

## کاربرد مفهوم ظرفیت جذب انرژی در تحلیل پایداری سیستم های چند عاملی

کریم رحمانی<sup>۱</sup>، احمد افشار<sup>۲</sup>، علی اکبر جمشیدی فر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، پژوهشکده برق و فن آوری اطلاعات، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، k\_rahmani2003@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، aafshar@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشکده برق و فن آوری اطلاعات، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، gamshidifar@irost.org

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۰/۱/۱۷، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۰/۲/۳)

**چکیده:** امروزه تحلیل پایداری<sup>۱</sup> یک موضوع حیاتی در سیستم های واقعی از جمله سیستم های چند عاملی<sup>۲</sup> می باشد. در این مقاله مفهوم جدید ظرفیت جذب انرژی<sup>۳</sup> برای تحلیل پایداری سیستم های چند عاملی توسعه داده شده است. ظرفیت جذب انرژی در هر نقطه تعادل یک سیستم، ماکزیمم انرژی جذب شده در سیستم به شرط پایدار بودن نقطه تعادل تعریف شده است. در این مقاله عامل<sup>۴</sup> یک موجود هایبرید<sup>۵</sup> شامل تعدادی مود در نظر گرفته شده است که دارای قابلیت سیر تکامل پیوسته درون هر مود و همچنین انتقال بین مودها می باشد. سیستم چند عاملی نیز متشکل از چندین عامل بوده که هر یک فعالیت خود را از یک شرایط اولیه خاص آغاز نموده و با همکاری دیگر عامل ها به دنبال دستیابی به یک هدف مشترک از پیش تعریف شده می باشند. در این مقاله، قابلیت مفهوم ظرفیت جذب انرژی در تحلیل پایداری عامل و سیستم های چند عاملی نشان داده شده است. در خاتمه، کار آرایشی روش ارائه شده با انجام پیاده سازی روش پیشنهادی بر روی دو پروسه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** پایداری، ظرفیت جذب انرژی، عامل، سیستم های چند عاملی، موجود هایبرید.

### Application of Energy Absorption Capacity Concept for Stability Analysis of Multi-Agent Systems

Karim Rahmani, Ahmad Afshar, Ali Akbar Jamshidifar

**Abstract:** The issue of stability analysis of multi-agent systems (MASs) is focal point in this paper. In this paper, new concept of “Energy Absorption Capacity (EAC)” is extended to analyze the stability of MAS. EAC is defined for every equilibrium point of a system and is the maximum absorbed energy by the system preserving the stability of that point. An agent is considered a hybrid entity compromising a number of modes with continuous evolution within the modes and transition between them. A MAS is a group of agents that start from an initial state and cooperate with each other to achieve a pre-determined goal. In this work, it is shown that the EAC concept has good potential for stability analysis of both agent and multi-agent (MAS) systems. Finally, two examples are presented to support the proposed approach.

**Keywords:** Stability, Energy Absorption Capacity (EAC), Absolute EAC, Instantaneous EAC, Hybrid Agent, Multi-Agent Systems.

<sup>1</sup> Stability

<sup>2</sup> Multi-Agent System

<sup>3</sup> Energy Absorption Capacity

<sup>4</sup> Agent

<sup>5</sup> Hybrid Entity

## ۱- مقدمه

تکنولوژی های مبتنی بر سیستم عامل در زمینه های کاربردی در مراحل مختلف خطوط تولید در لایه های محلی و جهانی مخصوصا در توسعه الگوریتم های کنترلی توزیع شده خط تولید کاربرد داشته است [۱] و [۲]. همچنین در زمینه سیستم های چند رباتی همکار، سیستم های حمل و نقل شهری و وسایل نقلیه هوشمند کاربرد سیستم های چند عاملی ملاحظه شده است [۳]. در سیستم چند عاملی، دانشمندان کامپیوتر به خاصیت های عملی سیستم از قبیل هماهنگی، منطق و استدلال و یادگیری علاقه مند بوده ولیکن برای مهندسين کنترل که بیشتر علاقه به پیاده سازی این سیستم ها دارند، پایداری سیستم جایگاه ویژه ای دارد.

