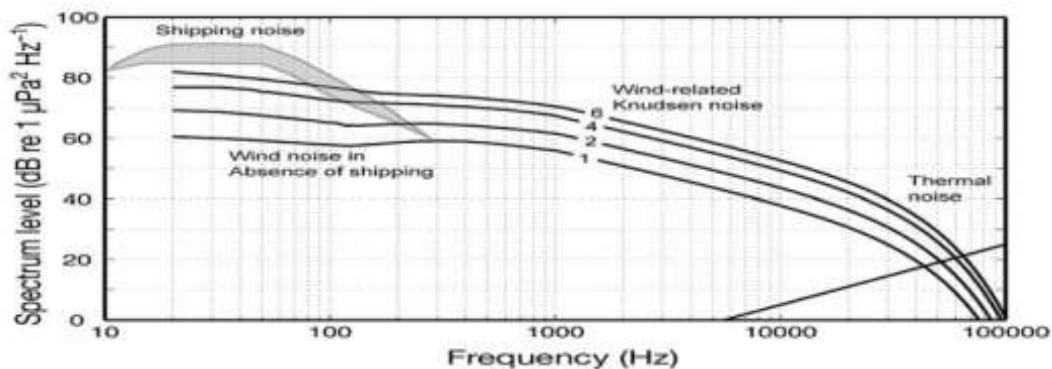
#### ۱-۴-۲-۷- نویز حرارتی و مولکولی:

وجود دماهای مختلف در لایه‌های گوناگون دریا سبب تولید حباب‌هایی می‌شود، که ترکیدن این حباب‌ها سبب تولید یک نویز با قدرت بیش از ۱۰ کیلو هرتز می‌شود [۱۱].

#### ۱-۴-۲-۸- تقسیم‌بندی نویزهای پس‌زمینه‌ای در طیف فرکانسی:



داشتن یک مشخصات خوب از نویزهای پس زمینه‌ای برای جنگ افزارهای زیر سطحی بسیار مهم است. یکی از وظایف روزمره در نیروی دریایی کشیدن چارتی است که نویز پس زمینه و سطح آن را نشان دهد. یکی از چارت‌های معروف در این زمینه چارت "Knudsen Curves" می‌باشد. که هفت مورد نویز پس زمینه‌ای را که در فوق توضیح داده شده در سه دسته جامع‌تر بررسی می‌کند که باند اول را در محدوده صفر تا ۲۰۰ هرتز فرض شده است. باند دوم را از محدوده ۲۰۰ تا ۵۰ کیلو هرتز و باند سوم را از ۵۰ کیلو هرتز به بالا فرض شده است. که این چارت در شکل ۱-۴ طیف مربوط به نویز آکوستیکی در سه باند نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در باند اول عامل موثر در تولید نویز، مداخلات انسانی می‌باشد. در باند دوم عوامل بشری کاهش می‌یابد و موثرترین عامل باد می‌باشد، بنابراین این نمودار به سرعت باد بستگی مستقیم دارد. در باند سوم عامل موثر نویز حرارتی و مولکولی خواهد بود. منحنی متفاوتی که در باند دوم رسم شده نشانگر تغییرات منحنی با وضعیت باد است. ناحیه اول نیز با دو منحنی که حداقل و حداکثر سطوح طیف را نشان می‌دهد مشخص شده است.

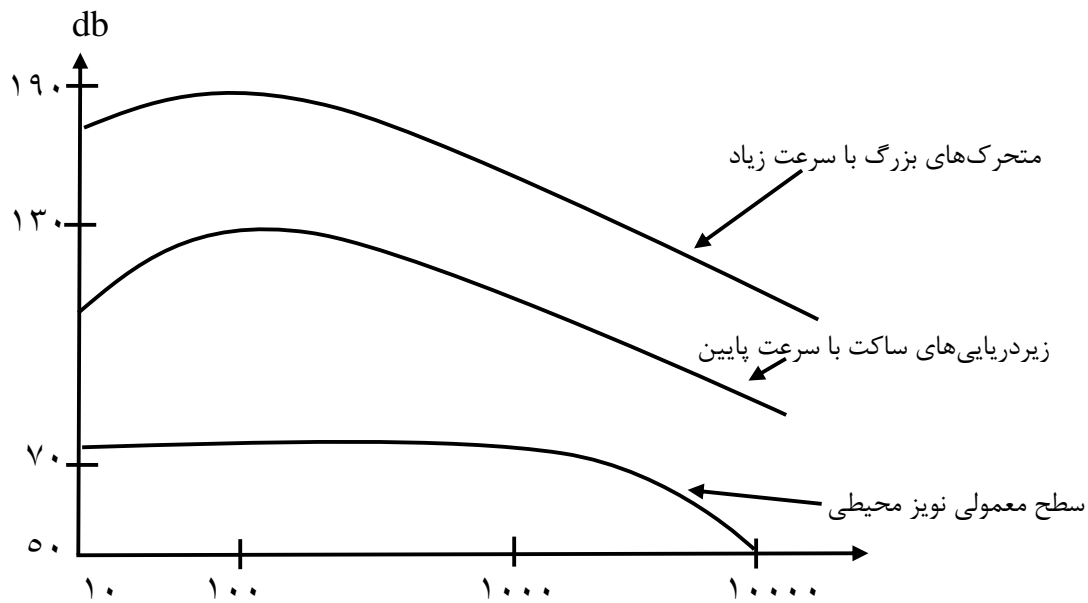


شکل ۱-۴- طیف مربوط به نویز آکوستیکی در سه باند

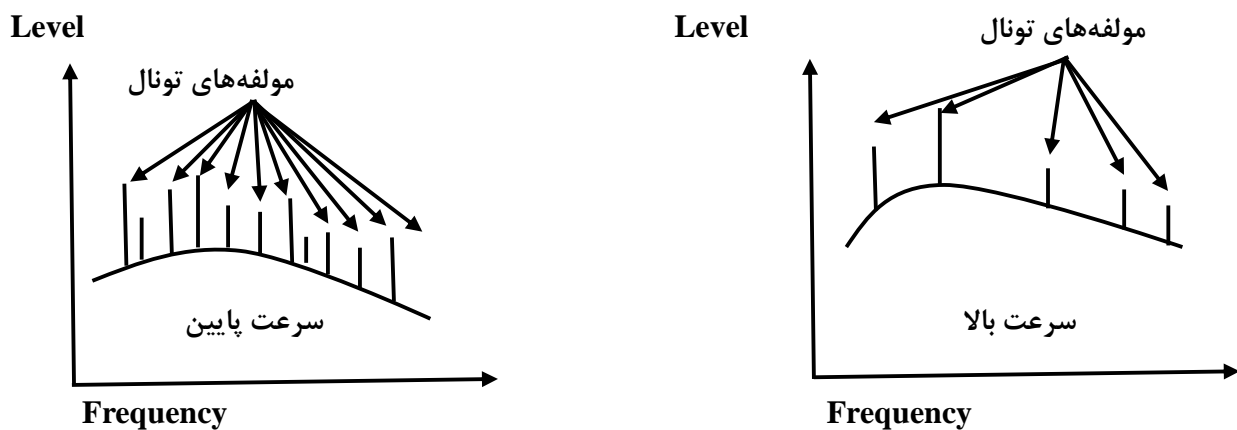
### ۱-۴-۳- مشخصه‌های آکوستیکی کلی متعلق به محرک‌های دریایی:

در شکل ۱-۵ کل حوزه فرکانسی مربوط به طیف سیگنال‌های تولید شده توسط متحرک‌های دریایی دیده می‌شود. به طوری که مشهود است در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ کیلو هرتز طیف توان شیب تضعیف ۲۰ دسی بل بر هر دهه (۲۰ db/decade) را دارد و از درجه اهمیت ساقط می‌شود. در این شکل اطلاعات بسیار مهم دیگری نیز نهفته است. با توجه به شکل می‌توان دریافت که پایین‌ترین و ضعیف‌ترین

منحنی طیفی متعلق به زیردریایی‌های مخفی و غوطه‌ور است که با سرعت پایین و با نیروی محرکه الکتریکی حرکت می‌کند و نویز حاصله از پروانه ندارند. محدوده بالایی متعلق به کشتی‌های بزرگ با سرعت بالاست و همانگونه که مشاهده می‌شود چیزی حدود ۵۰ تا ۷۰ دسی بل بالاتر از محدوده پایینی مشخصه متحرک‌های دریایی یعنی زیردریایی‌های مخفی است. در همین شکل منحنی مربوط به نویز دائمی محیط ترسیم شده است و همانگونه که مشخص است چیزی حدود ۴۰ تا ۵۰ دسی بل زیر منحنی مربوط به ضعیف‌ترین سیگنال حاصله از متحرک‌های دریایی است. بنابراین می‌توان در شرایط خاص حضور خاموش‌ترین متحرک‌های دریایی را کشف کرد. در شکل ۱-۶ شکل دقیق‌تر مشخصه طیف مربوط به یک زیردریایی به تصویر کشیده شده است. در این طیف تونال‌هایی دیده می‌شود که معمولاً ثابت هستند و تغییرات چندانی با سرعت نمی‌کنند. تونال‌های دیگری هم در طیف هستند که مربوط به گردش پروانه زیردریایی می‌شوند و بستگی مستقیم به سرعت متحرک دارند. بنابراین در حالی که تونال‌های مربوط به دستگاه‌های جانبی زیردریایی ثابت است با اضافه شدن سرعت زیردریایی تونال‌های دیگری هم تولید شده و تقویت می‌شوند و در ضمن محل آنها در حوزه فرکانسی متغیر است و این تغییر متناسب با تغییر فرکانس گردش پروانه زیردریایی است. سیگنال‌هایی که در این مبحث توضیح داده شد سیگنال‌هایی هستند که معمولاً توسط یک متحرک دریایی تولید می‌شوند و اگر قرار باشد حضور یک متحرک در محیط کشف و آشکار شود، استخراج و پردازش این سیگنال‌ها معمولاً در شرایط عادی اطلاعات کافی در اختیار سیستم آشکار ساز قرار می‌دهد [۴].



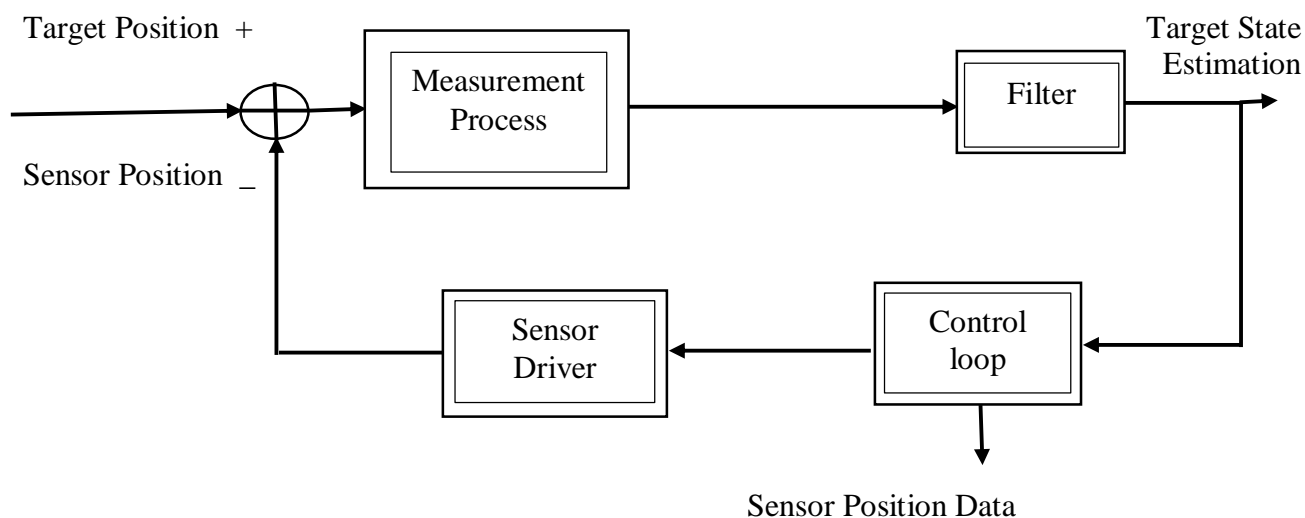
شکل ۵-۱- طیف مربوط به محدوده نویزهای آکوستیکی تولید شده توسط متحرک‌های دریایی



شکل ۶-۱- مشخصه طیف مربوط به یک زیردریایی

## ۵-۱- سیستم ردیابی تک‌هدفی (Single Target Tracking System):

در سیستم ردیابی تک‌هدفی، تنها یک هدف مورد ردگیری قرار می‌گیرد. نمودار جعبه‌ای کلی که می‌توان برای این سیستم در نظر گرفت مطابق شکل ۷-۱ می‌باشد.



شکل ۱-۷- نمودار جعبه‌ای کلی سیستم ردیابی تک هدفی

از دید کنترلی در این سیستم، هدف حفظ خط دید حسگر ردگیری در راستای هدف واحد می‌باشد. همان طور که در نمودار جعبه‌ای فوق دیده می‌شود، حلقه ردگیری تک هدفه، نوعاً برای تفکیک کننده داده کار می‌کند و انحراف بین زاویه‌ای که حسگر در حال حاضر به هدف اشاره می‌کند و زاویه خود هدف را اندازه‌گیری می‌نماید. نهایتاً حلقه ردگیری STT، طوری عمل می‌کند که انحراف ذکر شده به سمت صفر میل کند. برای مثال در یک سیستم ردیابی راداری تک هدفه نوک آنتن مستقیماً به سمت هدف نگه‌داشته می‌شود و در یک سیستم IR تلاش می‌شود که هدف در وسط میدان دید نگه‌داشته شود. مطابق شکل ترسیم شده فوق، در یک سیستم ردیابی تک هدفه، خطای داده محاسبه شده و به صورت مستقیم وارد صافی ردگیری می‌شود و چون در این سیستم، هدف واحد در نظر گرفته شده است، لذا حسگر به صورت اختصاصی برای این هدف به کار رفته است و بنابراین در اینجا به محاسبه توابع وابسته پیچیده نیاز نیست. صافی مورد اشاره در این نمودار جعبه‌ای ممکن است آنالوگ باشد ولی در سیستم‌های مدرن نوعاً از صافی کالمن استفاده می‌شود.

## ۱-۵-۱- سیستم ردیابی غیرفعال:

منظور از ردیابی غیر فعال، ردیابی بدون ارسال سیگنال در محیط زیرآب است، که در عمل برای این نوع ردیابی از سونارهای غیر فعال استفاده می‌شود که در این سیستم‌ها برای ردیابی اهداف، اندازه‌گیری‌ها از طریق منابع گوناگونی همچون انعکاس بازگشتی از اهداف با توجه به قوت آن‌ها و با وجود نویز زمینه‌ای و منابعی همچون نویز حرارتی انجام می‌شود. ردیابی اهداف زیرآب توسط سونارهای غیرفعال، برای پیش‌بینی مسیر هدف و جلوگیری از تداخل اهداف و اشتباه شدن اهداف بایکدیگر و در پاره‌ای از موارد جهت پیش‌بینی کوتاهترین فاصله هدف مورد نظر تا سیستم سونار در مسیری که هدف طی می‌کند، به کار می‌رود. همچنین ردیابی اهداف امکان پیش‌بینی کوتاهترین زمانی که هدف به کوتاهترین فاصله می‌رسد را فراهم می‌سازد. با توجه به سرعت کم انتشار امواج آکوستیکی زیرآب به ویژه در مقایسه با امواج راداری، نیاز قابلیت پیش‌گویی و تخمین مسیر حرکت هدف و یا سایر مشخصات مربوطه (از جمله موقعیت و سرعت و ...) در سونار غیر فعال ضروری می‌باشد [۱۲]. از روش‌های ردیابی اهداف زیرآب، توسط سونارهای غیرفعال که طی سال‌های گذشته و توسط افراد مختلف ارائه شده است، می‌توان به ردیابی اهداف با استفاده از روش  $IRWLS^4$  [۱۳-۱۴]، ردیابی وقفی اهداف زیرآب با استفاده از روش  $GKF^5$  [۱۵-۱۶]، ردیابی اهداف با استفاده از روش  $WTLS^6$ ,  $TLS^7$ ,  $LS^8$ ,  $ML^6$  [۱۷-۱۸]، ردیابی اهداف زیرآب با استفاده از روش  $EKF^{10}$  [۲۰-۲۱]، ردیابی اهداف زیرآب با گونه‌های مختلفی از روش  $UKF^{11}$  [۲۲-۲۳-۲۴-۲۵]، ردیابی اهداف با استفاده از روش  $PF^{12}$  [۲۶] اشاره کرد. در [۱۳-۱۴] ردیابی هدف با فرض در نظر گرفتن یک حسگر در زیرآب و برای ردیابی یک هدف واحد انجام گرفت. ردیابی اهداف زیرآب در مقالات ارائه شده، مبتنی بر مدلی است که بردار حالات هدف را با تاخیرهای زمانی رسیدن سیگنال آکوستیکی ساطع شده توسط هدف از مسیرهای چندگانه مستقیم،

۴ = Iteratively recursive weighted least squares

۵ = Generalized Kalman Filter

۶ = maximum likelihood

۷ = Least squares

۸ = Total least-squares

۹ = weighted total Least squares

۱۰ = Extended Kalman filter

۱۱ = Unscented Kalman filter

۱۲ = particle filter

انعکاس از سطح آب و انعکاس از کف دریا مرتبط می‌سازد. همچنین در این روش خطی کردن مدل‌های اندازه‌گیری انجام می‌گیرد. به کارگیری مدل حداقل مربعات در این روش تنها با فرض سفید بودن نویز اندازه‌گیری موفق خواهد بود در واقع برای موارد زیادی از خطاهای غیرگوسی، قابلیت تخمین‌گرهای حداقل مربعات نسبت به حالت بهینه دور است. در این مقالات روش بازگشت مقاوم، برای غلبه مدل حداقل مربعات بر خطاهای غیرگوسی پیشنهاد شده است که با به کارگیری این روش قابلیت‌های سیستم برای خطاهای گوسی نیز افزایش می‌یابد. در [۱۶-۱۵] روش ردیابی افقی اهداف زیرآب با استفاده از روش GKF انجام شده است. مدلی که برای سیستم در نظر گرفته شده است مبتنی بر وابستگی حالات سیستم بر اندازه‌گیری‌های تاخیر زمانی و نیز خطی نمودن بردار اندازه‌گیری می‌باشد. قبلاً برای ردیابی افقی اهداف از صافی کالمن کلاسیک، استفاده می‌شد که به علت آن که پایداری سیستم را به نحو مطلوب حفظ نمی‌شد، لذا هر اندازه‌گیری می‌بایست جداگانه آنالیز شود. در مقالات ارائه شده توسط این افراد یک صافی کالمن تعمیم یافته برای ردیابی افقی زیرآب پیشنهاد شده است که با سبک و سنگین کردن بین هزینه‌های مربوط به خطای تخمین و ناپایداری تخمین‌ها و سرانجام با انتخاب وزن‌های مناسب برای دقت و پایداری در تابع مورد نظر، تعادل مطلوب میان دقت و پایداری تخمین‌ها برقرار شده است. در [۱۷] به بررسی شرایط مورد نیاز برای رویت‌پذیری یک هدف در فضای سه بعدی پرداخته شده است. بردار اندازه‌گیری زاویه سمت هدف بوده و بردار حالت تشکیل شده از موقعیت و سرعت هدف می‌باشد. در این مقاله فرض بر این نهاده شده که هدف با سرعتی ثابت در راستای خط مستقیم در حال حرکت بوده است و ناظر هم با یک حسگر متحرک به ردیابی هدف با استفاده از روش حداقل مربعات می‌پردازد و همچنین نشان داده شده است که برای ردیابی یک هدف در حال حرکت با سرعت ثابت نیاز به اندازه‌گیری حداقل ۳ زاویه مستقل می‌باشد. در [۱۸] به ردیابی یک هدف ثابت با استفاده از روش ML و LS پرداخته شده است که در این مقاله بردار اندازه‌گیری شامل زاویه سمت هدف می‌باشد و همچنین علاوه بر وجود نویز در بردار اندازه‌گیری، نویز در موقعیت ناظر نیز در نظر گرفته شده است و مسئله در دست نبودن محل دقیق ناظر بحث شده است که در

نهایت برای مقابله با خطا در موقعیت ناظر و خطا در اندازه گیری به معرفی روش جدیدی به نام مجموع حداقل مربعات ( TLS ) پرداخته شده است. در [۱۹] به بهبود تخمین موقعیت هدف ثابت، با وجود خطا در موقعیت ناظر و نویز در اندازه گیری پرداخته است. که این دو نویز از هم مستقل بوده و برای برآورد بهتر موقعیت هدف روش وزندار نمودن مجموع حداقل مربعات ( WTLS ) معرفی شده است. در [۲۰-۲۱] روش ردیابی اهداف زیرآب با استفاده از EKF، ارائه گردیده است. که در این مقالات بردار اندازه گیری اختلاف زمانی رسیدن سیگنال ساطع شده از هدف از طریق مسیر مستقیم، مسیر انعکاس از کف آب و مسیر انعکاس از سطح دریا می باشد و همچنین در این مقاله فرض شده است که هدف با سرعت ثابت در حال حرکت بوده و یک ناظر ثابت با استفاده از انعکاسات ایجاد شده از هدف در حال ردیابی می باشد. در [۲۲] به ردیابی یک هدف زیرآب با استفاده از روش SPKF<sup>۱۳</sup> پرداخته شده است. بردار اندازه گیری زاویه سمت هدف می باشد. در این مقاله فرض بر این است که هدف با سرعت ثابت در حال حرکت بوده و ردیاب با یک حسگر با انجام مانور خاص به ردیابی می پردازد همچنین فرض شده است که حسگر دارای ۲ درجه بایاس می باشد و برای ردیابی از الگوریتم EKF هم استفاده شده است و نشان داده شده که نه تنها SPKF بر بایاس حسگر غلبه کرده بلکه روند همگرایی آن دارای سرعت بالاتری نسبت به EKF می باشد. در [۲۳] با استفاده از دو حسگر ثابت به ردیابی یک هدف دارای مانور پرداخته است. که بردار اندازه گیری شامل زاویه سمت هدف می باشد. از آنجایی که ردیابی یک هدف دارای مانور با دو حسگر ثابت و با استفاده از روش UKF دارای خطای زیادی می باشد و موجب واگرا شدن این تخمین گر می شود به معرفی روش STF-UKF<sup>۱۴</sup> پرداخته و نشان داده شده است که روش SFT-UKF دارای برتری در تخمین موقعیت و سرعت هدف نسبت به UKF می باشد و همچنین این برتری در شرایطی که مقدار دهی اولیه انحراف زیادی داشته باشد مشهودتر است. در [۲۴] به ردیابی یک هدف زیرآب در حال حرکت با سرعت ثابت به وسیله یک حسگر در حال حرکت در راستای خط

---

<sup>۱۳</sup> = Joint sigma point kalman filter

<sup>۱۴</sup> = Strong tracking filter- Unscented kalman filter

مستقیم پرداخته است. که بردار اندازه گیری زاویه سمت بوده است. در این مقاله به معرفی روش دیگری از خانواده صافی بی‌رد یعنی  $URTSS^{15}$  پرداخته شده است. که تفاوت اصلی این صافی با دیگر صافی‌های این خانواده در نقاط سیگما و وزن دهی آن می‌باشد. در نهایت روش  $URTSS$  را با روش  $UKF$  معمولی و  $EKF$  مقایسه کرده که  $URTSS$  دارای  $RMSE^{16}$  کمتری نسبت به دو صافی بیان شده می‌باشد. در [25] به ردیابی یک هدف در حال حرکت با استفاده از روش  $IUKF^{17}$  پرداخته شده است. که بردار اندازه گیری شامل زاویه سمت هدف و مشتق زاویه سمت هدف می‌باشد. تفاوت عمده این صافی با هم خانواده‌های خود در نحوه آپدیت اندازه گیری می‌باشد، زیرا که این صافی در مرحله پیش بینی از خطی سازی آماری و در مرحله آپدیت اندازه گیری از خطی سازی تحلیلی استفاده می‌کند. در این مقاله روش معرفی شده با روش  $UKF$  معمولی و  $EKF$  مقایسه شده است که صافی بیان شده دارای برتری در برآورد موقعیت و سرعت هدف می‌باشد و این برتری در شرایط نویز اندازه گیری زیاد و مقدار دهی اولیه نامناسب مشهودتر می‌باشد. در [26] به ردیابی یک هدف در حال حرکت با سرعت ثابت با استفاده از 4 صافی  $UKF$ ,  $EKF$ ,  $PF$  و  $SVSF^{18}$  در فضای دو بعدی پرداخته است. حرکت حسگر هم با سرعت ثابت و در راستای خط مستقیم فرض شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش  $PF$  و  $SVSF$  دارای برتری در برآورد موقعیت و سرعت نسبت به دو صافی بیان شده می‌باشند و همچنین در شرایط اولیه ضعیف  $SVSF$  دارای نتایج دقیق‌تری می‌باشد. همچنین نشان داده شده است که  $SVSF$  در برابر خطاهای مدل سازی و عدم قطعیت‌ها دارای قدرت بیشتری بوده و برآورد بهینه‌تری خواهد داشت. و ضعف آن مشکل بودن تنظیم پارامترهای  $SVSF$  می‌باشد. در [27] به بررسی جامع ردیابی اهداف زیرآب از طریق اندازه گیری زاویه سمت پرداخته است و تخمین گرهای اهداف زیرآب را در دو دسته پردازش گرهای دسته‌ای و پردازش گرهای بازگشتی مورد بررسی قرار داده است. همچنین به ردیابی

<sup>15</sup> = Unscented Rauch-Tung-Striebel smoother

<sup>16</sup> = Root mean square error

<sup>17</sup> = Iterated unscented Kalman filter

<sup>18</sup> = Smooth variable structure filters



اهداف در انواع مختلف حرکتی از جمله حرکت با سرعت ثابت و حرکت شتاب‌دار پرداخته است و ردیابی اهداف توسط یک حسگر و یا چند حسگر مورد مطالعه قرار داده است و در مورد شرایط رویت پذیر هدف متناسب به حرکت هدف بحث کرده و ردیابی با وجود خطا در موقعیت ناظر را مورد بررسی قرار داده است.

## ۱-۶- هدف پایان نامه:

هدف اصلی این پایان نامه به صورت خلاصه، ردیابی یک هدف زیرآب با استفاده از اصوات ایجاد شده به واسطه خود هدف و اجزای تشکیل دهنده آن می‌باشد که برای انجام این کار از سونارهای غیرفعال استفاده خواهد شد. در این پایان نامه دو حسگر غیرفعال عملیات دریافت سیگنال‌های مورد نیاز برای اجرای الگوریتم ردیابی تک هدف زیرآب را انجام می‌دهند. بنابراین ساختار سیستم این پایان نامه شامل دو حسگر تعبیه شده در عمق مورد نظر زیرآب و یک هدف متحرک ساطع کننده سیگنال‌های آکوستیکی می‌باشد. پس از دریافت سیگنال‌های مورد نظر از طریق حسگرها، تقویت لازم روی آنها انجام شده و این سیگنال‌ها به عنوان ورودی جعبه اصلی این پایان نامه، یعنی جعبه اجرای الگوریتم ردیابی اهداف زیرآب می‌باشند. در جعبه ردیابی اهداف زیرآب از روش‌های مختلفی همچون انواع تخمین‌گرهای خانواده صافی کالمن جهت ردیابی اهداف استفاده شده است و در نهایت خروجی این جعبه موقعیت و سرعت اهداف زیرآب را مشخص می‌کند.

## ۱-۷- ساختار پایان نامه:

همان گونه که دیده شد، فصل اول این پایان نامه شامل مقدمه، تاریخچه، ابزار مورد نیاز جهت ردیابی اهداف زیرآب، نویزهای موجود در زیرآب، هدف و ساختار پایان نامه می‌باشد که در قسمت معرفی ابزار مورد نیاز جهت ردیابی اهداف زیرآب به معرفی سونارها، کاربردهای سونارها، انواع تقسیمات و دسته بندی‌ها سونار پرداخته شد و همچنین نویزهای موجود در محیط زیرآب به طور مختصر مورد بررسی

قرار گرفت. در فصل دوم این پایان نامه به معرفی صافی کالمن خواهیم پرداخت و در بخش تئوری صافی کالمن، مباحثی در خصوص روش تخمین حداقل مربعات و روش برآورد حداقل مربعات بازگشتی و صافی کالمن توسعه یافته ارائه می‌شود. در فصل سوم به معرفی انواع روش‌های بهینه‌سازی و سیستم‌های فازی می‌پردازیم و در نهایت صافی کالمن توسعه یافته را با استفاده از سیستم فازی و روش‌های بهینه‌سازی بهبود می‌بخشیم. در فصل چهارم مدلسازی سیستم ردیابی تک هدف متحرک و دو حسگر ثابت زیرآب، با استفاده از الگوریتم تاخیر زمانی رسیدن سیگنال‌ها، انجام می‌شود. در این فصل با تشریح مسائل هندسی تک هدف و دو حسگر زیرآب، معادلات دینامیکی و آکوستیکی حاکم بر سیستم استخراج شده و سرانجام بردار حالت، معادلات حالت و بردار اندازه‌گیری این سیستم تعیین می‌گردند و در پایان این فصل با انجام شبیه‌سازی‌های متلب به مقایسه تخمین‌گرهای EKF، UKF و FEKF<sup>۱۹</sup> با استفاده از این معادلات استخراجی خواهیم پرداخت. در فصل پنجم به معرفی سیستم ردیابی تک هدف متحرک و دو حسگر متحرک زیرآب، با استفاده از الگوریتم اندازه‌گیری فقط سمت پرداخته شده است. معادلات دینامیکی و استاتیکی حاکم بر سیستم استخراج شده است و همچنین با توجه به غیر خطی بودن رابطه بردار اندازه‌گیری به خطی کردن این رابطه برای استفاده در الگوریتم صافی کالمن توسعه یافته، اقدام شده است و با استفاده از معادلات استخراج شده به مقایسه سه روش تخمین‌گر EKF، UKF و FEKF در ردیابی با استفاده از زاویه سمت پرداخته شده است. در فصل ششم نتایج بدست آمده در این پایان نامه و نیز پیشنهادات ادامه کار در این زمینه ارائه می‌شود.

---

<sup>۱۹</sup> = Fuzzy extended Kalman Filter

# صافی کا لمن

## خطی و توسعہ یافتہ

## ۱-۲- مقدمه:

در بسیاری از شناورهای دریایی که از سونار غیرفعال جهت شناسایی و ردیابی اهداف زیرآب استفاده می‌کنند، کمیت‌های سرعت و شتاب قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند. همچنین اندازه‌گیری‌های مربوط به موقعیت و جهت اهداف زیرآب به دلیل خطای دستگاه اندازه‌گیری و همچنین اغتشاشات نیروهای محیطی دقیق نمی‌باشند. در چنین مواردی برای بدست آوردن این کمیت‌ها از روش تخمین حالت استفاده می‌شود. به طور کلی کار یک سیستم ردگیری استخراج اطلاعات دقیق مربوط به اهداف، از روی داده‌های نویزی و غیر دقیق می‌باشد. این موضوع به نوعی همان تخمین یا به عبارتی مفهوم صافی کردن است. روند به این صورت است که پس از اعلام وجود هدف در واحد پردازش سیگنال، داده‌های مورد نیاز سیستم ردگیری از سیگنال‌های نویزی توسط تخمین‌گر استخراج شده و به سیستم ردگیری منتقل می‌شود. یکی از قسمت‌های مهم سیستم ردگیری صافی کردن می‌باشد. امروزه برای ردگیری اهداف از صافی‌های قدرتمندی همچون صافی کالمن استفاده می‌شود که در ادامه به معرفی و بررسی این صافی می‌پردازیم.

## ۲-۲- صافی کالمن خطی:

در سال ۱۹۶۰ کالمن با انتشار مقاله خود صافی خطی براساس معیار حداقل مربعات را برای تخمین حالت سیستم‌های خطی پیشنهاد نمود. بعد از انتشار مقاله، این صافی به خاطر خصوصیات کم نظیر و حتی منحصر به فرد آن در کاربردهای مهندسی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. تخمین‌گر کالمن به شرط دقیق بودن مدل دینامیکی مفروض، بهترین تخمین را با معیار حداقل میانگین مربعات خطا (MMSE) ارائه می‌کند. از جمله کاربردهایی که شدیداً تحت تاثیر صافی کالمن قرار گرفت، مسئله‌ی ردیابی هدف بوده به طوری که از آن به بعد این صافی اساس ردیابی قرار گرفت [۲۸]. صافی کالمن در واقع فرم بسط یافته روش LSE به صورت بازگشت‌پذیر می‌باشد. قانون کلی در صافی کالمن حداقل کردن میانگین مربعات خطا می‌باشد که برای این کار از تخمین‌گرهای خطی استفاده می‌شود.

تفاوت صافی کالمن و روش LSE بازگشت پذیر از آن جا ناشی می‌شود که در صافی کالمن خطی تغییرات تصادفی بر روی متغیرهای حالت در بازه‌ی زمانی مجاز بوده که این تغییرات تصادفی به عنوان نویز پردازش معرفی می‌شوند. ولی در روش LSE بازگشت پذیر فرض بر این است که متغیرهای حالت قطعی و غیر احتمالی باشند. به طور کلی صافی کالمن در دسته تخمین گره‌های بیزین قرار دارد. تخمین-گره‌های بیزین بر خلاف تخمین گره‌های کلاسیک، مقداری اطلاعات اولیه از پارامتر مورد تخمین در اختیار دارند و با داشتن اطلاعات قبلی به تخمین پارامتر مورد نظر می‌پردازند. نکته‌ی ظریفی که در مورد تخمین گره‌های بیزین وجود دارد این است که بهبود کارایی این دسته از تخمین گره‌ها نسبت به تخمین-گره‌های کلاسیک به میزان صحت اطلاعات قبلی برمی‌گردد. هر قدر اطلاعات قبلی دقیق‌تر باشد، کارایی تخمین گر نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد و برعکس اگر اطلاعات قبلی غیر دقیق و یا نادرست باشد، نه تنها کیفیت تخمین گر بهتر نمی‌شود، که بعضاً در مواقعی ممکن است کارایی تخمین گره‌های بیزین بدتر از تخمین گره‌های کلاسیک نیز باشد [۲۹]. صافی کالمن علاوه بر حداقل کردن میانگین مربعات خطا، مزایای دیگری نیز در ردگیری اهداف دارد که به طور کلی در زیر خلاصه می‌شود.

✓ بهره صافی کالمن به صورت اتوماتیک براساس مدل‌های حرکت اهداف و نویز مشاهده انتخاب می‌شود؛ به عبارت دیگر از آن جا که بهره‌ی صافی به صورت وفقی برای شرایط مانوری مختلف محاسبه می‌شود، تنها با تغییر در برخی پارامترها می‌توان از یک صافی مشابه برای اهداف و محیط‌های اندازه گیری متفاوت استفاده نمود.

✓ صافی کالمن یک اندازه گیری مناسب از دقت تخمین براساس ماتریس کواریانس ایجاد می‌نماید. این اندازه گیری برای عملیات ردگیری مطلوب‌تر لازم می‌باشد. از طرفی دیگر داشتن مقدار عددی از واریانس خطای تخمین برای ردیابی اهداف مفید می‌باشد.

✓ صافی کالمن زمانی که سیستم خطی و نویز اعمالی به سیستم از نوع اضافه شونده گوسی باشد، بهینه‌ترین تخمین گر می‌باشد.

در مجموع دونکته در صافی کالمن ساده حائز اهمیت می باشد که عبارت است از:

- مشاهدات با استفاده از توابع خطی از شرایط مورد بررسی بدست می آید.
- نویز در سیستم از نوع نویز سفید و گوسین باشد.

## ۲-۲-۱- الگوریتم صافی کالمن خطی:

برای اعمال صافی کالمن ساده به هر سیستم عملی، باید در اولین قدم فرآیند سیستم و مشاهدات به صورت خطی از متغیر حالت سیستم بیان شوند. معادلات فرآیند به صورت زیر توصیف می شوند.

$$X_{K+1} = F_K X_K + B_K U_K + W_K \quad (۱-۲)$$

در معادله فوق  $X_K$  بردار حالت سیستم،  $F_K$  ماتریس معلوم انتقال حالت و  $W_K$  بردار نویز دینامیکی سیستم بوده و برای منظور کردن عدم قطعیت مدل به کار گرفته می شود. در واقع نویز دینامیکی هر نوع خطا در مدل کردن و یا تغییرات ناخواسته سیستم دینامیکی را مدل می کند. درایه های بردار  $W_K$  به صورت فرایند گوسی نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_w^2$  می باشند. ماتریس کواریانس  $W_K$  یک ماتریس معین مثبت می باشد که هر کدام از مقادیر ویژه ی آن متناسب با مقدار عدم قطعیت پارامتر متناظر آن مقدار ویژه است و آن را  $Q$  نشان می دهند.

$$Q_K = E \{W_K W_K^T\} \quad (۲-۲)$$

رابطه (۱-۲) در واقع یک معادله ی تفاضلی جهت توصیف دینامیک هدف به صورت بردار حالت می باشد. در چنین حالتی اطلاعات آماری مربوط به مرحله  $K+1$  ام از روی حالت فعلی ( $K$  ام) به طور کامل قابل تعیین می باشد.

مدل مشاهدات در صافی کالمن به صورت ترکیب خطی از متغیرهای حالت سیستم می باشد که با نویز غیر همبسته نیز جمع شده است.

$$Z_K = H_K X_K + V_K \quad (۳-۲)$$

در رابطه فوق  $Z_K$  بردار مشاهدات،  $H_K$  ماتریس معلوم اندازه گیری و  $V_K$  برداری است که درایه های آن فرآیند تصادفی نرمال با میانگین صفر می باشند و معروف به نویز مشاهدات بوده و ماتریس کواریانس آن متناسب با عدم قطعیت مشاهدات می باشد که آن را با  $R$  نشان می دهند.

$$R_K = E \{V_K V_K^T\} \quad (4-2)$$

ماتریس  $F, H, Q$  و  $R$  جزء معلومات مسئله می‌باشند. لازم به ذکر است که هیچ فرضی در مورد ثابت بودن این ماتریس‌های وجود ندارد و بنابراین سیستم می‌تواند متغیر با زمان نیز باشد. هم چنین محدودیتی در مورد ایستادن بودن نویز سیستم و یا مشاهدات وجود ندارد. مقدار اولیه بردار حالت سیستم مجهول بوده و توسط یک متغیر تصادفی نرمال با میانگین و کواریانس مشخص مدل می‌شود. نویز سیستم، نویز مشاهدات و مقدار اولیه بردار حالت کمیت‌های تصادفی مستقل از هم فرض می‌شوند. چرخه الگوریتم صافی کالمن خطی در چهار مرحله خلاصه می‌شود که به صورت زیر می‌باشد [۳۰]:

۱- **محاسبه بهره کالمن:** با فرض اینکه مقدار اولیه تخمین بردار حالت،  $X(K|K-1)$  و کواریانس خطای متناظر آن،  $P(K|K-1)$  موجود باشد، آن گاه کمیت  $K_k$  که بهره کالمن نامیده می‌شود، توسط معادله زیر محاسبه می‌گردد.

$$K_k = P(K|K-1) H_K [H_K P(K|K-1) H_K^T + R]^{-1} \quad (5-2)$$

رابطه (۵-۲) بهره صافی کالمن را ارائه می‌کند که در رابطه بالا  $P(K|K-1)$  ماتریس کواریانس خطا لحظه  $k$ ام به شرط در دست بودن اندازه گیری‌ها تا لحظه  $k-1$  می‌باشد. با توجه به این رابطه، بهره کالمن متناسب با کواریانس خطای پیش‌بینی بوده و با کواریانس خطای مشاهدات نسبت عکس دارد؛ بنابراین برای شرایطی که پیش‌بینی‌ها از دقت پایینی برخوردار باشند، یعنی کواریانس خطای پیش‌بینی بالا باشد و یا بر عکس مشاهدات از دقت بالایی برخوردار باشند، بهره صافی افزایش می‌یابد تا در تجدید بردار حالت وزن بیشتری را به مشاهدات دریافتی اختصاص دهد؛ ولی برای شرایطی که پیش‌بینی از دقت خوبی برخوردار باشد و یا مشاهدات دقت پایینی داشته باشند، صافی کالمن با کاهش بهره سعی در تخمین پارامتر مطلوب براساس پیش‌بینی خودش خواهد داشت.

۲- **به روز رسانی تخمین توسط مشاهدات جدید:** در این مرحله به کمک بردار مشاهدات در زمان نمونه‌ی  $k$ ام، تخمین پیش‌بینی حالت به روز رسانی می‌شود. معادله به روز رسانی به صورت زیر می‌باشد.

$$\hat{X}(K|K) = \hat{X}(K|K-1) + K_k [Z_K - H_K \hat{X}(K|K-1)] \quad (6-2)$$

در رابطه بالا  $\hat{X}(K|K)$  تخمین حالت لحظه  $k$ ام به شرط در دست بودن اندازه گیری‌های لحظه  $k$ ام می‌باشد، همچنین  $\hat{X}(K|K-1)$  تخمین حالت لحظه  $k$ ام به شرط در دست بودن اندازه گیری‌های لحظه  $k-1$ ام می‌باشد.

۳- محاسبه کواریانس خطای تخمین به روز رسانی شده: در این مرحله کواریانس خطای تخمین محاسبه می‌گردد.

$$P(K|K) = [I - K_k H_K] P(K|K-1) \quad (7-2)$$

در رابطه فوق  $I$  نشان دهنده ماتریس همانی می‌باشد.

۴- تخمین بردار پیش‌بینی حالت و کواریانس متناظر برای گام بعد: در مرحله آخر از سیکل صافی کالمن خطی، شرایط اولیه برای شروع سیکل بعدی تولید می‌شود. معادلات تولید کننده‌ی تخمین بردار حالت پیش‌بینی شده و کواریانس خطای متناظر آن به صورت زیر می‌باشند.

$$\hat{X}(K+1|K) = F \hat{X}(K|K) + B U(K|K) \quad (8-2)$$

$$P(K+1|K) = F P(K|K) F^T + Q \quad (9-2)$$

بردار تفاوت بین مقدار مشاهده شده و مقدار پیش‌بینی شده در هر لحظه به عنوان بردار نوآوری یا باقی مانده در نظر گرفته می‌شود و با  $r_k$  نشان داده می‌شود. بردار نوآوری در واقع اطلاعات زاید را حذف می‌کند و در شرایطی که صافی کالمن خطی بهترین عملکرد خود را داشته باشد فرآیند سفید می‌باشد.

$$r_k = Z(K) - \hat{Z}(K|K-1) \quad (10-2)$$

$$\hat{Z}(K|K-1) = H_K \hat{X}(K|K-1) \quad (11-2)$$

$$r_k = Z(K) - H_K \hat{X}(K|K-1) \quad (12-2)$$

ماتریس کواریانس نوآوری نیز با رابطه زیر تعریف می‌شود و با  $S_K$  نشان داده می‌شود. همچنین  $\hat{Z}(K|K-1)$  تخمین مقادیر اندازه گیری لحظه  $k$ ام به شرط در دست بودن مقادیر اندازه گیری لحظه  $k-1$  می‌باشد.

$$S_K = H_K P(K|K-1) H_K^T + R \quad (13-2)$$



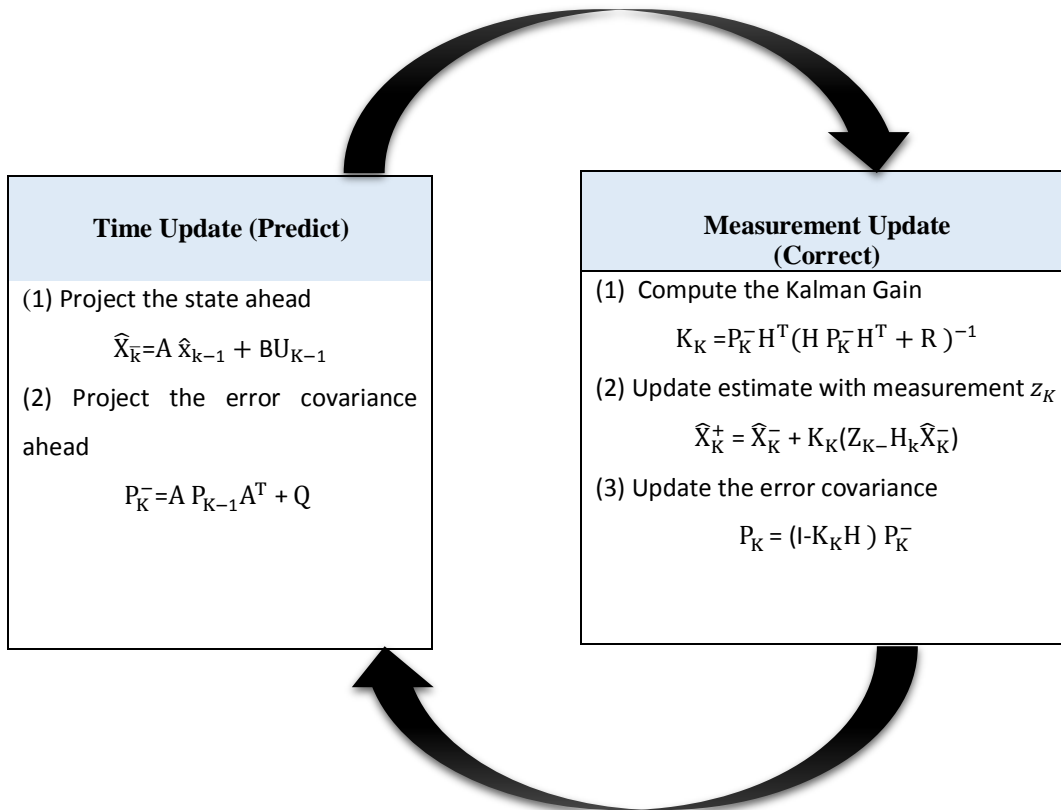
با استفاده از رابطه (۲-۱۳)، می‌توان رابطه (۲-۷) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$P(K|K) = P(K|K-1) - K_k S_k K_k^T \quad (2-14)$$

همچنین با توجه به معادله (۲-۱۲)، معادله (۲-۶) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$\hat{X}(K|K) = \hat{X}(K|K-1) + K_k r_k \quad (2-15)$$

همان گونه که در رابطه (۲-۱۵) ملاحظه می‌شود، مقدار تخمینی برای لحظه  $K$  ام مجموع وزن داری پیش‌بینی صافی (براساس اطلاعات قبلی‌اش در مورد دینامیک سیستم) و نوآوری موجود در مشاهده فعلی می‌باشد. بهره کالمن در واقع وزنی است که در نوآوری ضرب می‌شود. در شکل (۲-۱) چرخه صافی کالمن خطی نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- چرخه الگوریتم صافی کالمن خطی

## ۲-۲-۲- پایداری صافی کالمن:

عموما پایداری برای یک سیستم بدین صورت تعریف می‌شود که به ازای ورودی محدود و کران‌دار، خروجی سیستم کران‌دار باشد. اما تعریف پایداری در تخمین‌گرها از جمله صافی کالمن متفاوت می‌باشد.