پایداری یک خاصیت مهم در سیستم می باشد و در صورت عدم تحقق آن، سیستم ناپایدار و بدون استفاده می گردد. در مطالعه و بررسی سیستم های دینامیکی، کلاسه های مختلفی از مسائل پایداری مطرح می باشند. در این راستا روش های گوناگونی جهت مقابله با این مسئله مطرح شده اند. از جمله روش های شناخته شده، روش لیپانوف<sup>۶</sup> در مطالعه پایداری نقاط تعادل می باشد. روش دیگر مطرح شده، روش ورودی-خروجی<sup>۷</sup> بوده که در آن تفصیل پایداری بر آن اساس می باشد که اعمال ورودی محدود شده به سیستم منجر به خروجی محدود شده در سیستم گردد [۴] و [۵]. روش دیگر تحلیل پایداری سیستم های فیزیکی، قضیه انفعال<sup>۸</sup> می باشد که بر پایه ورودی و خروجی سیستم و انرژی آن استوار است [۶]. در زمینه تحلیل پایداری سیستم های چند عاملی، تحقیقات متعددی در مقالات گزارش شده است [۷] و [۸] و [۹] و [۱۰] و [۱۱]. از جمله این تحقیقات، در نظر گرفتن سیستم های چند عاملی در قالب حالت های مجزا و بکارگیری روش های آماری در تحلیل پایداری آن ها می باشد. تمرکز محققین دیگر در طبقه بندی دیگری از سیستم های چند عاملی از قبیل گروه و یا به عبارتی حرکت دسته جمعی می باشد، که مدل سازی دینامیکی عامل ها انجام شده و با استفاده از روش های موجود از قبیل لیپانوف، تحلیل پایداری سیستم را انجام داده اند.

در این مقاله، مفهوم ظرفیت جذب انرژی جهت بنا نهادن شرایط پایداری یک عامل (موجود های پدید) و پایداری سیستم های چند عاملی بسط داده شده است. روش پیشنهادی بطور خاص مناسب سیستم هایی

می باشد که در مدلسازی آن ها از روش های شی گرا<sup>۹</sup> و روش مدلسازی بلوک تابع<sup>۱۰</sup> [۱۲] و [۱۳] استفاده شده است. مفهوم جدید پیشنهادی همخوانی لازم را با تحقیقات گذشته محققین در توسعه روش های مدلسازی و کنترل سیستم های توزیع شده [۱۴] و [۱۵] و همچنین تحلیل پایداری آن ها دارد [۱۶] و [۱۷]. نقش انرژی در مدلسازی فیزیکی سیستم ها در گذشته بنا نهاده شده است و چندین قالب کاری شناخته شده در مدلسازی توسعه داده شده است [۱۸] و [۱۹]. بر اساس بررسی های انجام شده، تنها تحقیقات مربوطه در زمینه تحلیل پایداری سیستم های چند عاملی، در زمینه رباتیک می باشد که در آن حداقل انرژی پتانسیل مورد نیاز جهت واژگون کردن ربات در اطراف تکیه گاه چند ضلعی آن<sup>۱۱</sup> حاشیه انرژی پایداری<sup>۱۱</sup> تعریف شده است. این حاشیه انرژی مناسب مطالعات پایداری سیستم های استاتیک بوده و توسعه حاشیه انرژی پایداری که منجر به تعریف حاشیه پایداری دینامیکی<sup>۱۲</sup> شده است جهت معرفی راهکاری مناسب برای مطالعه پایداری سیستم های دینامیکی (حرکت ربات) می باشد [۲۰] و [۲۱].

بسط مفهوم ظرفیت جذب انرژی پیشنهادی در این مقاله در راستای معیار های توسعه یافته جهت تحلیل پایداری سیستم های چند عاملی بوده و در بر گیرنده حالت های پیوسته درون هر مود و سوئیچینگ بین مود ها می باشد. مقاله پیشنهادی متشکل از بخش های مختلف می باشد. در بخش ۲، مفهوم ظرفیت جذب انرژی در توسعه معیار پایداری سیستم های دینامیکی ارائه شده و در بخش ۳ بسط آن برای تحلیل پایداری سیستم های تک عامل و چند عاملی انجام شده است. در بخش ۴ مقایسه بین روش لیپانوف و روش جذب انرژی آورده شده است. نهایتا در بخش ۵ دو مثال کاربردی جهت نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی و نتایج پیاده سازی ارائه شده و در خاتمه (بخش ۶) نتیجه گیری و پیشنهادات در ارتباط با موضوع تحقیق در آینده مطرح شده است.

## ۲- کاربرد ظرفیت جذب انرژی در توسعه معیارهای پایداری برای حالت های پیوسته

از نقطه نظر لیپانوف، نقطه تعادل یک سیستم پایدار است اگر تمام حالات شروع شده از نقاط مجاور آن نقطه تعادل در همسایگی آن

<sup>9</sup> Object-Oriented Methodology

<sup>10</sup> Function Block Modeling

<sup>11</sup> Edge Stability Margin

<sup>12</sup> Dynamic Stability Margin

<sup>6</sup> Lyapunov

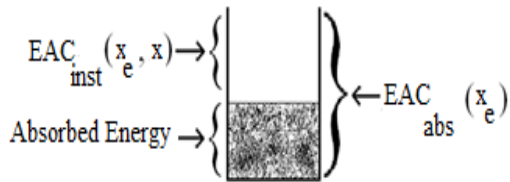
<sup>7</sup> Input-Output

<sup>8</sup> Passivity Theorem

تعریف شده است. گام بعدی توسعه معیار پایداری با شرایط مرزی دیگر در یک سیستم می باشد. جهت بسط مفهوم ظرفیت جذب انرژی به شرایط فوق عبارت جدید ظرفیت جذب انرژی مطلق تعریف شده است. **تعریف ۴:** فرض کنید سیستم (۱) در شرایط اولیه  $x_0$  باشد و یا به عبارت دیگر انرژی اولیه  $E(x_0)$  را جذب کرده باشد. ظرفیت جذب انرژی لحظه ای آن در حالت اولیه  $x_0$  به صورت اختلاف ظرفیت جذب انرژی مطلق سیستم و انرژی جذب شده آن تعریف می شود.