برای صافی کالمن پایداری به صورت همگرایی ماتریس کواریانس تخمین به مقدار نهایی کران دار تعریف می شود. بنابراین برای پایداری صافی کالمن، نیازی به پایداری مدل دینامیک مورد استفاده وجود ندارد و اساسا این مدل ها ناپایدار هستند. چرا که در آن ها حداقل یک انتگرال گیری از سرعت به مکان وجود دارد که معرف قطبی در مبدا می باشد. شرط لازم برای پایداری صافی کالمن مشاهده پذیر بودن بردار حالت سیستم می باشد. یعنی باید ماتریس  $\{F, H\}$  مشاهده پذیر باشند. برای ماتریس های  $\{F, H\}$  ماتریس مشاهده پذیری به صورت زیر تعریف می شود.

$$Q_0 = \begin{bmatrix} H \\ HF \\ \vdots \\ HF^{n-1} \end{bmatrix} \quad (۱۶-۲)$$

در رابطه فوق  $n_x$  مرتبه بردار حالت سیستم می باشد. برای مشاهده پذیر بودن ماتریس های  $\{F, H\}$  می بایست ماتریس  $Q_0$  از مرتبه کامل باشد. شرط مشاهده پذیر بودن بردار حالت تضمین می کند که مشاهدات دریافتی اطلاعاتی را در مورد تمامی پارامترهای مجهول در برداشته باشند و بنابراین با افزایش تعداد مشاهدات، عدم قطعیت موجود در تمامی مولفه های بردار حالت سیر نزولی خواهند داشت. این امر از واگرایی ماتریس کواریانس خطا جلوگیری کرده و باعث می شود که ماتریس کواریانس خطا به یک مقدار نهایی، نه لزوما منحصر به فرد همگرا شود. این ماتریس کواریانس خطا می تواند مثبت معین و یا نامنفی معین باشد. در حالتی که ماتریس کواریانس خطا نامنفی معین باشد، تعدادی از مقادیر ویژه ی ماتریس کواریانس خطا صفر خواهد بود و این نشان دهنده اطمینان کامل صافی از تخمین پارامترهای متناظر با این مقادیر ویژه است. لذا صافی برای تجدید این پارامترها از مشاهدات دریافتی استفاده نکرده و تخمین را به طور کامل براساس پیش بینی خودش انجام می دهد که این امر در مسئله ی ردگیری نامطلوب می باشد. بنابراین حتی در مواقعی که مدل دینامیکی هیچ عدم قطعیتی نداشته باشد مقداری نویز مصنوعی به معادله دینامیکی سیستم اضافه می کنیم تا مطمئن شویم که ماتریس کواریانس خطا مثبت معین باقی می ماند [۳۱].

## ۲-۲-۳- سازگاری صافی کالمن:

به طور کلی سازگاری در تخمین گرهای کلاسیک به این معنی است که با افزایش تعداد مشاهدات، واریانس پارامتر تخمینی به صورت مجانبی به سمت صفر میل کند. این بدان معنی است که با افزایش تعداد مشاهدات، اطلاعات ما از پارامتر مورد تخمین افزایش و این امر به تدریج عدم قطعیت پارامتر مورد تخمین را به سمت صفر کاهش می‌دهد. در نتیجه میانگین پارامتر تخمینی به مقدار واقعی همگرا می‌شود. سازگار بودن در صافی کالمن به معنی دقیق بودن مدل دینامیکی فرض شده تعریف می‌شود. چرا که در صورت دقیق نبودن این مدل صافی کالمن تخمین درستی از بردار حالت سیستم ارائه نخواهد کرد. در صورتی که مدل سیستم دقیق بوده و فرض نرمال خطی درست باشد، توزیع شرطی  $x(k)$  به شکل زیر خواهد بود.

$$P[X(K)|Z(K)] \sim N(X(K); \hat{X}(K|K), P(K|K)) \quad (۱۶-۲)$$

مدل سیستم شامل معادله دینامیک سیستم، معادله اندازه‌گیری و مشخصات آماری نویزهایی است که در این معادلات ظاهر می‌شود. اگر همه این‌ها دقیق مدل شده باشند، معادله (۱۶-۲) کاملاً دقیق خواهد بود. ولی در عمل همیشه مقداری خطا مدل کردن وجود دارد. از آنجا که در همه مدل‌ها تا حدودی خطا و تقریب وجود دارد، لذا هدف از بحث سازگاری این است که بدانیم تا چه حدی مدل مفروض قابل قبول است. در مجموع صافی کالمن سازگار محسوب می‌شود به شرطی که معادله زیر را ارضاع شود [۳۱].

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E [\tilde{x}(k|k)^T \tilde{x}(k|k)] = 0 \quad (۱۷-۲)$$

$$\tilde{x}(k|k) = x(k) - \hat{x}(k|k) \quad (۱۸-۲)$$

## ۲-۲-۴- شرایط اولیه صافی کالمن:

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در صافی‌های ردگیری مطرح است، مقدار دهی اولیه به آن‌ها می‌باشد. ممکن است بگوییم که چرا از مقادیر اولیه صفر برای مقدار دهی الگوریتم و در لحظه شروع آن استفاده نکنیم. دو مسئله مطرح است: اولاً در صورتی که از مقادیر اولیه صفر استفاده کنیم باید زمانی را برای همگرایی الگوریتم اختصاص دهیم، در این مدت تخمین‌های خروجی الگوریتم نادرست بوده و خطای زیادی دارد. به علاوه این که ممکن است تحت شرایطی زمان این همگرایی افزایش یابد (مثلاً وقتی که شتاب هدف بزرگ باشد). مسئله دوم این است که در عمل هیچ‌گاه با اولین مشاهده‌ی هدف ردگیری آغاز نمی‌شود، بلکه شروع ردگیری شرایطی دارد و تست این شرایط همواره زمانی ممکن است که هدف در ابتدا در چندین اسکن مشاهده شود، پس از آن اجازه‌ی شروع ردگیری برای هدف مذکور داده می‌شود. بنابراین اگر شرایط اولیه صافی ردگیری را صفر در نظر بگیریم، در چند مشاهده‌ی اول اندازه‌گیری‌هایی از مکان و سرعت داریم که در ردگیری استفاده نشده‌اند. مناسب‌تر است که این اندازه‌گیری‌ها به منظور بهبود سرعت همگرایی به عنوان شرایط اولیه انتخاب شوند، با این کار حداکثر استفاده را از مشاهداتمان خواهیم کرد، کارایی ردگیری نیز بهبود می‌یابد. شرایط اولیه در صافی کالمن از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. صافی کالمن در کنار مقدار اولیه بردار حالت، دقت این بردار را نیز با مقدار اولیه ماتریس کواریانس خطا دریافت می‌کند. ماتریس کواریانس خطای اولیه باید مقدار خطای موجود در بردار حالت اولیه را بدون کم و کاست منعکس کند، چون در غیر این صورت صافی کالمن وزن درستی را به مقدار اولیه در تخمین پارامترها برای لحظات آینده نخواهد داد. به عنوان مثال اگر مقدار اولیه خیلی دقیق نباشد ولی ماتریس کواریانس اولیه خیلی کوچک انتخاب شود. در این حالت صافی وزن بیشتری را به مقدار اولیه داده و اثر این مقدار اولیه غیر دقیق به مدت طولانی باقی خواهد ماند که این امر ممکن است منجر به واگرایی صافی شود. در عمل مقدار اولیه باید حداکثر دوبرابر انحراف استاندارد باشد که ماتریس کواریانس خطا اولیه گزارش می‌کند. در شبیه‌سازی مقدار اولیه را مطابق توزیع زیر مقدار دهی می‌کنیم.

$$\hat{X}(0|0) \sim N(X(0), P(K|K)) \quad (19-2)$$

در کاربردهای واقعی مقدار دهی اولیه‌ی موقعیت و سرعت به ترتیب به شکل زیر انجام می‌شود که این روش به روش تفاضل دو نقطه‌ای معروف می‌باشد [۳۱].

$$\hat{X}(0|0) = Z(0) \quad (20-2)$$

$$V(0|0) = \frac{Z(0) - Z(-1)}{T} \quad (21-2)$$

$$P(0|0) = \begin{bmatrix} R & R/T \\ R/T & 2R/T^2 \end{bmatrix} \quad (22-2)$$

### ۲-۳- صافی کالمن توسعه یافته:

صافی کالمن خطی برای شرایط خطی بودن سیستم، گوسی بودن نویزها و ناهمبستگی آن‌ها با هم تخمین بهینه محسوب می‌شود. اما در بسیاری از کاربردهای عملی تمام این شرایط ممکن است ارضا نشوند. برای مثال بسیاری از سیستم‌های دینامیکی غیر خطی‌اند و یا در صورتی که از مختصات قطبی یا کروی در اندازه گیری استفاده شود مدل حرکتی هدف در مختصات کارتیزین باشد، سیستم اندازه گیری غیر خطی می‌شود. صافی کالمن توسعه یافته، اساساً توسعه صافی کالمن خطی می‌باشد. این صافی حاصل خطی سازی توابع غیر خطی با استفاده از جملات بسط تیلور است که تابع غیر خطی با ممان اول و یا ممان‌های بالاتر تقریب زده می‌شود. فرض کنید که معادله‌ی دینامیکی سیستم و معادله اندازه گیری به شکل غیر خطی بیان شده باشد.

$$X(K) = f(K, X(K-1), U(K-1)) + W(K) \quad (23-2)$$

$$Z(K) = h(K, X(K)) + V(K) \quad (24-2)$$

تعاریف مربوط به نویزهای  $V(K)$  و  $W(K)$ ، بردار حالت و اندازه گیری، مشابه قبل بوده و تنها تفاوت غیر خطی بودن توابع  $f$  و  $h$  می‌باشد. صافی EKF از خطی سازی توابع  $f$  و  $h$ ، حول آخرین نقطه تخمین یافته، حاصل می‌شود. در صافی EKF هم دو دسته معادلات داریم. یکی معادلات به روز رسانی زمان که تخمین حالت را یک پله زمانی به جلو برده و تولید یک تخمین اولیه  $\hat{X}_K^-$  می‌کند. دیگری معادلات

به روز رسانی اندازه گیری است که با استفاده از داده‌های اندازه گیری در همان پله زمانی تخمین اولیه را بهبود داده و یک تخمین ثانویه  $\hat{X}_K$  تولید می‌کند. در زیر این دو دسته معادلات نشان داده شده‌اند.

به روز رسانی زمان در EKF	به روز رسانی اندازه گیری در EKF
$\hat{X}_K^- = f(\hat{X}_{K-1}^-, u_{k-1}, 0)$	$K_k = p_k^- H_k (H_k p_k^- H_k^T + R_k)^{-1}$
$p_k^- = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + Q$	$\hat{X}_K = \hat{X}_K^- + k_k (z_k - h(\hat{X}_K^-, 0))$
	$P_k = (I - K_k H_k) p_k^-$

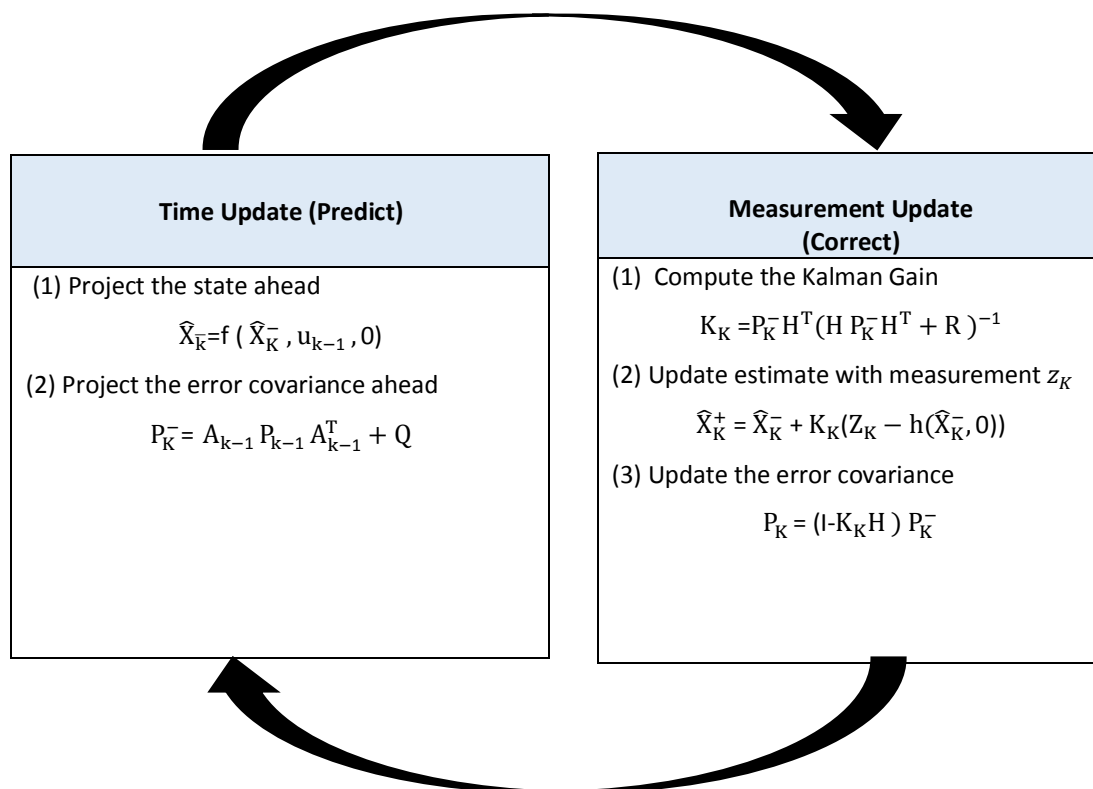
که در معادلات بالا ماتریس  $A$  و  $H$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\hat{X}_{K-1}^-, u_{k-1}, 0) \quad (25-2)$$

$$H_{ij} = \frac{\partial h_i}{\partial x_j}(\hat{X}_K^-, 0) \quad (26-2)$$

دقت شود که این ماتریس‌ها در هر پله زمانی تغییر می‌کنند و در واقع وابسته به  $k$  هستند. البته در مواردی هم این وابستگی وجود ندارد و برخی از آنها می‌توانند ثابت باشند. همان گونه که در روابط به روز رسانی زمان و اندازه گیری EKF ملاحظه می‌شود، روابط مشابه روابط صافی کالمن خطی می‌باشد. با این تفاوت که ماتریس ژاکوبین  $A$  و  $H$  به ترتیب نقش ماتریس انتقال حالت و ماتریس اندازه گیری را ایفا می‌کنند که در واقع به دلیل نیاز به ماتریس‌های ژاکوبین، مرحله محاسباتی دیگری نیز اضافه بر صافی کالمن خطی در آن انجام می‌شود. این الگوریتم به دلیل سادگی نسبت به دیگر صافی‌های کالمن که برای مقابله با غیر خطی بودن مدل دینامیکی ارائه شده‌اند، در عمل کاربرد فراوانی دارد. نکته قابل توجه در صافی EKF این است که غیر خطی بودن توابع برداری  $f$  و  $h$  باید کم باشد، به عبارت دیگر غیر خطی بودن این توابع باید به مقداری باشد که بتوان آنها را با استفاده از سری تیلور تقریب زد [۳۲].

همچنین در عمل چنانچه خطای اولیه و نویزها، زیاد بزرگ نباشند عملکرد صافی کالمن خوب می- باشد [۳۱-۳۳]. در زیر نیز چرخه صافی کالمن توسعه یافته مشاهده می شود.



شکل ۲-۲- چرخه الگوریتم صافی کالمن توسعه یافته





صافی کاملن

توسعه یافته فازی

همین سازی شده

### ۳-۱- مقدمه:

همان طور که در فصل دوم بیان شد بهبود کارایی تخمین گر صافی کالمن به مقداردهی اطلاعات آماری اولیه از پارامترهای مورد تخمین بستگی شدیدی دارد. هر قدر اطلاعات آماری قبلی دقیق تر باشند، کارایی تخمین گر صافی کالمن نسبت به تخمین گرهای کلاسیک نیز به همان نسبت افزایش می یابد و برعکس اگر اطلاعات آماری غیر دقیق و نادرست باشد نه تنها کیفیت تخمین بهتر نمی شود که بعضا در مواقعی ممکن است کارایی تخمین گرهای بییزی نامطلوب تر از تخمین گر کلاسیک نیز باشد. به همین علت جهت بهبود کارایی تخمین گر صافی کالمن در این فصل با به کار گیری روش فازی و روش های بهینه سازی سعی در بهبود هرچه بیشتر صافی کالمن داریم. یکی از پارامترهای که به عنوان اطلاعات آماری اولیه در اختیار صافی کالمن قرار داده می شود مقدار ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری (R) و ماتریس کواریانس نویز فرآیند (Q) می باشد. همچنین در روش های مرسوم برای استفاده از صافی کالمن فرض بر این است که ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری و نویز فرآیند (Q, R) شناخته شده و ثابت است. اما در دنیای واقعی ماتریس های (Q, R) ممکن است به علت تغییرات پارامترهای محیطی تغییر کنند، که این تغییر باعث عدم دقت تخمین و واگرایی صافی کالمن می شود. با توجه به علت های بیان شده سخت ترین قسمت طراحی صافی کالمن مقدار دهی ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری و ماتریس کواریانس نویز فرآیند می باشد. در اغلب مسائل اطلاعات درستی از این ماتریس ها در دست نیست و مقدار دهی اشتباه این ماتریس باعث خطای زیاد در تخمین می شود. در این فصل برای مقدار دهی این ماتریس ها یک روش جدید به نام صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده  $^{20}$  (OFKFK) معرفی می شود که در این روش با استفاده از یک شبکه فازی  $^{21}$  (FIS) که مراکز و سیگماهای این شبکه فازی توسط روش های بهینه سازی مشخص شده است در هر گام از صافی، مقادیر ماتریس (Q, R) را تصحیح می کند. تا مقدار دهی این ماتریس ها با دقت بیشتری انجام شود و تخمین

<sup>20</sup> = Optimization Fuzzy Kalman Filter

<sup>21</sup> = Fuzzy Inference System

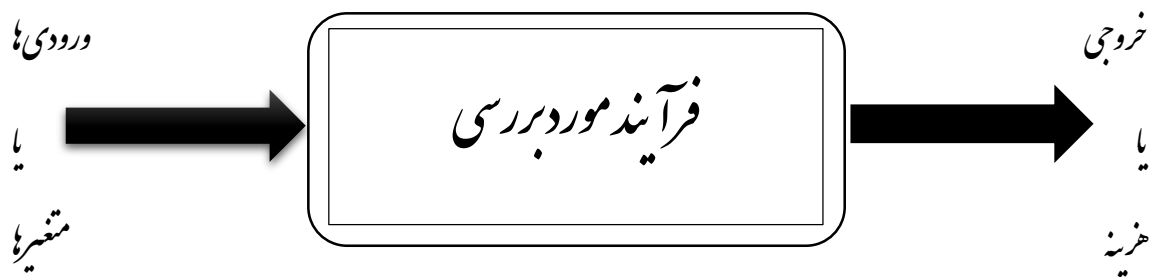
دقیق‌تری از حالت‌ها داشته باشیم و ردگیری با دقت بیشتری انجام شود. به علت استفاده از سیستم فازی و روش‌های بهینه‌سازی در این فصل، ابتدا به معرفی روش‌های بهینه‌سازی و نحوه عملکرد آن‌ها را می‌پردازیم. سپس با ترکیب سیستم فازی و روش‌های بهینه‌سازی، با صافی کالمن، صافی کالمن بهینه‌سازی شده را معرفی می‌کنیم.

### ۲-۳- مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی:

بهینه‌سازی فرآیندی است که طی آن با کمترین امکانات بهترین بهره‌برداری صورت می‌گیرد. فکر، ایده و یا طرحی که به وسیله یک دانشمند یا یک مهندس مطرح می‌شود، طی روال بهینه‌سازی بهتر می‌شود [۳۴]. در هنگام بهینه‌سازی، شرایط اولیه با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و اطلاعات به دست آمده، برای بهبود بخشیدن به یک فکر یا روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه‌سازی ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌ها در خصوص چگونگی راه حل مسایل مختلف به بهترین وجه و کمترین هزینه به کار می‌رود [۳۵]. در بهینه‌سازی از یافتن بهترین جواب برای یک مساله صحبت به میان می‌آید. لفظ بهترین به طور ضمنی بیان می‌کند که بیش از یک جواب برای مساله مورد نظر وجود دارد که البته دارای ارزش یکسانی نیستند. تعریف بهترین جواب، به مساله مورد بررسی، روش حل و هم‌چنین میزان خطای مجاز وابسته است. بنابراین نحوه فرمول بندی مساله نیز بر چگونگی تعریف بهترین جواب تاثیر مستقیم دارد. برخی از مسایل جواب‌های مشخصی دارند؛ بهترین بازیکن یک رشته ورزشی، طولانی‌ترین روز سال و پاسخ یک معادله دیفرانسیل معمولی درجه اول از مثال‌هایی هستند که می‌توان از آن‌ها به عنوان مسایل ساده نام برد. در مقابل، برخی از مسایل دارای جواب‌های بیشینه<sup>۲۲</sup> یا کمینه<sup>۲۳</sup> متعددی هستند که به نام نقاط بهینه یا اکسترمم شناخته می‌شوند، بهترین جواب یک مفهوم نسبی خواهد بود. بهترین اثر هنری، زیباترین منظره و گوش‌نوازترین قطعه موسیقی از مثال‌هایی هستند که می‌توان برای این‌گونه مسایل بیان کرد [۳۶]. بهینه‌سازی، تغییر دادن ورودی‌ها و خصوصیات یک دستگاه، فرآیند ریاضی و یا آزمایش تجربی است به نحوی که بهترین خروجی یا نتیجه به دست بیاید (شکل ۳-۱). ورودی‌ها متغیرهای فرآیند یا تابع مورد بررسی هستند که به نام‌های تابع هدف، تابع هزینه و یا تابع برآورد نامیده می‌شود. خروجی نیز به صورت هزینه یا سود تعریف می‌شود [۳۶]. در این نوشتار نیز، مطابق با بسیاری از نوشتارهای مرتبط با موضوع، تمام مسایل بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی مقدار یک تابع هزینه در نظر گرفته شده‌اند.

<sup>۲۲</sup> = Maximum

<sup>۲۳</sup> = minimum



شکل ۳-۱- فرآیند یاد تابعی که بهینه سازی می‌شود.

### ۳-۲-۱- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA):

الگوریتم ژنتیک اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط جان هالند ابداع شد. این الگوریتم یکی از روش‌های جستجو و بهینه‌سازی است که بر اصول و مکانیسم‌های طبیعی زاد و ولد، مانند تلفیق ژنی و جهش ژنی و قانون بقای اصلح، بنا گردیده است. از آنجا که این الگوریتم از اصل بقای نسل‌های برتر پیروی می‌کند، شرایطی را برای یافتن جواب مطلوب فراهم می‌آورد. تفکر اصلی الگوریتم ژنتیک از نظریه تکاملی داروین گرفته شده است. نظریه داروین بیانگر این نکته است که آن دسته از خصوصیات و صفاتی در طبیعت پایدار می‌مانند که با قانون طبیعت سازگاری بیشتری داشته باشند و هر چه این سازگاری بیشتر باشد شانس ادامه حیات بیشتر است. به این ترتیب می‌توان مشاهده کرد که طبیعت با بهره‌گیری از یک روش بسیار ساده (حذف تدریجی گونه‌های نامناسب و در عین حال تکثیر بالاتر گونه‌های بهینه) توانسته است، دائماً هر نسل را از لحاظ خصوصیات مختلف ارتقا بخشد [۳۸-۳۷]. در ابتدا در الگوریتم ژنتیک جواب‌های شدنی مسئله مورد نظر به صورت تصادفی به عنوان جمعیت اولیه انتخاب می‌شوند. سپس هریک از جواب‌ها به صورت رشته‌هایی که کروموزم نامیده شده است کدگذاری می‌شوند. برای تولید نسل بعدی از روی نسل فعلی، از عملگرهای ژنتیکی زیر استفاده می‌شود.

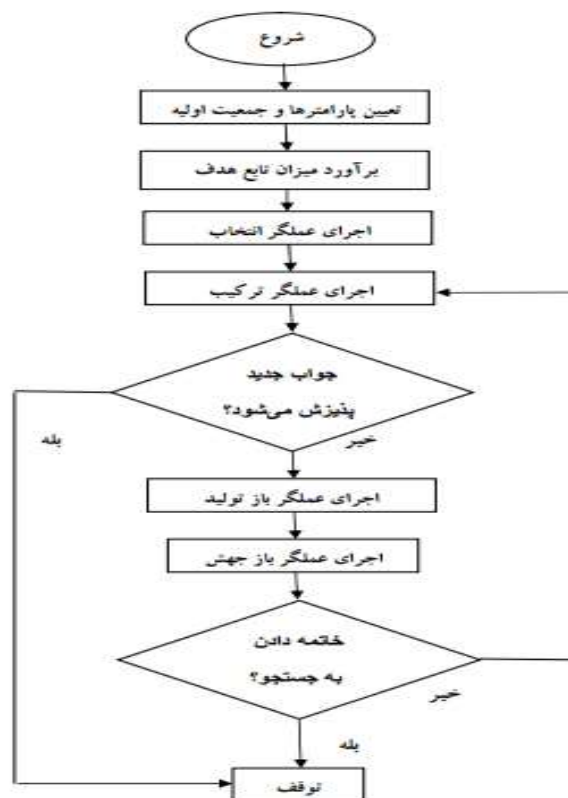
۱- عملگر انتخاب: روندی است که اگر کروموزمی دارای لیاقت بالاتری باشد، شانس خود را برای بقا در سیستم افزایش می‌دهد.

۲- عملگر ترکیب: دو فرد از جامعه‌ی انتخاب شده به صورت تصادفی تعیین می‌شوند و کروموزوم آنها در یک نقطه بریده می‌شود. کروموزوم‌ها به دو قسمت سر و دوم تقسیم می‌شوند و مقادیر قسمت دم آنها با هم تعویض می‌گردد.

۳- عملگر باز تولید: کروموزوم‌ها از نسل فعلی، مستقیماً و بدون تغییر به نسل بعدی منتقل می‌شوند.

۴- عملگر جهش: مکانیسمی است که در اثر آن یک تغییر غیر سازمان یافته و کاملاً تصادفی به یک رشته داده می‌شود.

در نهایت پس از مراحل فوق، جمعیت جدیدی جایگزین جمعیت پیشین می‌شود و این چرخه ادامه می‌یابد. هنگامی جستجو متوقف خواهد شد که به حداکثر نسل مورد نظر رسیده و یا همگرایی حاصل شده باشد، یا زمان اجرای برنامه از یک مقدار معینی تجاوز کند و یا گذشت چند نسل، بهبودی در لیاقت جمعیت ایجاد نشود [۳۸-۳۹]. مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک

### ۳-۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO):

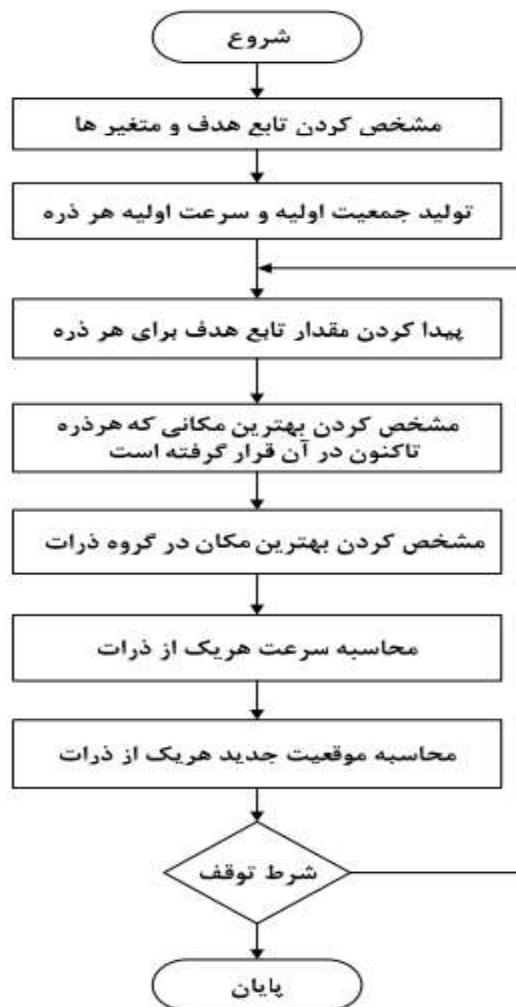
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) توسط جیمز کندی و راسل ابرهارت در سال ۱۹۹۵ میلادی پیشنهاد شد. الگوریتم PSO، شبیه‌سازی رفتار اجتماعی پرندگان است. دسته‌ای از پرندگان را که در محیطی به دنبال غذا می‌گردند را در نظر بگیرید. هیچ‌یک از پرندگان در مورد محل غذا اطلاعاتی ندارند ولی در هر مرحله فاصله خود را تا محل غذا می‌دانند. بر این اساس، بهترین رویکرد برای پیدا کردن غذا، پیروی کردن از نزدیک‌ترین پرنده به غذا می‌باشد. PSO این رفتار را در مسائل بهینه‌سازی شبیه‌سازی می‌نماید [۴۰]. در این الگوریتم، هر پرنده یک جواب ممکن در فضای جستجو مسئله می‌باشد که آن را ذره می‌نامند. در ابتدا، PSO به وسیله گروهی از پرندگان که به طور تصافی در فضای مسئله تولید شده‌اند، مقداردهی شود و سپس جستجو برای رسیدن به بهترین جواب آغاز می‌گردد. در هر مرحله از تکرار الگوریتم، ذرات به سمت موقعیت بهتر جابه‌جا می‌شوند. موقعیت بعدی برای هر ذره با توجه به دو مقدار بدست می‌آید: اولین مقدار، بهترین موقعیتی است که آن ذره تا کنون داشته است (pbest) و دومین مقدار، بهترین موقعیتی است که تا به حال توسط کل ذره‌های آن اجتماع بدست آمده است و بهترین pbest در کل گروه (gbest) می‌باشد. این فرآیند تا زمانی که نتیجه مطلوب حاصل گردد (یعنی سرعت پرندگان به سمت صفر میل نماید) و یا اینکه به حداکثر تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای الگوریتم PSO برسیم، تکرار می‌گردد. با توجه به مقادیر pbest و gbest، هر پرنده از روابط زیر برای تعیین موقعیت بعدی استفاده می‌نماید:

$$V_i(t+1) = \omega(t) \times V_i(t) + C_1(t) \times r_1 \times (P(t)_i - X_i(t)) + C_2(t) \times r_2 \times (G(t) - X_i(t)) \quad (1-3)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (2-3)$$

در روابط بالا ثابت‌های  $C_1$  و  $C_2$  پارامترهای یادگیری (میزان تاثیر) را برای gbest و pbest تعیین می‌کنند و معمولاً برابر با ۲ انتخاب می‌شوند.  $r_1$  و  $r_2$  نیز دو عدد حقیقی‌اند که به صورت تصادفی، و بر اساس یک تابع توزیع یکنواخت بین صفر و یک، انتخاب می‌گردند.  $X_i(t)$  موقعیت کنونی،  $V_i(t)$  سرعت حرکت ذره‌ها در آن مرحله می‌باشد.  $\omega$  پارامتری است که لختی حرکت ذرات را کنترل می‌نماید. در

ابتدا اجرای الگوریتم، مقدار  $w$  بزرگ اختصاص داده می‌شود تا جستجوی سراسری نسبت به جستجوی محلی در اولویت قرار گیرد، سپس به منظور رسیدن به بهترین جواب ممکن، اندازه آن تدریجاً به سمت مقدار کوچکی مانند صفر میل می‌نماید [۴۱]. مراحل اجرای الگوریتم ازدحام ذرات در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

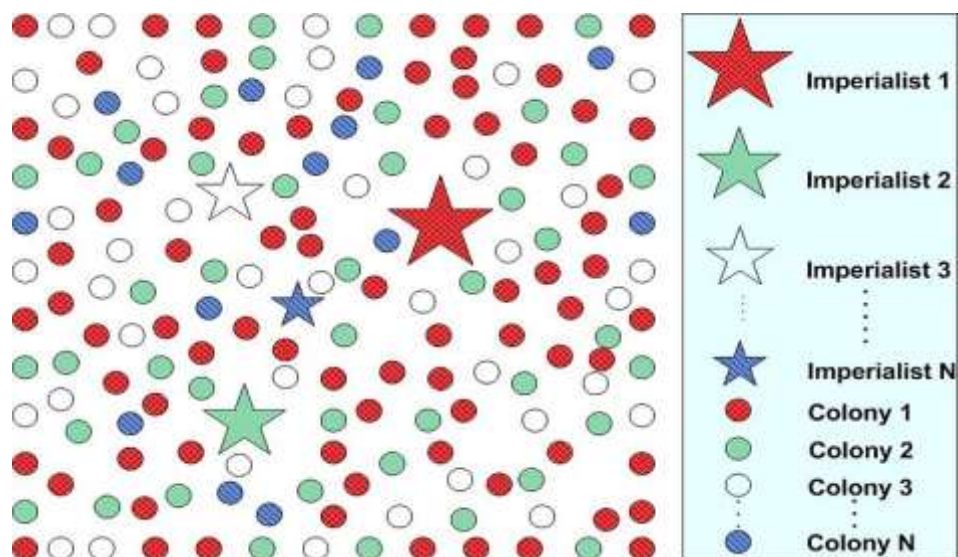


شکل ۳-۳- مراحل اجرای الگوریتم ازدحام ذرات

### ۳-۲-۳- الگوریتم رقابت استعماری (ICA):

این الگوریتم بهینه سازی توسط آقایان اسماعیل آتش پز و کارو لوکس در سال ۲۰۰۷ ارائه شده است که برای بهینه سازی، بجای طبیعت از یک پدیده اجتماعی الهام گرفته است. الگوریتم رقابت استعماری یک روش تکامل یافته جدید می‌باشد که از الگوی رقابت استعماری کشورها الهام گرفته شده است و با

الهام‌گیری از یک فرایند اجتماعی سیاسی، برای بهینه‌سازی توسعه داده شده است و نسبت به روش‌های بهینه‌سازی که تاکنون مطرح شده دارای توانایی بالایی بوده و دارای سرعت مناسبی در یافتن جواب بهینه می‌باشد [۴۲-۴۳]. الگوریتم ICA همانند الگوریتم GA با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک کشور نامیده می‌شوند شروع می‌شود. که این کشورها، متناظر با افراد، در الگوریتم ژنتیک می‌باشند. سپس تعدادی از بهترین کشورها (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان استعمارگر انتخاب شده و مابقی جمعیت نیز به عنوان مستعمره، در نظر گرفته می‌شوند. سپس کشورهای مستعمره بصورت تصادفی به یکی از استعمارگران منتسب می‌شوند (شکل ۳-۴). تعداد مستعمرات هر استعمارگر، متناسب با قدرتش می‌باشد. مطابق شکل ۳-۴ استعمارگران قویتر (ستاره‌های بزرگتر) مستعمرات بیشتری به خود اختصاص داده‌اند.

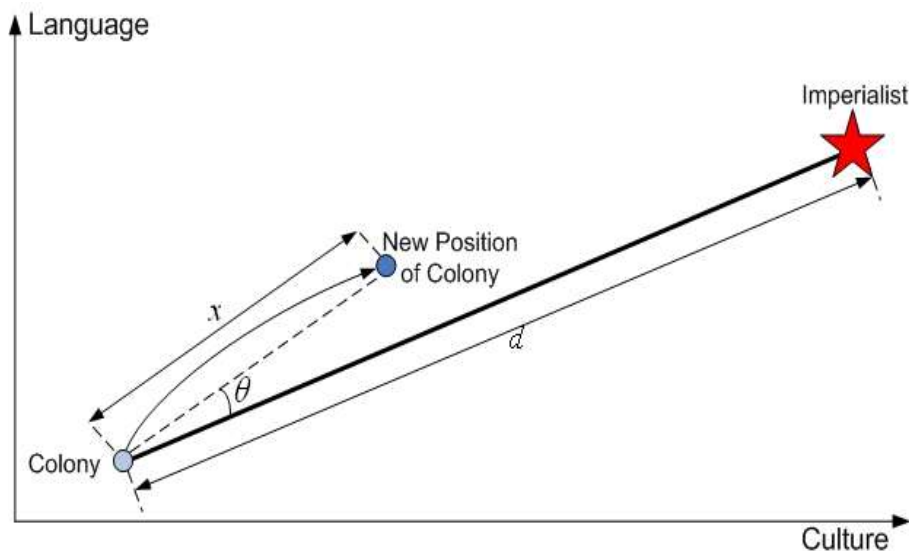


شکل ۳-۴- نحوه تخصیص کشورهای مستعمره به کشورهای استعمارگر مرجع [۴۳]

با تشکیل امپراتوری‌های اولیه، رقابت استعماری میان آنها شروع می‌شود. هر امپراتوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کند و قدرت خود را افزایش دهد (و یا از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری، حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراتوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراتوری‌های رقیب، و به سيطرة در آوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، امپراتوری‌های مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را در راستای محورهای مختلف، مثلا زبان و فرهنگ نیز پیشرفت دهند.



این موضوع بوسیله حرکت تصادفی هر کشور مستعمره به سمت کشور استعمارگر خود، در فضای جستجو مدل‌سازی شده است. مطابق شکل ۳-۵، حرکت کشور مستعمره به سمت کشور استعمارگر به اندازه  $X$  و با انحراف زاویه ای  $\theta$ ، صورت می‌گیرد که این مقادیر بطور تصادفی تعیین می‌گردند.



شکل ۳-۵- چگونگی جابجایی کشورهای مستعمره در راستای سیاست جذب مرجع [۴۳]

ممکن است در روند حرکت کشورها در طول اجرای الگوریتم، یک کشور مستعمره قدرت بیشتری از استعمارگر نظیر خود پیدا کند در این حالت، جای کشور مستعمره و استعمارگر عوض خواهد شد. مراحل الگوریتم به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا بالاخره تعداد استعمارگران به یک برسد. در این حالت تمام کشورها، مستعمره در سلطه یک استعمارگر هستند و الگوریتم به پایان می‌رسد. البته شرایط توقف دیگری مانند تعداد تکرار معین نیز، می‌تواند بکار رود [۴۳-۴۲]. به این ترتیب فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری مطابق شکل ۳-۶ خواهد بود.



شکل ۳-۶- مراحل اجرای الگوریتم رقابت استعماری

### ۳-۳- سیم‌های فازی (FIS):

منطق فازی در سال ۱۹۶۵ توسط لطفعلی عسگرزاده پرفسور علوم رایانه دانشگاه برکلی کالیفرنیا ارائه شد [۴۴]. به صورت مفهومی منطق فازی، چند ارزشی است و اجازه می‌دهد که ارزش‌هایی را بین دو ارزشی‌هایی مثل "درست / نادرست"، "بله / خیر" یا "بالا / پایین" تعریف کرد. می‌توان مفاهیمی چون "خیلی"، "نسبتاً"، "تقریباً" و ... را که پایه‌های اندیشه و استدلال‌های معمولی انسان می‌باشند، به صورت ریاضی درآورد تا به وسیله رایانه قابل فهم باشند و از این طریق بتوان برنامه‌های رایانه‌ای که به منطق و تفکر انسان نزدیک‌ترند را بوجود آورد [۴۵].

### ۳-۴-صافی کالمن فازی بهینه‌سازی شده (OFKF):

همانطور که در مقدمه گفته شد، مقدار دهی اولیه صافی کالمن، تاثیر زیادی بر روی نتایج تخمین و خطای آن دارد و همچنین در توصیف صافی کالمن که در فصل ۲ بررسی شد فرض کردیم که ماتریس  $Q$  و  $R$  کاملاً معلوم هستند. اما در عمل ماتریس کواریانس  $Q$  و  $R$  یا بصورت تقریبی در دسترس بوده یا اینکه نامعلوم می‌باشند. مساله اینجاست که بهینه بودن صافی کالمن بطور قابل ملاحظه‌ای به دقت و صحت اطلاعات آماری نویز فرآیند و نویز اندازه گیری وابسته است [۴۶-۴۷]. همچنین در شرایط دینامیکی متغیر استفاده از صافی کالمن با پارامترهای آماری ثابت مناسب نخواهد بود. به همین دلیل به نظر می‌رسد باید بدنبال تنظیم و تطبیق این پارامتر باشیم تا عملکرد مناسب صافی کالمن ادامه یابد. مزیت اصلی تنظیم ماتریس‌های  $Q$  و  $R$  این است که وابستگی صافی را به دانش اولیه از مشخصه‌های آماری کم می‌کند. تا کنون روش‌های متفاوتی برای تنظیم ماتریس‌های  $Q$  و  $R$  معرفی شده اند [۴۷-۴۸] که در آنها از روش‌های تطبیقی مرسوم استفاده شده، یا با استفاده از سیستم فازی به تطبیق پرداخته اند که مراکز وسیگماهای سیستم فازی را با آزمایش‌های مکرر و بدست آوردن تجربه تنظیم کرده اند. اما زمانی که ما از چند حسگر استفاده کنیم که هر کدام دارای نویزهای متفاوتی هستند (که در این حالت ما برداری از اندازه گیری‌ها داریم). تنظیم مراکز و سیگماهای سیستم فازی که بهترین تطبیق را برای ماتریس  $Q$  و  $R$  به همراه داشته باشد، کاری بسیار دشوار و زمان بر است. به همین علت ما از سه الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات به صورت جداگانه به بهینه سازی مراکز وسیگماهای سیستم فازی می‌پردازیم که به بهترین حالت برای تنظیم ماتریس  $Q$  و  $R$  ختم می‌شود.

### ۳-۴-۱- باقی مانده یا دنباله ابداع:

باقی مانده<sup>۲۴</sup> یا دنباله ابداع<sup>۲۵</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۹].

۲۱ =Residuel

۲۲= Innovation Sequence

$$r_k = z_k - H_k \hat{X}_k^- \quad (3-3)$$

در رابطه بالا  $H_k \hat{X}_k^-$  تخمین اولیه‌ی اندازه گیری است و  $z_k$  اندازه گیری حسگرها می‌باشد. در واقع دنباله ابداع تفاضل بین خروجی واقعی و خروجی تخمین زده شده است. در کاربردهای عملی از دنباله ابداع به منظور آشکار سازی خرابی حسگرها یا برای چک کردن داده اندازه گیری استفاده می‌شود. هر بار که اندازه‌گیری انجام می‌شود دنباله ابداع اطلاعات جدیدی را در اختیار صافی قرار می‌دهد. برای یک صافی کالمن بهینه دنباله ابداع، بصورت نویز سفید با میانگین صفر خواهد بود [۵۰].