$$EAC_{inst}(x_e, x_0) = EAC_{abs}(x_e) - E(x_0) \quad (۳)$$

بعنوان یک مثال، ظرفیت جذب انرژی لحظه ای یک فنر خطی برابر  $\frac{1}{2}kx^2$  باشد که در آن عبارت دوم نشان دهنده انرژی پتانسیل ذخیره شده در تغییر طول فنر می باشد. جهت درک بهتر مفاهیم ظرفیت جذب انرژی لحظه ای و مطلق یک سیستم و ارتباط بین آن ها، شکل شماتیکی (۱) پیشنهاد شده است.



شکل ۱: نمایش شماتیک ظرفیت جذب انرژی مطلق و آنی

در ادامه دو قضیه زیر در خصوص ارتباط بین ظرفیت جذب انرژی و پایداری سیستم بیان می شود.

#### قضیه ۱:

فرض کنید  $x_e = 0$  یک نقطه تعادل سیستم (۱) باشد.  $x_e$  پایدار است اگر و فقط اگر ظرفیت جذب انرژی مطلق سیستم در آن نقطه تعادل بزرگتر از صفر باشد. بعبارت دیگر

$$EAC_{abs}(x_e) > 0$$

اثبات قضیه فوق در مرجع [۱۷] ارائه شده است.

#### قضیه ۲:

نقطه تعادل  $x_e = 0$  در سیستم (۱) پایدار مجانبی است اگر و فقط اگر پایدار بوده و

باقی بمانند و در غیر اینصورت سیستم ناپایدار می باشد [۴]. همچنین سیستم در آن نقطه تعادل پایدار مجانبی می باشد به شرط آنکه تمام حالات شروع شده از نقاط مجاور آن نقطه تعادل در مجاورت آن باقی مانده و با افزایش زمان به سمت آن نقطه تعادل میل کنند. تعریف دیگر از پایداری بر اساس قضیه انفعال ارائه شده است که در آن یک رابطه بین پایداری و انرژی سیستم بیان شده است [۶].

در این بخش بر اساس معیار های لیاپانوف و انفعال و مفهوم جدیدی بنام ظرفیت جذب انرژی، معیار مناسبی جهت تحلیل پایداری نقاط تعادل سیستم ارائه شده است. بر اساس مفهوم ظرفیت جذب انرژی، هر نقطه تعادل یک سیستم پایدار است اگر ظرفیت جذب انرژی آن مثبت بوده و ناپایدار است اگر ظرفیت جذب انرژی آن منفی باشد. همچنین پایدار مجانبی است اگر علاوه بر پایدار بودن، ظرفیت جذب انرژی لحظه ای با افزایش زمان به ظرفیت جذب انرژی مطلق آن میل کند. در ادامه تعاریف زیر برای توسعه معیار ها بیان شده اند. شرح و تفصیل این تعاریف در مرجع [۱۶] آورده شده است.

**تعریف ۱:** ظرفیت جذب انرژی مطلق سیستم<sup>۱۳</sup>، حداکثر میزان انرژی قابل جذب توسط سیستم است بگونه ای که به ازای بیش از آن سیستم به وضعیت غیر قابل برگشت برود.

**تعریف ۲:** برای یک المان ذخیره کننده انرژی، ظرفیت جذب انرژی مطلق در نقطه تعادل آن بصورت زیر تعریف می شود.

$$EAC_{abs}(x) = E(x) \Big|_{x_{EAC}}$$

که در آن  $x$  متغیری است که المان در آن راستا می تواند انرژی ذخیره نماید،  $E(x)$  انرژی ذخیره شده در المان و در راستای  $x$  و  $x_{EAC}$  نشان دهنده حداکثر مقدار  $x$  است که المان به ازای بیش از آن به وضعیت غیر قابل برگشت می رود.