### ۳-۴-۲- بهبود صافی کالمن توسط سیستم فازی بهینه‌سازی شده با تنظیم R و فرض Q ثابت:

ماتریس R میزان دقت اندازه گیری را ارائه می‌دهد. افزایش R به این معنی است که ما به داده‌های واقعی اندازه گیری، کمتر از تخمین اندازه گیری اعتماد داریم. همچنین وقتی ابزار اندازه گیری از نگاه طراح دقت کمی داشته باشد R بزرگتر انتخاب می‌شود. فرض کنید که ماتریس Q کاملاً برای ما معلوم باشد با این فرض بدنبال تنظیم ماتریس R خواهیم بود. ایده اصلی در تنظیم ماتریس R سازگار کردن ماتریس کواریانس ابداع بدست آمده از روابط نظری با کواریانس حاصل از دنباله ابداع واقعی است [۵۱].

ماتریس کواریانس نظری دنباله ابداع به صورت زیر بیان می‌شود.

$$S_K = H_k P_K^- H_k^T + R_k \quad (4-3)$$

با داشتن دنباله ابداع  $r_i$ ، می‌توان کواریانس واقعی آن یعنی  $C_{rk}$ ، تخمین زد این کار را با میانگین گیری در یک بازه مشخص و متحرک با اندازه N بر روی دنباله ابداع میتوان انجام داد. که دنباله ابداع واقعی به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\hat{C}_{rk} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^k r_i r_i^T \quad (5-3)$$

که در رابطه بالا N پنجره تخمین متحرک نامیده می‌شود. که اندازه پنجره تخمین به طور تجربی انتخاب می‌شود تا مشخصات آماری نرمی را نتیجه دهد. که در این جا ما برابر با ۲۵ در نظر گرفته‌ایم و  $i_0 =$

$K - N + 1$  اولین پنجره تخمین است.

اگر مقدار کواریانس دنباله ابداع  $(C_{rk}^{\wedge})$  با مقدار نظری آن  $(S_K)$  متفاوت باشد باید تنظیماتی بر روی  $R$  صورت گیرد تا این عدم تطابق از بین برود. برای رصد اختلاف بین  $S_K$  و مقدار واقعی آن یک متغیر جدید تعریف می‌کنیم و آن را درجه تطابق می‌نامیم.

$$DOM_K^{۲۶} = S_K - C_{rk}^{\wedge} \quad (۶-۳)$$

که در رابطه بالا سه حالت برای  $DOM$  ایجاد می‌شود

۱-  $DOM > 0$  بدین معنا است که مقدار واقعی کواریانس دنباله ابداع  $(C_{rk}^{\wedge})$  کوچکتر از مقدار نظری آن  $(S_K)$  بوده و نیاز به تنظیم  $R$  است تا این اختلاف از بین برود.

۲-  $DOM = 0$  بدین معنا است که مقدار واقعی کواریانس دنباله ابداع  $(C_{rk}^{\wedge})$  برابر با مقدار نظری آن  $(S_K)$  بوده و نیازی به تنظیم  $R$  نمی‌باشد.

۳-  $DOM < 0$  بدین معنا است که مقدار واقعی کواریانس دنباله ابداع  $(C_{rk}^{\wedge})$  بزرگتر از مقدار نظری آن  $(S_K)$  بوده و نیاز به تنظیم  $R$  است تا این اختلاف از بین برود.

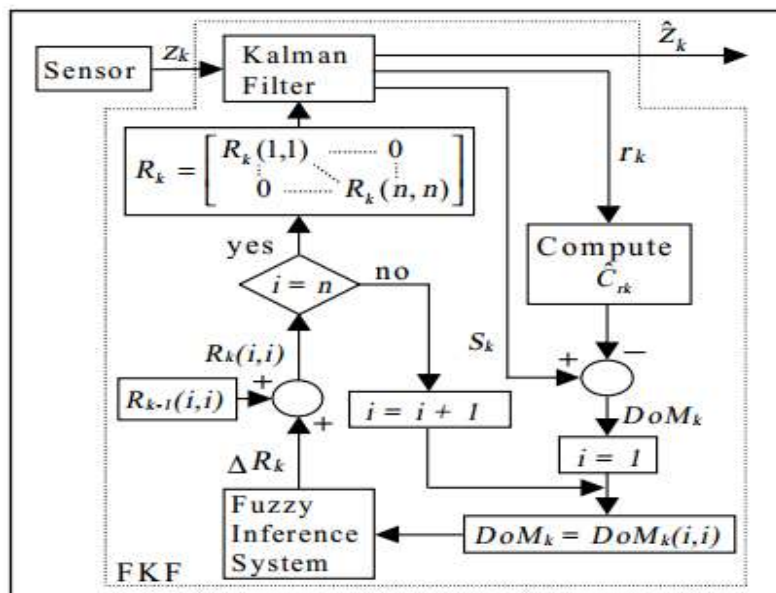
برای یافتن منطق مورد استفاده در سیستم فازی جهت تنظیم  $R$ ، مجدداً روابط را بررسی می‌کنیم. رابطه (۴-۳) نشان می‌دهد که افزایش  $R$  باعث افزایش  $S_K$  می‌شود و برعکس کاهش  $R$ ،  $S_K$  را کاهش می‌دهد به این ترتیب می‌توان با تغییر  $R$  به تطبیق  $S_K$  با  $C_{rk}^{\wedge}$  پرداخت. با توجه به اینکه ماتریس‌های  $R_K$ ،  $S_K$ ،  $C_{rk}^{\wedge}$  و  $DOM_K$  همگی هم اندازه‌اند. بنابراین تنظیم عنصرهای  $(i,i)$   $R_K$  مطابق با المان  $(i,i)$   $DOM_K$  انجام می‌شود. که  $i=1,2,\dots,m$  و  $m$  اندازه بردار اندازه گیری  $Z_K$  است. بنابراین از سیستم فازی برای تنظیم  $R_K(i,i)$  می‌توان استفاده کرد که فرآیند تنظیم آن به صورت زیر است.

$$R_{K+1}(i, i) = R_K(i, i) + AdjR_K \quad (۷-۳)$$

که  $AdjR_K$  ضریبی است که به  $R$  اضافه یا کم می‌شود تا اختلاف بین کواریانس دنباله ابداع واقعی  $(C_{rk}^{\wedge})$  و نظری  $(S_K)$  آن به سمت صفر میل کند. نحوه تنظیم  $R$  برای از بین بردن اختلاف بین  $S_K$  و  $C_{rk}^{\wedge}$  و میل کردن  $DOM$  به سمت صفر در شکل ۷-۳ نشان داده شده است.

---

۲۳ = Degree of Matching



شکل ۳-۷- نحوه تنظیم R برای از بین بردن اختلاف بین  $S_K$  و  $\hat{C}_{rk}$

### ۳-۴-۳- بهبود صافی کالمن توسط سیستم فازی بهینه سازی شده با تنظیم Q و فرض R ثابت:

ماتریس کواریانس Q معرف عدم قطعیت مدل فرآیند است. افزایش Q به این معنی است که اعتماد ما به مدل فرآیند کمتر از داده‌های اندازه گیری است. فرض کنید ماتریس R برای ما معلوم باشد. حال می‌توانیم روشی برای تخمین Q بدست آوریم. رابطه نظری بدست آمده برای کواریانس دنباله ابداع می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$S_K = H_k (H_k p_k^- H_k^T + Q_k) H_k^T + R_k \quad (۸-۳)$$

حال با توجه به معادله (۵-۳)، (۶-۳) و (۸-۳) Q را باید طوری تنظیم کرد که DOM به سمت صفر میل کند. با توجه به معادلات ذکر شده واضح است که اگر DOM مثبت باشد، باید Q کاهش یابد و در نتیجه DOM نیز کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر اگر DOM منفی باشد، Q باید افزایش یابد و برای  $DOM=0$  نیاز به تغییر Q نخواهد بود. ایده تنظیم Q به این صورت است که از معادله (۸-۳) می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات Q بر روی  $S_K$  اثر می‌گذارد به عبارت دیگر اگر Q افزایش یابد  $S_K$  نیز افزایش می‌یابد و بالعکس.

بنابراین اگر بین کواریانس دنباله ابداع واقعی و نظری عدم تطابق وجود داشته باشد این اختلاف را می توان با افزایش و کاهش Q از بین برد. که روند تغییرات Q به صورت زیر می باشد.

$$Q_{K+1} = Q_K + AdjQ_K \quad (9-3)$$

که  $AdjQ_K$  ضریبی است که به Q اضافه یا کم می شود تا اختلاف بین کواریانس دنباله ابداع واقعی ( $C_{rk}^{\wedge}$ ) و نظری ( $S_K$ ) آن به سمت صفر میل کند. در مجموع هدف تطبیق تک تک عناصر ماتریس R و Q نیست بلکه هدف آن است که سیستم فازی ماتریس R و Q را طوری تنظیم کند که عدم تطابق بین دنباله ابداع نظری و واقعی به سمت صفر میل کند نحوه تنظیم ماتریس Q همانند شکل ۳-۷ است با این تفاوت که به جای R، Q تنظیم می شود.

### ۳-۴-۴- سیستم فازی جهت تنظیم R و Q:

ورودی در این سیستم فازی در هر لحظه،  $DOM_K$  می باشد که در رابطه (۳-۶) نشان داده شده است که اختلاف بین ماتریس کواریانس دنباله ابداع واقعی و نظری است و  $AdjR_K$  و  $AdjQ_K$  خروجی سیستم فازی می باشد که برای تصحیح ماتریس R و Q که در معادلات (۳-۷) و (۳-۹) استفاده شده اند و هر دو ماتریس R و Q قطری می باشند. سیستم فازی که در این مقاله در نظر گرفته شده دارای ۵ گروه فازی برای ورودی و خروجی می باشد و قوانین فازی را می توان به ترتیب زیر نوشت.

- |                       |   |                                 |
|-----------------------|---|---------------------------------|
| ۱- IF $DOM = NM^{27}$ | , | Then $AdjR_K, AdjQ_K = IL^{28}$ |
| ۲- IF $DOM = NS^{29}$ | , | Then $AdjR_K, AdjQ_K = I^{30}$  |
| ۳- IF $DOM = ZE^{31}$ | , | Then $AdjR_K, AdjQ_K = M^{32}$  |
| ۴- IF $DOM = PS^{33}$ | , | Then $AdjR_K, AdjQ_K = D^{34}$  |
| ۵- IF $DOM = PM^{35}$ | , | Then $AdjR_K, AdjQ_K = DL^{36}$ |

۲۷ = Negative Medium

۲۸ = Increase Large

۲۹ = Negative Small

۳۰ = Increase

۳۱ = Zeros

۳۲ = Maintain

۳۳ = Positive Small

۳۴ = Decrease

۳۵ = Positive Medium

۳۶ = Decrease Large

سیستم فازی که برای تنظیم ماتریس های R و Q استفاده شده سیستم فازی ممدانی با فازی ساز منفرد، موتور استنتاج ضرب و همچنین غیر فازی ساز میانگین مراکز تشکیل شده است که رابطه ورودی و خروجی آن بشکل زیر خواهد بود.

$$Y(x) = \frac{\sum_{L=1}^M \bar{y}^L * [\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^L}{\sigma_i}\right)^2\right)]}{\sum_{L=1}^M [\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^L}{\sigma_i}\right)^2\right)]} \quad (10-3)$$

که در رابطه (۱۰-۳)،  $Y(X)$  خروجی سیستم فازی،  $M$  تعداد قوانین سیستم فازی،  $n$  تعداد گروه‌های ورودی سیستم فازی،  $\bar{y}^L$  مراکز گروه‌های خروجی سیستم فازی،  $\bar{x}_i^L$  مراکز گروه‌های ورودی سیستم فازی و  $\sigma_i$  بیان کننده میزان پراکندگی گروه‌های ورودی سیستم فازی است. در رابطه بالا  $\bar{x}_i^L$  و  $\bar{y}^L$  عوامل هستند که در دقت سیستم فازی نقش بسیار مهمی دارند. هر چه این سه پارامتر در سیستم فازی دقیق تر تنظیم شوند سیستم فازی عملکرد بهتری داشته و در نتیجه به بهبود صافی کالمن کمک کرده که به RMSE کمتر در صافی کالمن ختم می‌شود. به همین علت برای تنظیم این سه پارامتر از الگوریتم های بهینه سازی رقابت استعماری، ژنتیک و ازدحام ذرات استفاده می‌کنیم. روند کار بدین ترتیب است که ابتدا، الگوریتم‌های بهینه سازی مراکز و سیگماهای گروه‌های فازی را طوری تعیین می‌کند که تابع هزینه آن که ماتریس DOM است به حداقل مقدار خود برسد که روند بهینه سازی به صورت OFF-LINE انجام می‌شود و زمانی که الگوریتم بهینه سازی بهترین مراکز و سیگماها به ازای کمترین DOM مشخص کرد آن را به سیستم فازی اعمال می‌کند و از آن پس سیستم فازی از مراکز و سیگماهای که الگوریتم بهینه سازی تعیین کرده استفاده می‌کند و با تنظیم ماتریس R و Q به بهبود عملکرد صافی کالمن می‌پردازد. در ادامه برای نشان دادن بهبود عملکرد صافی کالمن توسط سیستم فازی و الگوریتم‌های بهینه سازی به شبیه سازی یک مثال ردیابی با استفاده از صافی کالمن مرسوم و صافی کالمن بهبود یافته می‌پردازیم.



### ۳-۴-۵- شیه سازی و مقایسه KF و OFKF:

برای اینکه بتوانیم یک مقایسه مناسب بین صافی کالمن مرسوم و صافی کالمن فازی بهینه سازی شده داشته باشیم در یک مثال نتایج و خطای حالت های آن را بررسی می کنیم. سیستم زیر، یک سیستم خطی از مدل ردیابی می باشد که در [۵۲] و [۵۳] مورد استفاده قرار گرفته است.

$$\begin{bmatrix} X_{K+1}^1 \\ X_{K+1}^2 \\ X_{K+1}^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.77 & 0.20 & 0.00 \\ 0.25 & 0.75 & 0.25 \\ 0.05 & 0.00 & 0.75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_K^1 \\ X_K^2 \\ X_K^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_K^1 \\ W_K^2 \\ W_K^3 \end{bmatrix} \quad (۱۱-۳)$$

$$\begin{bmatrix} Z_K^1 \\ Z_K^2 \\ Z_K^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_K^1 \\ X_K^2 \\ X_K^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_K^1 \\ V_K^2 \end{bmatrix} \quad (۱۲-۳)$$

در معادلات (۱۱-۳) و (۱۲-۳) ،  $X_K^1$  ،  $X_K^2$  و  $X_K^3$  به ترتیب موقعیت، سرعت و شتاب یک شی در حال پرواز می باشد.  $Z_K$  بردار اندازه گیری ها و  $W_K$  بردار نویز فرآیند و  $V_K$  بردار نویز اندازه گیری سیستم می باشند. همان طور که قبلا بیان شد برای شبیه سازی نیاز به مقادیر اولیه می باشد که این مقادیر اولیه به ترتیب زیر در نظر گرفته شده است.

$$\hat{X}_0 = 0 \quad , \quad P_0 = 0.01 I_3 \quad (۱۳-۳)$$

$$Q_0 = 0.02 I_3 \quad , \quad R_0 = \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۴-۳)$$

باید توجه داشت که مقادیر اولیه در صافی کالمن مرسوم و صافی کالمن فازی بهینه سازی شده باهم یکسان باشد و همچنین باید مقادیر  $W_K$  و  $V_K$  در KF و OFKF باهم برابر باشد تا مقایسه در شرایط برابر انجام پذیرد.

### ۳-۴-۶- مقایسه بین KF و OFKF با فرض ثابت بودن ماتریس Q و تنظیم ماتریس R:

به کمک نرم افزار متلب، مدل بیان شده در معادلات (۳-۱۱) و (۳-۱۲) برای  $500S$  و زمان نمونه برداری  $1S$  شبیه سازی شده است و مقدار ماتریس  $Q$  که توسط آن بردار نویز فرآیند ایجاد می شود را ثابت و برابر  $Q = Q_0 = 0.02I_3$  در نظر می گیریم و ماتریس  $R$  که توسط آن بردار نویز اندازه گیری ایجاد می شود را برابر  $R = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 9 \end{bmatrix}$  در نظر می گیریم که مقدار  $R$  ناشناخته فرض شده است. در تمام مراجع بیان شده درایه های قطر اصلی ماتریس  $R_0$  با هم برابر بوده و ماتریس  $R_0$  مضرب عدد صحیح از ماتریس  $R$  واقعی می باشند، که در نتیجه تعیین گروه های فازی که به تنظیم ماتریس  $R_0$  می پردازد، کار نسبتاً ساده تری می باشد. اما در این اینجا درایه های قطر اصلی ماتریس  $R_0$  باهم متفاوت بوده است، که در نتیجه باعث شده، تعیین گروه های فازی که بهترین تطبیق را ایجاد کند کاری بسیار دشوار باشد. که به همین علت از الگوریتم های هوشمند رقابت استعماری، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات برای تعیین مراکز و سیگماهای گروه های فازی ورودی و خروجی استفاده شده است. که در اینجا مقادیر قطر اصلی ماتریس  $R_0$  طبق معادلاتی که در بخش (۳-۴-۲) بیان شد طوری تنظیم می شوند که باعث کاهش خطا در صافی کالمن می شود. همچنین قابل ذکر است که مقادیر  $X_0, \hat{X}_0, P_0, R_0$  و  $Q_0$  به صورت فرضی در نظر گرفته شده است، اما باید توجه داشت که همیشه مقادیر  $X_0$  و  $\hat{X}_0$  باهم متفاوت باشند زیرا هیچگاه مقادیر دقیق  $X_0$  در دست نیست و این اختلاف مقادیر، می بایست توسط الگوریتم صافی کالمن به هم نزدیک شود تا مشخص شود که روند صافی کالمن هم به درستی انجام می شود. همچنین مقادیر  $R$  طوری تعیین شده است که میزان سیگنال به نویز برابر با  $20\text{ db}$  باشد. برای مقایسه بین صافی کالمن مرسوم و صافی کالمن فازی بهینه سازی شده از معادلات (۳-۱۵) الی (۳-۱۸) استفاده می کنیم.

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (Z_a - Z_m)^2} \quad (15-3)$$

$$J_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (Z_a - Z_e)^2} \quad (16-3)$$

$$J_3 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_a - X_e)^2} \quad (17-3)$$

$$J_4 = \alpha \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (DOM)^2} \quad (18-3)$$

که در معادلات (۱۵-۳) الی (۱۸-۳) مقدار واقعی اندازه گیری (بدون نویز)،  $Z_m$  مقدار اندازه گیری شده (همراه با نویز)،  $Z_e$  مقدار تخمینی اندازه گیری،  $X_a$  مقدار واقعی حالتها،  $X_e$  مقدار تخمینی حالتها، DOM اختلاف بین ماتریس کواریانس دنباله ابداع نظری و واقعی و  $\alpha$  یک عدد ثابت جهت سهولت در نمایش مقدار DOM می باشد که برابر با ۱۰۰۰ انتخاب شده است. نتایج مقایسه بین صافی کالمن مرسوم (KF)، صافی کالمن فازی بهینه سازی شده توسط الگوریتم رقابت استعماری<sup>۳۷</sup> (ICAFKF)، صافی کالمن فازی بهینه سازی شده توسط الگوریتم ژنتیک<sup>۳۸</sup> (GAFKF) و صافی کالمن فازی بهینه سازی شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات<sup>۳۹</sup> (PSOFKF) را می توانید در جدول ۱ مشاهده کنید.

جدول ۱-۳- مقایسه بین KF، GAFKF، PSOFKF، ICAFKF

معیار مقایسه	KF	GAFKF	PSOFKF	ICAFKF
J1-Z <sub>K</sub> <sup>1</sup>	0.3091	0.3091	0.3091	0.3091
J1-Z <sub>K</sub> <sup>2</sup>	2.9762	2.9762	2.9762	2.9762
J2-Z <sub>K</sub> <sup>1</sup>	3.2148	1.4875	1.1743	0.1835
J2-Z <sub>K</sub> <sup>2</sup>	3.6038	1.6969	1.3564	0.2886
J3-X <sub>K+1</sub> <sup>1</sup>	0.7297	0.3415	0.3413	0.3397
J3-X <sub>K+1</sub> <sup>2</sup>	0.8739	0.5433	0.4566	0.4522
J3-X <sub>K+1</sub> <sup>3</sup>	0.2974	0.2874	0.2576	0.2575
J4	15947	1425	1346	1246

همان طور که در جدول شماره یک مشاهده می کنید مقادیر سطر اول و دوم با هم برابر است که علت آن این است که شرایط اولیه برای هر چهار صافی KF، GAFKF، PSOFKF و ICAFKF یکسان هستند در نتیجه اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر اندازه گیری شده در هر چهار صافی باهم برابر

<sup>۳۷</sup> = Imperialist Competitive Algorithm Fuzzy Kalman Filter

<sup>۳۸</sup> = Genetic Algorithms Fuzzy Kalman Filter

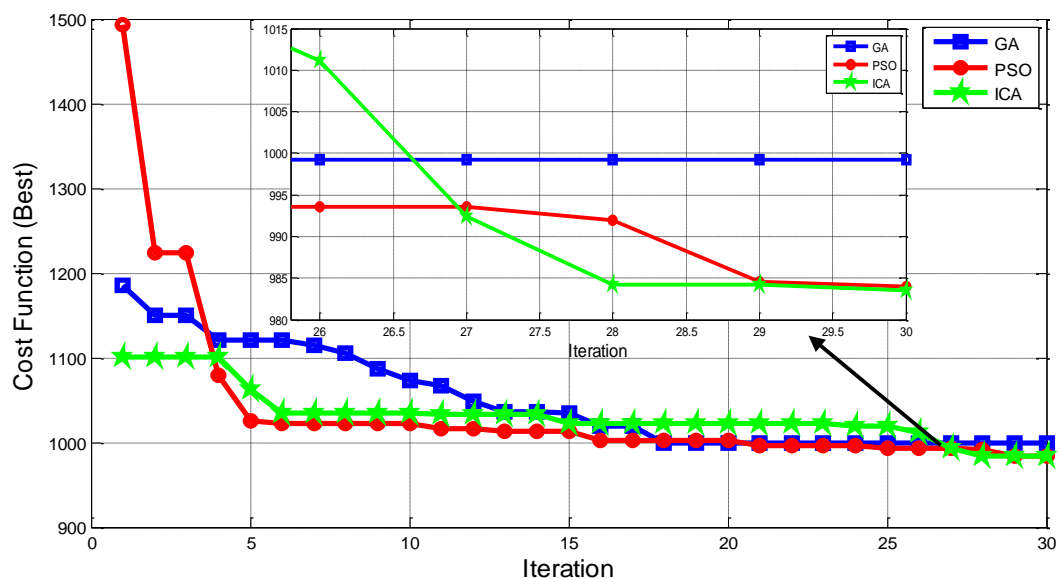
<sup>۳۹</sup> = Particle swarm optimization Fuzzy Kalman Filter

بوده. اما در مابقی سطرهای جدول مشاهده می‌شود که GAFKF و PSOFKF نسبت به KF بهتر عمل کرده و ICAFKF نسبت به هر سه‌ی آنها برتری در تخمین داشته است. علت این امر بدست آوردن گروه‌های فازی دقیقتر توسط الگوریتم بهینه‌سازی ICA نسبت به GA و PSO است که در نتیجه باعث بهبود بیشتر صافی کالمن شده است. مقایسه بین عملکرد الگوریتم GA، PSO و ICA را می‌توان در جدول شماره ۲-۳ و شکل ۳-۸ مشاهده کرد که این مقایسه در طی ۱۵ بار اجرا بر روی تابع هزینه DOM بدست آمده است که در هر اجرا برای جمعیت و تعداد تکرار به ترتیب عدد ۵۰ و ۳۰ در نظر گرفته شده است. همچنین تابع هزینه جهت بهینه‌سازی به صورت زیر فرض شده است.

$$\text{cost function} = 1000 * (\sqrt{(\text{sum}(\text{DOM}(1,1)^2)/500)} + \sqrt{(\text{sum}(\text{DOM}(2,2)^2)/500)}) \quad (19-3)$$

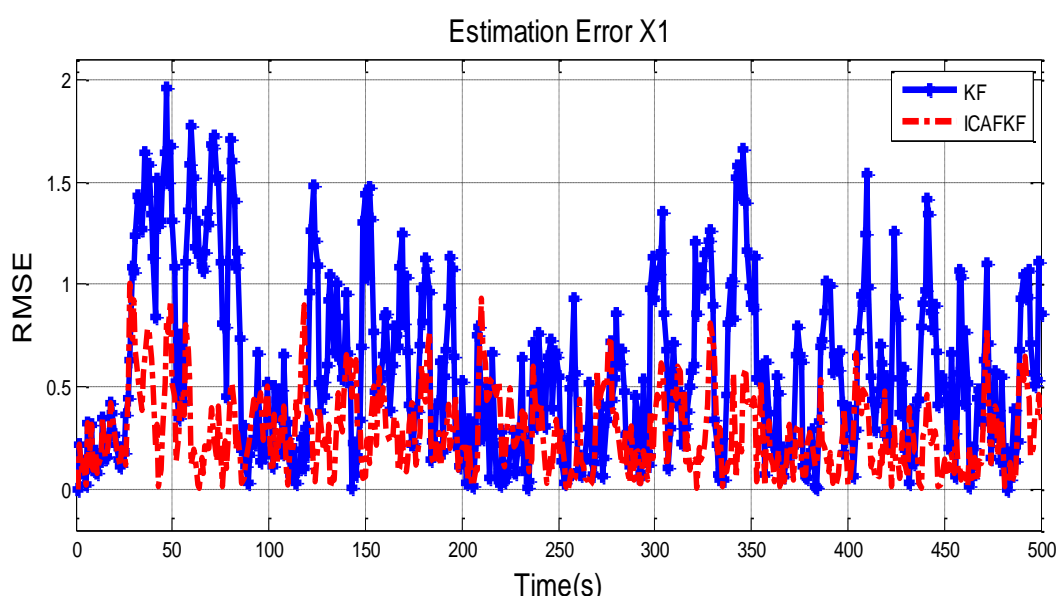
جدول ۲-۳- مقایسه بین GA، PSO و ICA در بهینه‌سازی

نام الگوریتم	WORST COST	MEAN COST	BEST COST
GA	1189.7	1052.9	999.2223
PSO	1123.2	1026.7	984.0062
ICA	1096.3	1020.4	983.4919

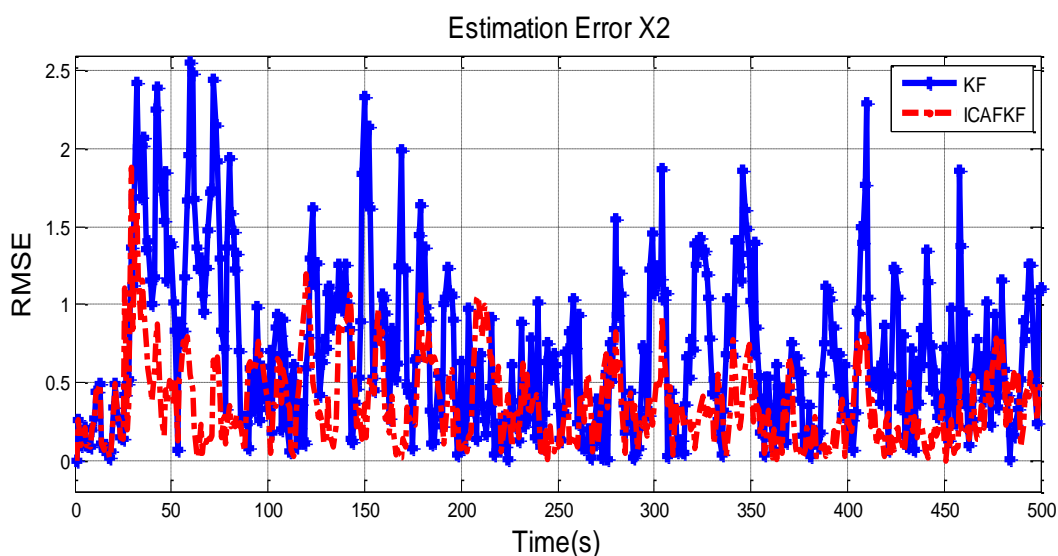


شکل ۳-۸- مقایسه بین GA، PSO و ICA در بهینه‌سازی

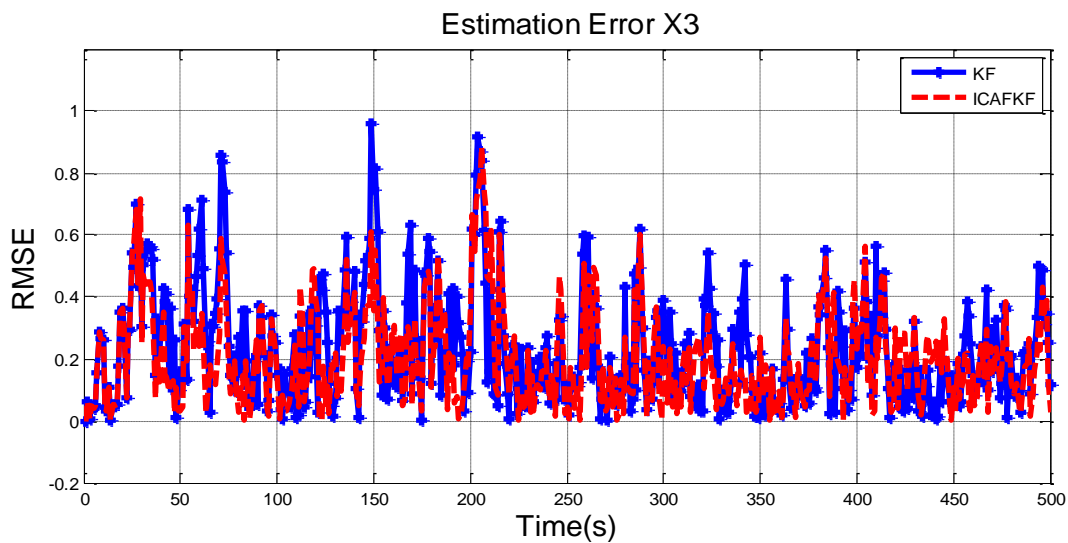
همان طور که در جدول (۳-۱)، (۳-۲) و شکل (۳-۸) مشاهده می‌شود الگوریتم بهینه سازی ICA نسبت به دو الگوریتم دیگر بهینه سازی، بهبود بیشتر بر روی صافی کالمن داشته است. به همین علت در ادامه جهت مقایسه، از بین صافی‌های کالمن فازی بهینه سازی شده فقط از نتایج ICAFKF استفاده می‌کنیم تا از شلوغ شدن اشکال جلوگیری کنیم. در ادامه مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، حالت‌ها و اندازه گیری‌ها توسط دو صافی KF و ICAFKF در شکل‌های ۳-۹ الی ۳-۱۳ نشان داده شده است.



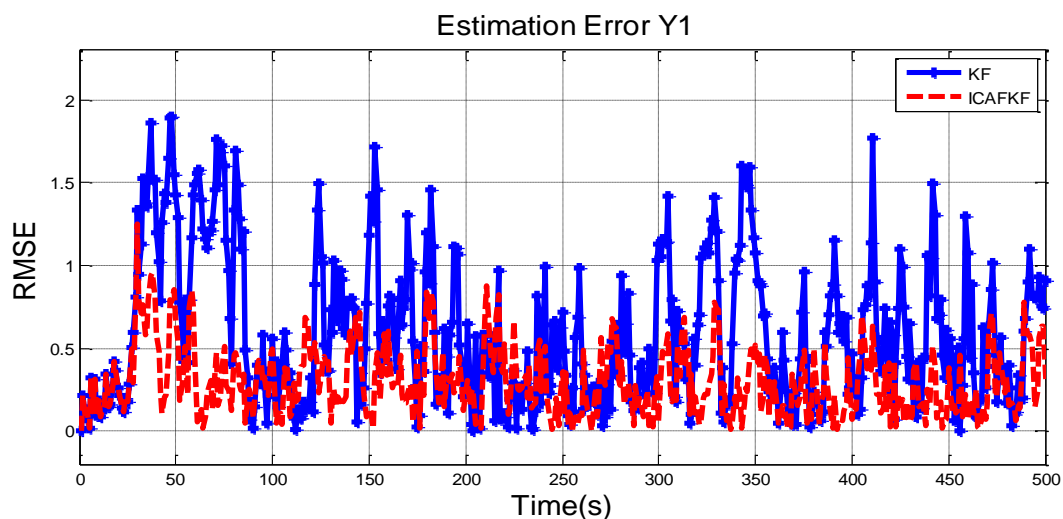
شکل ۳-۹- مقدار RMSE تخمین حالت X1 برای KF و ICAFKF



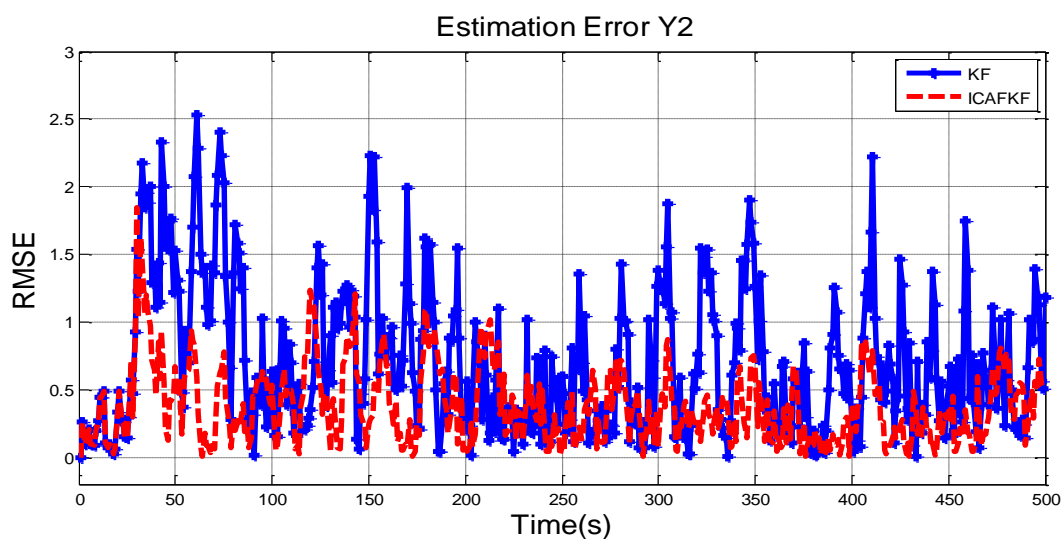
شکل ۳-۱۰- مقدار RMSE تخمین حالت X2 برای KF و ICAFKF



شکل ۳-۱۱- مقدار RMSE تخمین حالت X3 برای KF و ICAFKF

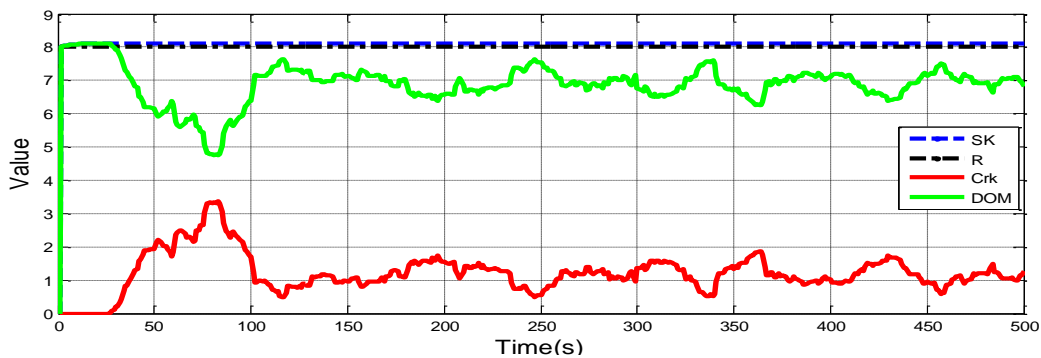


شکل ۳-۱۲- مقدار RMSE تخمین Y1 برای KF و ICAFKF

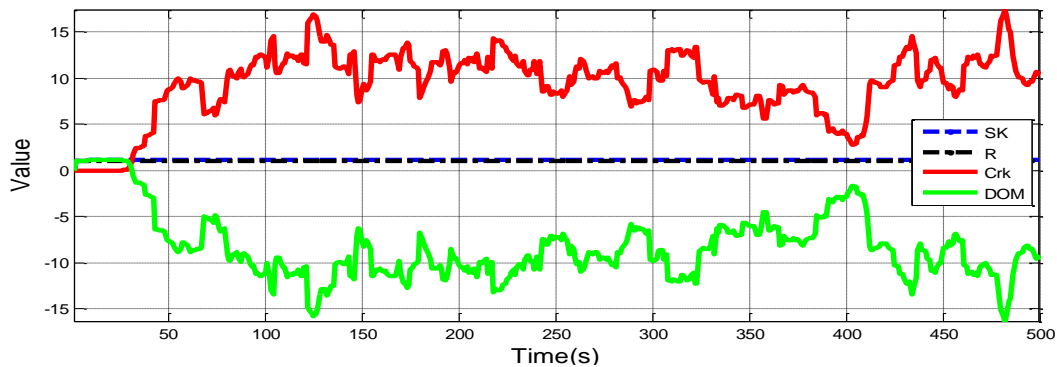


شکل ۳-۱۳- مقدار RMSE تخمین Y2 برای KF و ICAFKF

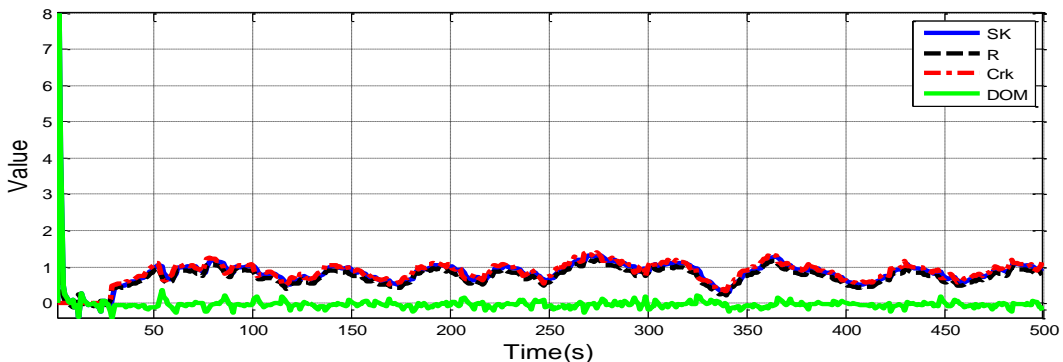
همان طور که در شکل ۳-۹ الی ۳-۱۳ مشاهده می‌شود، مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تخمین حالات و اندازه گیری‌ها توسط صافی ICAFKF بسیار کمتر از KF می‌باشد که علت آن هم تنظیم مقادیر ماتریس کواریانس اندازه گیری توسط سیستم فازی و الگوریتم بهینه سازی می‌باشد، که باعث بهبود عملکرد صافی کالمن گشته است. در ادامه نتایج مقادیر SK، Crk، R و DOM برای صافی KF و ICAFKF در شکل‌های ۳-۱۴ الی ۳-۱۷ نشان داده شده است.



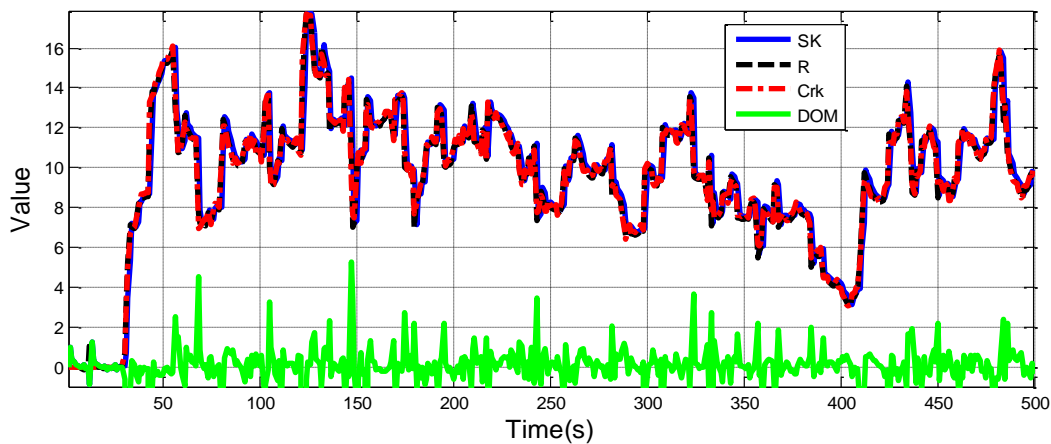
شکل ۳-۱۴- مقادیر SK(1,1)، Crk(1,1)، R(1,1) و DOM(1,1) برای KF



شکل ۳-۱۵- مقادیر SK(2,2)، Crk(2,2)، R(2,2) و DOM(2,2) برای KF



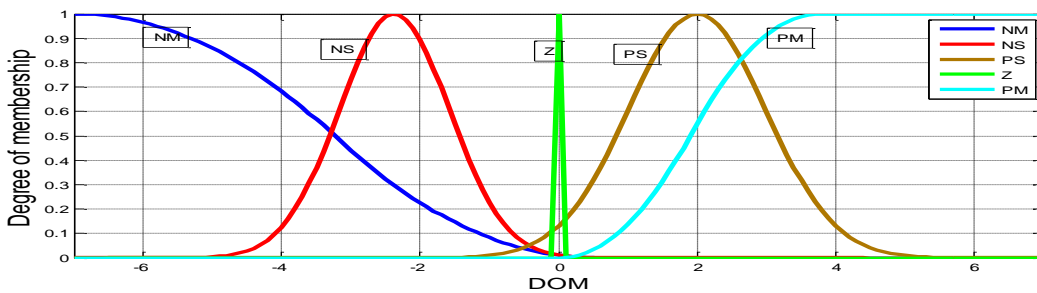
شکل ۳-۱۶- مقادیر SK(1,1)، Crk(1,1)، R(1,1) و DOM(1,1) برای ICAFKF



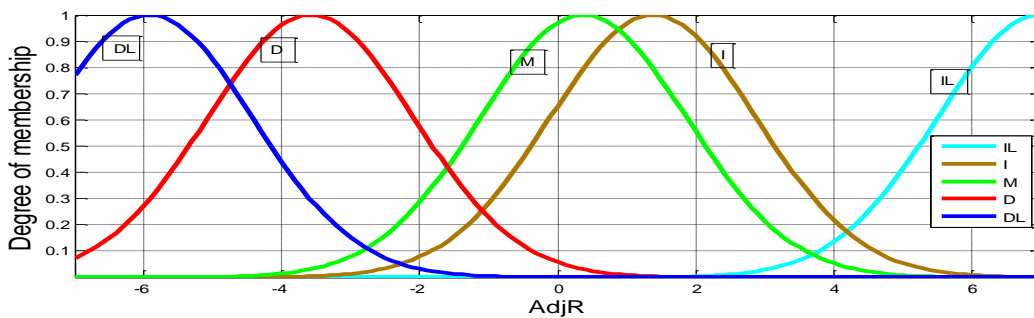
شکل ۳-۱۷- مقادیر  $SK(2,2)$ ،  $Crk(2,2)$ ،  $R(2,2)$  و  $DOM(2,2)$  برای ICAFKF

همان طور که در شکل‌های (۳-۱۴) الی (۳-۱۷) نشان داده شده است در صافی کالمن مرسوم مقدار SK و Crk باهم اختلاف دارد اما در صافی کالمن فازی بهینه سازی شده R به گونه ای تنظیم می‌شود که اختلاف مقدار SK و Crk به سمت صفر میل می‌کند که این روند باعث بهبود صافی کالمن می‌شود. همچنین در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که تا ثانیه ۲۵م مقادیر Crk برابر با صفر می‌باشد، که علت آن را می‌توان توسط رابطه (۳-۵) توجیح کرد. رابطه (۳-۵) بیان کننده ماتریس کواریانس دنباله ابداع واقعی بوده که در آن متغیر  $N$ ، بازه پنجره تخمین ماتریس کواریانس دنباله ابداع را تعیین می‌کند که برابر با ۲۵ در نظر گرفته شده است. در نتیجه تا لحظه ۲۵م مقادیر Crk جمع می‌شود تا در ادامه روند صافی کالمن از آن استفاده شود و به همین علت مقادیر خروجی آن تا لحظه ۲۵م در شکل‌ها بالا برابر با صفر در نظر گرفته‌ایم. سیستم فازی که در این شبیه سازی در نظر گرفته شده دارای ۵ گروه فازی برای ورودی و خروجی است، که در شکل ۳-۱۸ و ۳-۱۹ نشان داده شده است. مراکز و سیگماهای این گروه فازی توسط الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری تعیین شده است به علت این که الگوریتم ICA نسبت به الگوریتم‌های PSO و GA پاسخ بهتری داشته فقط گروه‌های فازی که توسط الگوریتم رقابت استعماری تعیین شده نشان می‌دهیم تا از طولانی شدن مطالب جلوگیری کنیم.





شکل ۳-۱۸- توابع تعلق ورودی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم R



شکل ۳-۱۹- توابع تعلق خروجی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم R

### ۳-۴-۷- مقایسه بین KF و OFKF با فرض ثابت بودن ماتریس R و تنظیم ماتریس Q:

حال با توجه به معادلاتی که در بخش ۳-۴-۳ بیان شد با تنظیم ماتریس درایه های قطر اصلی ماتریس Q سعی در بهبود صافی کالمن داشته و صافی کالمن بهبود یافته را با صافی کالمن مرسوم مقایسه می کنیم فرض کنید شرایط اولیه به ترتیب زیر باشد.

$$X_0^{\wedge} = 0, \quad P_0 = 0.01 I_3 \quad (۱۹-۳)$$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 15 \end{bmatrix}, \quad R_0 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 9 \end{bmatrix} \quad (۲۰-۳)$$

به کمک نرم افزار متلب مدل بیان شده در معادلات (۳-۱۱) و (۳-۱۲) برای  $500S$  و زمان نمونه برداری  $1S$  شبیه سازی شده است و مقدار ماتریس R که توسط آن بردار نویز اندازه گیری ایجاد می شود

را ثابت و برابر  $R = R_0 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 \\ 0 & 9 \end{bmatrix}$  در نظر گرفته شده است و مقدار ماتریس Q که توسط آن بردار

نویز فرایند ایجاد می شود برابر  $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$  در نظر گرفته شده است. در تمام مراجع بیان شده

درایه های قطر اصلی ماتریس  $Q_0$  با هم برابر بوده و ماتریس  $Q_0$  مضرب عدد صحیح از ماتریس Q واقعی

می‌باشند، که در نتیجه تعیین گروه‌های فازی که به تنظیم ماتریس  $Q_0$  بپردازد، کار نسبتاً ساده‌تری بوده است. اما در این جا درایه‌های قطر اصلی ماتریس  $Q_0$  باهم متفاوت بوده است، که در نتیجه باعث شده، تعیین گروه‌های فازی که بهترین تطبیق را ایجاد کند کاری بسیار دشوار باشد. که به همین علت از الگوریتم‌های هوشمند رقابت استعماری، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات برای تعیین مراکز و سیگماهای گروه‌های فازی ورودی و خروجی استفاده شده است. در اینجا تنظیم ماتریس  $Q$  کاری بسیار دشوارتر از تنظیم ماتریس  $R$  است چون ابعاد ماتریس  $Q$  بیشتر از  $R$  بوده و دارای متغیرهای بیشتر می‌باشد و از طرفی طبق معادله  $(3-4)$  و  $(3-5)$  ابعاد ماتریس  $R, SK, Crk$  و  $DOM 2 \times 2$  می‌باشد اما ابعاد ماتریس  $Q 3 \times 3$  می‌باشد که این اختلاف ابعاد کار را دشوار می‌کند برای تنظیم درایه سوم  $Q$  از راهکار زیر استفاده می‌شود.

$$DOM_K(3,3) = [DOM_K(1,2)]^2 \quad (21-3)$$

با استفاده از روابط  $(3-15)$  الی  $(3-18)$  مقایسه  $KF, GAFKF, PSOFKF, ICAFKF$  در جدول شماره ۳ آورده شده است.

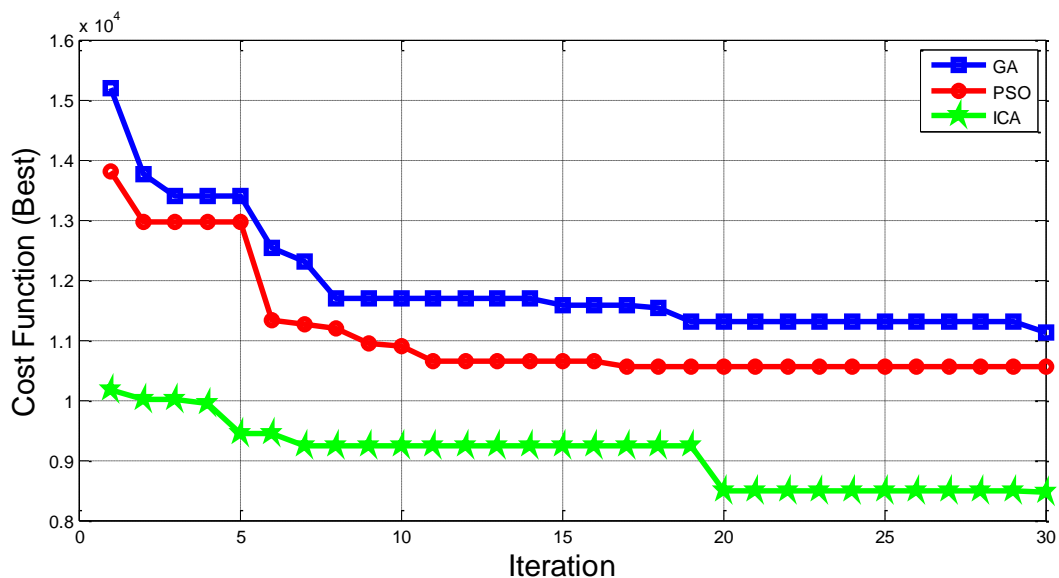
جدول ۳-۳- مقایسه بین  $KF, GAFKF, PSOFKF, ICAFKF$

معیار مقایسه	KF	GAFKF	PSOFKF	ICAFKF
$J1-Z_K^1$	1.3535	1.3535	1.3535	1.3535
$J1-Z_K^2$	1.7535	1.7535	1.7535	1.7535
$J2-Z_K^1$	0.4847	0.3768	0.3385	0.2814
$J2-Z_K^2$	0.8121	0.8053	0.7955	0.7925
$J3-X_{K+1}^1$	0.9786	0.9584	0.7320	0.7228
$J3-X_{K+1}^2$	1.3929	1.0644	1.0156	1.0108
$J3-X_{K+1}^3$	7.0821	2.9387	2.9170	2.7170
$J4$	42766	11162	10799	10720

در تنظیم ماتریس Q هم مشاهده می شود که GAFKF و PSOFKF بهتر از KF عمل کرده و ICAFKF نسبت به هر سه آنها برتری داشته علت این امر تنظیم دقیق تر گروه های فازی توسط الگوریتم ICA نسبت به GA و PSO می باشد. مقایسه بین عملکرد الگوریتم ICA، PSO و GA را می توان در جدول شماره ۳-۴ و شکل ۳-۲۰ مشاهده کرد که این مقایسه در طی ۱۵ بار اجرا بر روی تابع هزینه DOM بدست آمده است که در هر اجرا برای جمعیت و تعداد تکرار به ترتیب عدد ۵۰ و ۳۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۴- مقایسه بین PSO، GA و ICA در بهینه سازی

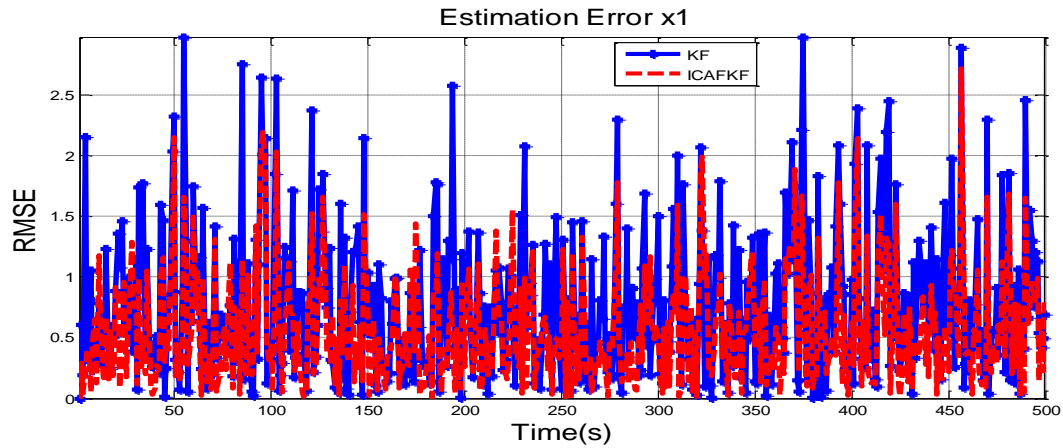
نام الگوریتم	WORST COST	MEAN COST	BEST COST
GA	12276	11660	11134
PSO	12676	11285	10557
ICA	9390	8906	8469



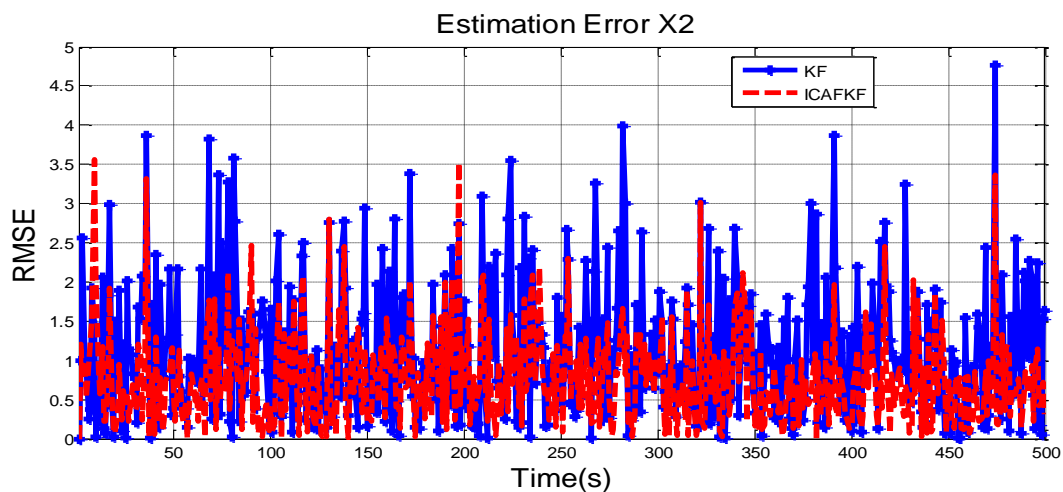
شکل ۳-۲۰- مقایسه بین PSO، GA و ICA در بهینه سازی

همان طور که در جدول (۳-۳)، (۳-۴) و شکل (۳-۲۰) مشاهده می شود الگوریتم بهینه سازی ICA نسبت به دو الگوریتم دیگر بهینه سازی، بهبود بیشتر بر روی صافی کالمن داشته است. به همین علت در ادامه جهت مقایسه، از بین صافی های کالمن فازی بهینه سازی شده فقط از نتایج ICAFKF استفاده

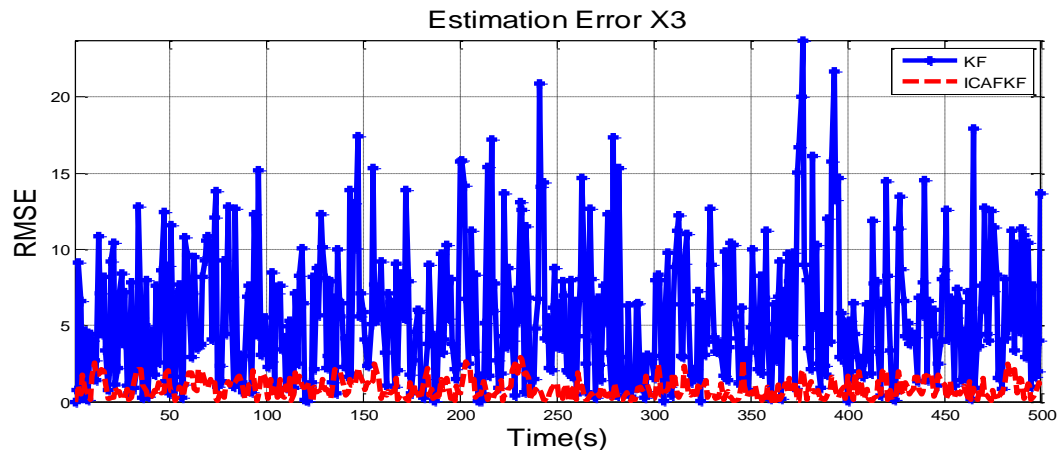
می‌کنیم تا از شلوغ شدن اشکال جلوگیری کنیم. در ادامه مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، حالت‌ها و اندازه گیری‌ها توسط دو صافی KF و ICAFKF در شکل‌های ۲۱-۳ الی ۲۲-۳ نشان داده شده است.



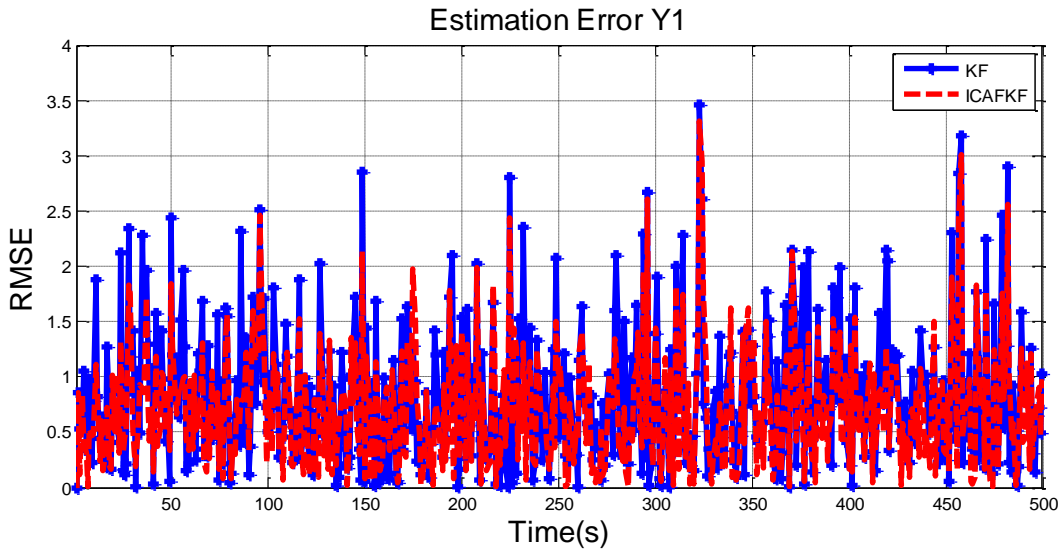
شکل ۲۱-۳- مقدار RMSE تخمین حالت X1 برای KF و ICAFKF



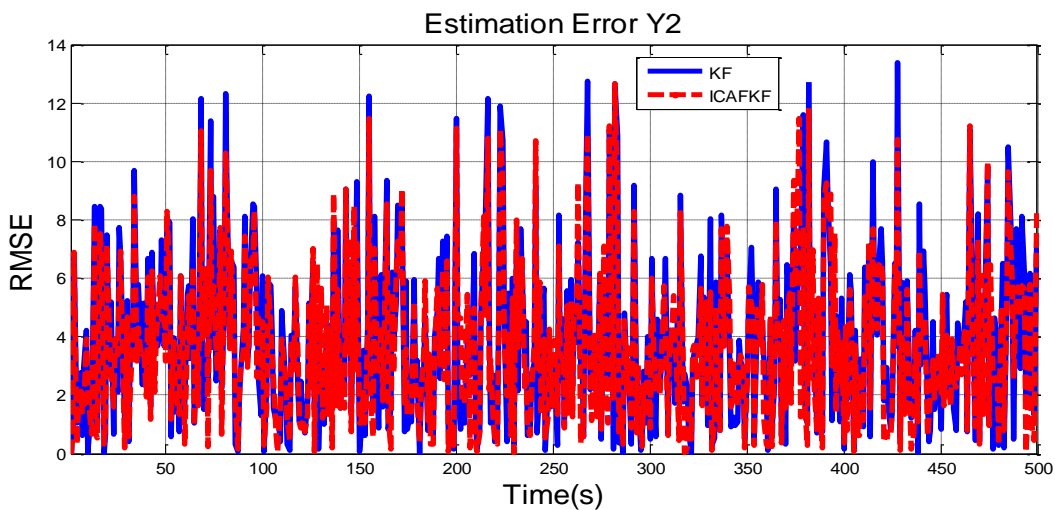
شکل ۲۲-۳- مقدار RMSE تخمین حالت X2 برای KF و ICAFKF



شکل ۲۳-۳- مقدار RMSE تخمین حالت X3 برای KF و ICAFKF

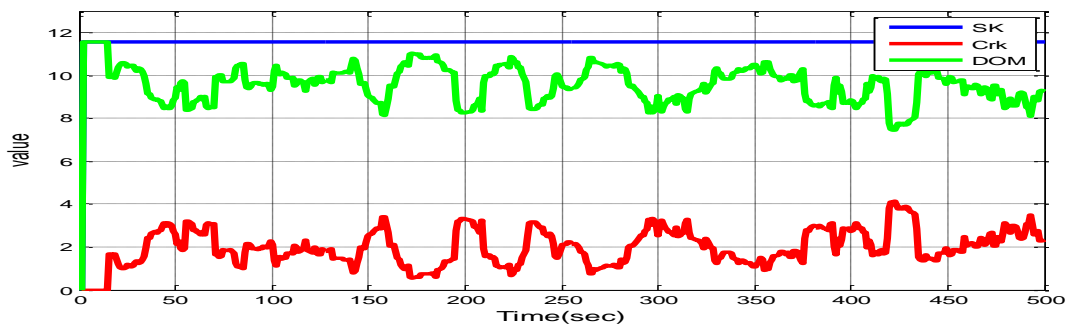


شکل ۳-۲۴- مقدار RMSE تخمین Y1 برای KF و ICAFKF

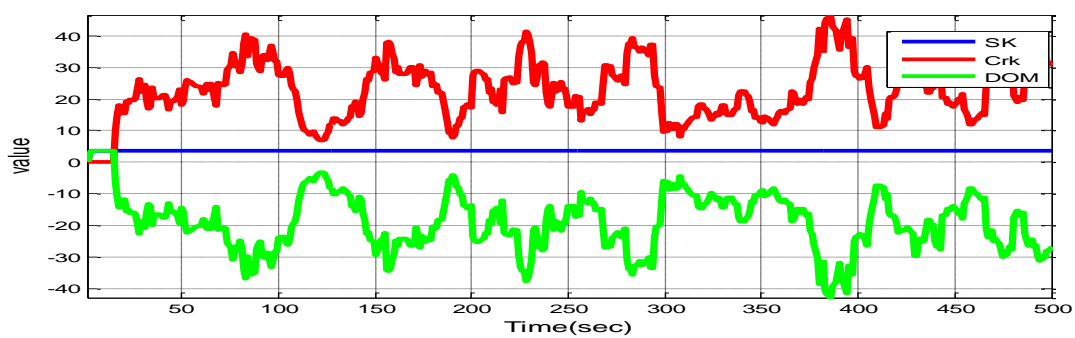


شکل ۳-۲۵- مقدار RMSE تخمین Y2 برای KF و ICAFKF

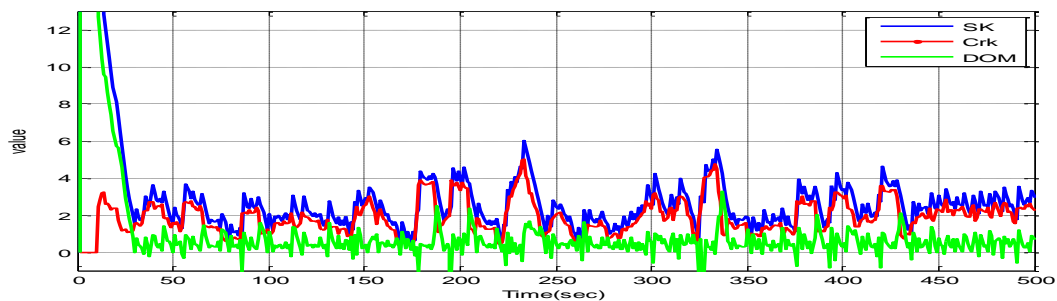
همان طور که در شکل ۳-۲۱ الی ۳-۲۵ مشاهده می‌شود، مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای تخمین حالات و اندازه گیری‌ها توسط صافی ICAFKF بسیار کمتر از KF می‌باشد که علت آن هم تنظیم مقادیر ماتریس کواریانس فرایند (Q) توسط سیستم فازی و الگوریتم بهینه سازی می‌باشد، که باعث بهبود عملکرد صافی کالمن گشته است. در ادامه نتایج مقادیر SK, Crk, R و DOM برای صافی KF و ICAFKF در شکل‌های ۳-۲۶ الی ۳-۲۹ نشان داده شده است



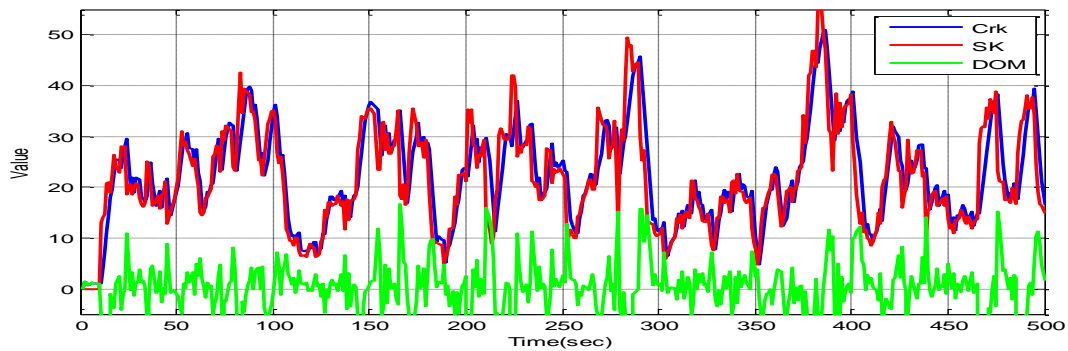
شکل ۳-۲۶- مقادیر  $SK(1,1)$ ،  $Crk(1,1)$ ،  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای KF



شکل ۳-۲۷- مقادیر  $SK(2,2)$ ،  $Crk(2,2)$ ،  $R(2,2)$  و  $DOM(2,2)$  برای KF

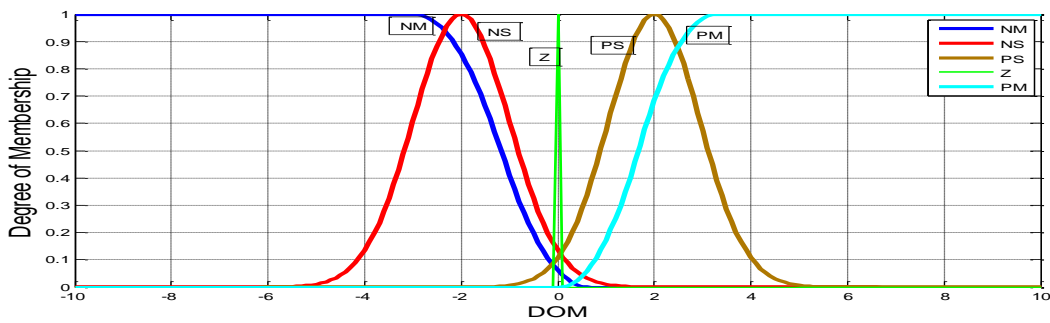


شکل ۳-۲۸- مقادیر  $SK(1,1)$ ،  $Crk(1,1)$ ،  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای ICAFKF

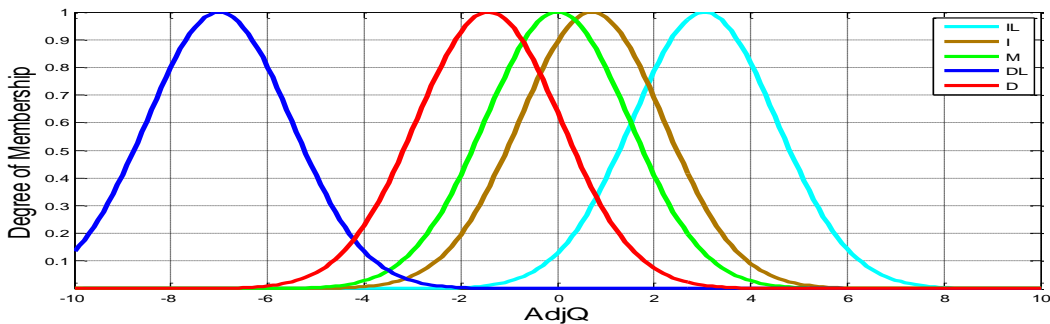


شکل ۳-۲۹- مقادیر  $SK(2,2)$ ،  $Crk(2,2)$ ،  $R(2,2)$  و  $DOM(2,2)$  برای ICAFKF

همان طور که در شکل‌های (۳-۲۶) الی (۳-۲۹) نشان داده شده است در صافی کالمن مرسوم مقدار SK و Crk باهم اختلاف دارد اما در صافی کالمن فازی بهینه سازی شده Q به گونه ای تنظیم می‌شود که اختلاف مقدار SK و Crk به سمت صفر میل می‌کند که این روند باعث بهبود صافی کالمن می‌شود. سیستم فازی که در این شبیه سازی در نظر گرفته شده دارای ۵ گروه فازی برای ورودی و خروجی است، که در شکل ۳-۳۰ و ۳-۳۱ نشان داده شده است. مراکز و سیگماهای این گروه فازی توسط الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری تعیین شده است.



شکل ۳-۳۰- توابع تعلق ورودی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم Q



شکل ۳-۳۱- توابع تعلق خروجی فازی تعیین شده توسط الگوریتم رقابت استعماری برای تنظیم Q

در نهایت اگر روش تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری (R) را با روش تنظیم ماتریس کواریانس فرآیند (Q) مقایسه کنیم با توجه به جدول شماره ۳-۱ و ۳-۳ مشاهده می‌شود که روش تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری (R) بهبود بیشتری بر روی صافی کالمن داشته است (جز تخمین حالت شماره سه). همچنین قابل ذکر است که در روش تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری (R) به علت اینکه ابعاد ماتریس R با ماتریس‌های SK، Crk و DOM برابر است کاری بسیار ساده‌تری می‌باشد.

### ۳-۵- خلاصه:

در این فصل به معرفی صافی کالمن فازی بهینه سازی شده (OFKF) پرداختیم. همچنین در این فصل بیان کردیم که برای بهبود صافی کالمن باید دنباله ابداع نظری را به دنباله ابداع واقعی نزدیک کنیم و اختلاف آنها را به سمت صفر میل دهیم، که به همین منظور از سیستم فازی جهت نزدیک کردن دنباله ابداع نظری به دنباله ابداع واقعی استفاده نمودیم که مراکز و سیگماهای این سیستم فازی از طریق سه روش بهینه سازی GA، PSO و ICA به صورت جداگانه تعیین شد که در نهایت پاسخ الگوریتم ICA نسبت به دو الگوریتم دیگر بهبود بیشتری بر روی صافی کالمن داشته است. همچنین بیان شد که برای بهبود صافی کالمن از طریق نزدیک کردن دنباله ابداع نظری به دنباله ابداع واقعی دو روش وجود دارد. که در روش اول ماتریس کواریانس فرآیند (Q) را ثابت فرض کرده و با تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری (R) به بهبود صافی کالمن می پردازیم و در روش دوم ماتریس کواریانس اندازه گیری (R) را ثابت فرض کرده و با تنظیم ماتریس کواریانس فرآیند (Q) به بهبود صافی کالمن می پردازیم. در نهایت بیان شد که تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری (R) دارای بهبود بیشتر بر روی صافی کالمن بوده و همچنین بهبود صافی کالمن با استفاده از این روش ساده تر می باشد. در فصل های آینده از صافی کالمن فازی بهینه سازی شده با استفاده از الگوریتم ICA و روش تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری (R) استفاده می کنیم.



# روپایی غیرفعال

مدف زیر آب با استفاده از

الکوریتم اندازه گیری تاخیر زمانی

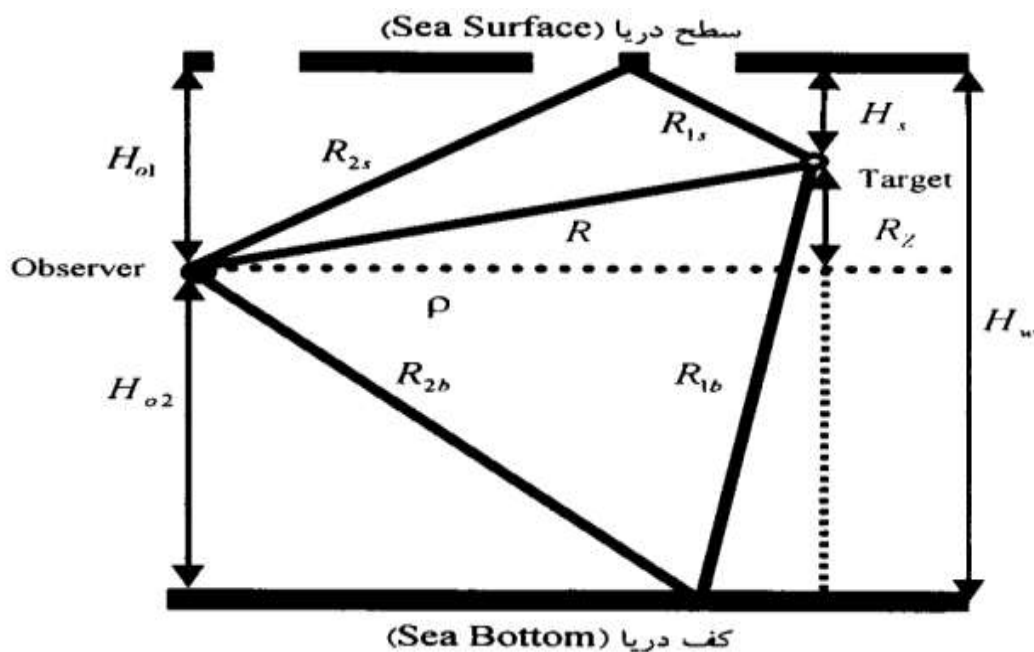
#### ۴-۱- مقدمه:

ردیابی اهداف زیر آب، به علت نویزی بودن سیگنال‌های ساطع شده از هدف که به ماهیت انتشار امواج در آب برمی‌گردد، کار دشواری است. در این فصل ما به ردیابی و تخمین موقعیت یک هدف متحرک در زیر آب صرفاً براساس سیگنال‌های آکوستیکی ساطع شده از هدف به کمک الگوریتم صافی کالمن می‌پردازیم. جهت ردیابی و تخمین موقعیت هدف زیر آب نیاز به یک سری معادلات حالت و اندازه‌گیری می‌باشد، که معادلات توصیف‌کننده این سیستم براساس هندسه موقعیت هدف و حسگر در مختصات دکارتی و با فرض حرکت هدف با سرعت ثابت در زیر آب ارائه می‌شود. همچنین معادلات حالت توصیف‌کننده این سیستم تشکیل شده از موقعیت و سرعت هدف متحرک در راستاهای مختلف می‌باشد و بردار اندازه‌گیری مدل مذکور، اختلاف زمانی رسیدن سیگنال آکوستیکی ساطع شده از هدف به حسگر از مسیر انعکاس از سطح آب و نیز از مسیر انعکاس از کف دریا نسبت به مسیر مستقیم، می‌باشد. در این فصل به علت غیر خطی بودن بردار اندازه‌گیری و با توجه به نویزی بودن داده‌ها، جهت ردیابی از الگوریتم‌های مختلف صافی کالمن از جمله: صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه‌سازی شده و صافی کالمن بی‌رد استفاده می‌کنیم. همچنین برای مدل کردن انتشار امواج آکوستیکی در محیط زیر آب از روش تئوری پرتو که در آن امواج آکوستیکی در زیر آب به شکل پرتو منتشر می‌شوند، استفاده شده است، که در این روش سطح و کف دریا مانند آینه عمل می‌کنند. همچنین در این فصل به شبیه‌سازی، ردیابی هدف زیر آب با استفاده از انواع مختلف صافی کالمن می‌پردازیم، و همچنین مراحل شش‌گانه شبیه‌سازی را به صورت نمودار جعبه‌ای به تفصیل توضیح می‌دهیم. در ادامه به معرفی معادلات حالت و اندازه‌گیری می‌پردازیم.

#### ۴-۲- معادلات حاکم بر سیستم ردیاب غیرفعال:

اولین گام در ردیابی اهداف، ایجاد یک مدل است که بیان‌کننده رابطه بیان حالات هدف و اندازه‌گیری حسگرها باشد. ساختار هندسی سیستم ردیاب غیرفعال شامل دو حسگر تعبیه شده ثابت در عمق مورد

نظر و یک هدف متحرک ساطع کننده سیگنال‌های آکوستیکی است. برای مدل کردن امواج آکوستیکی از روش نظریه پرتو استفاده شده است که در این روش با برخورد امواج آکوستیکی به سطح و کف دریا امواج آکوستیکی بازتاب کرده و به حسگرها می‌رسند. شکل ۱ بیان کننده ساختار هندسی سیستم ردیاب می‌باشد. در شکل ۱ دایره توپر بیان کننده موقعیت مشاهده گر و دایره توخالی بیان کننده موقعیت هدف می‌باشد و  $H_w$  عمق دریا،  $H_{01}$  عمق حسگر نسبت به سطح دریا،  $H_{02}$  عمق حسگر نسبت به کف دریا،  $H_s$  عمق هدف نسبت به سطح دریا،  $R$  فاصله مستقیم هدف تا مشاهده گر (برد کلی)،  $R_z$  تفاوت عمقی هدف و مشاهده گر نسبت به سطح دریا (برد عمقی) و  $\rho$  برد شعاعی هدف می‌باشند.



شکل ۴-۱- ساختار هندسی سیستم ردیاب غیر فعال

همچنین  $R_{2s}$  و  $R_{1s}$  مسیر پرتوی انعکاس از سطح دریا،  $R_{1b}$  و  $R_{2b}$  مسیر پرتوی انعکاس از کف دریا می‌باشد. اختلاف زمانی بین انعکاس امواج از سطح دریا و مسیر مستقیم را با  $\tau_1$  و اختلاف زمانی بین انعکاس از کف دریا و مسیر مستقیم را با  $\tau_2$  نشان می‌دهیم. که روابط حاکم بر آن در زیر آمده است

[۱۵-۵۴].

$$\tau_1 = \frac{(R^2 + 4H_{01}^2 - 4R_z H_{01})^{1/2} - R}{c} \quad (۱-۴)$$

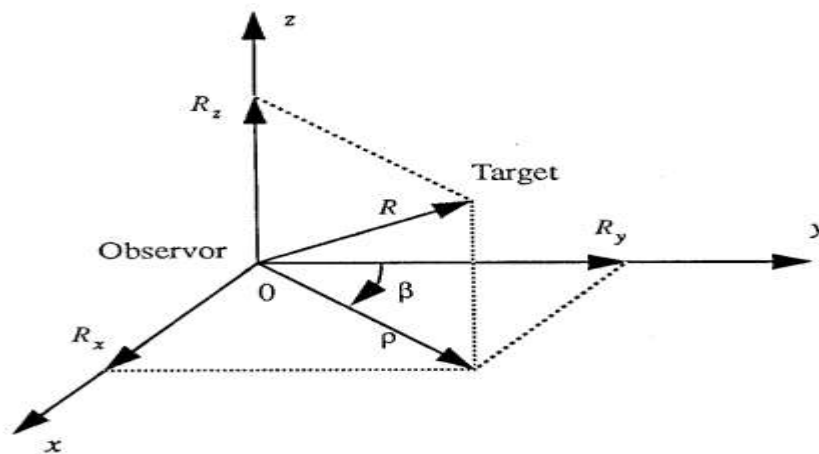
$$\tau_2 = \frac{(R^2 + 4H_{02}^2 + 4R_z H_{02})^{1/2} - R}{c} \quad (۲-۴)$$

C در روابط ۱-۴ و ۲-۴ سرعت انتشار صوت در آب می‌باشد که برابر با ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است. فاصله مستقیم هدف تا مشاهده‌گر (برد هدف) R و تفاوت عمقی هدف تا مشاهده‌گر نسبت به سطح دریا (برد عمقی هدف)  $R_z$  با استفاده از رابطه ۱-۴ و ۲-۴ به صورت زیر بدست می‌آید [۱۵-۵۴].

$$R = \frac{4 H_{O1} H_{O2} [H_{O1} + H_{O2}] - C^2 [\tau_1^2 H_{O2} + \tau_2^2 H_{O1}]}{2C[\tau_1 H_{O2} + \tau_2 H_{O1}]} \quad (۳-۴)$$

$$R_z = \frac{\tau_2^2 C^2 + 2R\tau_2 C - 4H_{O2}^2}{4H_{O2}} \quad (۴-۴)$$

توصیف هندسی موقعیت هدف و مشاهده‌گر در فضای سه بعدی در شکل ۲-۴ بیان شده است که برای تبدیل مختصات از حالت قطبی به دکارتی هم می‌توان از آن استفاده نمود.



شکل ۲-۴- توصیف موقعیت مشاهده‌گر و هدف در فضای سه بعدی

در شکل ۲-۴، R فاصله بین مشاهده‌گر و هدف بوده و  $\rho$  برد شعاعی مشاهده‌گر،  $\beta$  زاویه سمت هدف،  $R_x$  برد هدف در راستای محور X،  $R_y$  برد هدف در راستای محور Y،  $R_z$  برد هدف در راستای محور Z می‌باشد. با توجه به شکل ۲-۴ تبدیل مختصات قطبی به دکارتی در روابط زیر بیان شده است [۵۴-۱۵].

$$R_x = \rho \sin \beta \quad (۵-۴)$$

$$R_y = \rho \cos \beta \quad (۶-۴)$$

$$\rho^2 = R^2 - R_Z^2 \quad (7-4)$$

$$R = \sqrt{(\rho^2 - R_Z^2)} \quad (8-4)$$

برای ردیابی غیر فعال هدف توسط صافی کالمن نیاز است تا معادلات حرکتی و اندازه گیری هدف به صورت فضای حالت بیان شود که بردار حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۵-۵۴].

$$X_K = \begin{bmatrix} X_{(1)T} \\ X_{(2)T} \\ X_{(3)T} \\ X_{(4)T} \\ X_{(5)T} \\ X_{(6)T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T(K) \\ Y_T(K) \\ Z_T(K) \\ V_{TX}(K) \\ V_{TY}(K) \\ V_{TZ}(K) \end{bmatrix} \quad (9-4)$$

$$W_K = \begin{bmatrix} WX_{(1)} \\ WX_{(2)} \\ WX_{(3)} \\ WX_{(4)} \\ WX_{(5)} \\ WX_{(6)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} WX_T(K) \\ WY_T(K) \\ WZ_T(K) \\ WV_{TX}(K) \\ WV_{TY}(K) \\ WV_{TZ}(K) \end{bmatrix} \quad (10-4)$$

$$X_K = \begin{bmatrix} X_{(1)O} \\ X_{(2)O} \\ X_{(3)O} \\ X_{(4)O} \\ X_{(5)O} \\ X_{(6)O} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_O(K) \\ Y_O(K) \\ Z_O(K) \\ V_{OX}(K) \\ V_{OY}(K) \\ V_{OZ}(K) \end{bmatrix} \quad (11-4)$$

در روابط بالا،  $X_T(K), Y_T(K), Z_T(K)$  به ترتیب موقعیت هدف متحرک زیر آب در راستای محور  $X$  ها،  $Y$  ها و  $Z$  ها بوده و  $V_{TX}(K), V_{TY}(K), V_{TZ}(K)$  به ترتیب سرعت هدف متحرک در راستای محور  $X$  ها،  $Y$  ها و  $Z$  ها می باشد. همچنین  $X_O(K), Y_O(K), Z_O(K)$  موقعیت حسگر در راستای محور  $X$  ها،  $Y$  ها و  $Z$  ها است و  $V_{OX}(K), V_{OY}(K), V_{OZ}(K)$  به ترتیب سرعت حسگر در راستای محور  $X$  ها،  $Y$  ها و  $Z$  ها می باشد که به علت ثابت فرض شدن حسگر، سرعت حسگر در جهت های مختلف برابر صفر می باشد، و بردار  $W$  نویز فرآیند در راستاهای مختلف حرکتی می باشد. معادلات دینامیکی موقعیت و سرعت هدف در دستگاه دکارتی در هر لحظه با فرض ثابت بودن سرعت هدف متحرک زیر آب به صورت زیر بدست می آید.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_T(K+1) = X_T(K) + \Delta t \cdot V_{TX}(K) + WX_T(K) \\ Y_T(K+1) = Y_T(K) + \Delta t \cdot V_{TY}(K) + WY_T(K) \\ Z_T(K+1) = Z_T(K) + \Delta t \cdot V_{TZ}(K) + WZ_T(K) \\ \\ V_{TX}(K+1) = V_{TX}(K) + WV_{TX}(K) \\ V_{TY}(K+1) = V_{TY}(K) + WV_{TY}(K) \\ V_{TZ}(K+1) = V_{TZ}(K) + WV_{TZ}(K) \end{array} \right. \quad (12-4)$$

در رابطه بالا  $\Delta t$  فاصله نمونه برداری می باشد. اگر روابط بدست آمده بالا به صورت ماتریس نوشته شود، روابط زیر بدست می آید:

$$X_K = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T(K) \\ Y_T(K) \\ Z_T(K) \\ V_{TX}(K) \\ V_{TY}(K) \\ V_{TZ}(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} WX_T(K) \\ WY_T(K) \\ WZ_T(K) \\ WV_{TX}(K) \\ WV_{TY}(K) \\ WV_{TZ}(K) \end{bmatrix} \quad (13-4)$$

بردار اندازه گیری در این سیستم تاخیرهای زمانی دریافت سیگنال های آکوستیکی انعکاس سطح و کف دریا نسبت به مسیر مستقیم بوده است که به صورت زیر بیان می شود:

$$Z_K = \begin{bmatrix} \tau_1(k) \\ \tau_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1(k) \\ V_2(k) \end{bmatrix} \quad (14-4)$$

در رابطه بالا  $V$  بردار نویز اندازه گیری می باشد. همچنین در عمل سیگنال های دریافتی سطح، کف و مسیر مستقیم، توسط زاویه ای که به حسگر می رسند قابل جداسازی بوده و توسط الگوریتم های پردازش سیگنال، تأخیرهای  $\tau_1$  و  $\tau_2$  قابل محاسبه می باشد.

## ۴-۲-۱-۲-۴ خطی سازی مدل اندازه گیری:

با توجه به رابطه ۴-۱ و ۴-۲ مشاهده می شود که رابطه بردار اندازه گیری در این سیستم، رابطه ای غیر خطی می باشد. برای استفاده از روش صافی کالمن توسعه یافته در قسمت شبیه سازی، نیاز است که

مدل مذکور خطی شود. برای این منظور ماتریس H را تعریف می‌کنیم. این ماتریس، یک ماتریس ژاکوبین است که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$H(k) = \frac{\partial z}{\partial x} \Big|_{X(k)} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} \end{bmatrix} \quad (15-4)$$

لذا رابطه مربوط به مدل اندازه‌گیری از معادلات حالت سیستم بصورت زیر در می‌آید.

$$Z_K = H_K X_K + V_K \quad (16-4)$$

المان‌های مربوط به ماتریس H به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$h_{11}(K) = \frac{\partial \tau_1}{\partial X_{(1)T}} \Big|_{X(K)} = \frac{(X_{(1)T} - X_{(1)O})}{C} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{R} \right) \quad (17-4)$$

$$h_{12}(K) = \frac{\partial \tau_1}{\partial X_{(2)T}} \Big|_{X(K)} = \frac{(X_{(2)T} - X_{(2)O})}{C} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{R} \right) \quad (18-4)$$

$$h_{13}(K) = \frac{\partial \tau_1}{\partial X_{(3)T}} \Big|_{X(K)} = \frac{\frac{1}{S_1} \left( (X_{(3)T} - X_{(3)O}) - 2H_{O1} \right) \left( \frac{(X_{(3)T} - X_{(3)O})}{R} \right)}{C} \quad (19-4)$$

$$h_{14}(K) = \frac{\partial \tau_1}{\partial X_{(4)T}} \Big|_{X(K)} = 0 \quad (20-4)$$

$$h_{15}(K) = \frac{\partial \tau_1}{\partial X_{(5)T}} \Big|_{X(K)} = 0 \quad (21-4)$$

$$h_{16}(K) = \frac{\partial \tau_1}{\partial X_{(6)T}} \Big|_{X(K)} = 0 \quad (22-4)$$

$$h_{21}(K) = \frac{\partial \tau_2}{\partial X_{(1)T}} \Big|_{X(K)} = \frac{(X_{(1)T} - X_{(1)O})}{C} \left( \frac{1}{S_2} - \frac{1}{R} \right) \quad (23-4)$$

$$h_{22}(K) = \frac{\partial \tau_2}{\partial X_{(2)T}} \Big|_{X(K)} = \frac{(X_{(2)T} - X_{(2)O})}{C} \left( \frac{1}{S_2} - \frac{1}{R} \right) \quad (24-4)$$

$$h_{23}(K) = \frac{\partial \tau_2}{\partial X_{(3)T}} \Big|_{X(K)} = \frac{\frac{1}{S_2} \left( (X_{(3)T} - X_{(3)O}) - 2H_{O2} \right) \left( \frac{(X_{(3)T} - X_{(3)O})}{R} \right)}{C} \quad (25-4)$$

$$h_{24}(K) = \frac{\partial \tau_2}{\partial X_{(4)T}} \Big|_{X(K)} = 0 \quad (26-4)$$

$$h_{25}(K) = \frac{\partial \tau_2}{\partial X_{(5)T}} \Big|_{X(K)} = 0 \quad (27-4)$$

$$h_{26}(K) = \frac{\partial \tau_2}{\partial X_{(6)T}} |X(K) = 0 \quad (28-4)$$

که در روابط فوق  $S_1$  و  $S_2$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_1 = \sqrt{(R^2 + 4H_{O1}^2 - 4H_{O1}(X_{(3)T} - X_{(3)O}))} \quad (29-4)$$

$$S_2 = \sqrt{(R^2 + 4H_{O2}^2 - 4H_{O2}(X_{(3)T} - X_{(3)O}))} \quad (30-4)$$

### ۴-۳- مراحل شش گانه شبیه سازی سیستم رویایی تک هدف و دو حکم ثابت:

در این بخش به توضیح درباره نحوه شبیه سازی می‌پردازیم. اندازه گیری در این شبیه سازی اختلاف زمان دریافت سیگنال انعکاسی از سطح و کف نسبت به مسیر مستقیم بوده و خروجی سیستم موقعیت و سرعت هدف متحرک زیر آب می‌باشد. در این بخش شبیه سازی به شش مرحله تقسیم شده است، و هر یک از این مراحل به صورت کامل توضیح داده شده است. نمودار جعبه‌ای مراحل شش گانه تدوین شبیه سازی با استفاده از صافی کالمن در شکل ۴-۳ رسم شده است.