**تعریف ۳:** سیستم دینامیکی زیر با نقطه تعادل  $x_e$  را در نظر بگیرید.

$$\dot{x} = f(x), f(x_e) = 0 \quad (۱)$$

ظرفیت جذب انرژی مطلق به صورت زیر تعریف شده است

$$EAC_{abs}(x_e) = \min_i E(x_i) \Big|_{x_i \in EAC} \quad (۲)$$

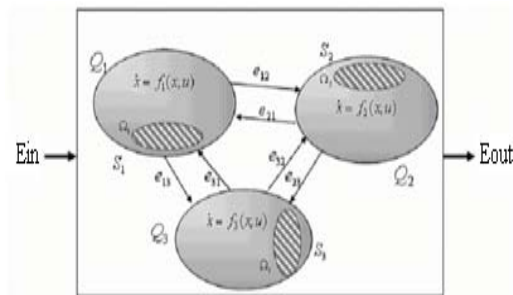
که در آن  $E(x_i)$  انرژی ذخیره شده در  $x_i$  است. تا کنون ظرفیت جذب انرژی مطلق سیستم در ارتباط با نقاط تعادل

<sup>13</sup> Absolute Energy Absorption Capacity

تفاوت درون هر مود یک عامل نشان داده شده و حالت های مستقل همان مود های یک سیستم می باشند. عامل با متغیر  $A(Q, X)$  نشان داده شده که در آن  $Q$  نشان دهنده حالت های مستقل (یا مود ها) و  $X$  نشان دهنده حالت های پیوسته می باشد. درون هر مود، عامل دارای سیر تکاملی پیوسته می باشد. شکل (۲)، ساختار داخلی یک عامل هایبرید را به تصویر می کشاند. عامل فوق متشکل از سه مود مستقل  $Q_1, Q_2, Q_3$  می باشد. دینامیک داخلی هر عامل درون هر مود توسط معادله دیفرانسیلی زیرین تشریح شده است.

$$\dot{x} = f_1(x, u)$$

حالت پیوسته  $X$  متعلق به فضای حالت  $S_1$  می باشد. مناطق سایه دار  $\Omega_i$  درون هر فضای حالت نشان دهنده مناطق نامن می باشند و حوادث عامل ها  $e_{ij}$  که باعث انتقال بین مود ها  $Q_i$  می گردند در اثر دریافت ورودی های خارجی  $E_{in}$  و یا توسط سیر تکاملی حالت ها در راستای دستیابی به مقادیر از پیش تعریف شده می باشد. بعضی از این حوادث و یا توالی خاص خود، مولد خروجی های خارجی عامل می شوند ( $E_{out}$ ).



شکل ۲: ساختار داخلی موجود هایبرید

روشی که عامل در نحوه برخورد با حوادث و تغییر مودها اتخاذ می نماید مربوط به خواص استقلال و انعطاف پذیری آن می باشد. استقلال عامل ها بدلیل داشتن نوعی کنترل در پذیرفتن و یا رد کردن حوادث دریافت شده می باشد که منجر به تغییر و یا عدم تغییر مود می گردد. انعطاف پذیری یک عامل مربوط به چگونگی نحوه برخورد با حوادث ورودی و زمان و روش تولید شدن حوادث خروجی می باشد. این موضوع می تواند در ارتباط با دیگر خواص عامل ها از قبیل هوش و یادگیری بسط پیدا کند.

### ب - پایداری یک عامل

برای بحث در مورد پایداری یک سیستم عامل، یک عامل متشکل از ۳ مود طبق شکل (۲) در نظر گرفته شده است. در واقع عامل هایبرید

$$EAC(x, x) \rightarrow EAC(x) \text{ as } t \rightarrow \infty$$

inst eq                      abs eq

اثبات قضیه فوق در مرجع [۱۷] ارائه شده است.

## ۳- بسط ظرفیت جذب انرژی به تحلیل

### پایداری عامل و سیستم های چند عاملی

در این بخش، مفهوم ظرفیت جذب انرژی جهت تحلیل پایداری

سیستم های چند عاملی توسعه داده شده است. در ابتدا به منظور نشان دادن قابلیت مفهوم ظرفیت جذب انرژی در تحلیل پایداری عامل و سیستم های چند عاملی، یک مثال کیفی اجتماعی ارائه شده است.

فردی را در نظر بگیرید که در یک جامعه زندگی کرده و نحوه تعامل او با دیگران از طریق تعامل اقتصادی می باشد. زندگی عادی او در جامعه را می توان بعنوان یک نقطه تعادل تصور نمود. اعتبار اقتصادی این فرد میزان سرمایه وی و درآمدی است که می تواند کسب نماید. از طرف دیگر زندگی در اجتماع هزینه های مختلف اقتصادی را به وی تحمیل می کند. بطور معمول بخشی از سرمایه و درآمد این فرد صرف هزینه های جاری زندگی شده و بخش دیگر صرف هزینه های پیش بینی نشده می شود. واضح است که هر چقدر میزان سرمایه و درآمد یک فرد بیشتر باشد و هزینه های معمول زندگی بخش کمتری از این سرمایه و درآمد وی را در برگیرد، ثبات اقتصادی این فرد بیشتر است. از دیدگاه مفهوم ظرفیت جذب انرژی، اعتبار اقتصادی این فرد همان ظرفیت جذب انرژی وی و هزینه های معمول پیش بینی نشده زندگی، انرژی است که به وی تحمیل می شود. بدیهی است هر چقدر ظرفیت جذب انرژی این فرد بالاتر باشد، امکان تحمل هزینه های اضافی بیشتری را در زندگی خود دارد و در صورتی که هزینه زندگی بیش از توان اقتصادی وی باشد، عملاً از لحاظ اقتصادی ورشکسته می شود که می توان به ناپایداری اقتصادی وی تعبیر نمود.

در این بخش، نخست یک سیستم عامل هایبرید تشریح شده و سپس مفهوم ظرفیت جذب انرژی برای تحلیل پایداری عامل و سیستم های چند عاملی توسعه داده می شود.

### الف - موجود هایبرید

در این تحقیق، عامل یک موجود هایبرید در نظر گرفته شده است که شامل تعدادی مود مستقل با تکامل پیوسته درون هر مود بوده و ارائه دهنده ارزش های پیوسته و رویداد های مستقل با رفتار دینامیکی می باشد. حالت های ارزش پیوسته توسط معادلات دیفرانسیلی و معادلات

یک سیستم سوئیچینگ می باشد، در جایی که دو مفهوم در بحث پایداری بایستی در نظر گرفت. اول، تحلیل پایداری حالت های پیوسته درون هر مود و دوم تحقیقات بر روی اثرات سوئیچینگ بین مود ها [ ۲۶ ] مد نظر می باشد.

پایداری حالت های پیوسته درون هر مود می تواند بطور مستقیم توسط روش ظرفیت جذب انرژی (بخش ۲) بررسی گردد. فرض کنید  $x_e$  نقطه تعادل هر مود باشد. بنابر این

$$x_e \in S \setminus \Omega$$

$$f_i(x_e, 0) = 0, \quad \forall t \geq t_e$$

که در آن  $t_e$  نشان دهنده زمان رسیدن به  $x_e$  می باشد. دینامیک حالت های پیوسته عامل درون هر مود توسط رابطه زیر توصیف می شود.

$$\dot{x} = f_i(x, u)$$

با توجه به قضایای ۱ و ۲ بخش ۲، سیستم پایدار است اگر و فقط اگر:

$$EAC_{abs}(x_e) > 0$$

پایدار مجانبی است اگر و فقط اگر:

1 - Stable

$$2 - EAC_{inst}(x_{eq}, x) \rightarrow EAC_{abs}(x_{eq}) \text{ as } t \rightarrow \infty$$

در صورتی که بخشی از فضای حالت درون هر مود بعنوان منطقه ناامن  $\Omega$  شناخته شود، حالت های پیوسته عامل نباید وارد این مناطق نا امن شود و در غیر اینصورت ناپایدار خواهد شد. این بدان معنی است که انرژی جذب شده توسط سیستم پیش از ظرفیت انرژی جذب شده لحظه ای در منطقه نا امن می باشد. هر چند ممکن است برخی مودها دارای مناطق نا امن درون خود نباشند، بنابراین عامل تا زمانی که درون آن مود ها است، پایدار می باشد.

شق دیگر پایداری عامل، مربوط به سوئیچینگ بین مود های گسسته آن می باشد. روش رایج برای تحلیل سیستم های سوئیچینگ با فرکانس سوئیچ دلخواه و البته محدود، روش توابع لیاپانوف مشترک (چندگانه)<sup>۱۴</sup> می باشد [ ۲۶ ] و [ ۲۷ ].

با توجه به اینکه فرکانس سوئیچینگ بین مود ها محدود است، بنابراین می توان یک  $\tau > 0$  یافت که زمان بین دو سوئیچ متوالی از آن کوچکتر نباشد. در بازه زمانی

$$t \in [t_i, t_{i+1})$$

که

$$t_{i+1} - t_i \geq \tau$$

در مود  $Q_i$  قرار گرفته باشد.

با توجه به مطالب بیان شده در بخش دوم، عامل در این مود تا زمانیکه ظرفیت جذب انرژی لحظه ای آن مثبت باشد، پایدار بوده و در غیر اینصورت ناپایدار می گردد. ظرفیت جذب انرژی لحظه ای  $x_e$  در مود  $Q_i$  در زمان  $t_i$  را با  $EAC_{inst}(x_e, x(t_i))$  نشان می دهیم. همچنین تصور کنید  $t_j$  زمانی می باشد که در آن عامل مجدداً به مود  $Q_i$  سوئیچ می نماید. جهت تضمین پایداری عامل، ظرفیت جذب انرژی لحظه ای  $x_e$  در مود  $Q_i$  و در زمان  $t_j$  که برابر  $EAC_{inst}(x_e, x(t_j))$  است، نبایستی کمتر از  $EAC_{inst}(x_e, x(t_i))$  باشد. به عبارت دیگر میزان انرژی جذب شده عامل هر بار که وارد مود  $Q_i$  می شود نباید بیشتر از مقدار آن در زمان های قبلی ورود به این مود باشد.