#### ۱- جعبه مولد داده‌های با خط سیر دلخواه هدف:

همانگونه که در شکل ۴-۳ دیده می‌شود، این جعبه مسیر دلخواه حرکت هدف که توسط کاربر و با انتخاب برد هدف در راستای محور مختصات دکارتی تعیین شده است، را به داده‌های مورد نیاز ورودی شبیه سازی (برد هدف و برد در راستای محور  $Z$  یا برد عمقی) تبدیل می‌کند. مقدار برد کلی هدف و برد عمقی هدف در هر لحظه با انتخاب مسیر دلخواه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R = \sqrt{(X_{(1)T} - X_{(1)O})^2 + (X_{(2)T} - X_{(2)O})^2 + (X_{(3)T} - X_{(3)O})^2} \quad (31-4)$$

$$R_\rho = \sqrt{(X_{(1)T} - X_{(1)O})^2 + (X_{(2)T} - X_{(2)O})^2} \quad (32-4)$$

$$R_z = \sqrt{R^2 - R_\rho^2} \quad (33-4)$$

#### ۲- جعبه مبدل داده‌های متناظر با خط سیر دلخواه هدف به داده‌های اندازه گیری:



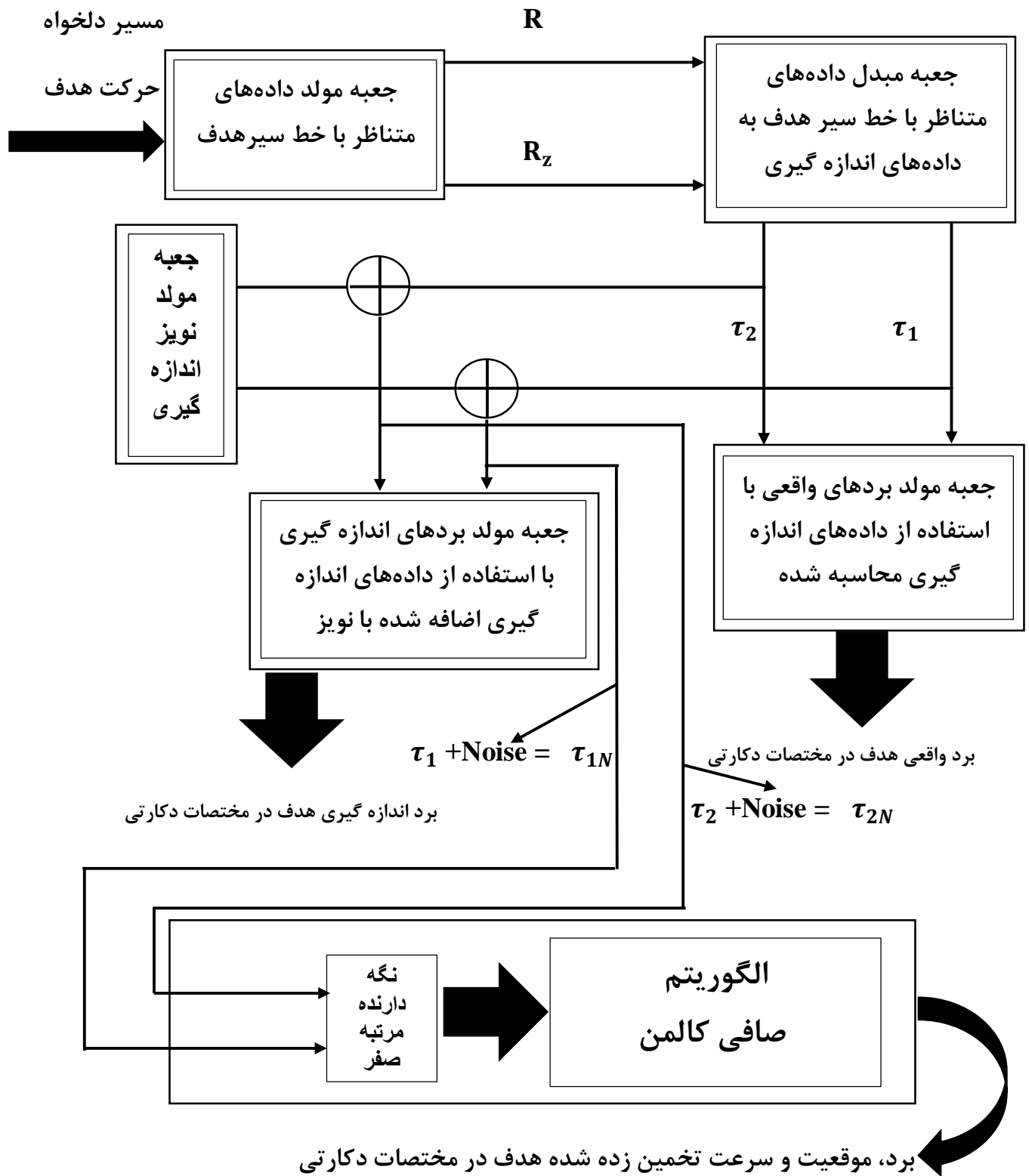
با توجه به این که در عمل داده‌های اندازه‌گیری شده برای این سیستم برای تخمین موقعیت و اجرای عملیات ردگیری، اختلاف زمانی رسیدن سیگنال از مسیر انعکاس از سطح و کف آب نسبت به مسیر انعکاس مستقیم (تاخیر  $\tau_1$  و  $\tau_2$ ) می‌باشد، لذا لازم است داده‌های  $R$  و  $R_z$  (خروجی جعبه مولد داده‌های متناظر با خط سیر هدف) متناظر به تاخیر  $\tau_1$  و  $\tau_2$  تبدیل شوند. معادلات ریاضی و هندسی حاکم بر این تبدیل مطابق روابط ۱-۴ و ۲-۴ می‌باشد. موقعیت حسگر در آب از معلومات مسئله می‌باشند. لذا پارامترهای  $H_{O1}$  و  $H_{O2}$  در روابط فوق‌الذکر بعنوان داده‌های اولیه این مساله مشخص می‌باشند. از آنجایی که ورودی جعبه مبدل داده‌های متناظر با خط سیر دلخواه هدف به داده‌های اندازه‌گیری، برد هدف و برد عمقی می‌باشند، که این دو از روابط ۴-۳۱ الی ۴-۳۳ بدست می‌آیند. سرعت صوت در این جعبه نیز برابر با ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است، این جعبه در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.

### ۳- جعبه مولد بردهای واقعی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری محاسبه شده:

در این مرحله مقادیر محاسبه شده تاخیر  $\tau_1$  و  $\tau_2$  مستقیماً وارد جعبه می‌شوند که در آن با استفاده از تاخیرها، برد کلی واقعی هدف در مختصات دکارتی بدست می‌آید. از این جهت به این برد، برد واقعی می‌گوییم که از تاخیرهای  $\tau_1$  و  $\tau_2$  خالص بدون نویز حاصل شده‌اند. اگر در روابط ۴-۳ و ۴-۴ به جای تاخیرها، تاخیرهای  $\tau_1$  و  $\tau_2$  خالص بدون نویز مذکور گذاشته شود، به ترتیب برد واقعی  $R_a$  و برد عمقی واقعی  $R_{za}$  بدست می‌آید. این جعبه در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.

### ۴- جعبه مولد نویز:

برای شبیه‌سازی دقیق سیستم، لازم است نویز اندازه‌گیری متناسب با شرایط واقعی سیستم را تولید کرده و به بردار اندازه‌گیری اضافه نمائیم. در شکل ۴-۳ جعبه‌ای تحت عنوان مولد نویز اندازه‌گیری، پس از تولید نویز مورد نظر آن را به داده‌های اندازه‌گیری خالص (خروجی جعبه مبدل داده‌های متناظر با خط سیر هدف به داده‌های اندازه‌گیری) اضافه نمائیم. همچنین میزان سیگنال به نویز در شبیه‌سازی‌ها برابر با ۲۰db در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۳- نمودار جعبه‌ای مراحل شش‌گانه شبیه‌سازی

## ۵- جعبه مولد بردهای اندازه گیری با استفاده از داده‌های اندازه گیری اضافه شده با نویز:

در این مرحله  $\tau_{1N}$  (  $\tau_1 + \text{Noise}$  ) و  $\tau_{2N}$  (  $\tau_2 + \text{Noise}$  ) به جعبه وارد می‌شوند که در آن با استفاده از این مقادیر، بردهای اندازه گیری هدف در مختصات دکارتی بدست می‌آید. از این رو به این برد، برد اندازه گیری می‌گوییم که از تاخیرهای  $\tau_1$  و  $\tau_2$  اضافه شده با نویز اندازه گیری حاصل شده‌اند (  $\tau_{1N}$  و  $\tau_{2N}$  ) مشابه با آنچه در محاسبه برد واقعی بیان شد، اگر در روابط برد کلی و برد عمقی به جای تاخیر  $\tau_1$  و  $\tau_2$  ، تاخیرهای  $\tau_{1N}$  و  $\tau_{2N}$  قرار داده شود، برد کلی اندازه گیری (  $R_m$  ) و برد عمقی اندازه گیری (  $R_{zm}$  ) قابل محاسبه است.

## ۶- جعبه صافی کالمن:

اهم قسمت شبیه سازی مربوط به این قسمت می‌شود و در این قسمت، داده‌های اندازه گیری اضافه شده با نویز وارد جعبه صافی کالمن می‌شوند. در این جعبه عملیات ردیابی هدف با استفاده از الگوریتم صافی کالمن انجام می‌شود. نمودار جعبه‌ای کلی این واحد در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. همانگونه که در این نمودار جعبه‌ای دیده می‌شود ورودی جعبه صافی کالمن، داده‌های اندازه گیری اضافه شده با نویز و خروجی این جعبه موقعیت و سرعت تخمین زده شده هدف در مختصات دکارتی می‌باشد. البته می‌توان مقادیر مربوط به اختلاف برد تخمینی و برد اندازه گیری و یا برد واقعی را به عنوان خروجی جعبه در نظر گرفت. همچنین یکی از خروجی‌های مهم این جعبه می‌توان خطای تخمین و یا باقی مانده باشد. همچنین مطابق با شکل ۳-۴ در جعبه صافی کالمن از نگه دارنده مرتبه صفر جهت نمونه برداری و نگهداری داده‌های اندازه گیری اضافه شده با نویز استفاده شده است. همچنین باید توجه داشت که مقدار دهی اولیه در بردار حالت و ماتریس کواریانس اندازه گیری و فرآیند و ماتریس کواریانس خطا در صافی کالمن بسیار حائز اهمیت است زیرا مقدار دهی اشتباه در این جعبه منجر به واگرایی صافی کالمن می‌گردد. همچنین در این جعبه از سه نوع صافی (EKF، UKF و OFEKF) به صورت جداگانه استفاده شده و به مقایسه این سه صافی هم پرداخته شده است.

## ۴-۴- شبیه سازی سیستم ردیاب تک هدف و دو حسگر ثابت:

در این قسمت به شبیه سازی ردیابی غیر فعال هدف، با استفاده از نمودار جعبه ای شش گانه شبیه سازی بیان شده در مرحله قبل می پردازیم. همچنین در این قسمت از سه نوع صافی کالمن از جمله صافی کالمن توسعه یافته بیان شده در فصل دوم، صافی کالمن بی رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده که در فصل سوم بیان شد، جهت برآورد موقعیت و سرعت هدف در مختصات دکارتی استفاده شده است و به مقایسه این سه صافی پرداخته شده است. برای اینکه بتوانیم یک مقایسه مناسب بین صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی در مسئله ردیابی غیر فعال هدف زیر آب داشته باشیم با استفاده از معادلات معرفی شده در بخش ۴-۲ در یک مثال ردیابی، نتایج و خطای حالات آن هارا بررسی می کنیم. همان طور که در بخش ۴-۲ بیان شد ساختار هندسی سیستم ردیاب غیر فعال شامل دو حسگر تعبیه شده ثابت در عمق مورد نظر و یک هدف متحرک ساطع کننده سیگنال های آکوستیکی است. همان طور در فصل ها و بخش های قبل بیان شد برای شبیه سازی نیاز به مقادیر اولیه می باشد که این مقادیر اولیه به ترتیب زیر در نظر گرفته شده است.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_W = 200 = \text{عمق دریا} \\ H_{O1S1} = 180 = \text{فاصله حسگر شماره یک نسبت به سطح دریا} \\ H_{O2S1} = 20 = \text{فاصله حسگر شماره یک نسبت به کف دریا} \\ H_{O1S2} = 180 = \text{فاصله حسگر شماره دو نسبت به سطح دریا} \\ H_{O2S2} = 20 = \text{فاصله حسگر شماره دو نسبت به کف دریا} \end{array} \right. \quad (4-34)$$

به طور کلی موقعیت حسگرها در مختصات دکارتی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$S_1 = [-500, -600, -160] \quad (4-35)$$

$$S_2 = [-550, -500, -160] \quad (36-4)$$

همان طور که مشاهده می‌شود از نظر موقعیت ارتفاعی دو حسگر با هم برابر هستند و دو حسگر از نظر موقعیت طولی و عرضی با هم متفاوت می‌باشند. موقعیت اولیه‌ای که هدف شروع به حرکت می‌کند به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$X_0 = [0, -5, -98, -5, -1, -0.1] \quad (37-4)$$

به عبارتی هدف متحرک ساطع کننده سیگنال‌های آکوستیکی از موقعیت  $X = 0$ ،  $Y = -5$ ،  $Z = -98$ ، با سرعتی ثابت شروع به حرکت کرده و دارای سرعتی معادل با  $5 \text{ km/h}$  در راستای محور  $X$ ها، سرعتی معادل با  $1 \text{ km/h}$  کیلو در راستای محور  $Y$ ها و سرعتی معادل با  $0.1 \text{ km/h}$  در راستای محور  $Z$ ها در حال حرکت می‌باشد، همچنین سایر مقادیر اولیه برای شروع کار الگوریتم صافی کالمن به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\hat{X}_0 = [0, 5, -88, -4, -0, -0.2] \quad (38-4)$$

$$P_0 = 1 I_6 \quad ; \quad Q_0 = 0.0001 I_6 \quad (39-4)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (40-4)$$

قابل ذکر است که مقادیر  $X_0$ ،  $\hat{X}_0$ ،  $P_0$ ،  $R_0$  و  $Q_0$  به صورت فرضی در نظر گرفته شده است، اما باید توجه داشت که همیشه مقادیر  $X_0$  و  $\hat{X}_0$  با هم متفاوت باشند زیرا هیچگاه مقادیر دقیق  $X_0$  در دست نیست و این اختلاف مقادیر، می‌بایست توسط الگوریتم صافی کالمن به هم نزدیک شود تا مشخص شود که روند صافی کالمن هم به درستی انجام می‌شود. همچنین مقادیر  $R$  طوری تعیین شده است که میزان سیگنال به نویز برابر با  $20 \text{ db}$  باشد. مقادیر باید توجه داشت که مقادیر اولیه در صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی‌رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده با هم یکسان باشد و همچنین باید مقادیر  $V_K$  و  $W_K$  با هم برابر باشد تا مقایسه در شرایط برابر انجام پذیرد. به کمک نرم افزار متلب، مدل بیان شده در معادلات (4-9) الی (4-13) برای  $500 \text{ S}$  و زمان نمونه برداری  $1 \text{ S}$  شبیه سازی شده

است و مقدار ماتریس  $Q$  که توسط آن بردار نویز فرآیند ایجاد می شود را ثابت و برابر  $Q = Q_0 = 0.0001I_6$

در نظر می گیریم و ماتریس  $R$  که توسط آن بردار نویز اندازه گیری ایجاد می شود را برابر با

$$R = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (41-4)$$

در نظر می گیریم، که مقدار  $R$  ناشناخته فرض شده است. در اینجا مقادیر قطر اصلی ماتریس  $R_0$  طبق معادلاتی که در فصل ۳ بیان شد طوری تنظیم می شوند که باعث کاهش خطا در صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده می شود. همچنین میزان سیگنال به نویز در شبیه سازی برابر با  $20 \text{ db}$  در نظر گرفته شده است. برای مقایسه بین صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده از معادلات (۴۲-۴) و (۴۳-۴) استفاده می کنیم.

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_a - X_e)^2} \quad (42-4)$$

$$J_2 = \alpha \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (DOM)^2} \quad (43-4)$$

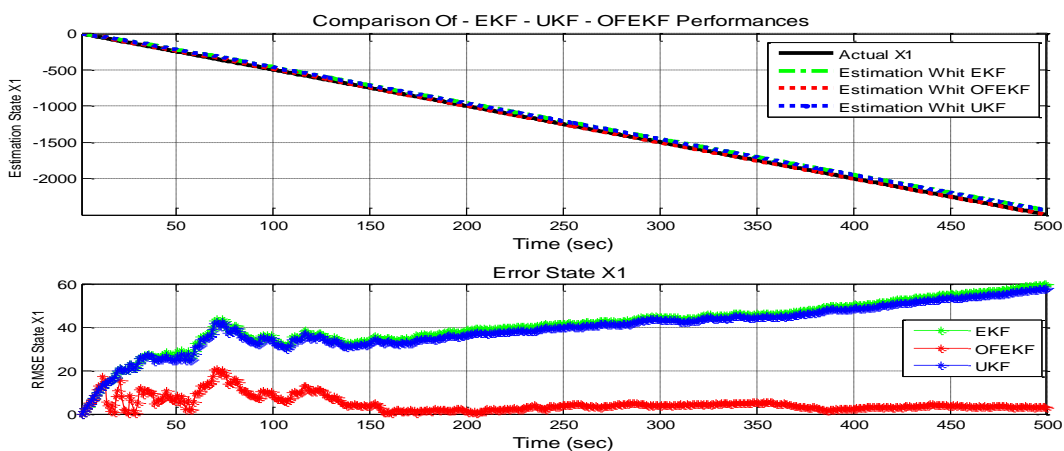
که در معادلات (۴۲-۴) و (۴۳-۴)  $X_a$  مقدار واقعی حالت ها،  $X_e$  مقدار تخمینی حالت ها،  $DOM$  اختلاف بین ماتریس کواریانس دنباله ابداع نظری و واقعی و  $\alpha$  یک عدد ثابت جهت سحولت در نمایش مقدار  $DOM$  می باشد که برابر با ۵۰۰۰ انتخاب شده است. نتایج مقایسه بین صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده را می توانید در جدول ۴-۱ مشاهده کنید. همچنین قابل ذکر است که در صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده از روش تنظیم ماتریس کواریانس  $R$  و روش بهینه سازی  $ICA$  استفاده شده است.

جدول ۴-۱- مقایسه بین EKF, UKF و FEKF در ردیابی غیر فعال

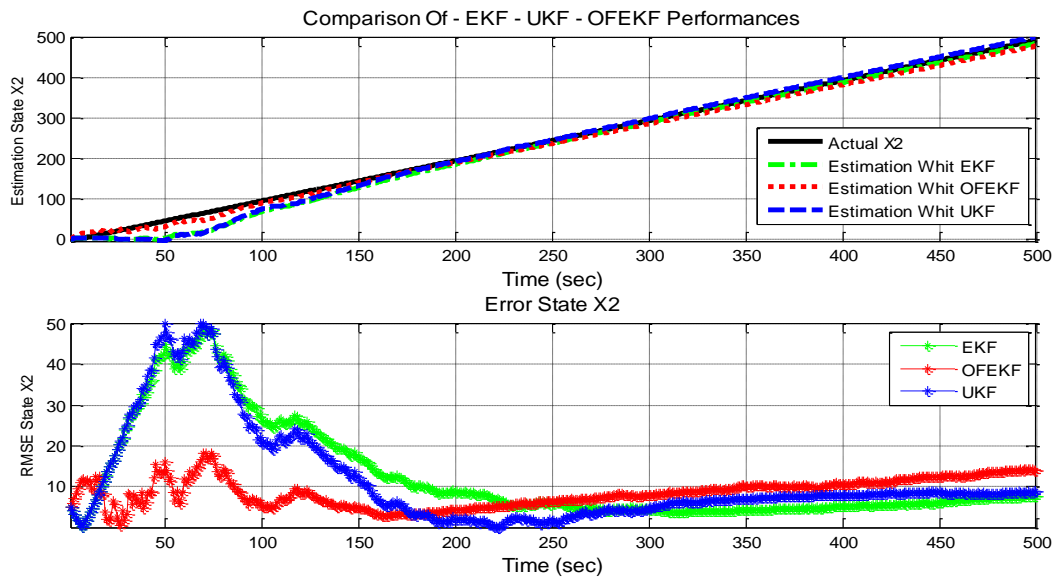
معیار مقایسه	EKF	UKF	FEKF
$J1-X_{K+1}^1$	42.5233	41.0415	6.0592
$J1-X_{K+1}^2$	17.5682	17.1058	9.3315
$J1-X_{K+1}^3$	6.7358	5.6269	1.7066
$J1-X_{K+1}^4$	0.3653	0.3584	0.2175
$J1-X_{K+1}^5$	0.3829	0.3766	0.1985
$J1-X_{K+1}^6$	0.1786	0.1776	0.1054
J4	4.2934	4.0153	0.3585

همان طور که در جدول شماره یک مشاهده می شود صافی کالمن بی رد بهتر از صافی کالمن توسعه یافته مرسوم عمل کرده که علت آن عدم خطی سازی و استفاده مستقیم از روابط غیر خطی می باشد. همچنین صافی کالمن توسعه یافته فازی نسبت به هر دو صافی دیگر دارای برتری در تخمین می باشد، که علت این امر تنظیم ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری توسط سیستم فازی بوده است که این امر در دوصافی دیگر انجام نمی شود.

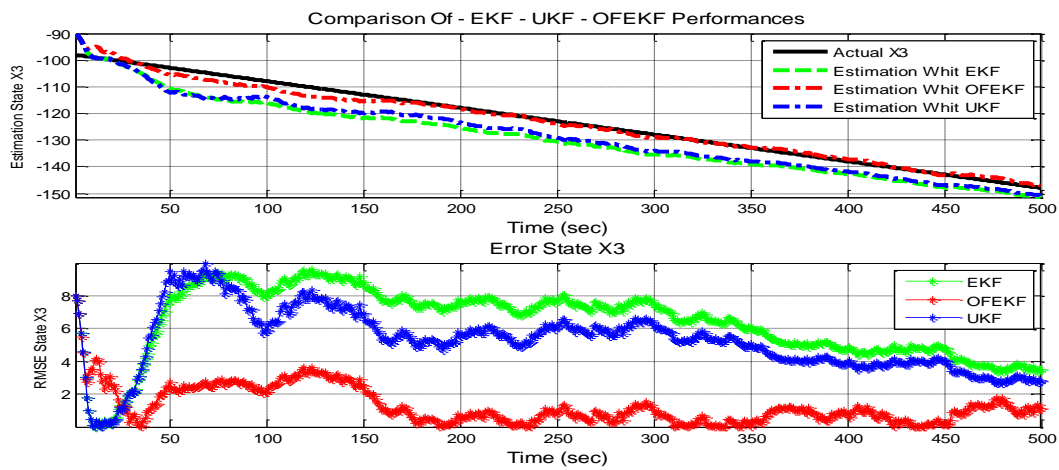
می توان نحوه تخمین حالات و مقدار جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) حالات تخمین زده شده توسط صافی EKF, UKF و OFEKF را در شکل های ۴-۴ الی ۹-۴ مشاهده کرد.



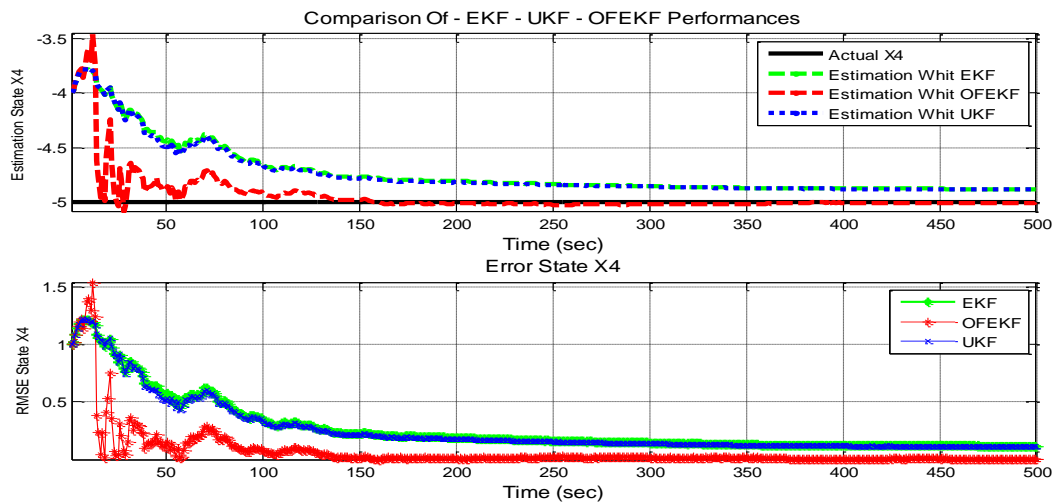
شکل ۴-۴- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_1$



شکل ۴-۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_2$

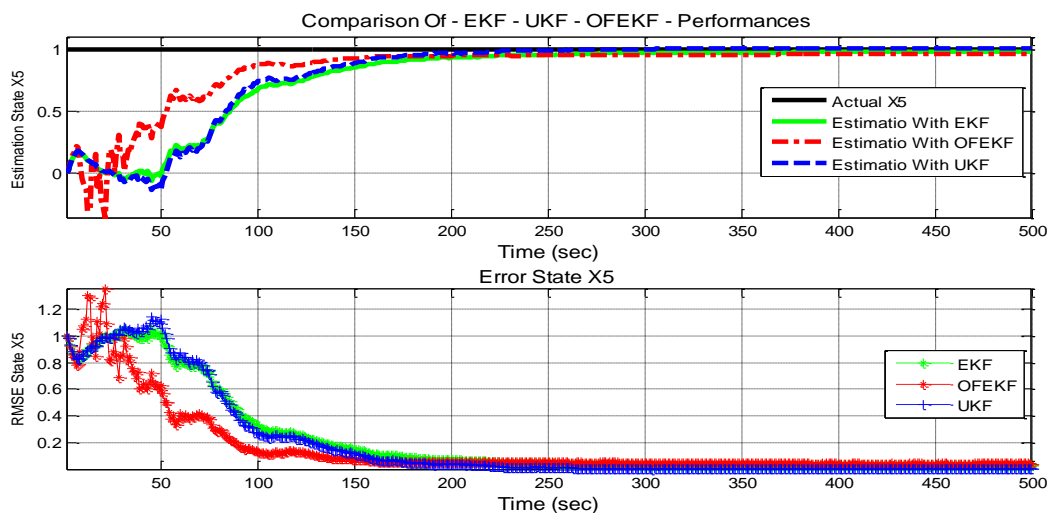


شکل ۴-۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_3$

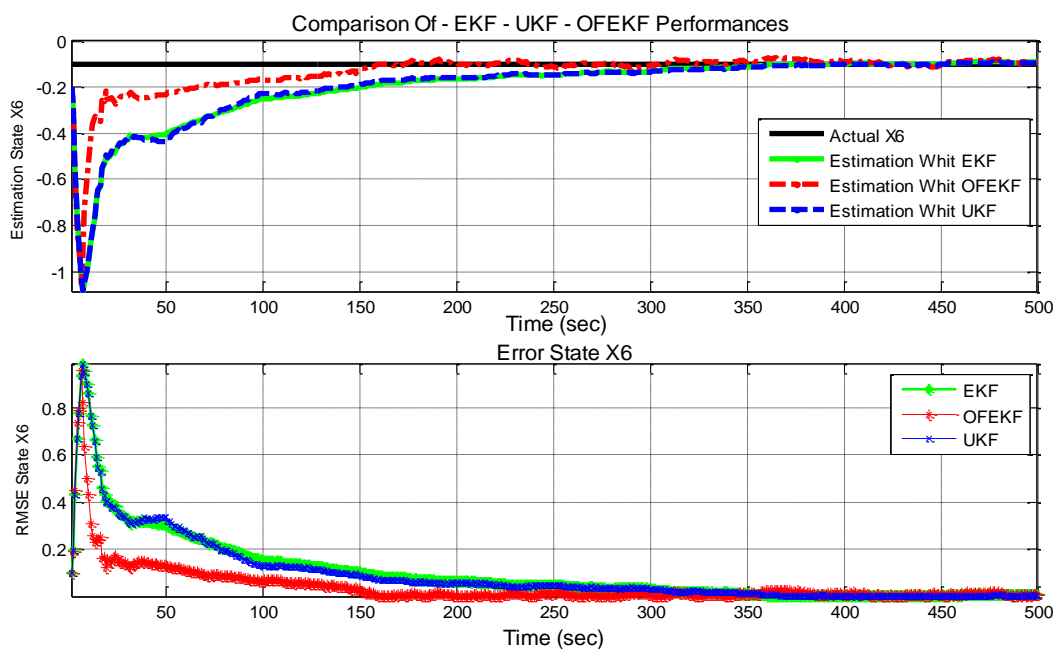


شکل ۴-۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_4$



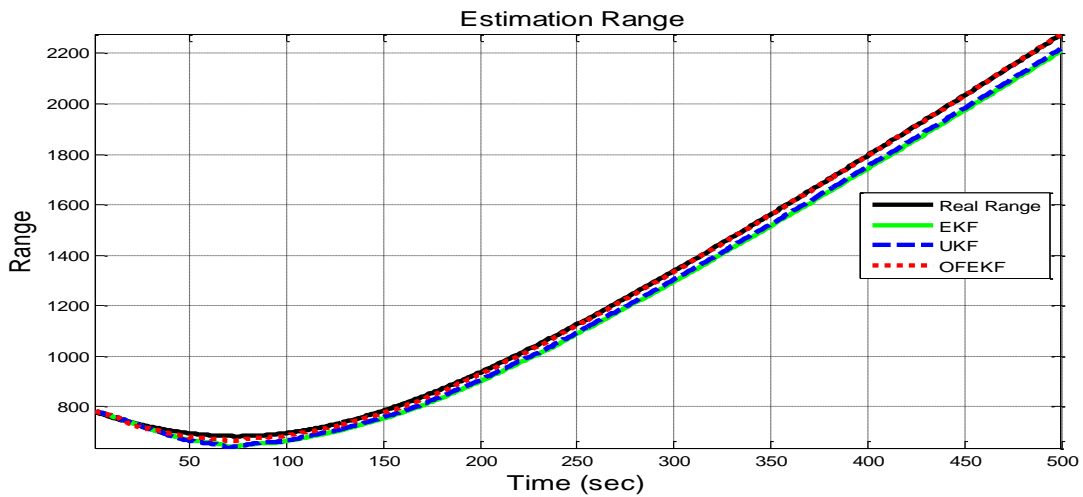


شکل ۴-۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_5$

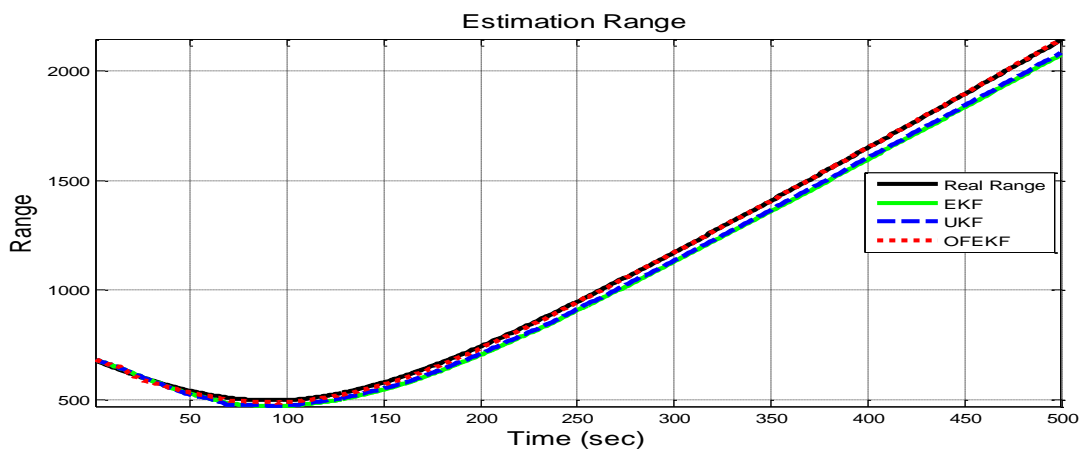


شکل ۴-۹- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_6$

همان طور که مشاهده می‌شود UKF نسبت به EKF عملکرد بهتری در تخمین حالت‌ها داشته است. همچنین OFEKF به علت تنظیم ماتریس کواریانس اندازه‌گیری عملکرد مطلوب‌تری نسبت به دو صافی دیگر داشته و دارای خطای کمتری در تخمین حالات می‌باشد. میزان برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک و حسگر شماره دو توسط سه صافی بیان شده در شکل‌های ۴-۱۰ و ۴-۱۱ نشان داده شده است.

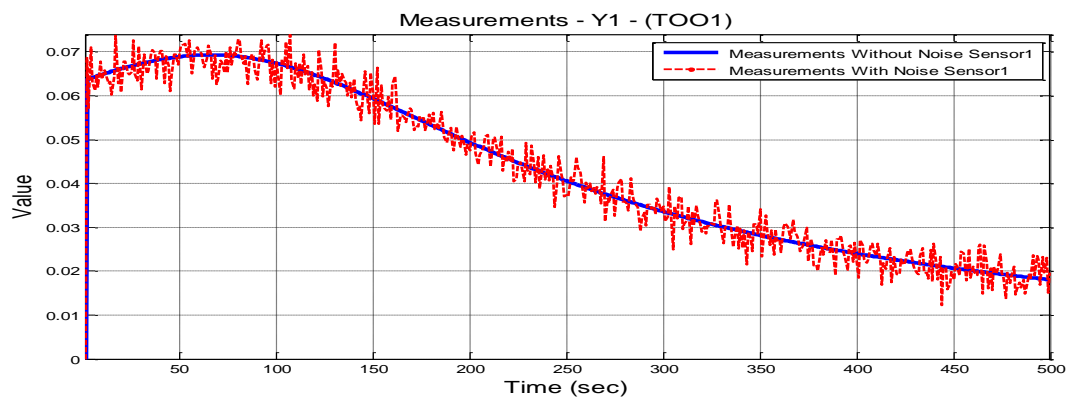


شکل ۴-۱۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک

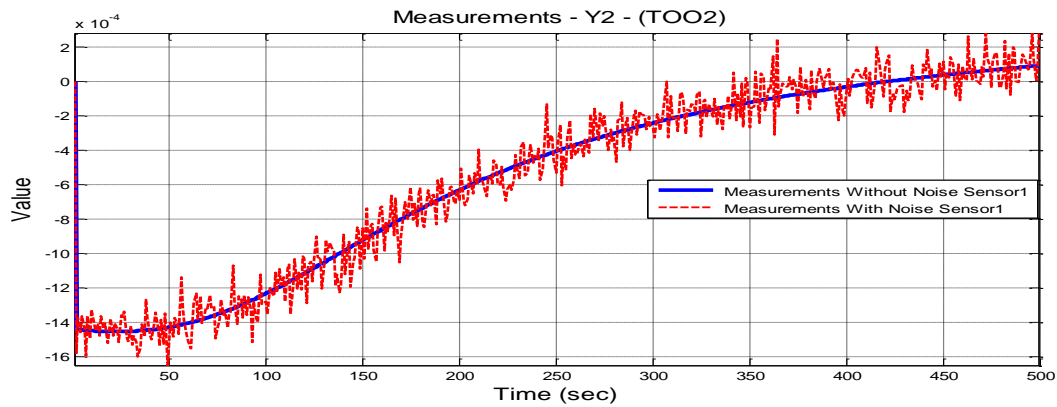


شکل ۴-۱۱- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو

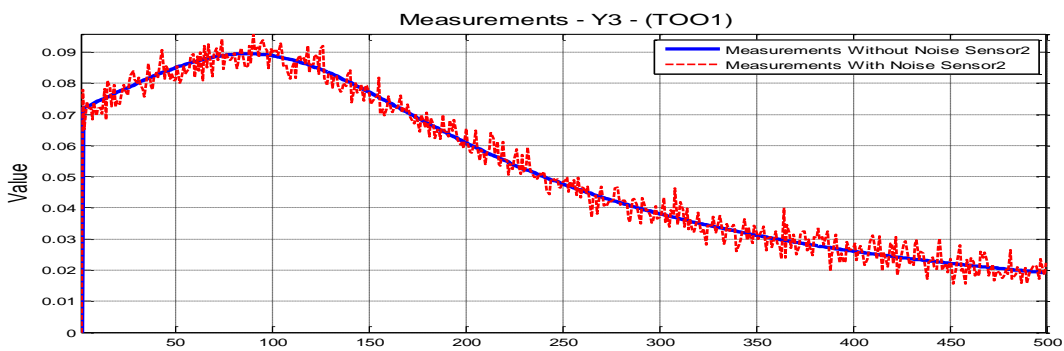
همان طور که در شکل ۴-۱۰ و ۴-۱۱ مشاهده می شود صافی OFEKF در تخمین برد کلی عملکرد بهتری داشته است. در ادامه میزان نویز اعمالی به مقادیر اندازه گیری شده را با نمایش مقادیر اندازه گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز را در شکل های ۴-۱۲ الی ۴-۱۵ نشان می دهیم.



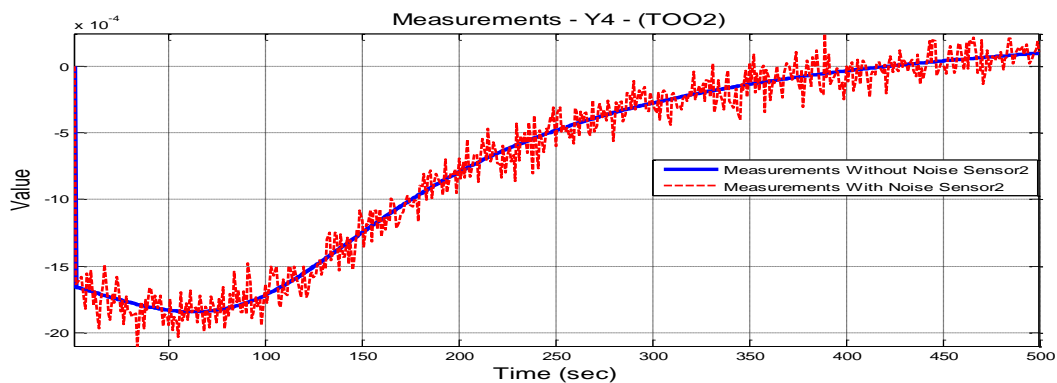
شکل ۴-۱۲- مقادیر اندازه گیری شده  $\tau_1$  برای حسگر شماره یک قبل و بعد از اعمال نویز



شکل ۴-۱۳- مقادیر اندازه گیری شده برای حسگر شماره یک قبل و بعد از اعمال نویز

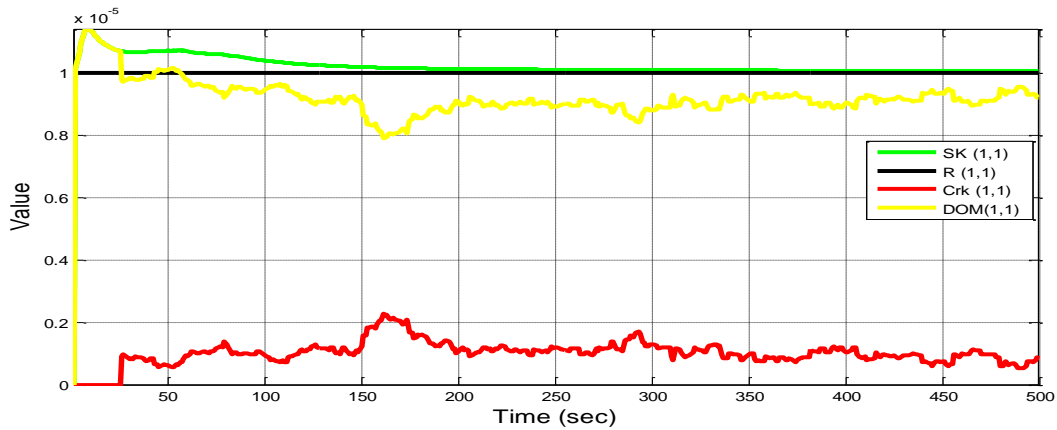


شکل ۴-۱۴- مقادیر اندازه گیری شده برای حسگر شماره دو قبل و بعد از اعمال نویز

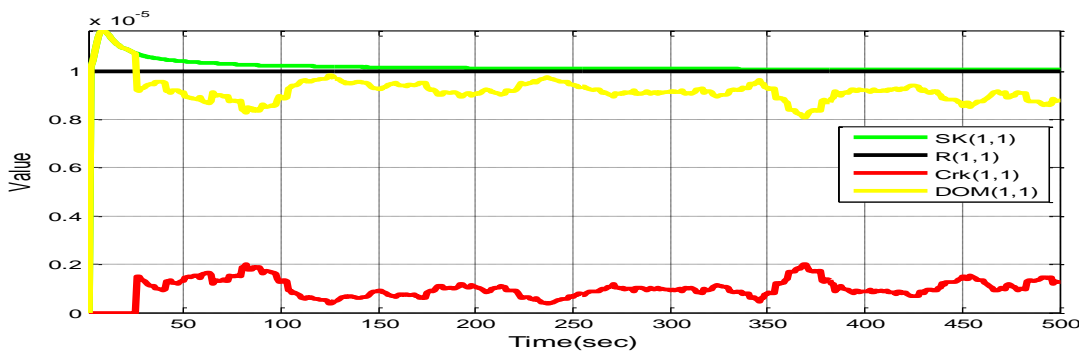


شکل ۴-۱۵- مقادیر اندازه گیری شده برای حسگر شماره دو قبل و بعد از اعمال نویز

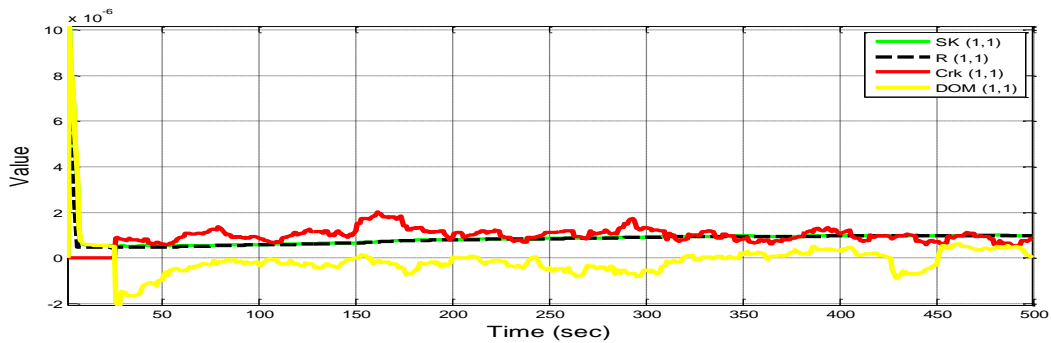
نحوه کاهش دادن اختلاف بین دنباله ابداع نظری و واقعی را که به واسطه تنظیم ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری (R) که توسط سیستم فازی ایجاد می شود را در شکل های ۴-۱۶ الی ۴-۱۸ نشان داده شده است. به علت جلوگیری از طولانی شدن مطالب نحوه تنظیم  $R(1,1)$  ارائه شده و از ارائه نحوه تنظیم مابقی درایه های قطر اصلی ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری خودداری شده است.



شکل ۴-۱۶- مقادیر  $SK(1,1)$ ،  $Crk(1,1)$ ،  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای EKF



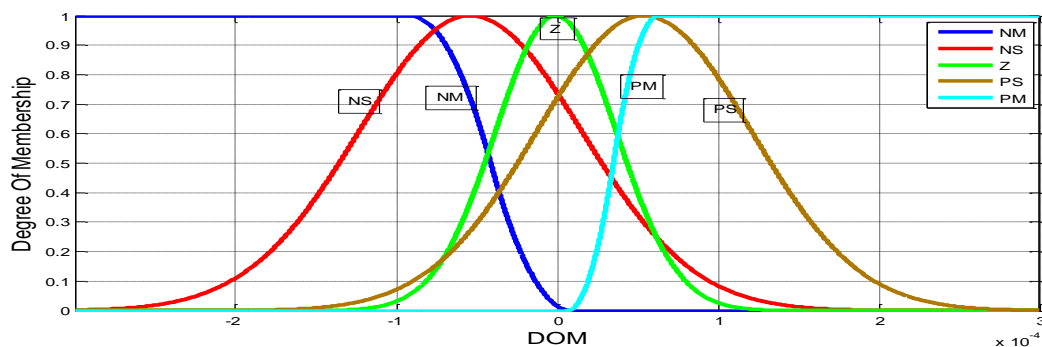
شکل ۴-۱۷- مقادیر  $SK(1,1)$ ،  $Crk(1,1)$ ،  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای UKF



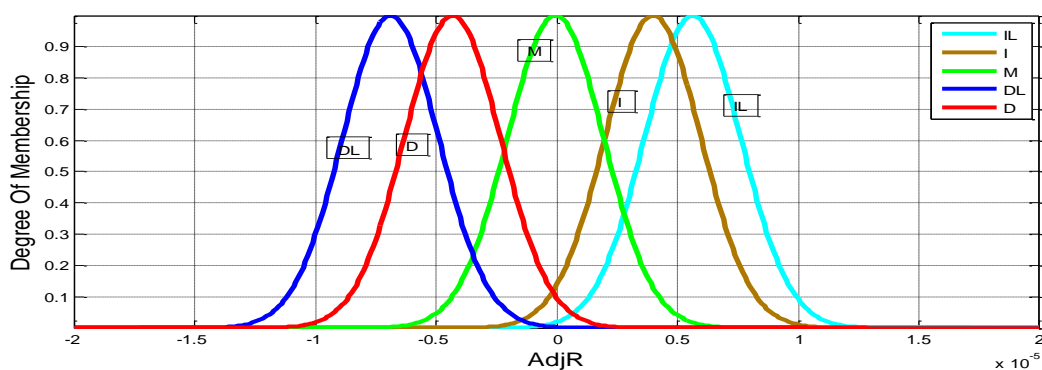
شکل ۴-۱۸- مقادیر  $SK(1,1)$ ،  $Crk(1,1)$ ،  $R(1,1)$  و  $DOM(1,1)$  برای OFEKF

همان طور که در شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌شود مقادیر  $R(1,1)$  توسط سیستم فازی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که مقدار  $DOM(1,1)$  به سمت صفر میل کند، که در نهایت این تنظیم باعث بهبود عملکرد صافی کالمن توسعه یافته فازی می‌شود که این امر در صافی کالمن بی‌رد و صافی کالمن توسعه یافته مرسوم مشاهده نمی‌شود. همچنین در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود که تا ثانیه ۲۵ام مقادیر  $Crk$  برابر

با صفر می‌باشد، که علت آن را می‌توان توسط رابطه (۳-۵) توجیح کرد. رابطه (۳-۵) بیان کننده ماتریس کواریانس دنباله ابداع واقعی بوده که در آن متغیر  $N$ ، بازه پنجره تخمین ماتریس کواریانس دنباله ابداع را تعیین می‌کند که برابر با ۲۵ در نظر گرفته شده است. در نتیجه تا لحظه ۲۵ مقادیر  $Crk$  جمع می‌شود تا در ادامه روند صافی کالمن از آن استفاده شود و به همین علت مقادیر خروجی آن تا لحظه ۲۵ در شکل‌ها بالا برابر با صفر در نظر گرفته‌ایم. همچنین تعداد گروه‌های توابع تعلق فازی برای ورودی و خروجی این سیستم برابر با ۵ در نظر گرفته شده است و قوانین این سیستم فازی همانند قوانین ارائه شده در فصل سوم می‌باشد که در شکل ۴-۱۹ و ۴-۲۰ نشان داده شده است.



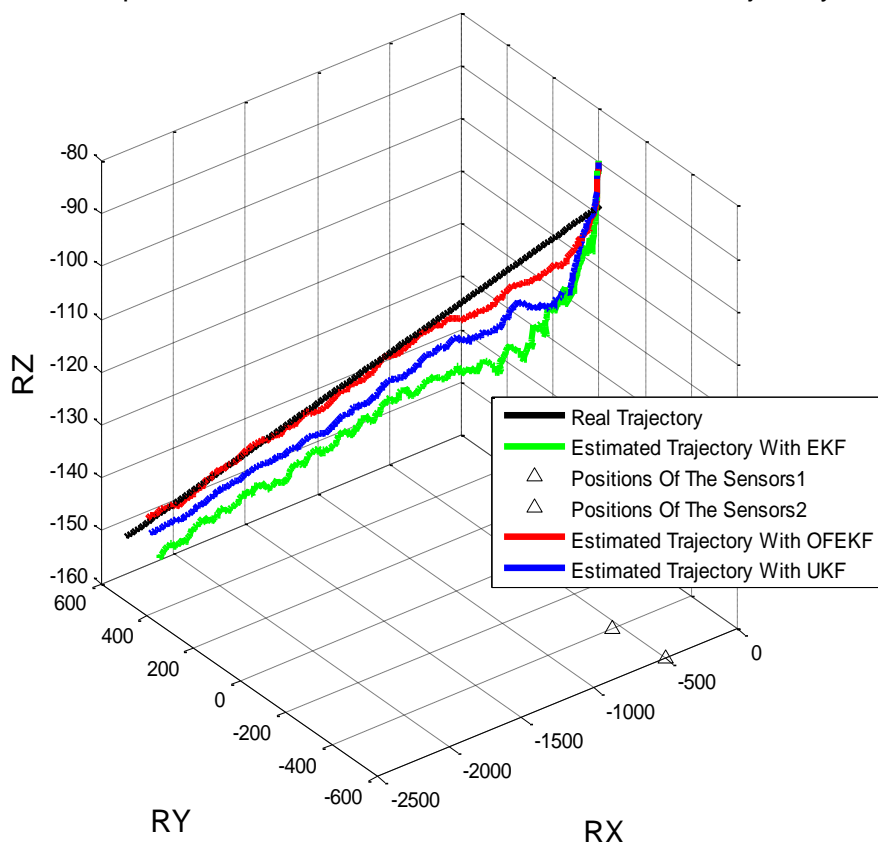
شکل ۴-۱۹- توابع تعلق ورودی سیستم فازی برای تنظیم R در صافی کالمن توسعه یافته فازی



شکل ۴-۲۰- توابع تعلق خروجی سیستم فازی برای تنظیم R در صافی کالمن توسعه یافته فازی

در نهایت مقایسه نحوه ردیابی هدف زیر آب در فضای سه بعدی، توسط سه صافی بیان شده در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است.

Comparison Of - EKF - UKF - OFEKF - Estimated Trajectory



شکل ۴-۲۱- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی EKF, UKF و OFEKF

#### ۴-۵- خلاصه:

در این فصل معادلات حاکم بر یک سیستم ردیاب غیر فعال زیر آب، که هدف در آن با سرعت ثابت در حال حرکت است معرفی شد. در این سیستم معرفی شده بردار حالت بیان کننده موقعیت و سرعت هدف متحرک ساطع کننده سیگنال‌های آکوستیکی بوده است. همچنین بردار اندازه گیری اختلاف زمانی رسیدن سیگنال آکوستیکی ساطع شده از هدف به حسگر از مسیر انعکاس از سطح آب و نیز از مسیر انعکاس از کف دریا نسبت به مسیر مستقیم، بوده است. در این فصل نشان داده شده است که صرفاً براساس اندازه گیری‌های دو حسگر که هیچ سیگنالی از خود ساطع نمی‌کنند، می‌توان یک هدف زیر آب را با وجود نویزهای بزرگ ردیابی کرد. این درحالی است که این سیستم هیچگاه توسط عوامل شنودی دشمن کشف نخواهد شد. همچنین در این فصل از روش جدید بهبود صافی کالمن توسعه یافته

که در فصل گذشته معرفی شد جهت ردیابی غیر فعال استفاده شد. سپس این سیستم ردیاب غیر فعال توسط سه صافی کالمن EKF، UKF و OFEKF پیاده سازی شد. که در نهایت صافی OFEKF تخمین بسیار مطلوبتری نسبت به دو صافی بیان شده داشته است. علت آن هم این می باشد که در اغلب مسائل اطلاعات و دانش دقیقی نسبت به ماتریس R نداریم و مقدار دهی اشتباه این ماتریس کارایی صافی را پایین می آورد، اما با استفاده از الگوریتم OFEKF توانستیم این ماتریس را با اشتباه کمتری مقدار دهی کنیم که در نهایت به خطای کمتر در تخمین، توسط OFEKF ختم شد.





ردیابی غیرفعال

هدف زیر آب با استفاده از

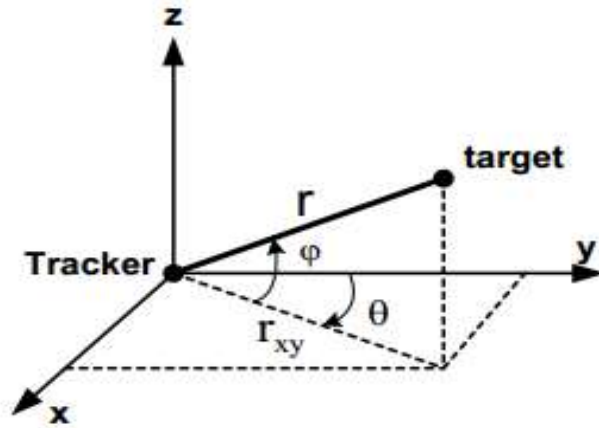
الکوریتم اندازه گیری فقط سمت

## ۱-۵- مقدمه:

در این فصل به ردیابی غیرفعال یک هدف زیر آب با استفاده از الگوریتم اندازه گیری فقط سمت هدف پرداخته شده است که تخمین موقعیت و سرعت هدف متحرک در زیر آب صرفاً براساس زوایای بدست آمده از سیگنال‌های آکوستیکی ساطع شده از هدف و دریافت آن توسط حسگرهای سونار بدست می‌آید. معادلات توصیف کننده این سیستم براساس هندسه موقعیت هدف و حسگر در مختصات دکارتی و با فرض حرکت هدف با سرعت ثابت در زیر آب ارائه می‌شود همچنین برای موقعیت و سرعت حسگرها سه حالت در نظر گرفته شده است که از جمله: موقعیت حسگر ثابت، موقعیت حسگر به صورت متحرک با سرعتی ثابت و در راستای خط مستقیم و موقعیت حسگر به صورت متحرک با سرعتی متفاوت و دارای مانور. در این فصل هم، به علت غیر خطی بودن بردار اندازه گیری و با توجه به نویزی بودن داده‌ها، جهت ردیابی از الگوریتم‌های مختلف صافی کالمن از جمله: صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده و صافی کالمن بی‌رد استفاده می‌کنیم. همچنین در این فصل به شبیه سازی، ردیابی هدف زیر آب با استفاده از انواع مختلف صافی کالمن می‌پردازیم، و همچنین مراحل چهار گانه شبیه سازی را به صورت نمودار جعبه‌ای به تفصیل توضیح می‌دهیم. در ادامه به معرفی معادلات حالت و اندازه گیری می‌پردازیم.

## ۲-۵- معادلات حاکم بر سیستم ردیاب غیرفعال با الگوریتم اندازه گیری فقط سمت:

برای ردیابی هدف نیاز به مدلی است که، ارتباطی بین بردار حالات هدف و بردار اندازه گیری حسگرها برقرار کند. ساختار هندسی سیستم ردیاب غیر فعال با الگوریتم اندازه گیری فقط سمت شامل دو حسگر می‌باشد که به منظور ردیابی هدف، در عمقی مشخص در نظر گرفته شده‌اند، و زوایای بین هدف و ردیاب را محاسبه می‌کنند. همچنین فرض بر این است که هدف با سرعتی ثابت در حال حرکت می‌باشد. نحوه قرار گیر هدف و زوایای بدست آمده توسط حسگرها در شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱- نحوه قرار گیری هدف و حسگر در فضای سه بعدی و زوایای بدست آمده از هدف

همان طور که مشاهده می شود هر حسگر دو زاویه را محاسبه می کند که در شکل بالا  $\phi$  زاویه نسبت به بردار Z و یا به عبارتی زاویه عمودی هدف می باشد و  $\theta$  زاویه نسبت به بردار X و Y و یا به عبارتی زاویه افقی هدف است.

حال فرض کنید بردار حالت هدف را به صورت زیر در نظر بگیریم.

$$X_T(K) = [X_T(K), Y_T(K), Z_T(K), V_{TX}(K), V_{TY}(K), V_{TZ}(K)]^T \quad (1-5)$$

همچنین بردار حالت حسگرها را به صورت زیر مفروض باشد.

$$X_O(K) = [X_O(K), Y_O(K), Z_O(K), V_{OX}(K), V_{OY}(K), V_{OZ}(K)]^T \quad (2-5)$$

که در رابطه شماره ۵-۱  $X_T(K), Y_T(K), Z_T(K)$  به ترتیب موقعیت هدف در راستای محور X ها، Y ها و Z ها است و  $V_{TX}(K), V_{TY}(K), V_{TZ}(K)$  به ترتیب سرعت هدف در راستای محور X ها، Y ها و Z ها می باشد. همچنین در رابطه شماره ۵-۲  $X_O(K), Y_O(K), Z_O(K)$  موقعیت حسگر در راستای محور X ها، Y ها و Z ها است و  $V_{OX}(K), V_{OY}(K), V_{OZ}(K)$  به ترتیب سرعت حسگر در راستای محور X ها، Y ها و Z ها می باشد. که در لحظه K ام رابطه بین زاویه و بردار حالت به صورت زیر بیان می شود- [۲۲]

$$\theta_1(K) = \tan^{-1} \frac{Y_T(K) - Y_{O1}(K)}{X_T(K) - X_{O1}(K)} = \tan^{-1} \frac{R_{Y1}(K)}{R_{X1}(K)} \quad (3-5)$$

$$\theta_2(K) = \tan^{-1} \frac{Y_T(K) - Y_{O2}(K)}{X_T(K) - X_{O2}(K)} = \tan^{-1} \frac{R_{Y2}(K)}{R_{X2}(K)} \quad (4-5)$$

$$\varphi_1(K) = \tan^{-1} \frac{Z_T(K) - Z_{O1}(K)}{\sqrt{(X_T(K) - X_{O1}(K))^2 - (Y_T(K) - Y_{O1}(K))^2}} = \tan^{-1} \frac{R_{Z1}(K)}{\sqrt{(R_{X1}(K))^2 - (R_{Y1}(K))^2}}$$

(5-5)

$$\varphi_2(K) = \tan^{-1} \frac{Z_T(K) - Z_{O2}(K)}{\sqrt{(X_T(K) - X_{O2}(K))^2 - (Y_T(K) - Y_{O2}(K))^2}} = \tan^{-1} \frac{R_{Z2}(K)}{\sqrt{(R_{X2}(K))^2 - (R_{Y2}(K))^2}}$$

(6-5)

که در روابط بالا  $R_X(K)$ ,  $R_Y(K)$ ,  $R_Z(K)$  به ترتیب برد هدف در راستای محور  $X$  ها،  $Y$  ها و  $Z$  ها است برای ردیابی غیر فعال هدف توسط صافی کالمن نیاز است تا معادلات حرکتی و اندازه گیری هدف به صورت فضای حالت بیان شود که معادلات حالت و اندازه گیری در رابطه 5-7 الی 5-10 آورده شده است [22-23].

$$X(k) = F(X(k-1), W(k-1)) = F.X(k-1) + W(k-1) \quad (7-5)$$

$$Z(k) = h(X(k)) + V(k) \quad (8-5)$$

$$X(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_T(k-1) \\ Y_T(k-1) \\ Z_T(k-1) \\ V_{TX}(k-1) \\ V_{TY}(k-1) \\ V_{TZ}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} WX_T(k-1) \\ WY_T(k-1) \\ WZ_T(k-1) \\ WV_{TX}(k-1) \\ WV_{TY}(k-1) \\ WV_{TZ}(k-1) \end{bmatrix} \quad (9-5)$$

$$Z_K = \begin{bmatrix} \theta_1(k) \\ \varphi_1(k) \\ \theta_2(k) \\ \varphi_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1(k) \\ V_2(k) \\ V_3(k) \\ V_4(k) \end{bmatrix} \quad (10-5)$$

با توجه به فرض ثابت بودن، سرعت هدف متحرک معادله 5-9 به صورت بالا بدست آمده است و بردار  $W$  نویز فرآیند راستاهای مختلف حرکتی است و  $\Delta t$  فاصله نمونه برداری می باشد. همچنین  $V$  بردار نویز اندازه گیری است.

## ۵-۲-۱- خطی سازی مدل اندازه گیری:

با توجه به این که بردار اندازه گیری، تشکیل شده از زوایای بین هدف و حسگر بوده است و این روابط به صورت غیر خطی می باشند و برای استفاده از صافی کالمن توسعه یافته نیازی به خطی سازی روابط است. خطی سازی بردار اندازه گیری در رابطه ۵-۱۲ نشان داده شده است.

$$H(k) = \frac{\partial z}{\partial x} \Big|_{X(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_1}{\partial X_K} & \frac{\partial \theta_1}{\partial Y_K} & \frac{\partial \theta_1}{\partial Z_K} & \frac{\partial \theta_1}{\partial V_{XK}} & \frac{\partial \theta_1}{\partial V_{YK}} & \frac{\partial \theta_1}{\partial V_{ZK}} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial X_K} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial Y_K} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial Z_K} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial V_{XK}} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial V_{YK}} & \frac{\partial \varphi_1}{\partial V_{ZK}} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial X_K} & \frac{\partial \theta_2}{\partial Y_K} & \frac{\partial \theta_2}{\partial Z_K} & \frac{\partial \theta_2}{\partial V_{XK}} & \frac{\partial \theta_2}{\partial V_{YK}} & \frac{\partial \theta_2}{\partial V_{ZK}} \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial X_K} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial Y_K} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial Z_K} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial V_{XK}} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial V_{YK}} & \frac{\partial \varphi_2}{\partial V_{ZK}} \end{bmatrix} \quad (11-5)$$

که ماتریس  $H(K)$  بعد از مشتق گیری به صورت زیر بدست می آید.

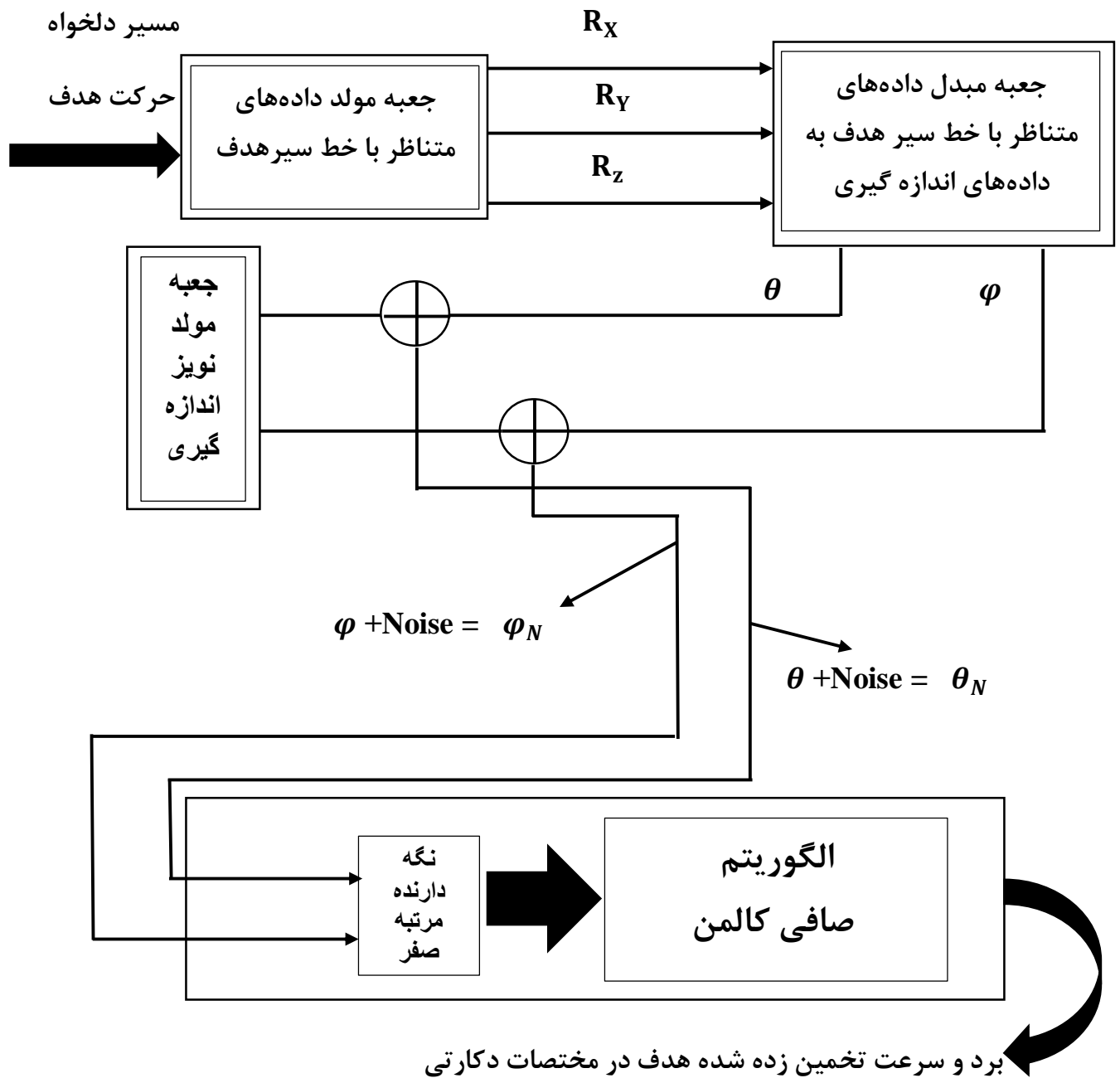
$$H(K) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-R_{Y_1}(K)}{R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2} & \frac{R_{X_1}(K)}{R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-R_{X_1}(K)R_{Z_1}(K)}{(\sqrt{R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2})(R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2 + R_{Z_1}(K)^2)} & \frac{-R_{Y_1}(K)R_{Z_1}(K)}{(\sqrt{R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2})(R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2 + R_{Z_1}(K)^2)} & \frac{(\sqrt{R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2})}{(R_{X_1}(K)^2 + R_{Y_1}(K)^2 + R_{Z_1}(K)^2)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-R_{Y_2}(K)}{R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2} & \frac{R_{X_2}(K)}{R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-R_{X_2}(K)R_{Z_2}(K)}{(\sqrt{R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2})(R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2 + R_{Z_2}(K)^2)} & \frac{-R_{Y_2}(K)R_{Z_2}(K)}{(\sqrt{R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2})(R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2 + R_{Z_2}(K)^2)} & \frac{(\sqrt{R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2})}{(R_{X_2}(K)^2 + R_{Y_2}(K)^2 + R_{Z_2}(K)^2)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(۱۲-۵)

## ۵-۳-۱- مراحل چهارگانه شبیه سازی سیستم رویانی تک هدف و دو حسگر ثابت:

در این بخش به توضیح درباره نحوه شبیه سازی می پردازیم. ورودی در این شبیه سازی زاویه سمت هدف بوده و خروجی سیستم موقعیت و سرعت هدف متحرک زیر آب می باشد. در این بخش شبیه سازی به چهار مرحله تقسیم شده است، و هر یک از این مراحل به صورت کامل توضیح داده شده است. نمودار جعبه ای مراحل چهار گانه تدوین شبیه سازی با استفاده از صافی کالمن در شکل ۵-۲ رسم شده است.



شکل ۵-۲- نمودار جعبه‌ای مراحل چهار گانه شبیه سازی

### ۱- جعبه مولد داده‌های با خط سیر دلخواه هدف:

همانگونه که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، این جعبه مسیر دلخواه حرکت هدف که توسط کاربر تعیین شده است، را به داده‌های مورد نیاز ورودی شبیه سازی ( برد هدف در راستای محور X ها  $(R_X)$ ، برد هدف در راستای محور Y ها  $(R_Y)$  و برد هدف در راستای محور Z ها  $(R_Z)$ ) تبدیل می‌کند. همچنین

پارامترهای  $X_{(1)0}$ ،  $X_{(2)0}$  و  $X_{(3)0}$  در روابط زیر بعنوان داده‌های اولیه این مساله مشخص می‌باشند. لذا مقادیر بردها در هر لحظه با انتخاب مسیر دلخواه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R_X = X_{(1)T} - X_{(1)0} \quad (۱۳-۵)$$

$$R_Y = X_{(2)T} - X_{(2)0} \quad (۱۴-۵)$$

$$R_Z = X_{(3)T} - X_{(3)0} \quad (۱۵-۵)$$

## ۲- جعبه مبدل داده‌های متناظر با خط سیر دلخواه هدف به داده‌های اندازه گیری:

با توجه به این که در عمل داده‌های اندازه گیری شده برای این سیستم برای تخمین موقعیت و اجرای عملیات ردگیری، زوایای سمت هدف  $(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2)$  می‌باشد، لذا لازم است داده‌های  $R_X$ ،  $R_Y$  و  $R_Z$  ( خروجی جعبه مولد داده‌های متناظر با خط سیر هدف ) متناظرا به زوایای سمت تبدیل شوند. معادلات ریاضی و هندسی حاکم بر این تبدیل مطابق روابط ۳-۵ الی ۶-۵ می‌باشد.

## ۳- جعبه مولد نویز:

برای شبیه سازی دقیق سیستم، لازم است نویز اندازه گیری متناسب با شرایط واقعی سیستم را تولید کرده و به بردار اندازه گیری اضافه نمائیم. در شکل ۲-۵ جعبه‌ای تحت عنوان مولد نویز اندازه گیری، پس از تولید نویز مورد نظر آن را به داده‌های اندازه گیری خالص ( خروجی جعبه مبدل داده‌های متناظر با خط سیر هدف به داده‌های اندازه گیری) اضافه نمائیم. همچنین میزان سیگنال به نویز در شبیه سازی‌ها برابر با ۲۰db در نظر گرفته شده است.

## ۴- جعبه صافی کالمن:

اهم قسمت شبیه سازی مربوط به این قسمت می‌شود و در این قسمت، داده‌های اندازه گیری اضافه شده با نویز وارد جعبه صافی کالمن می‌شوند. در این جعبه عملیات ردیابی هدف با استفاده از الگوریتم صافی کالمن انجام می‌شود. نمودار جعبه‌ای کلی این واحد در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. همانگونه که در این نمودار جعبه‌ای دیده می‌شود ورودی جعبه صافی کالمن، داده‌های اندازه گیری اضافه شده با نویز و خروجی این جعبه موقعیت و سرعت تخمین زده شده هدف در مختصات دکارتی می‌باشد.

همچنین مطابق با شکل ۳-۴ در جعبه صافی کالمن از نگه دارنده مرتبه صفر جهت نمونه برداری و نگهداری داده‌های اندازه گیری اضافه شده با نويز استفاده شده است. همچنین در این جعبه از سه نوع صافی (EKF، UKF و OFEKF) به صورت جداگانه استفاده شده و به مقایسه این سه صافی هم پرداخته شده است.

## ۵-۴- شبیه سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب، با دو حسگر ثابت:

در این قسمت به شبیه سازی ردیابی غیر فعال هدف، با استفاده از نمودار جعبه‌ای چهارگانه شبیه سازی بیان شده در مرحله قبل می‌پردازیم. همچنین در این قسمت از سه نوع صافی کالمن جهت برآورد موقعیت و سرعت هدف در مختصات دکارتی استفاده شده است و به مقایسه این سه صافی پرداخته شده است. برای اینکه بتوانیم یک مقایسه مناسب بین صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی‌رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی در مسئله ردیابی غیر فعال هدف زیر آب داشته باشیم با استفاده از معادلات معرفی شده در بخش ۵-۲ در یک مثال ردیابی، نتایج و خطای حالات آن‌ها را بررسی می‌کنیم. همان طور که در بخش ۵-۲ بیان شد ساختار هندسی سیستم ردیاب غیر فعال شامل دو حسگر تعبیه شده ثابت در عمق مورد نظر و یک هدف متحرک ساطع کننده سیگنال‌های آکوستیکی با سرعت ثابت است. همچنین مقادیر اولیه به ترتیب زیر در نظر گرفته شده است.

به طور کلی موقعیت حسگرها و سرعت آن‌ها در مختصات دکارتی به صورت زیر در نظر گرفته شد است.

$$S_1 = [-900, -200, -100, 0, 0, 0] \quad (۱۶-۵)$$

$$S_2 = [-910, -180, -100, 0, 0, 0] \quad (۱۷-۵)$$

همان طور که مشاهده می‌شود از نظر موقعیت ارتفاعی دو حسگر با هم برابر هستند و دو حسگر از نظر موقعیت طولی و عرضی با هم متفاوت می‌باشند. همچنین سرعت حسگرها برابر صفر در نظر گرفته شده است که این به معنای ثابت بودن حسگرها می‌باشد. موقعیت اولیه‌ای که هدف شروع به حرکت می‌کند به صورت زیر در نظر گرفته شده است.



$$X_0 = [-530, -50, -50, 14, 0.3, 0.1] \quad (18-5)$$

به عبارتی هدف متحرک ساطع کننده سیگنال‌های آکوستیکی از موقعیت  $X = -530$ ،  $Y = -50$  و  $Z = -50$  با سرعتی ثابت شروع به حرکت کرده و دارای سرعتی معادل با  $14 \text{ km/h}$  در راستای محور  $X$ ها، سرعتی معادل با  $0.3 \text{ km/h}$  در راستای محور  $Y$ ها و سرعتی معادل با  $0.1 \text{ km/h}$  در راستای محور  $Z$ ها در حال حرکت می‌باشد. همچنین سایر مقادیر اولیه برای شروع کار الگوریتم صافی کالمن به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\hat{X}_0 = [-500, -40, -40, 17, 1, 1] \quad (19-5)$$

$$P_0 = \text{diag} [50, 15, 15, 5, 0.4, 0.4] \quad ; \quad Q_0 = 0.0001 I_6 \quad (20-5)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.03 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.03 \end{bmatrix} \quad (21-5)$$

قابل ذکر است که مقادیر  $X_0$ ،  $\hat{X}_0$ ،  $P_0$ ،  $R_0$  و  $Q_0$  به صورت فرضی در نظر گرفته شده است، اما باید توجه داشت که همیشه مقادیر  $X_0$  و  $\hat{X}_0$  باهم متفاوت باشند زیرا هیچگاه مقادیر دقیق  $X_0$  در دست نیست و این اختلاف مقادیر، می‌بایست توسط الگوریتم صافی کالمن به هم نزدیک شود تا مشخص شود که روند صافی کالمن هم به درستی انجام می‌شود. همچنین مقادیر  $R$  طوری تعیین شده است که میزان سیگنال به نویز برابر با  $20 \text{ db}$  باشد. به کمک نرم افزار متلب، مدل بیان شده در معادلات (5-9) الی (5-10) برای  $500 \text{ S}$  و زمان نمونه برداری  $1 \text{ S}$  شبیه سازی شده است و مقدار ماتریس  $Q$  که توسط آن بردار نویز فرآیند ایجاد می‌شود را ثابت و برابر  $Q = Q_0 = 0.0001 I_6$  در نظر می‌گیریم و ماتریس  $R$  که توسط آن بردار نویز اندازه گیری ایجاد می‌شود به صورت زیر در نظر می‌گیریم.

$$R = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix} \quad (22-5)$$

در اینجا مقادیر ماتریس  $R$  ناشناخته فرض شده است، و مقادیر قطر اصلی ماتریس  $R_0$  طبق معادلاتی که در فصل 3 بیان شد طوری تنظیم می‌شوند که باعث کاهش خطا در صافی کالمن توسعه یافته فازی

بهینه سازی شده می شود. برای مقایسه بین صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده از معادلات (۲۳-۴) و (۲۴-۴) استفاده می کنیم.

$$J_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_a - X_e)^2} \quad (23-5)$$

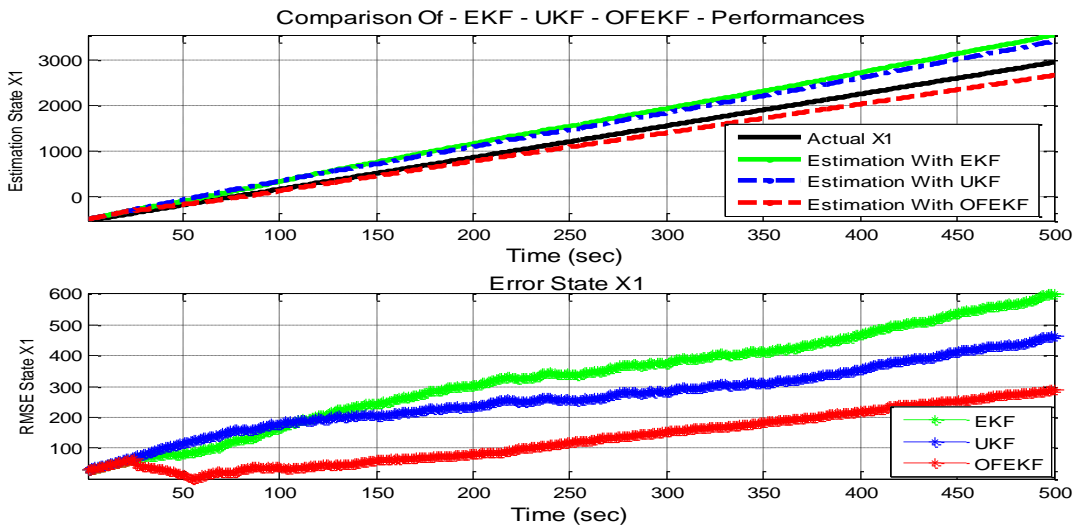
$$J_2 = \alpha \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (DOM)^2} \quad (24-5)$$

که در معادله (۲۴-۵)  $\alpha$  یک عدد ثابت جهت سهولت در نمایش مقدار DOM می باشد که برابر با ۵۰۰۰ انتخاب شده است. نتاج مقایسه بین صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده را می توانید در جدول ۱-۵ مشاهده کنید. همچنین قابل ذکر است که در صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده از روش تنظیم ماتریس کوریانس R و روش بهینه سازی ICA استفاده شده است.

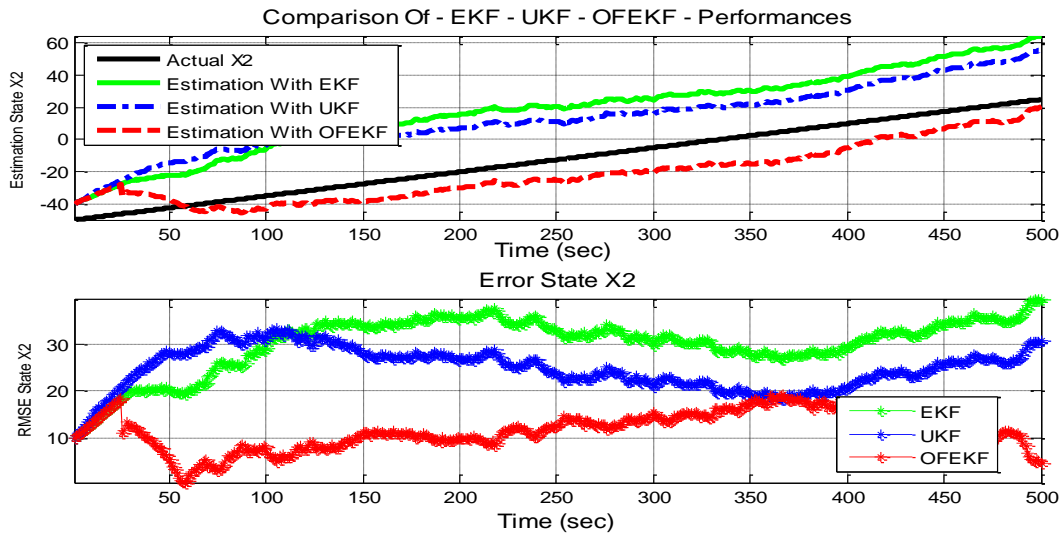
جدول ۱-۵- مقایسه بین EKF, UKF و FEKF در ردیابی غیر فعال

معیار مقایسه	EKF	UKF	FEKF
$J1-X_{K+1}^1$	362.9721	283.1913	155.2434
$J1-X_{K+1}^2$	30.7917	25.3125	12.0341
$J1-X_{K+1}^3$	9.9054	8.3218	5.9861
$J1-X_{K+1}^4$	2.5740	2.2970	1.6509
$J1-X_{K+1}^5$	0.3235	0.2996	0.2904
$J1-X_{K+1}^6$	0.2796	0.2257	0.1328
J4	390.8180	315.1452	24.1471

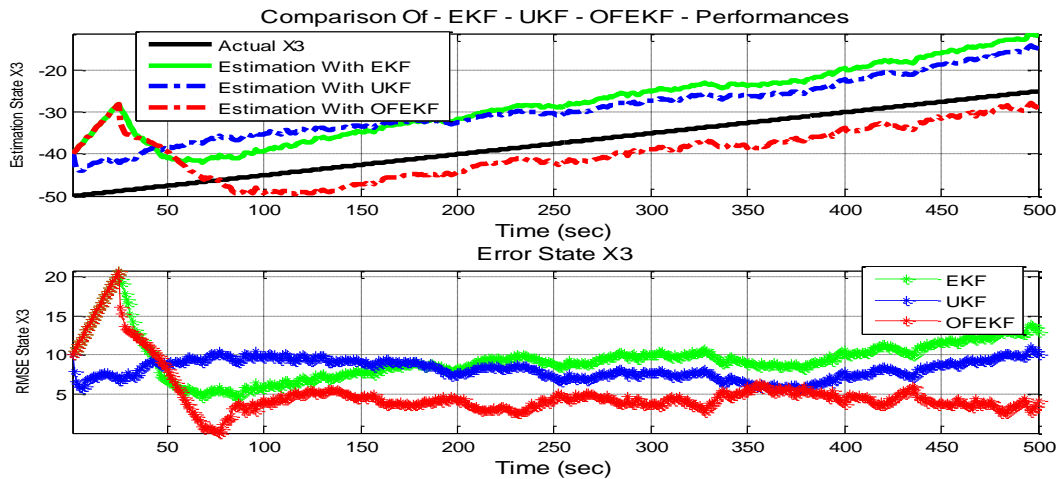
همان طور که در جدول شماره ۱-۵ مشاهده می شود صافی کالمن توسعه یافته فازی نسبت به هر دو صافی دیگر دارای برتری در تخمین می باشد. می توان نحوه تخمین حالات و مقدار جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) حالات تخمین زده شده توسط صافی EKF, UKF و OFEKF را در شکل های ۳-۵ الی ۸-۵ مشاهده کرد.



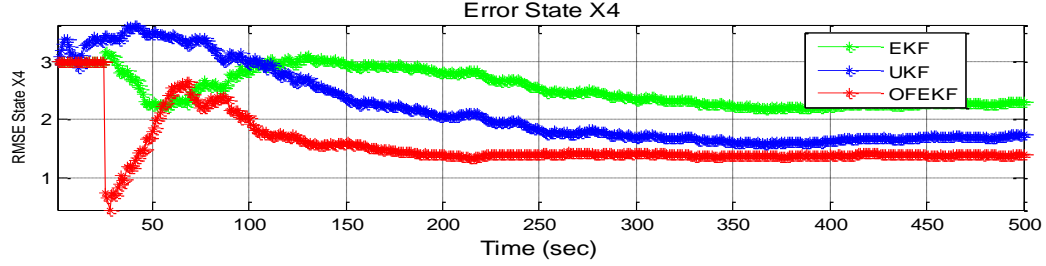
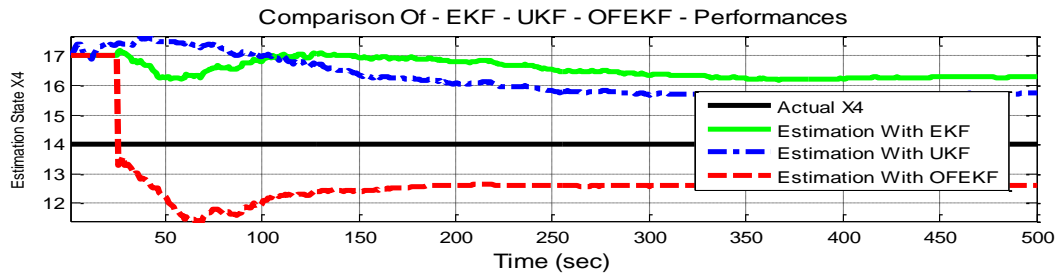
شکل ۵-۳- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_1$



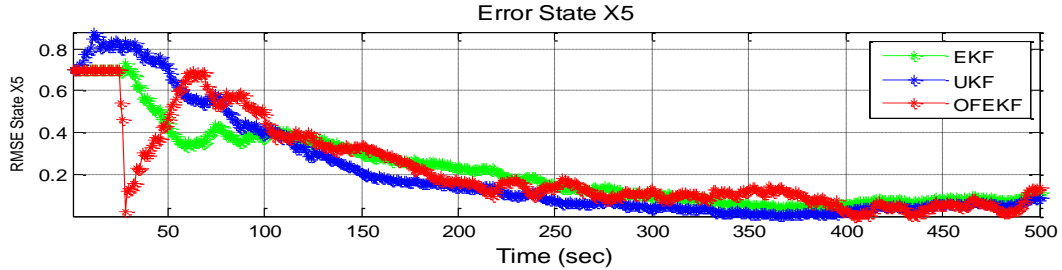
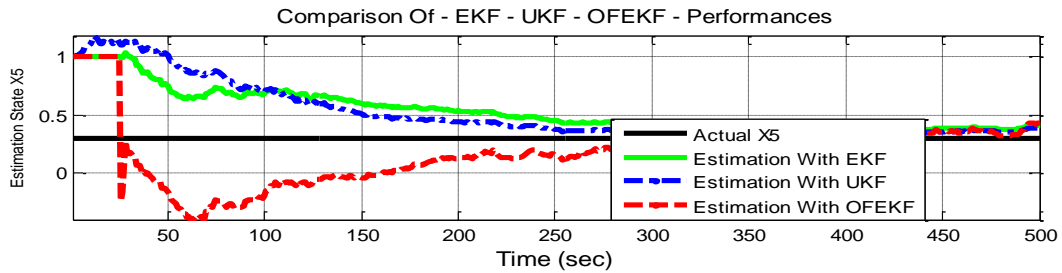
شکل ۵-۴- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_2$



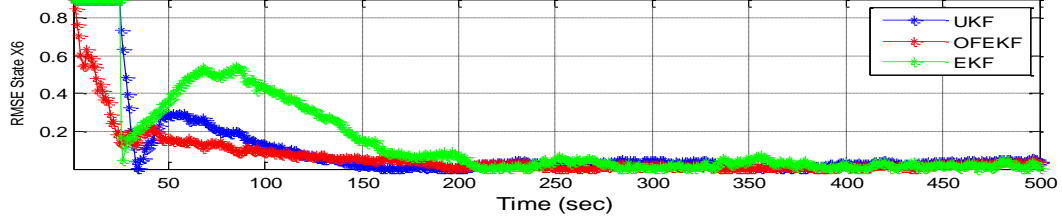
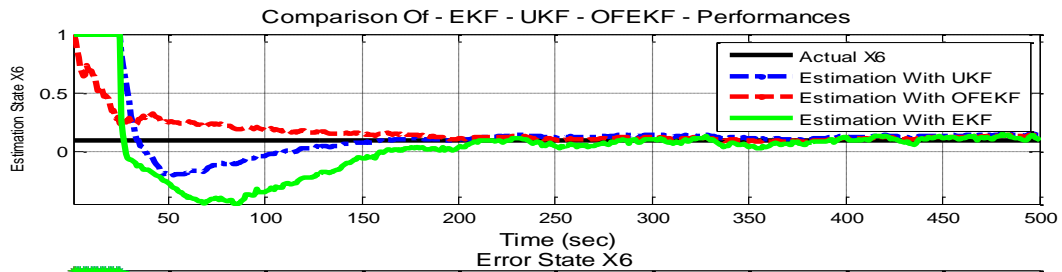
شکل ۵-۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_3$



شکل ۵-۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_4$

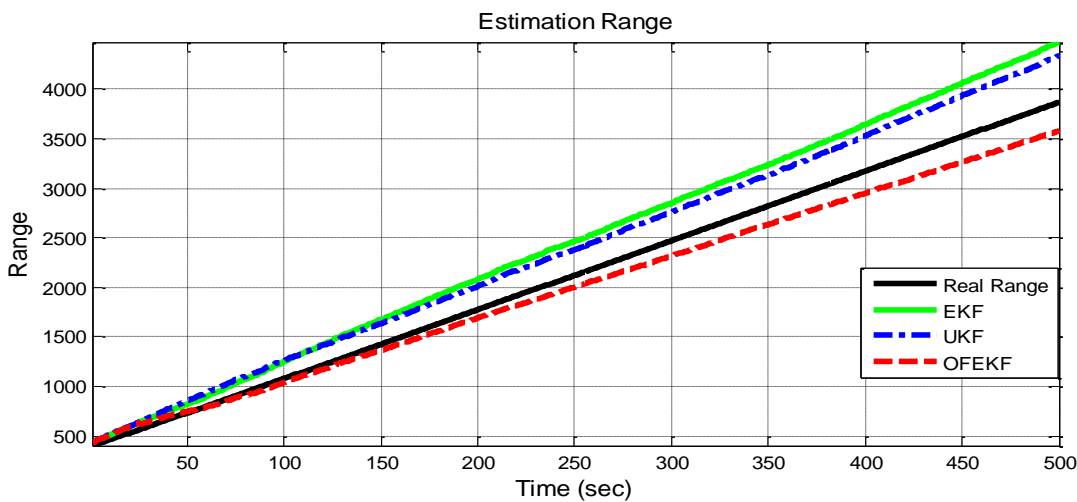


شکل ۵-۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_5$

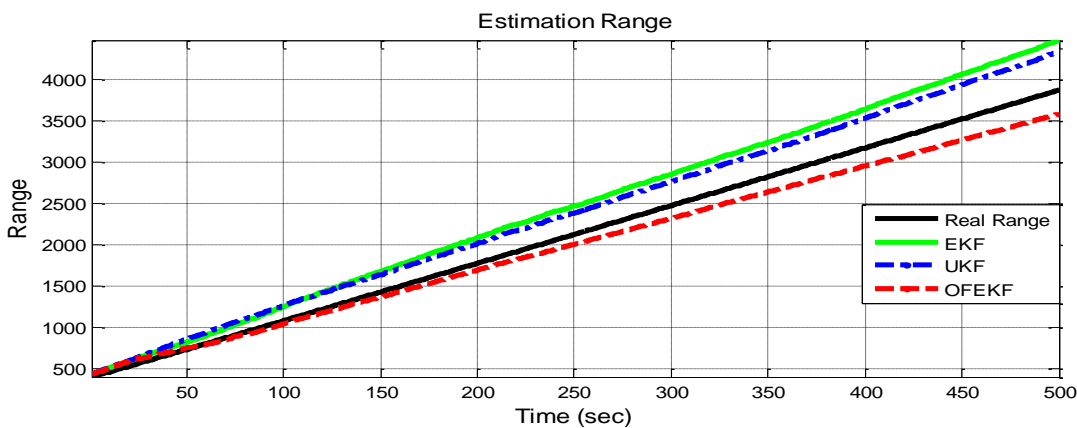


شکل ۵-۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_6$

همانطور که در شکل شماره ۵-۳ مشاهده می‌شود میزان خطای تخمین حالت شماره یک زیاد است، که علت آن، دور شدن هدف از حسگرها در راستای محور Xها است. اما خطای حالت‌های شماره دو و سه به علت سرعت کم هدف در راستای محور Y و Z دارای خطای کمتری می‌باشد. همچنین همان طور که مشاهده می‌شود UKF نسبت به EKF عملکرد بهتری در تخمین حالت‌ها داشته است. همچنین OFEKF به علت تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری عملکرد مطلوب تری نسبت به دو صافی دیگر داشته و دارای خطای کمتری در تخمین حالات می‌باشد. میزان برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک و حسگر شماره دو توسط سه صافی بیان شده در شکل‌های ۵-۹ و ۵-۱۰ نشان داده شده است.