بعلاوه، برخی انتقالات خاص بین مود ها ممکن است منجر به ناپایداری در سیستم گردد. این انتقالات می تواند در مرحله طراحی مشخص و به عنوان انتقال غیر مجاز مشخص گردند. برای مثال یک موتور القائی را با سه مود: ۱-آماده بکار، ۲-شروع و ۳-عملکرد نرمال در نظر بگیریم. برای سیستم فوق، در صورتیکه انتقال از مود آماده بکار به مود عملکرد نرمال به طور مستقیم انجام شود، ممکن است به موتور خسارت وارد نموده و بنابراین ممنوع می باشد. بنابر این عملکرد صحیح یک موتور القائی از مود آماده به کار آغاز شده و سپس مدتی در مود شروع باقی مانده و نهایتاً وارد مود عملکرد نرمال می گردد. در مود عملکرد نرمال، مقادیر غیر مجاز سرعت و جریان موتور که همان متغیر های حالت می باشند، را می توان مناطق نا امن معرفی نمود که سیستم باید از ورود به آن نواحی خودداری نماید. در نتیجه یک عامل پایدار است اگر شرایط زیر برقرار باشند:

۱- ظرفیت جذب انرژی مطلق عامل درون هر مود مثبت باشد.

۲ - حالت های سیستم از تکامل به مناطق نا امن  $x \in S_i \setminus \Omega_i$  اجتناب کنند.

۳- ظرفیت جذب انرژی لحظه ای عامل در مود  $Q_i$  نبایستی در زمان های متناوب ورود به این مود کاهش یابد.

$$EAC_{inst}(x_e, x(t_j)) \geq EAC_{inst}(x_e, x(t_i)) \quad (۴)$$

<sup>14</sup> Common (Multiple) Lyapunov Functions

که انرژی اولیه آن کمتر از ظرفیت جذب انرژی مجموعه هدف باشد یعنی

$$\Xi(\Theta_0) < EAC_{abs}(\Theta_d)$$

آنگاه با افزایش تعداد مود های میانی که سیستم از آن ها گذشته است،  
 $EAC_{inst}(\Theta_d, \Theta_k) \rightarrow EAC_{abs}(\Theta_d)$  as  $k \rightarrow \infty$   
 دسترسی به مجموعه هدف از طریق مود های میانی و از طریق انتقال  
 برخی رخدادهای بین عامل ها میسر می باشد. برای این منظور لازم است  
 که عامل ها پایدار درونی باشند تا پاسخ به رخدادهای مختلف آن ها را  
 ناپایدار ننمایند. در نتیجه، شرایط پایدار بودن سیستم چند عاملی به شرح  
 زیر می باشد.

۱- هر عامل یک سیستم درونی پایدار باشد.

$$\Xi(\Theta_0) < EAC_{abs}(\Theta_d)$$

۲- برای هر شرایط اولیه  $\Theta_0$  که انرژی جذب شده آن کمتر از  
 ظرفیت جذب انرژی مجموعه هدف سیستم چند عاملی باشد،

$$\Xi(\Theta_0) < EAC_{abs}(\Theta_d)$$

و رابطه زیرین بایستی برقرار باشد.

$$EAC_{inst}(\Theta_d, \Theta_k) \rightarrow EAC_{abs}(\Theta_d)$$

as  $k \rightarrow \infty$

(۵)

#### ۴- مقایسه روش لیاپانوف و روش ظرفیت جذب انرژی

روش های لیاپانوف و ظرفیت جذب انرژی هر دو بر مبنای انرژی  
 هستند. بنابراین شباهتهای زیادی با هم دارند. هر چند که تفاوت هایی  
 نیز دارند. هر دو روی پایداری نقطه تعادل سیستم تمرکز می کنند. هر  
 دو بر مبنای یک تابع انرژی برای تحلیل پایداری عمل می کنند که  
 تعیین این تابع انرژی برای برخی سیستم ها ممکن است سخت ترین  
 مرحله تحلیل باشد.

ممکن است ادعا شود که تعیین ظرفیت جذب انرژی مناسب یک  
 سیستم یک مرحله چالش برانگیز آن است. ولی این ادعا در صورتی  
 درست است که فقط توصیف ریاضی سیستم در دسترس باشد. ولی اگر  
 اطلاعات فیزیکی سیستم نیز معلوم باشد، ظرفیت جذب انرژی سیستم را  
 می توان راحتتر محاسبه نمود. این کار با استفاده از تجزیه سیستم به  
 المان های اصلی تشکیل دهنده آن که در واقع المان های ساده ذخیره  
 کننده انرژی و تلفاتی هستند، انجام خواهد شد. ظرفیت جذب انرژی  
 این المان ها براحتی از روی اطلاعات دینا شیت آن ها و یا توسط  
 آزمایشات ساده قابل تعیین خواهد بود.