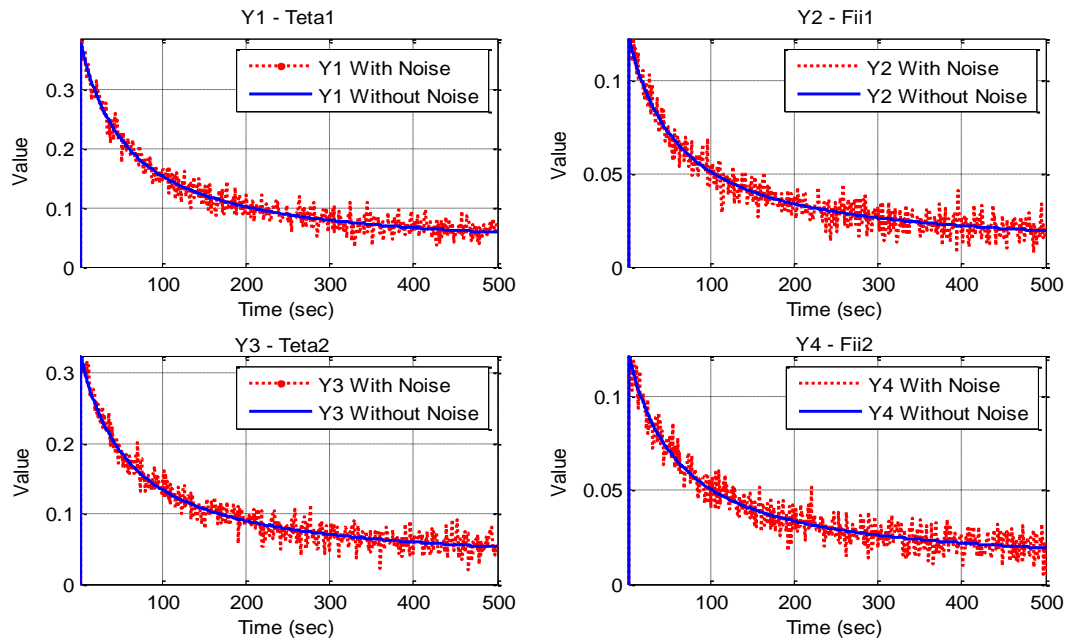


شکل ۵-۹- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک



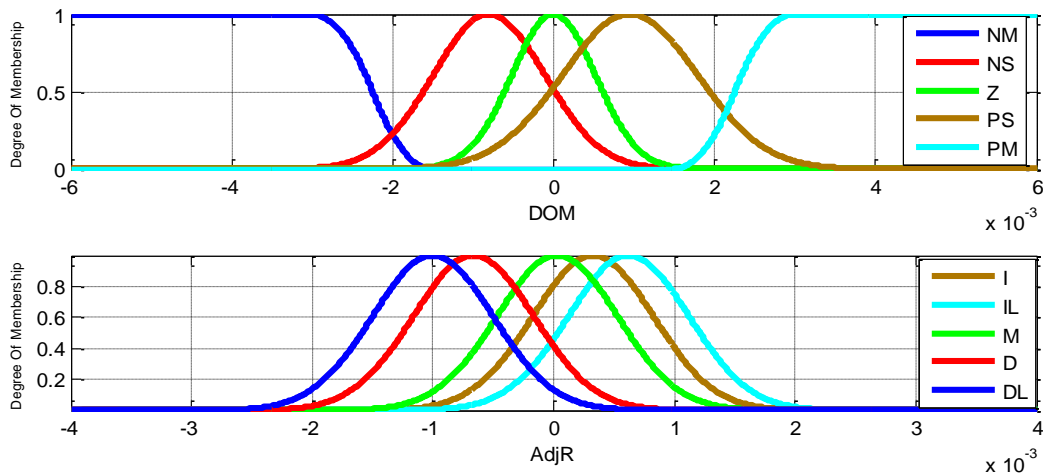
شکل ۵-۱۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو

همان طور که در شکل ۵-۹ و ۵-۱۰ مشاهده می‌شود صافی OFEKF در تخمین برد کلی عملکرد بهتری داشته است. در ادامه میزان نویز اعمالی به مقادیر اندازه گیری شده زاویه سمت را با نمایش مقادیر اندازه گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز را در شکل‌های ۵-۱۱ نشان می‌دهیم.



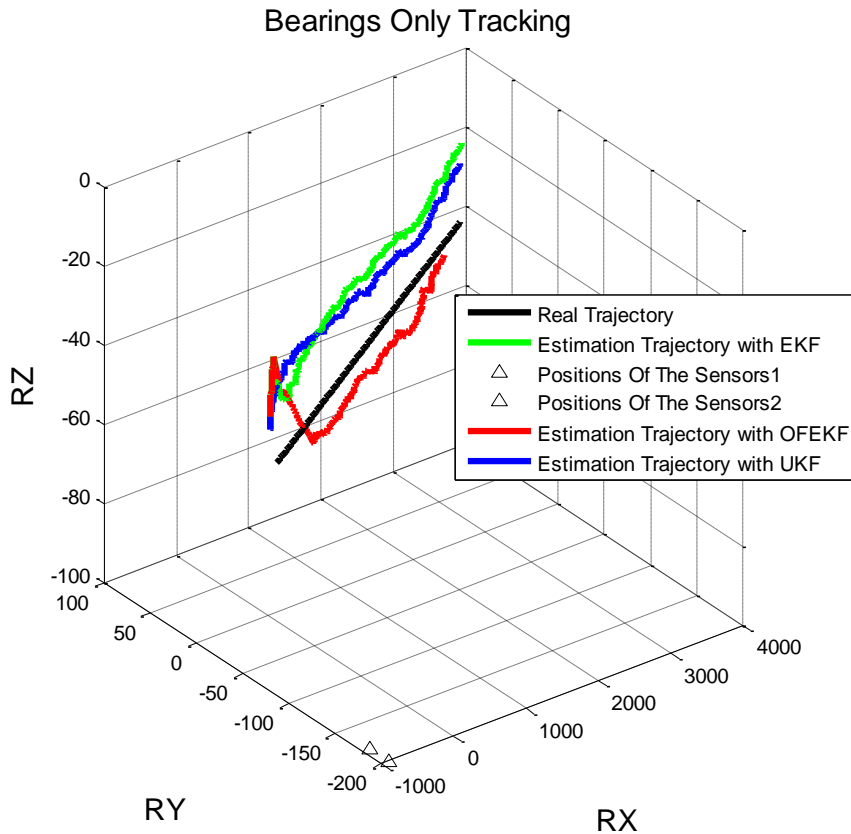
شکل ۵-۱۱- مقادیر اندازه گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز

قابل ذکر است که مقادیر زاویه نشان داده شده در شکل فوق بر حسب رادیان می‌باشد. تعداد گروه‌های توابع تعلق فازی برای ورودی و خروجی این سیستم برابر با ۵ در نظر گرفته شده است و قوانین این سیستم فازی همانند قوانین ارائه شده در فصل سوم می‌باشد که در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲- توابع تعلق ورودی و خروجی سیستم فازی برای تنظیم R در صافی کالمن توسعه یافته فازی

در نهایت مقایسه نحوه ردیابی هدف زیر آب در فضای سه بعدی، توسط سه صافی بیان شده در شکل ۱۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۳-۵- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی EKF, UKF و OFEKF

در شکل بالا مشاهده می‌شود که روش OFEKF برآورد بهتری نسبت به EKF و UKF داشته است و با وجود اینکه هر سه صافی از یک نقطه شروع به ردیابی کرده‌اند روش OFEKF بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی با یک جهش خود را به مسیر اصلی هدف نزدیک کرده که این جهش حاصل تنظیم ماتریس کواریانس نویز اندازه گیری می‌باشد. همچنین همان طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود ردیابی با دقت مطلوبی انجام نشده است، که علت این امر فقر زاویه توسط حسگرها می‌باشد. در روش ردیابی غیرفعال با استفاده از الگوریتم اندازه گیری فقط سمت از تقاطع دو زاویه بدست آمده توسط حسگرها باهم به تخمین موقعیت هدف پرداخته می‌شود اما زمانی که فاصله هدف تا ردیاب زیاد باشد و حسگرها ثابت باشند این دو زاویه بدست آمده توسط حسگرها با هم برخوردی نداشته و به صورت موازی باهم در

می آیند که این امر باعث کاهش دقت در تخمین موقعیت هدف می گردد. برای رفع فقر زاویه حسگرها، راهکار به تحرک در آوردن حسگرها را ارائه می دهیم که به همین علت در ادامه ردیابی غیر فعال هدف توسط دو حسگر متحرک با سرعت ثابت و سرعت متغیر بیان شده است.

## ۵-۵- شبیه سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب، با دو حسگر متحرک دارای سرعت ثابت:

در اینجا مراحل شبیه سازی و فرضیات در نظر گرفته شده دقیقا مشابه با حالتی است که موقعیت حسگرها را ثابت در نظر گرفته بودیم، و تنها تفاوت در سرعت حسگرها می باشد که به صورت زیر فرض شده است.

$$S_1 = [-900, -200, -100, 12, 0, -1] \quad (25-5)$$

$$S_2 = [-910, -180, -100, 12, 0, -1] \quad (26-5)$$

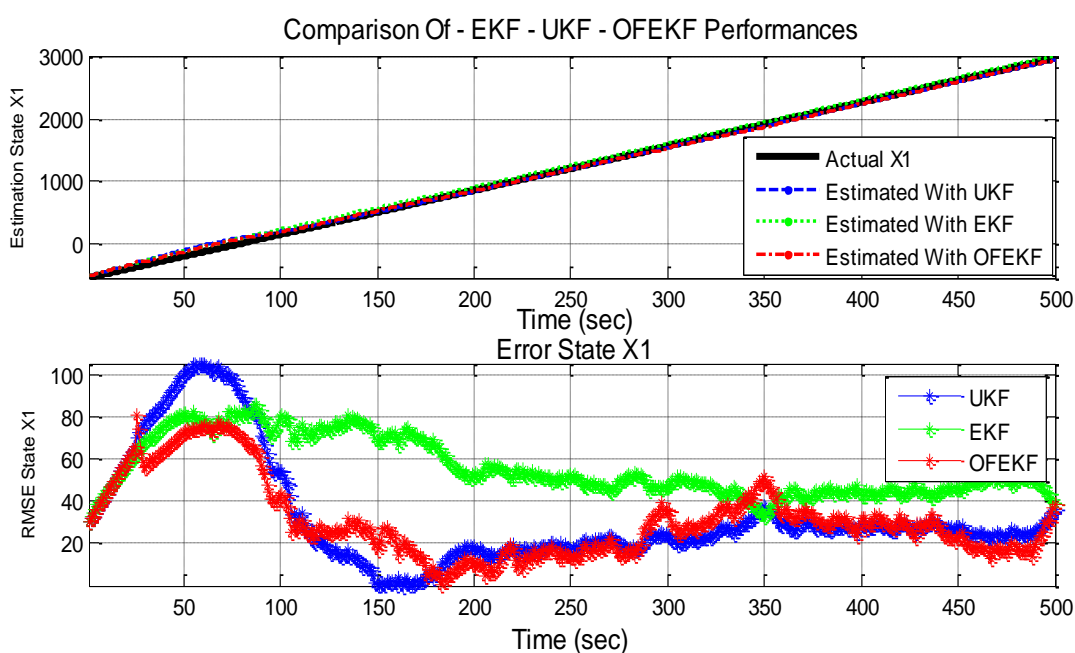
به عبارتی ردیاب با سرعتی ثابت شروع به حرکت کرده و دارای سرعتی معادل با  $12 \text{ km/h}$  در راستای محور  $X$  ها، سرعتی معادل با  $0 \text{ km/h}$  در راستای محور  $Y$  ها و سرعتی معادل با  $-1 \text{ km/h}$  در راستای محور  $Z$  ها در حال حرکت می باشد. نتایج مقایسه بین صافی ها را می توانید در جدول ۲-۵ مشاهده کنید. همچنین قابل ذکر است که در صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده از همان گروه های فازی بهینه سازی شده بخش ۴-۵ استفاده شده است که در شکل شماره ۱۲-۵ نشان داده شده است.

جدول ۲-۵- مقایسه بین EKF، UKF و OFEKF در ردیابی غیر فعال

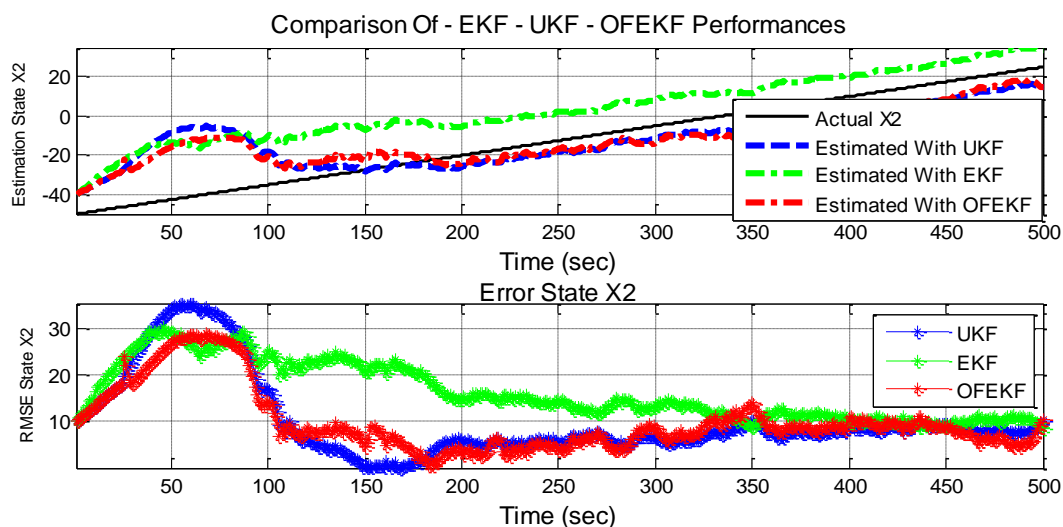
معیار مقایسه	EKF	UKF	FEKF
$J1-X_{K+1}^1$	57.9990	41.8541	36.4103
$J1-X_{K+1}^2$	17.4634	13.4918	12.1277
$J1-X_{K+1}^3$	15.4538	9.9048	9.5134
$J1-X_{K+1}^4$	1.1757	0.9830	0.9795
$J1-X_{K+1}^5$	0.3526	0.3500	0.3357
$J1-X_{K+1}^6$	0.2409	0.2393	0.1860
J4	398.7121	289.5785	31.4710



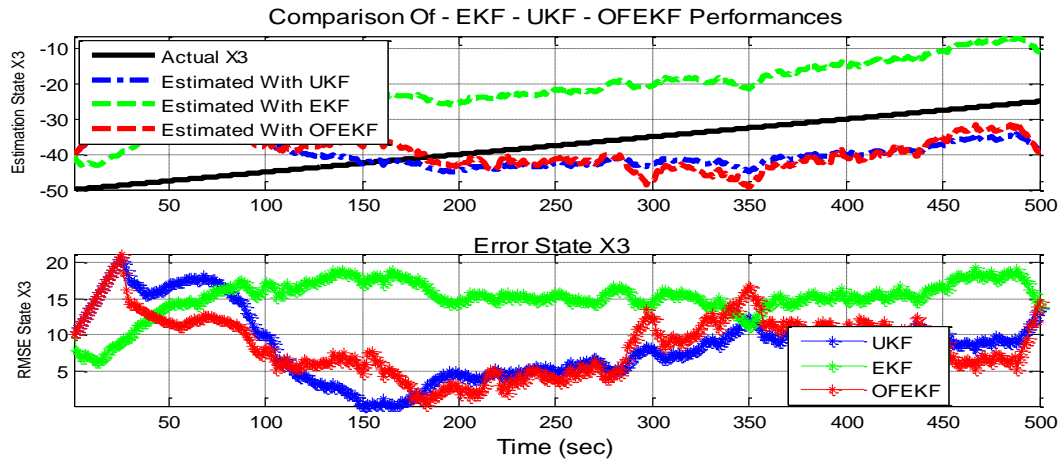
همان طور که در جدول شماره ۵-۲ مشاهده می‌شود میزان خطا در هر سه صافی کالمن نسبت به حالتی که حسگرها ثابت فرض شده بودند کمتر است و همچنین صافی کالمن توسعه یافته فازی نسبت به هر دو صافی دیگر دارای برتری در تخمین می‌باشد. می‌توان نحوه تخمین حالات و مقدار جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) حالات تخمین زده شده توسط صافی EKF, UKF و OFEKF را در شکل‌های ۵-۱۴ الی ۵-۱۹ مشاهده کرد.



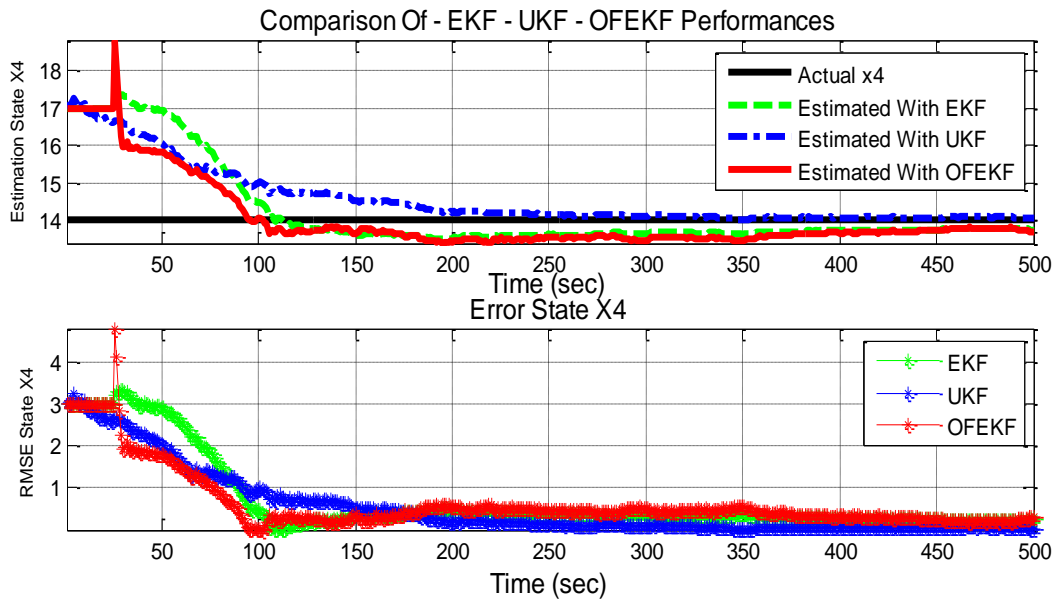
شکل ۵-۱۴- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_1$



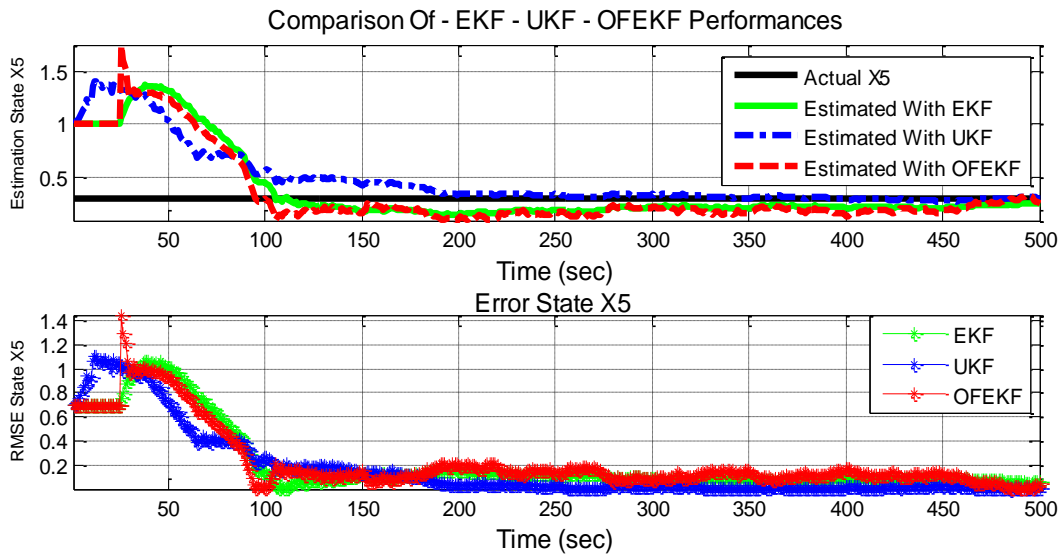
شکل ۵-۱۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_2$



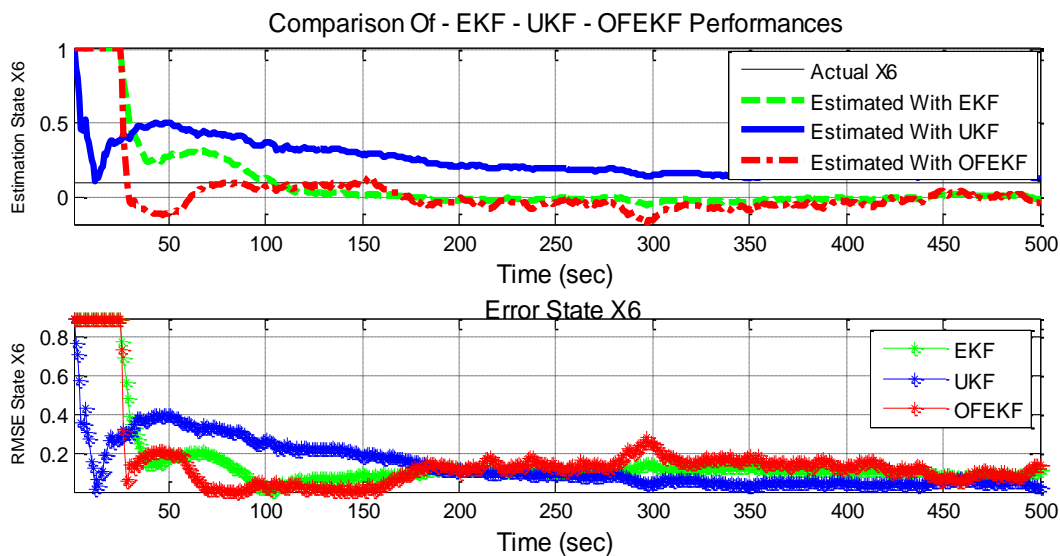
شکل ۵-۱۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_3$



شکل ۵-۱۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_4$

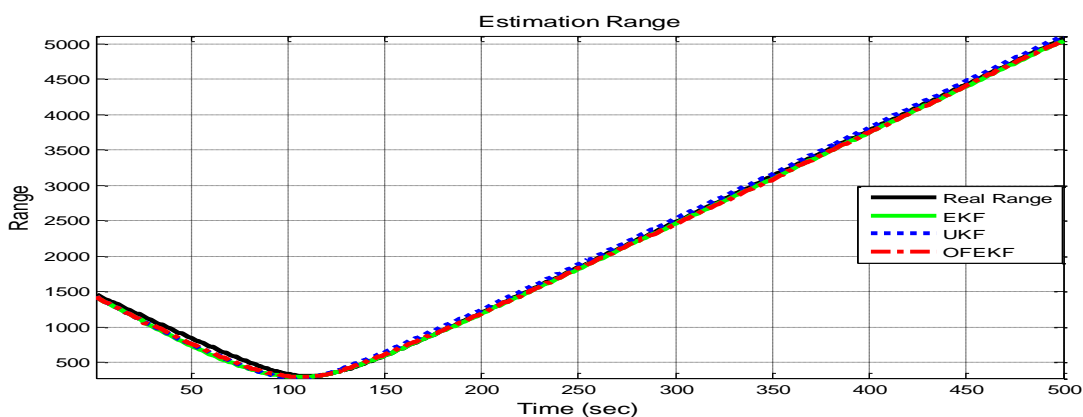


شکل ۵-۱۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_5$

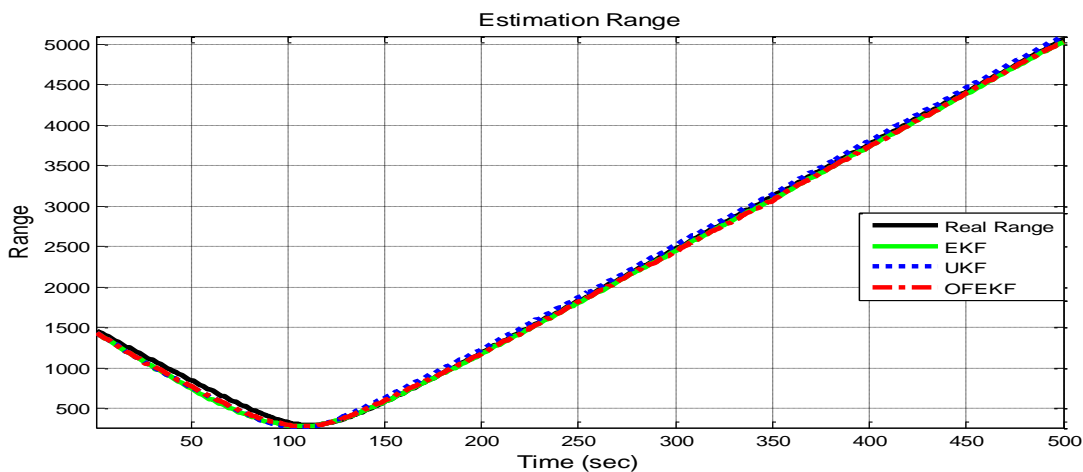


شکل ۵-۱۹- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_6$

میزان برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک و حسگر شماره دو توسط سه صافی بیان شده در شکل‌های زیر نشان داده شده است.

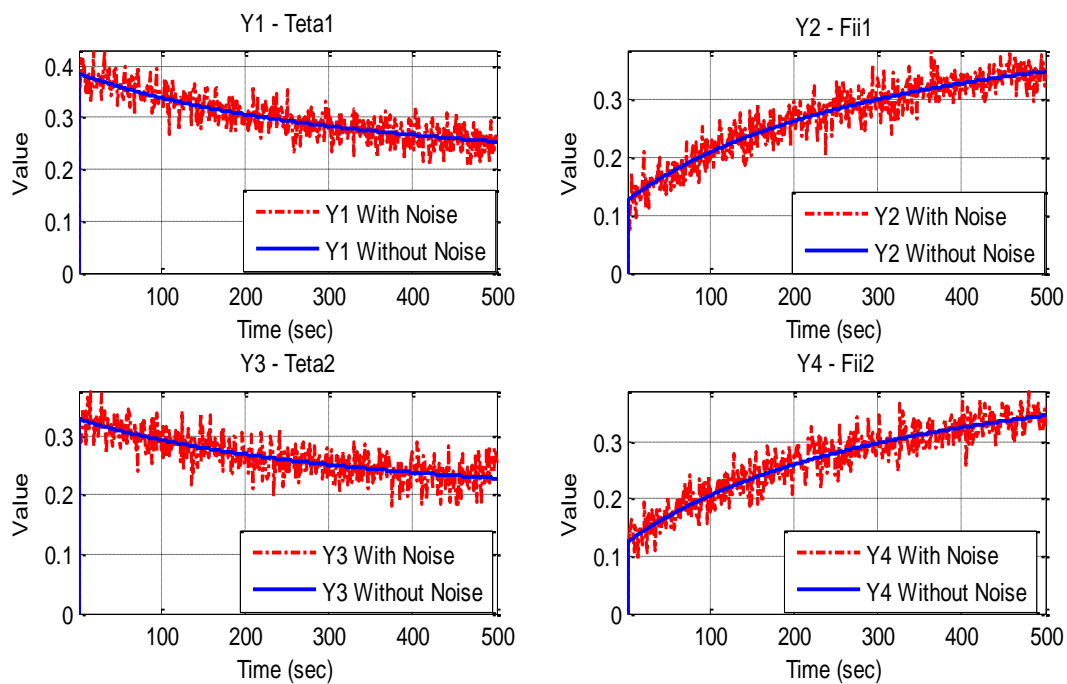


شکل ۵-۲۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک



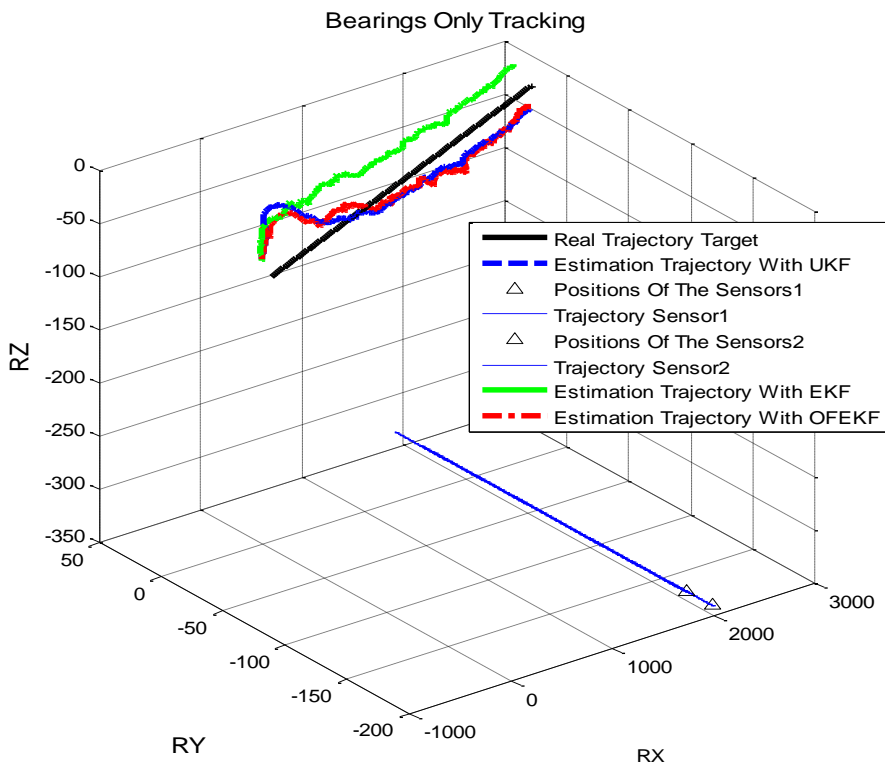
شکل ۵-۲۱- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو

همان طور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود میزان برآورد موقعیت و برد هدف در اینجا که حسگرها متحرک (با سرعت ثابت) فرض شده بسیار دقیق‌تر از حالت حسگر ثابت می‌باشد. همچنین صافی OFEKF دارای خطای کمتری در تخمین نسبت به دو صافی دیگر می‌باشد. در ادامه میزان نویز اعمالی به مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه سمت را با نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز را در شکل‌های ۲۲-۵ نشان می‌دهیم.



شکل ۲۲-۵- مقادیر اندازه‌گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز

قابل ذکر است که مقادیر زاویه نشان داده شده در شکل فوق بر حسب رادیان می‌باشد. در نهایت مقایسه نحوه ردیابی هدف زیر آب با استفاده از دو حسگر متحرک (با سرعت ثابت) در فضای سه بعدی، توسط سه صافی بیان شده در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۳- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی UKF, EKF و OFEKF

همان طور که در شکل بالا مشاهده می شود در اینجا ردیابی با دقت بیشتری انجام شده است، که علت این امر به تحرک در آوردن حسگرها می باشد، که مشکل فقر زاویه را تا حدی بهبود بخشیده است. برای رفع هر چه بیشتر مشکل فقر زاویه در ادامه به ردیابی غیرفعال هدف توسط دو حسگر دارای مانور می پردازیم.

## ۵-۶- شبیه سازی سیستم ردیاب تک هدف زیر آب، با دو حسگر محرک داری سرعت متغیر (مانوردار):

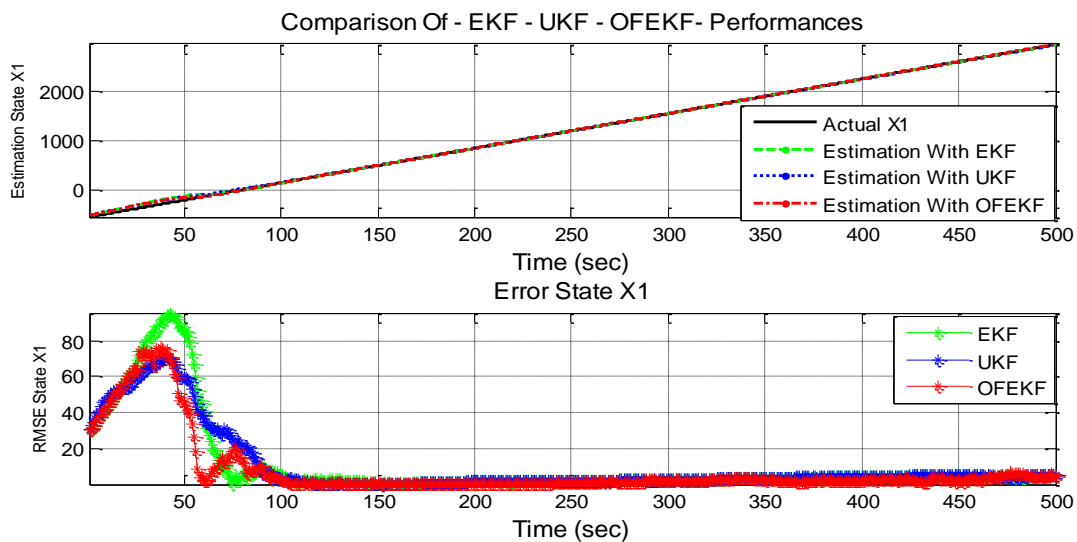
در اینجا مراحل شبیه سازی و فرضیات در نظر گرفته شده دقیقاً مشابه با حالتی است که موقعیت حسگرها را ثابت در نظر گرفته بودیم، و تنها تفاوت در سرعت حسگرها می باشد که به صورت متغیر در نظر گرفته شده است، که باعث ایجاد یک حرکت دارای مانور در حسگرها می شود. نتایج مقایسه بین صافی ها را می توانید در جدول ۵-۳ مشاهده کنید. همچنین قابل ذکر است که در صافی کالمن توسعه

یافته فازی بهینه سازی شده از همان گروه‌های فازی بهینه سازی شده بخش ۴-۵ استفاده شده است که در شکل شماره ۱۲-۵ نشان داده شده است.

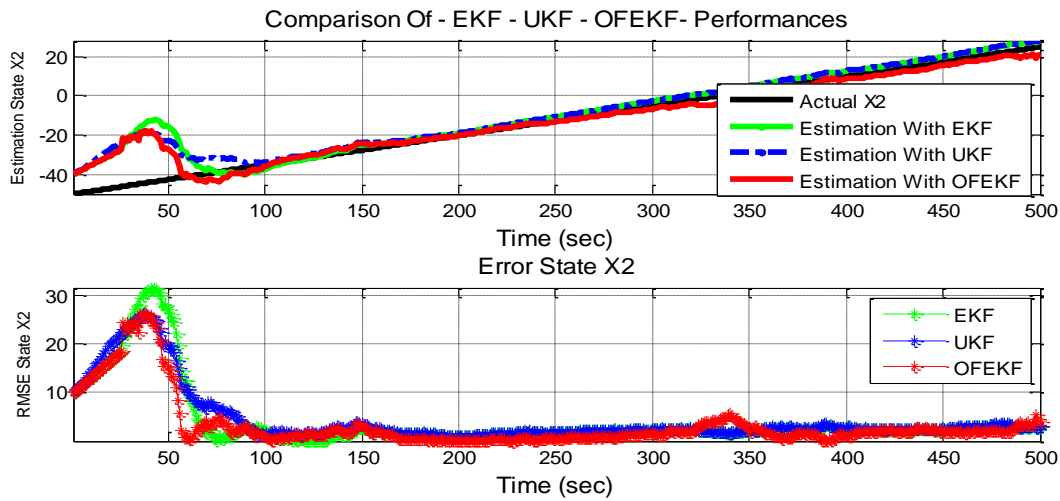
جدول ۳-۵- مقایسه بین EKF, UKF و OFEKF در ردیابی غیر فعال

معیار مقایسه	EKF	UKF	FEKF
$J1-X_{K+1}^1$	24.4465	20.7247	19.4403
$J1-X_{K+1}^2$	7.8581	7.3351	6.4740
$J1-X_{K+1}^3$	5.9468	5.1657	4.3216
$J1-X_{K+1}^4$	1.0325	0.9372	0.8246
$J1-X_{K+1}^5$	0.2908	0.2893	0.2618
$J1-X_{K+1}^6$	0.2507	0.2413	0.1663
J4	392.9816	321.5896	27.2342

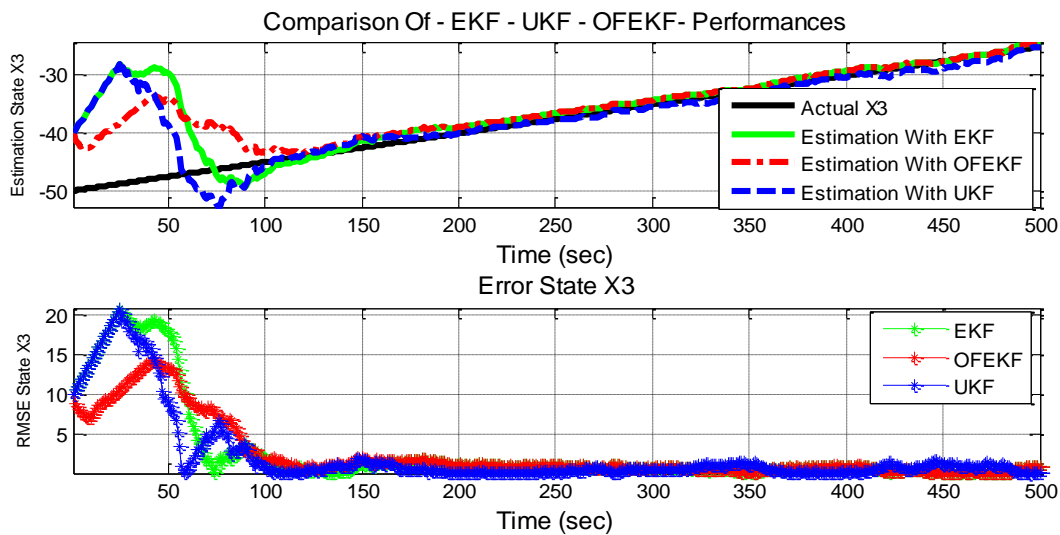
همان طور که در جدول شماره ۳-۵ مشاهده می‌شود میزان خطا در هر سه صافی کالمن نسبت به حالتی که حسگرها ثابت و متحرک با سرعت ثابت فرض شده بودند کمتر است و همچنین صافی کالمن توسعه یافته فازی نسبت به هر دو صافی دیگر دارای برتری در تخمین می‌باشد. می‌توان نحوه تخمین حالات و مقدار جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) حالات تخمین زده شده توسط صافی EKF, UKF و OFEKF را در شکل‌های ۲۴-۵ الی ۲۹-۵ مشاهده کرد.



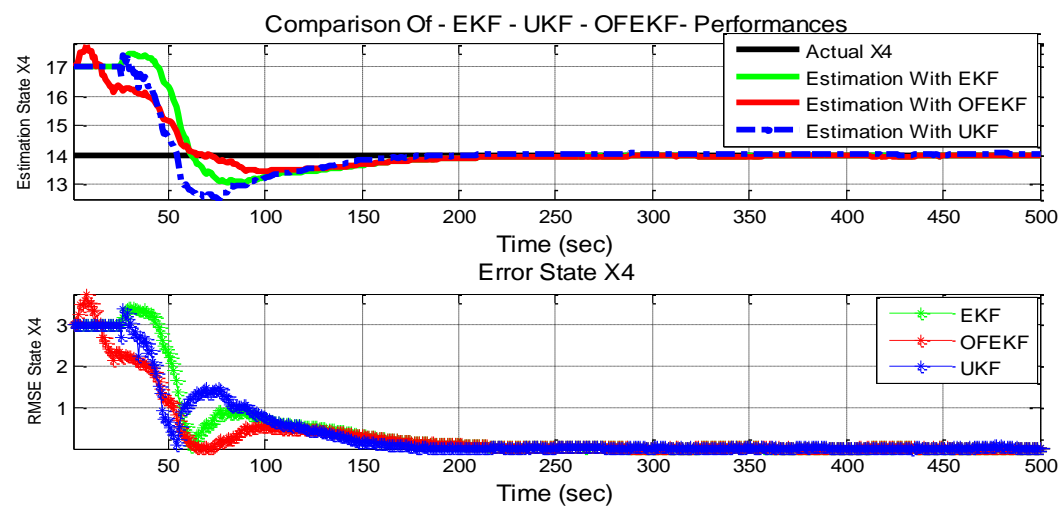
شکل ۲۴-۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_1$



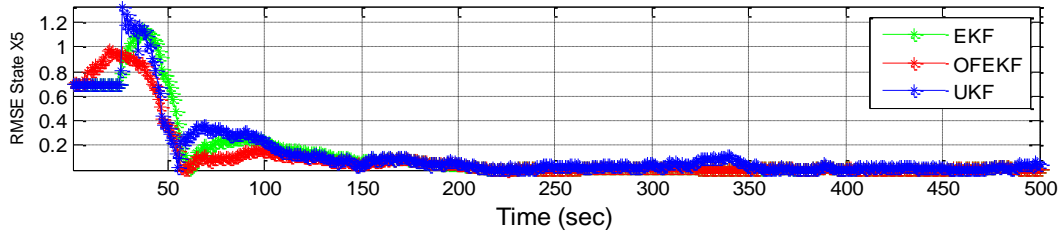
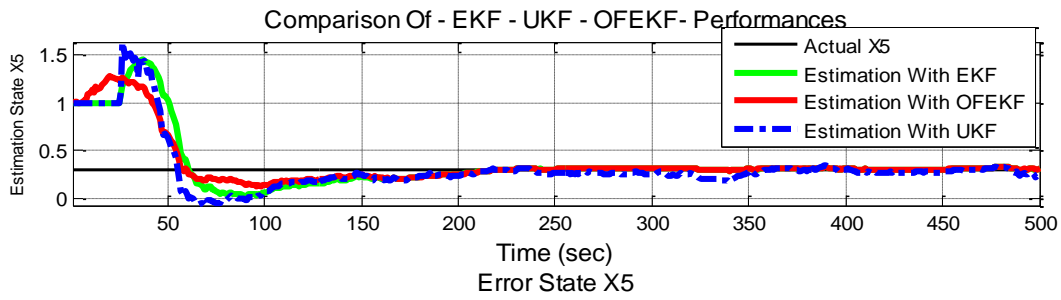
شکل ۵-۲۵- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_2$



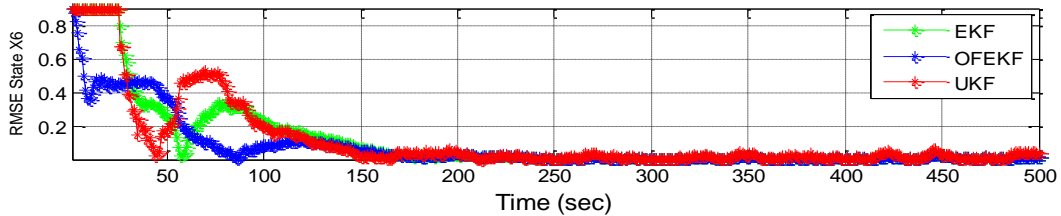
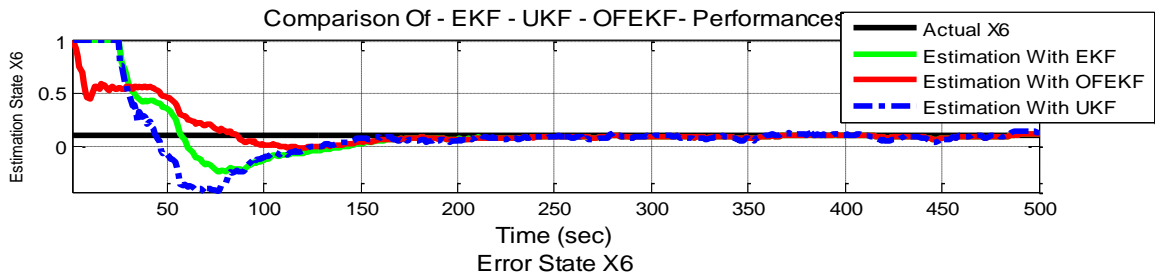
شکل ۵-۲۶- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_3$



شکل ۵-۲۷- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_4$

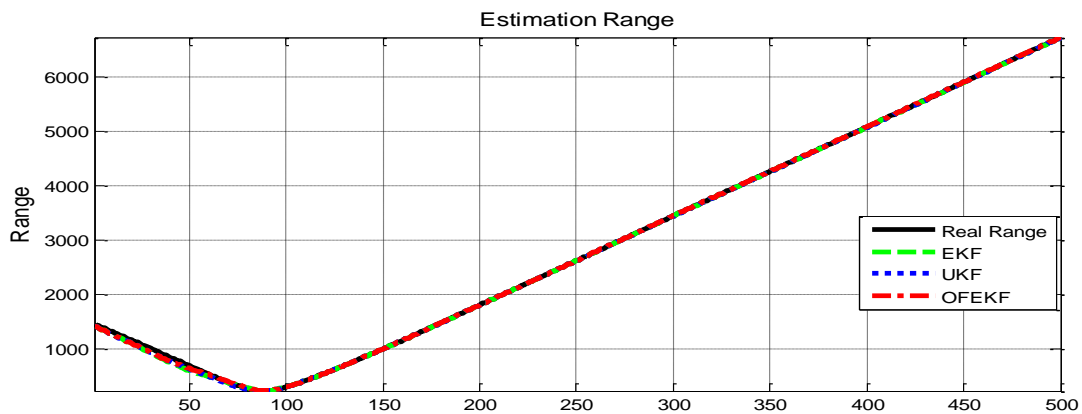


شکل ۵-۲۸- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_5$



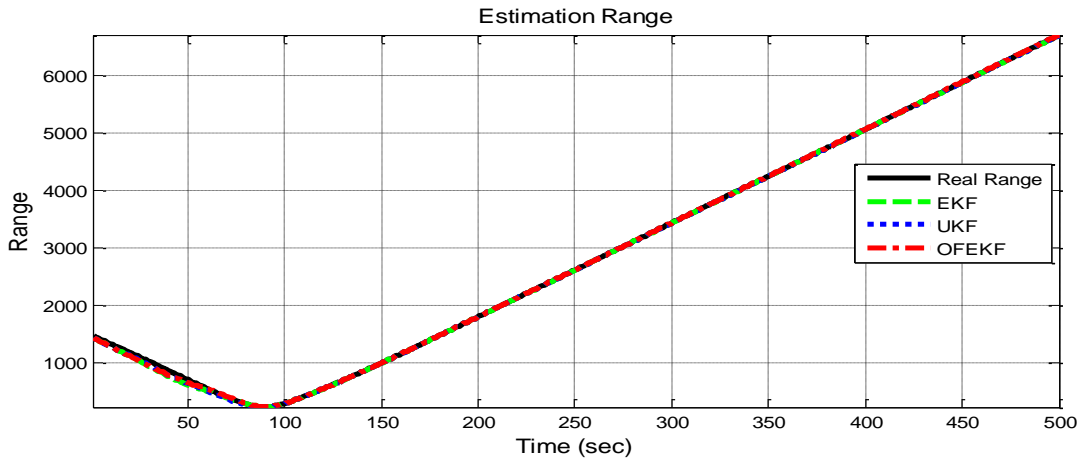
شکل ۵-۲۹- مقدار تخمین و جذر میانگین مربعات خطای حالت  $X_6$

میزان برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک و حسگر شماره دو توسط سه صافی بیان شده در شکل‌های زیر نشان داده شده است.



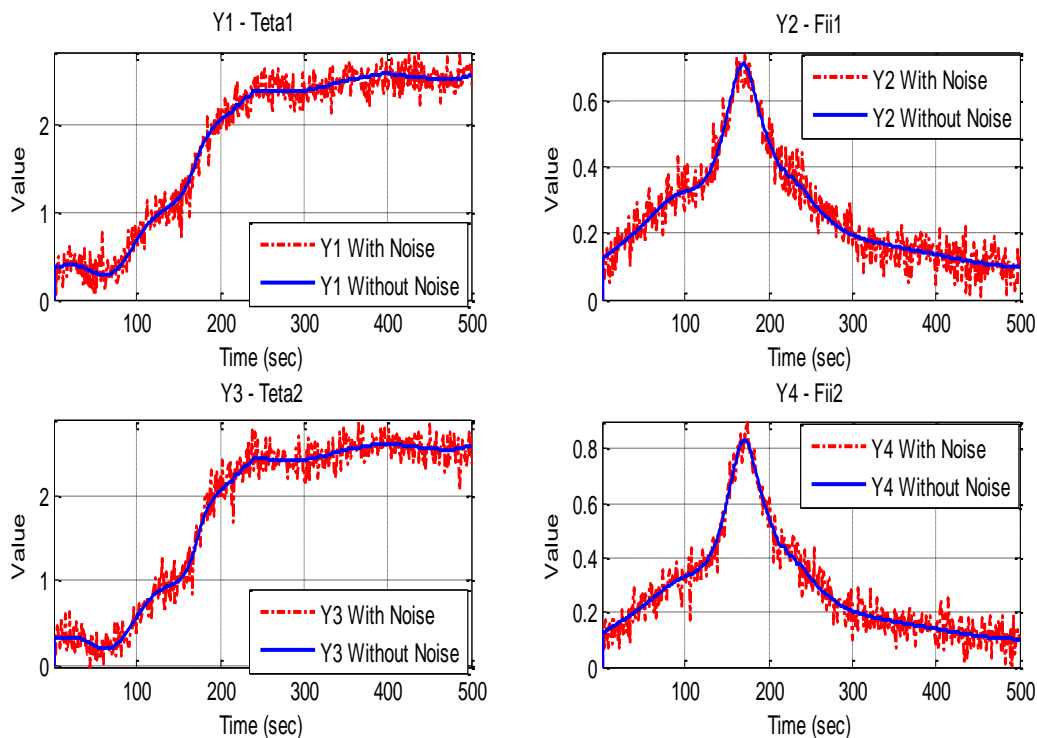
شکل ۵-۳۰- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره یک





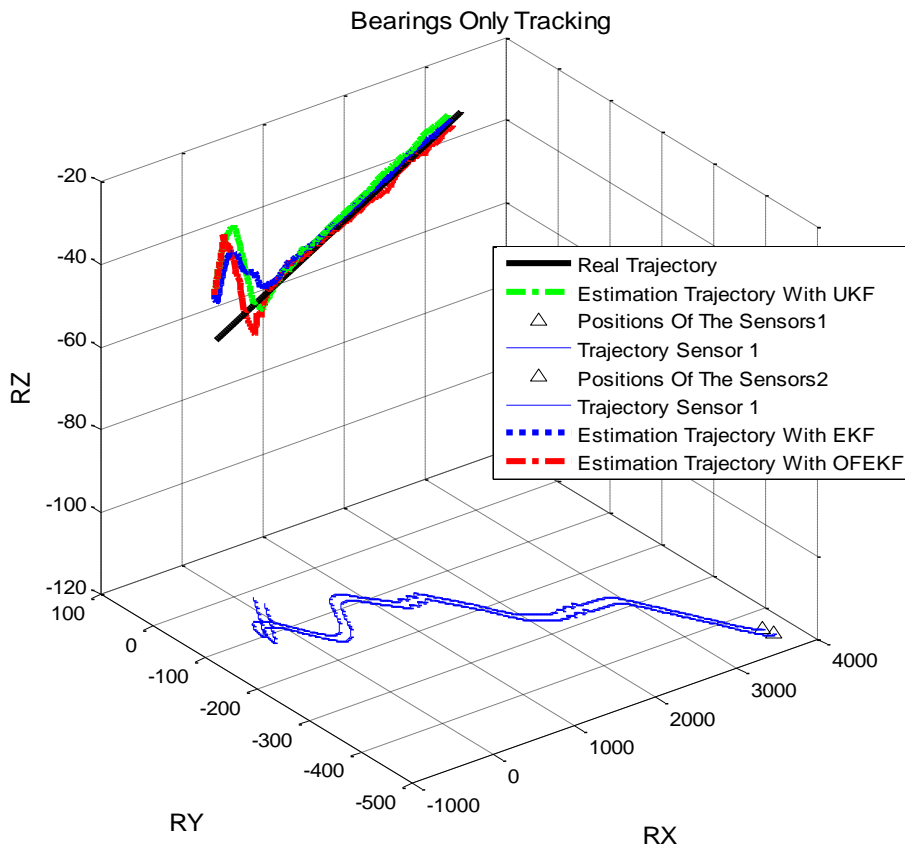
شکل ۵-۳۱- برد کلی واقعی و برد کلی تخمین زده شده نسبت به حسگر شماره دو

همان طور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود میزان برآورد برد، موقعیت و سرعت هدف در اینجا که حسگرها به صورت دارای مانور (با سرعت متغیر) فرض شده بسیار دقیق‌تر از حالت حسگر ثابت و حسگرهای متحرک (دارای سرعت ثابت) می‌باشد. همچنین صافی OFEKF دارای خطای کمتری در تخمین نسبت به دو صافی دیگر می‌باشد. در ادامه میزان نویز اعمالی به مقادیر اندازه‌گیری شده زاویه سمت را با نمایش مقادیر اندازه‌گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز را در شکل‌های ۵-۳۲ نشان می‌دهیم.



شکل ۵-۳۲- مقادیر اندازه‌گیری شده قبل و بعد از اعمال نویز

در نهایت مقایسه نحوه ردیابی هدف زیر آب با دو حسگر دارای مانور در فضای سه بعدی، توسط سه صافی بیان شده در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۵-۳۳- مقایسه نحوه ردیابی غیرفعال هدف توسط صافی UKF, EKF و OFEKF

همان طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود در اینجا ردیابی با دقت بیشتری انجام شده است، که علت این امر حرکت مانوردار حسگرها می‌باشد که مشکل فقر زاویه را تا حد بسیار زیادی حل کرده است.

## ۵-۷- خلاصه:

در این فصل معادلات حاکم بر یک سیستم ردیاب غیر فعال زیر آب، که هدف در آن با سرعت ثابت در حال حرکت است معرفی شد. در این سیستم معرفی شده بردار حالت بیان کننده موقعیت و سرعت هدف متحرک ساطع کننده سیگنال‌های آکوستیکی بوده است. همچنین بردار اندازه گیری اختلاف زمانی رسیدن سیگنال آکوستیکی ساطع شده از هدف به حسگر از مسیر انعکاس از سطح آب و نیز از مسیر انعکاس از کف دریا نسبت به مسیر مستقیم، بوده است. در این فصل نشان داده شده است که

صرفاً براساس اندازه گیری‌های دو حسگر که هیچ سیگنالی از خود ساطع نمی‌کنند، می‌توان یک هدف زیر آب را با وجود نویزهای بزرگ ردیابی کرد. این درحالی است که این سیستم هیچگاه توسط عوامل شنودی دشمن کشف نخواهد شد. همچنین در این فصل از روش جدید بهبود صافی کالمن توسعه یافته که در فصل گذشته معرفی شد جهت ردیابی غیر فعال استفاده شد. سپس این سیستم ردیاب غیر فعال توسط سه صافی کالمن EKF، UKF و OFEKF پیاده سازی شد. که در نهایت صافی OFEKF تخمین بسیار مطلوب‌تری نسبت به دو صافی بیان شده داشته است. علت آن هم این می‌باشد که در اغلب مسائل اطلاعات و دانش دقیقی نسبت به ماتریس R نداریم و مقدار دهی اشتباه این ماتریس کارایی صافی را پایین می‌آورد اما با استفاده از الگوریتم OFEKF ما توانستیم این ماتریس را با اشتباه کمتری مقدار دهی کنیم که در نهایت به خطای کمتر در تخمین، توسط OFEKF ختم شد.



نتیجہ گیری

و

مشہاد

## ۶-۱- نتیجه گیری:

در این پایان نامه، ردیابی غیر فعال اهداف زیر آب مورد بررسی قرار گرفت. این ردیابی براساس سیگنال-های صوتی ساطع شده از هدف و دریافت آنها توسط سونارهای غیرفعال انجام پذیرفت. همچنین جهت ردیابی اهداف از دو روش اندازه گیری اعم از روش اندازه گیری تاخیر زمانی و روش اندازه گیری فقط سمت استفاده شد. در روش اندازه گیری تاخیر زمانی نشان داده شد با دسترسی به حداقل سه انعکاس از هدف شامل مسیر مستقیم، مسیر انعکاس از سطح دریا و مسیر انعکاس از کف دریا می توان به تخمین موقعیت و سرعت هدف پرداخت. همچنین در روش اندازه گیری سمت نشان داده شد که با افزایش فاصله مابین هدف و ردیاب، مشکل فقر زاویه موجب کاهش دقت در برآورد موقعیت هدف می گردد که برای رفع این مشکل روش متحرک کردن حسگرها ارائه گردید. همچنین با توجه به این که در سیستم پیاده سازی شده عملی، داده های اندازه گیری اعم از تاخیر زمانی و سمت هدف هیچگاه خالص و بدون نویز نیستند، لذا لازم است سیستم قابلیت تخمین مناسبی از موقعیت هدف در راستاهای مورد نظر را با وجود نویز در داده های اندازه گیری داشته باشد، لذا همانگونه که در فصول گذشته دیده شد، از سه ابزار شامل صافی کالمن توسعه یافته مرسوم، صافی کالمن بی رد و صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده جهت تخمین موقعیت مطلوب هدف استفاده گردید. که نتایج استفاده از این ابزارها در حالت شبیه سازی مفصلا در فصل چهارم و پنجم بررسی شد و همان گونه که ملاحظه گردید نتایج حاصل از صافی کالمن توسعه یافته فازی بهینه سازی شده برای تخمین موقعیت و سرعت هدف در راستاهای مورد نظر، نسبت به نتایج استفاده از صافی های دیگر بهتر و مطلوب تر بود. در نهایت نتیجه کلی که می توان از این پایان نامه گرفت، این است که می توان یک سیستم سوناری غیر فعال را طوری طرح ریزی نمود که با وجود نویزهای اندازه گیری بزرگ، تخمین برد، موقعیت و سرعت هدف در راستاهای مورد نظر با استفاده از تکنیک هایی همچون صافی کالمن به انجام رسد و این در حالی است که این سیستم هیچگاه توسط عوامل شنودی زیر آب دشمن همچون سونار غیر فعال کشف نخواهد شد.

## ۶-۲-۲-۳-۴-۵-۶-۷-۸-۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸-۱۹-۲۰-۲۱-۲۲-۲۳-۲۴-۲۵-۲۶-۲۷-۲۸-۲۹-۳۰-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴-۳۵-۳۶-۳۷-۳۸-۳۹-۴۰-۴۱-۴۲-۴۳-۴۴-۴۵-۴۶-۴۷-۴۸-۴۹-۵۰-۵۱-۵۲-۵۳-۵۴-۵۵-۵۶-۵۷-۵۸-۵۹-۶۰-۶۱-۶۲-۶۳-۶۴-۶۵-۶۶-۶۷-۶۸-۶۹-۷۰-۷۱-۷۲-۷۳-۷۴-۷۵-۷۶-۷۷-۷۸-۷۹-۸۰-۸۱-۸۲-۸۳-۸۴-۸۵-۸۶-۸۷-۸۸-۸۹-۹۰-۹۱-۹۲-۹۳-۹۴-۹۵-۹۶-۹۷-۹۸-۹۹-۱۰۰-۱۰۱-۱۰۲-۱۰۳-۱۰۴-۱۰۵-۱۰۶-۱۰۷-۱۰۸-۱۰۹-۱۱۰-۱۱۱-۱۱۲-۱۱۳-۱۱۴-۱۱۵-۱۱۶-۱۱۷-۱۱۸-۱۱۹-۱۲۰-۱۲۱-۱۲۲-۱۲۳-۱۲۴-۱۲۵-۱۲۶-۱۲۷-۱۲۸-۱۲۹-۱۳۰-۱۳۱-۱۳۲-۱۳۳-۱۳۴-۱۳۵-۱۳۶-۱۳۷-۱۳۸-۱۳۹-۱۴۰-۱۴۱-۱۴۲-۱۴۳-۱۴۴-۱۴۵-۱۴۶-۱۴۷-۱۴۸-۱۴۹-۱۵۰-۱۵۱-۱۵۲-۱۵۳-۱۵۴-۱۵۵-۱۵۶-۱۵۷-۱۵۸-۱۵۹-۱۶۰-۱۶۱-۱۶۲-۱۶۳-۱۶۴-۱۶۵-۱۶۶-۱۶۷-۱۶۸-۱۶۹-۱۷۰-۱۷۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۷۶-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۸۰-۱۸۱-۱۸۲-۱۸۳-۱۸۴-۱۸۵-۱۸۶-۱۸۷-۱۸۸-۱۸۹-۱۹۰-۱۹۱-۱۹۲-۱۹۳-۱۹۴-۱۹۵-۱۹۶-۱۹۷-۱۹۸-۱۹۹-۲۰۰-۲۰۱-۲۰۲-۲۰۳-۲۰۴-۲۰۵-۲۰۶-۲۰۷-۲۰۸-۲۰۹-۲۱۰-۲۱۱-۲۱۲-۲۱۳-۲۱۴-۲۱۵-۲۱۶-۲۱۷-۲۱۸-۲۱۹-۲۲۰-۲۲۱-۲۲۲-۲۲۳-۲۲۴-۲۲۵-۲۲۶-۲۲۷-۲۲۸-۲۲۹-۲۳۰-۲۳۱-۲۳۲-۲۳۳-۲۳۴-۲۳۵-۲۳۶-۲۳۷-۲۳۸-۲۳۹-۲۴۰-۲۴۱-۲۴۲-۲۴۳-۲۴۴-۲۴۵-۲۴۶-۲۴۷-۲۴۸-۲۴۹-۲۵۰-۲۵۱-۲۵۲-۲۵۳-۲۵۴-۲۵۵-۲۵۶-۲۵۷-۲۵۸-۲۵۹-۲۶۰-۲۶۱-۲۶۲-۲۶۳-۲۶۴-۲۶۵-۲۶۶-۲۶۷-۲۶۸-۲۶۹-۲۷۰-۲۷۱-۲۷۲-۲۷۳-۲۷۴-۲۷۵-۲۷۶-۲۷۷-۲۷۸-۲۷۹-۲۸۰-۲۸۱-۲۸۲-۲۸۳-۲۸۴-۲۸۵-۲۸۶-۲۸۷-۲۸۸-۲۸۹-۲۹۰-۲۹۱-۲۹۲-۲۹۳-۲۹۴-۲۹۵-۲۹۶-۲۹۷-۲۹۸-۲۹۹-۳۰۰-۳۰۱-۳۰۲-۳۰۳-۳۰۴-۳۰۵-۳۰۶-۳۰۷-۳۰۸-۳۰۹-۳۱۰-۳۱۱-۳۱۲-۳۱۳-۳۱۴-۳۱۵-۳۱۶-۳۱۷-۳۱۸-۳۱۹-۳۲۰-۳۲۱-۳۲۲-۳۲۳-۳۲۴-۳۲۵-۳۲۶-۳۲۷-۳۲۸-۳۲۹-۳۳۰-۳۳۱-۳۳۲-۳۳۳-۳۳۴-۳۳۵-۳۳۶-۳۳۷-۳۳۸-۳۳۹-۳۴۰-۳۴۱-۳۴۲-۳۴۳-۳۴۴-۳۴۵-۳۴۶-۳۴۷-۳۴۸-۳۴۹-۳۵۰-۳۵۱-۳۵۲-۳۵۳-۳۵۴-۳۵۵-۳۵۶-۳۵۷-۳۵۸-۳۵۹-۳۶۰-۳۶۱-۳۶۲-۳۶۳-۳۶۴-۳۶۵-۳۶۶-۳۶۷-۳۶۸-۳۶۹-۳۷۰-۳۷۱-۳۷۲-۳۷۳-۳۷۴-۳۷۵-۳۷۶-۳۷۷-۳۷۸-۳۷۹-۳۸۰-۳۸۱-۳۸۲-۳۸۳-۳۸۴-۳۸۵-۳۸۶-۳۸۷-۳۸۸-۳۸۹-۳۹۰-۳۹۱-۳۹۲-۳۹۳-۳۹۴-۳۹۵-۳۹۶-۳۹۷-۳۹۸-۳۹۹-۴۰۰-۴۰۱-۴۰۲-۴۰۳-۴۰۴-۴۰۵-۴۰۶-۴۰۷-۴۰۸-۴۰۹-۴۱۰-۴۱۱-۴۱۲-۴۱۳-۴۱۴-۴۱۵-۴۱۶-۴۱۷-۴۱۸-۴۱۹-۴۲۰-۴۲۱-۴۲۲-۴۲۳-۴۲۴-۴۲۵-۴۲۶-۴۲۷-۴۲۸-۴۲۹-۴۳۰-۴۳۱-۴۳۲-۴۳۳-۴۳۴-۴۳۵-۴۳۶-۴۳۷-۴۳۸-۴۳۹-۴۴۰-۴۴۱-۴۴۲-۴۴۳-۴۴۴-۴۴۵-۴۴۶-۴۴۷-۴۴۸-۴۴۹-۴۵۰-۴۵۱-۴۵۲-۴۵۳-۴۵۴-۴۵۵-۴۵۶-۴۵۷-۴۵۸-۴۵۹-۴۶۰-۴۶۱-۴۶۲-۴۶۳-۴۶۴-۴۶۵-۴۶۶-۴۶۷-۴۶۸-۴۶۹-۴۷۰-۴۷۱-۴۷۲-۴۷۳-۴۷۴-۴۷۵-۴۷۶-۴۷۷-۴۷۸-۴۷۹-۴۸۰-۴۸۱-۴۸۲-۴۸۳-۴۸۴-۴۸۵-۴۸۶-۴۸۷-۴۸۸-۴۸۹-۴۹۰-۴۹۱-۴۹۲-۴۹۳-۴۹۴-۴۹۵-۴۹۶-۴۹۷-۴۹۸-۴۹۹-۵۰۰-۵۰۱-۵۰۲-۵۰۳-۵۰۴-۵۰۵-۵۰۶-۵۰۷-۵۰۸-۵۰۹-۵۱۰-۵۱۱-۵۱۲-۵۱۳-۵۱۴-۵۱۵-۵۱۶-۵۱۷-۵۱۸-۵۱۹-۵۲۰-۵۲۱-۵۲۲-۵۲۳-۵۲۴-۵۲۵-۵۲۶-۵۲۷-۵۲۸-۵۲۹-۵۳۰-۵۳۱-۵۳۲-۵۳۳-۵۳۴-۵۳۵-۵۳۶-۵۳۷-۵۳۸-۵۳۹-۵۴۰-۵۴۱-۵۴۲-۵۴۳-۵۴۴-۵۴۵-۵۴۶-۵۴۷-۵۴۸-۵۴۹-۵۵۰-۵۵۱-۵۵۲-۵۵۳-۵۵۴-۵۵۵-۵۵۶-۵۵۷-۵۵۸-۵۵۹-۵۶۰-۵۶۱-۵۶۲-۵۶۳-۵۶۴-۵۶۵-۵۶۶-۵۶۷-۵۶۸-۵۶۹-۵۷۰-۵۷۱-۵۷۲-۵۷۳-۵۷۴-۵۷۵-۵۷۶-۵۷۷-۵۷۸-۵۷۹-۵۸۰-۵۸۱-۵۸۲-۵۸۳-۵۸۴-۵۸۵-۵۸۶-۵۸۷-۵۸۸-۵۸۹-۵۹۰-۵۹۱-۵۹۲-۵۹۳-۵۹۴-۵۹۵-۵۹۶-۵۹۷-۵۹۸-۵۹۹-۶۰۰-۶۰۱-۶۰۲-۶۰۳-۶۰۴-۶۰۵-۶۰۶-۶۰۷-۶۰۸-۶۰۹-۶۱۰-۶۱۱-۶۱۲-۶۱۳-۶۱۴-۶۱۵-۶۱۶-۶۱۷-۶۱۸-۶۱۹-۶۲۰-۶۲۱-۶۲۲-۶۲۳-۶۲۴-۶۲۵-۶۲۶-۶۲۷-۶۲۸-۶۲۹-۶۳۰-۶۳۱-۶۳۲-۶۳۳-۶۳۴-۶۳۵-۶۳۶-۶۳۷-۶۳۸-۶۳۹-۶۴۰-۶۴۱-۶۴۲-۶۴۳-۶۴۴-۶۴۵-۶۴۶-۶۴۷-۶۴۸-۶۴۹-۶۵۰-۶۵۱-۶۵۲-۶۵۳-۶۵۴-۶۵۵-۶۵۶-۶۵۷-۶۵۸-۶۵۹-۶۶۰-۶۶۱-۶۶۲-۶۶۳-۶۶۴-۶۶۵-۶۶۶-۶۶۷-۶۶۸-۶۶۹-۶۷۰-۶۷۱-۶۷۲-۶۷۳-۶۷۴-۶۷۵-۶۷۶-۶۷۷-۶۷۸-۶۷۹-۶۸۰-۶۸۱-۶۸۲-۶۸۳-۶۸۴-۶۸۵-۶۸۶-۶۸۷-۶۸۸-۶۸۹-۶۹۰-۶۹۱-۶۹۲-۶۹۳-۶۹۴-۶۹۵-۶۹۶-۶۹۷-۶۹۸-۶۹۹-۷۰۰-۷۰۱-۷۰۲-۷۰۳-۷۰۴-۷۰۵-۷۰۶-۷۰۷-۷۰۸-۷۰۹-۷۱۰-۷۱۱-۷۱۲-۷۱۳-۷۱۴-۷۱۵-۷۱۶-۷۱۷-۷۱۸-۷۱۹-۷۲۰-۷۲۱-۷۲۲-۷۲۳-۷۲۴-۷۲۵-۷۲۶-۷۲۷-۷۲۸-۷۲۹-۷۳۰-۷۳۱-۷۳۲-۷۳۳-۷۳۴-۷۳۵-۷۳۶-۷۳۷-۷۳۸-۷۳۹-۷۴۰-۷۴۱-۷۴۲-۷۴۳-۷۴۴-۷۴۵-۷۴۶-۷۴۷-۷۴۸-۷۴۹-۷۵۰-۷۵۱-۷۵۲-۷۵۳-۷۵۴-۷۵۵-۷۵۶-۷۵۷-۷۵۸-۷۵۹-۷۶۰-۷۶۱-۷۶۲-۷۶۳-۷۶۴-۷۶۵-۷۶۶-۷۶۷-۷۶۸-۷۶۹-۷۷۰-۷۷۱-۷۷۲-۷۷۳-۷۷۴-۷۷۵-۷۷۶-۷۷۷-۷۷۸-۷۷۹-۷۸۰-۷۸۱-۷۸۲-۷۸۳-۷۸۴-۷۸۵-۷۸۶-۷۸۷-۷۸۸-۷۸۹-۷۹۰-۷۹۱-۷۹۲-۷۹۳-۷۹۴-۷۹۵-۷۹۶-۷۹۷-۷۹۸-۷۹۹-۸۰۰-۸۰۱-۸۰۲-۸۰۳-۸۰۴-۸۰۵-۸۰۶-۸۰۷-۸۰۸-۸۰۹-۸۱۰-۸۱۱-۸۱۲-۸۱۳-۸۱۴-۸۱۵-۸۱۶-۸۱۷-۸۱۸-۸۱۹-۸۲۰-۸۲۱-۸۲۲-۸۲۳-۸۲۴-۸۲۵-۸۲۶-۸۲۷-۸۲۸-۸۲۹-۸۳۰-۸۳۱-۸۳۲-۸۳۳-۸۳۴-۸۳۵-۸۳۶-۸۳۷-۸۳۸-۸۳۹-۸۴۰-۸۴۱-۸۴۲-۸۴۳-۸۴۴-۸۴۵-۸۴۶-۸۴۷-۸۴۸-۸۴۹-۸۵۰-۸۵۱-۸۵۲-۸۵۳-۸۵۴-۸۵۵-۸۵۶-۸۵۷-۸۵۸-۸۵۹-۸۶۰-۸۶۱-۸۶۲-۸۶۳-۸۶۴-۸۶۵-۸۶۶-۸۶۷-۸۶۸-۸۶۹-۸۷۰-۸۷۱-۸۷۲-۸۷۳-۸۷۴-۸۷۵-۸۷۶-۸۷۷-۸۷۸-۸۷۹-۸۸۰-۸۸۱-۸۸۲-۸۸۳-۸۸۴-۸۸۵-۸۸۶-۸۸۷-۸۸۸-۸۸۹-۸۹۰-۸۹۱-۸۹۲-۸۹۳-۸۹۴-۸۹۵-۸۹۶-۸۹۷-۸۹۸-۸۹۹-۹۰۰-۹۰۱-۹۰۲-۹۰۳-۹۰۴-۹۰۵-۹۰۶-۹۰۷-۹۰۸-۹۰۹-۹۱۰-۹۱۱-۹۱۲-۹۱۳-۹۱۴-۹۱۵-۹۱۶-۹۱۷-۹۱۸-۹۱۹-۹۲۰-۹۲۱-۹۲۲-۹۲۳-۹۲۴-۹۲۵-۹۲۶-۹۲۷-۹۲۸-۹۲۹-۹۳۰-۹۳۱-۹۳۲-۹۳۳-۹۳۴-۹۳۵-۹۳۶-۹۳۷-۹۳۸-۹۳۹-۹۴۰-۹۴۱-۹۴۲-۹۴۳-۹۴۴-۹۴۵-۹۴۶-۹۴۷-۹۴۸-۹۴۹-۹۵۰-۹۵۱-۹۵۲-۹۵۳-۹۵۴-۹۵۵-۹۵۶-۹۵۷-۹۵۸-۹۵۹-۹۶۰-۹۶۱-۹۶۲-۹۶۳-۹۶۴-۹۶۵-۹۶۶-۹۶۷-۹۶۸-۹۶۹-۹۷۰-۹۷۱-۹۷۲-۹۷۳-۹۷۴-۹۷۵-۹۷۶-۹۷۷-۹۷۸-۹۷۹-۹۸۰-۹۸۱-۹۸۲-۹۸۳-۹۸۴-۹۸۵-۹۸۶-۹۸۷-۹۸۸-۹۸۹-۹۹۰-۹۹۱-۹۹۲-۹۹۳-۹۹۴-۹۹۵-۹۹۶-۹۹۷-۹۹۸-۹۹۹-۱۰۰۰

با توجه به رشد روزافزون گرایش به تخمین هرچه دقیق تر موقعیت و سرعت اهداف زیر آب، هنوز می توان مسائلی را برای به چالش کشیدن این مبحث یافت. در این بخش مباحثی مطرح می گردد که به کارگیری آنها می تواند به تخمین موقعیت هرچه بهتر اهداف زیر آب بینجامد.

✓ تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری و ماتریس کواریانس فرآیند به طور هم زمان توسط سیستم فازی می تواند باعث بهبود در تخمین گردد.

✓ اعمال سیستم فازی به صافی کالمن بی رد و تنظیم ماتریس کواریانس اندازه گیری می توان در بهبود تخمین موقعیت اهداف مفید باشد.

✓ استفاده از انواع دیگر صافی از جمله صافی ذره ای می تواند در کاهش خطای تخمین تاحدی کارآمدتر باشد.

✓ استفاده از شبکه های عصبی جهت تنظیم ماتریس کواریانس به جای سیستم های فازی می تواند تامل برانگیز باشد.

✓ با توجه به تاثیر زیاد نحوه تنظیم مراکز و سیگماهای سیستم فازی توسط الگوریتم بهینه سازی می توان از الگوریتم های بهینه سازی قوتوری جهت تنظیم سیستم فازی استفاده نمود.

✓ استفاده از تعداد حسگرهای بیشتر جهت بهبود در تخمین برد، موقعیت و سرعت هدف می تواند مفید باشد.

✓ همچنین یکی از پیشنهادات مهم می تواند تعمیم سیستم ردیاب غیر فعال تک هدف، به چند هدف باشد.

## مراجع

- [1] James E Barger, 'Sonar Systems', Encyclopedia of Acoustics, Volume One (1997), 559-79.
- [2] J Urick Robert, 'Principles of Underwater Sound', New York: McGraw-Hill Book Company (1983).
- [3] Lawrence E Kinsler, Austin R Frey, Alan B Coppens, and James V Sanders, 'Fundamentals of Acoustics', Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999., 1 (1999).
- [4] Donald Ross, Mechanics of Underwater Noise. Vol. 375 (Pergamon Press New York, 1976).
- [5] Rodney FW Coates, Underwater Acoustic Systems (J. Wiley, 1989).
- [6] Robert J Urick, Sound Propagation in the Sea (Peninsula Publishing Newport Beach, 1982).
- [7] Ira Dyer, 'Ocean Ambient Noise', Encyclopedia of Acoustics, Volume One (1997), 549-57.
- [8] Peter L Tyack, and Terrance Howald, 'Biological Sources of Noise in Coastal Waters', The Journal of the Acoustical Society of America, 94 (1993), 1819-19.
- [9] Ruth E Keenan, and Ira Dyer, 'Noise from Arctic Ocean Earthquakes', The Journal of the Acoustical Society of America, 75 (1984), 819-25.
- [10] Robert H Mellen, 'The Thermal-Noise Limit in the Detection of Underwater Acoustic Signals', The Journal of the Acoustical Society of America, 24 (1952), 478-80.
- [11] Robert J Urick, Ambient Noise in the Sea (Peninsula Pub, 1986).
- [12] Eli Brookner, 'Tracking and Kalman Filtering Made Easy John Wiley and Sons', Inc. NY (1998).
- [13] Ferial El-Hawary, and GAN Mbamalu, 'Fair and Andrews's Weighting-Based Irwls Algorithms for Time-Delay Estimation in Underwater Target Tracking', Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 18 (1993), 142-50.
- [14] Ferial El-Hawary, and GAN Mbamalu, 'Underwater Target Tracking Via the Irwls Filtering Approach', in Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F (IET, 1991), pp. 459-69.
- [15] Ferial El-Hawary, F Aminzadeh, and GAN Mbamalu, 'The Generalized Kalman Filter Approach to Adaptive Underwater Target Tracking', Oceanic Engineering, IEEE Journal of, 17 (1992), 129-37.
- [16] Ferial El-Hawary, 'Adaptive Underwater Target Tracking Via a Generalized Kalman Filter', in Autonomous Underwater Vehicle Technology, 1990. AUV'90., Proceedings of the (1990) Symposium on (IEEE, 1990), pp. 275-79.
- [17] MH Ferdowsi, 'Observability Conditions for Target States with Bearing-Only Measurements in Three-Dimensional Case', in Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006 IEEE (IEEE, 2006), pp. 1444-49.
- [18] Kutluyil Doğançay, 'Bearings-Only Target Localization Using Total Least Squares', Signal Processing, 85 (2005), 1695-710.
- [19] Reza M Vaghefi, Mohammad Reza Gholami, and EG Strom, 'Bearing-Only Target Localization with Uncertainties in Observer Position', in Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), 2010 IEEE 21st International Symposium on (IEEE, 2010), pp. 238-42.



- [20] F El-Hawary, and Yuyang Jing, 'Robust Regression-Based EKF for Tracking Underwater Targets', *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 20 (1995), 31-41.
- [21] Ferial El-Hawary, and Yuyang Jing, 'A Robust Pre-Filtering Approach to EKF Underwater Target Tracking', in *OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings (IEEE, 1993)*, pp. II/235-II/40 vol. 2.
- [22] DW Hou, FL Yin, and Liyan Zhang, 'Joint Sigma-Point Kalman Filter Based Bearing-Only Tracking', in *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, June 21-23 (2006)*, pp. 944-8.
- [23] Wang Yali, 'Bearings-Only Maneuvering Target Tracking Based on Stf and Ukf', in *Advanced Computer Theory and Engineering, 2008. ICACTE'08. International Conference on (IEEE, 2008)*, pp. 295-99.
- [24] Saifudin Razali, Keigo Watanabe, Shoichi Maeyama, and Kiyotaka Izumi, 'An Unscented Rauch-Tung-Striebel Smoother for a Bearing Only Tracking Problem', in *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on (IEEE, 2010)*, pp. 1281-86.
- [25] Ronghui Zhan, and Jianwei Wan, 'Iterated Unscented Kalman Filter for Passive Target Tracking', *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 43 (2007), 1155-63.
- [26] SA Gadsden, D Dunne, SR Habibi, and T Kirubarajan, 'Comparison of Extended and Unscented Kalman, Particle, and Smooth Variable Structure Filters on a Bearing-Only Target Tracking Problem', in *SPIE Optical Engineering+ Applications (International Society for Optics and Photonics, 2009)*, pp. 74450B-50B-13.
- [27] Alfonso Farina, 'Target Tracking with Bearings-Only Measurements', *Signal processing*, 78 (1999), 61-78.
- [28] Rudolph Emil Kalman, 'A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems', *Journal of basic Engineering*, 82 (1960), 35-45.
- [29] Rudolph E Kalman, and Richard S Bucy, 'New Results in Linear Filtering and Prediction Theory', *Journal of basic engineering*, 83 (1961), 95-108.
- [30] Robert Grover Brown Patrick YC Hwang, and Robert Grover Brown, 'Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering', *John Wiley & Sons, Inc*, 5 (1997), 39-45.
- [31] Yaakov Bar-Shalom, X Rong Li, and Thiagalingam Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software (John Wiley & Sons, 2004)*.
- [32] Konrad Reif, Stefan Günther, E YAZ SR, and Rolf Unbehauen, 'Stochastic Stability of the Discrete-Time Extended Kalman Filter', *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44 (1999), 714-28.
- [33] Kenneth S Miller, and Donald M Leskiw, 'Nonlinear Estimation with Radar Observations', *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on (1982)*, 192-200.
- [34] Pablo Pedregal, *Introduction to Optimization (Springer, 2004)*.
- [35] Randy L Haupt, and Sue Ellen Haupt, *Practical Genetic Algorithms (John Wiley & Sons, 2004)*.
- [36] Jorge Nocedal, and Stephen J Wright, *Conjugate Gradient Methods (Springer, 2006)*.
- [37] David E Goldberg, and John H Holland, 'Genetic Algorithms and Machine Learning', *Machine learning*, 3 (1988), 95-99.
- [38] SN Sivanandam, and SN Deepa, *Genetic Algorithm Optimization Problems (Springer, 2008)*.
- [39] Vahid Khorani, Nafiseh Forouzideh, and Ali Motie Nasrabadi, 'Artificial Neural Network Weights Optimization Using Ica, Ga, Ica-Ga and R-Ica-Ga: Comparing Performances', in *Hybrid Intelligent Models And Applications (HIMA), 2011 IEEE Workshop On (IEEE, 2011)*, pp. 61-67.

- [40] Riccardo Poli, James Kennedy, and Tim Blackwell, 'Particle Swarm Optimization', *Swarm intelligence*, 1 (2007), 33-57.
- [41] Bilal Alatas, Erhan Akin, and A Bedri Ozer, 'Chaos Embedded Particle Swarm Optimization Algorithms', *Chaos, Solitons & Fractals*, 40 (2009), 1715-34.
- [42] Esmail Atashpaz-Gargari, and Caro Lucas, 'Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition', in *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on (IEEE, 2007)*, pp. 4661-67.
- [43] Esmail Atashpaz-Gargari, and Caro Lucas, 'Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialistic Competition', in *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on (IEEE, 2007)*, pp. 4661-67.
- [44] Lotfi A Zadeh, 'Fuzzy Sets', *Information and control*, 8 (1965), 338-53.
- [45] Malek Masmoudi, and Alain Hait, 'A Tactical Model under Uncertainty for Helicopter Maintenance Planning', *MOSIM'10* (2010).
- [46] RG Brown, and Patrick YC Hwang, 'Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering: With Matlab Exercises and Solutions. 1997', (John Wiley and Sons, New York).
- [47] Robert J Fitzgerald, 'Divergence of the Kalman Filter', *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 16 (1971), 736-47.
- [48] JZ Sasiadek, and J Khe, 'Sensor Fusion Based on Fuzzy Kalman Filter', in *Robot Motion and Control, 2001 Proceedings of the Second International Workshop on (IEEE, 2001)*, pp. 275-83.
- [49] Babatunde Ayodeji Ogunnaike, and Willis Harmon Ray, *Process Dynamics, Modeling, and Control. Vol. 9* (Oxford University Press New York, 1994).
- [50] Raman K Mehra, 'On the Identification of Variances and Adaptive Kalman Filtering', *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 15 (1970), 175-84.
- [51] AH Mohamed, and KP Schwarz, 'Adaptive Kalman Filtering for Ins/Gps', *Journal of geodesy*, 73 (1999), 193-203.
- [52] BS Paik, and JH Oh, 'Gain Fusion Algorithm for Decentralised Parallel Kalman Filters', *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 147 (2000), 97-103.
- [53] Guanrong Chen, and Charles K Chui, 'A Modified Adaptive Kalman Filter for Real-Time Applications', *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 27 (1991), 149-54.
- [54] Ling Guan, 'A Neural Network Approach to Underwater Target Tracking', in *OCEANS'92. Mastering the Oceans Through Technology. Proceedings. (IEEE, 1992)*, pp. 173-78.



## **Abstract**

The area of sea and oceans is much more than land in the earth. This is the reason for importance of object detection and tracking under water in the commercial, leisure and defense field. Under water passive tracking is the subject of the thesis. It is investigated that the Fuzzy extended Kalman has better performance, in compare with other kind of the Kalman filter. The covariance matrix of the noise measurements in the Kalman filter is adjusted by using fuzzy method. The system consists of state equations describing the position and velocity of moving target in different directions. It is assumed the velocity is constant. The vector measurement model is studied in two cases: first, time differences between reflected signal from the surface and sea floor to the sensor is measured, in the second case, the vector measurement model is only the angle of the target. Finally, the fuzzy extended Kalman filter is tested for tracking. The results are compared with extended Kalman filter, tradition and Unscented Kalman filters. The results indicate that fuzzy extended Kalman filter show better estimate and less RMSE.

**Keywords:** Underwater targets tracking, The estimated position, Fuzzy kalman filter, Optimization, Bearings only target





**Shahrood University of Technology**  
**Department of Electrical and Robotic Engineering**

# **Underwater Single Target Passive Tracking Using a Fuzzy Extended Kalman Filter**

**Amir Hossein nasseri Solhdar**

**Supervisor:**

**Dr. Heydar Tusian Shandiz**

**2015**