چنانکه  $t_1$  و  $t_j$  زمان های ورود اول و دوم عامل به مود  $Q_j$  می  
 باشند.

۴- عامل بایستی از بعضی انتقالات مستقیم اجتناب بنماید.

برای عامل های بدون دینامیک مانند عامل های نرم افزاری، شرط اول  
 فوق قابل صرف نظر می باشد. از طرف دیگر، برای عامل هایی که  
 فقط یک مود دارند، فقط شرط اول بایستی بررسی گردد.

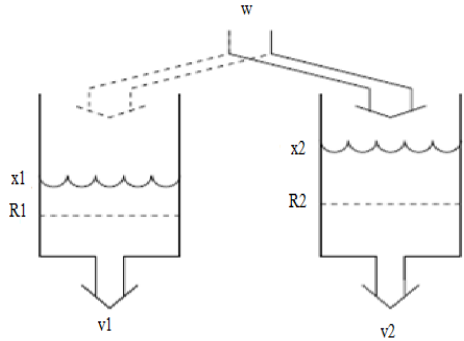
#### ج- پایداری سیستم های چند عاملی

یک سیستم چند عاملی مطلوب معمولاً از یک شرایط اولیه  
 $\Theta_0$  شروع نموده و سعی می کند از طریق تعداد محدودی مود های  
 میانی  $\Theta_k$  به هدف  $\Theta_d$  دست یابد. اگر مجموعه هدف یک  
 مجموعه نامتغیر<sup>۱۵</sup> تعریف شود، هر انتقال مود درون آن برای همیشه  
 درون آن باقی می ماند. بنابراین پایداری یک سیستم چند عاملی  
 منسوب را می توان به پایداری مجانبی مجموعه هدف  $\Theta_d$  مرتبط  
 نمود. فرض کنید که  $\rho(\Theta_0, \Theta_d)$  نشان دهنده فاصله بین مجموعه  
 اولیه  $\Theta_0$  و مجموعه هدف  $\Theta_d$  باشد. این فاصله را می توان به  
 اختلاف انرژی بین آن دو مجموعه متناظر نمود. این اختلاف انرژی  
 برای هر دو مود متوالی به فرم

$$\rho(\Theta_{k-1}, \Theta_k) = \Xi(\Theta_{k-1}) - \Xi(\Theta_k)$$

قابل بیان است که در آن  $\Xi(\Theta_k)$  انرژی سیستم در مود میانی  
 $\Theta_k$  می باشد. بنابراین  $\rho(\Theta_k, \Theta_d)$  نشان دهنده اختلاف انرژی  
 جذب شده سیستم در مود  $\Theta_k$  نسبت به مجموعه اهداف  $\Theta_d$  می  
 باشد. بر اساس قضیه لیاپانوف، سیستم چند عاملی پایدار است و یا به  
 طور معادل، مجموعه هدف آن پایدار مجانبی می باشد اگر  
 $\rho(\Theta_k, \Theta_d)$  در هر  $k$  کاهش یابد و به ازای  $k \rightarrow \infty$  مقدار  
 $\rho(\Theta_k, \Theta_d)$  به سمت صفر میل کند. از نقطه نظر ظرفیت جذب  
 انرژی، هر گونه انحراف از نقطه تعادل بدلیل جذب انرژی توسط سیستم  
 می باشد. فرض کنید که سیستم با جذب انرژی  $E_0 = \Xi(\Theta_0)$   
 وارد شرایط اولیه  $\Theta_0$  شده است. همچنین فرض کنید  
 $EAC_{abs}(\Theta_d)$  ظرفیت جذب انرژی مطلق مجموعه اهداف بوده و  
 $EAC_{inst}(\Theta_d, \Theta_k) = EAC_{abs}(\Theta_d) - \Xi(\Theta_k)$   
 جذب انرژی لحظه ای در هر مود میانی  $\Theta_k$  می باشد. مجموعه  
 هدف بطور مجانبی پایدار می باشد اگر برای هر شرایط اولیه  $\Theta_0$

<sup>15</sup> Invariant Set



شکل ۳: سیستم ذخیره و توزیع آب

شکل (۴) نشان دهنده ساختار داخلی این سیستم می باشد، که در آن عامل دارای دو مد مستقل  $q_1$ ،  $q_2$  بوده و دینامیک داخلی مود  $q_1$ ،  $q_2$  به ترتیب توسط روابط زیر نشان داده شده است.

$$dx_1/dt = W - V_1 \quad (۶)$$

$$dx_2/dt = -V_2$$

$$x_2 \geq R$$

$$dx_1/dt = -V_1 \quad (۷)$$

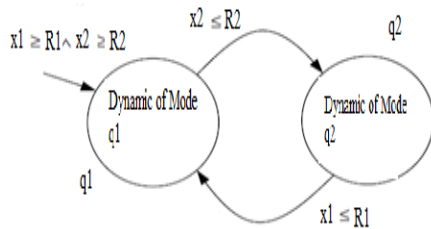
$$dx_2/dt = W - V_2$$

$$x_2 \geq R$$

هدف این سیستم نگه داشتن سطح آب ( $x_1$ ،  $x_2$  متغیرهای حالت سیستم و نشان دهنده سطوح آب در مخازن ۱ و ۲) در مخازن ۱ و ۲ بالای سطوح مرجع  $R_1$ ،  $R_2$  می باشد. هدف کنترل، تضمین قیود زیر می باشد.

$$x_1 > R_1 \text{ and } x_2 > R_2$$

از طرف دیگر، رخداد های ( $x_2 \leq R_2$ ،  $x_1 \leq R_1$ ) که منجر به انتقال از یک مود به مود دیگر می شود، حاصل تکامل حالت های پیوسته در رسیدن به مقادیر از پیش تعریف شده  $R_1$ ،  $R_2$  می باشد.



شکل ۴: ساختار داخلی سیستم ذخیره و توزیع آب

برای تحلیل پایداری سیستم ذخیره و آبرسانی، یک عامل هایبرید با دو مود در شکل (۴) نشان داده شده است. در واقع این عامل هایبرید یک سیستم سوئیچ می باشد که در آن دو مفهوم پایداری مطرح می باشند. (۱) تحلیل پایداری حالت های پیوسته درون هر مود و (۲) تحقیق

تحلیل پایداری در روش لیپانوف بر اساس یک تابع شبه انرژی (کاندیدای لیپانوف) انجام می شود. در صورت یافتن این تابع می توان پایداری را تحلیل نمود و در غیر اینصورت نمی توان در این خصوص اظهار نظر کرد. علاوه بر این توابع لیپانوف مختلف، تخمین های مختلفی از نواحی پایداری ارائه می دهند. به این دلیل است که روش لیپانوف یک شرط کافی برای پایداری و ناپایداری ارائه می دهد.

در روش ظرفیت جذب انرژی، تحلیل پایداری بر اساس مقدار حد بالای تابع انرژی و نه خود تابع انجام می شود. یک سیستم تا زمانیکه انرژی جذب شده آن کمتر از این مقدار باشد پایدار باقی می ماند و بر عکس. بنابراین می توان ادعا نمود که روش ظرفیت جذب انرژی نسبت به روش لیپانوف کمتر محافظه کارانه است.

همچنین ظرفیت جذب انرژی معیار ملموس تری از پایداری ارائه می دهد چرا که پایداری را به یک مقدار اسکالر ربط می دهد. با کمک آن می توان میزان پایداری در سیستم را با هم مقایسه نمود. هر چقدر ظرفیت جذب انرژی بیشتر باشد، پایداری بیشتر است و بر عکس. بنابر این از این روش می توان برای مقایسه پایدار کننده های مختلف برای یک سیستم مشخص نیز استفاده نمود.

## ۵- پیاده سازی

کار آرای روش پیشنهادی بر روی دو پروسه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. پروسه اول، یک سیستم ذخیره و توزیع آب متشکل از دو مخزن می باشد که در آن سیستم اصلی نشان دهنده یک عامل هایبرید می باشد و هدف دستیابی به اهداف از پیش تعریف شده است. پروسه دوم یک سیستم چند عاملی تعقیب - گریز می باشد که در آن عملیات از یک مجموعه شرایط اولیه آغاز شده و از طریق مد های میانی محدود به هدف نهایی، که دستگیری عامل فراری است، دست می یابد.

### الف- سیستم ذخیره و توزیع آب

شکل (۳) نشان دهنده دو مخزن آب می باشد که هر دو دارای خروجی آب با تغییرات حجمی در واحد زمان و مستقل از یکدیگر می باشند [۲۹]. آب ورودی به سیستم با تغییرات حجمی در واحد زمان از طریق یک شیر در هر لحظه از زمان می تواند به یکی از دو مخزن هدایت گردد.

در ارتباط با اثرات سوئیچ بین مود ها. طبق تعریف ۱ این سیستم را پایدار گوئیم اگر به وضعیت برگشت پذیر نرود. وضعیت برگشت پذیر در این سیستم وضعیتی است که آب از مخازن سر ریز شده و بیرون بریزد که در این صورت سیستم عملاً ناپایدار شده است. جهت تحلیل پایداری هر مخزن، ظرفیت جذب انرژی مطلق مخزن ۱ و ۲ در نقاط تعادل باید تعریف شود. در اینجا ظرفیت جذب انرژی سیستم معادل حداکثر حجم آب است که می شود داخل مخزن ریخت بدون آنکه سرریز شود.

در ارتباط با اثرات سوئیچ بین مود ها. طبق تعریف ۱ این سیستم را پایدار گوئیم اگر به وضعیت برگشت پذیر نرود. وضعیت برگشت پذیر در این سیستم وضعیتی است که آب از مخازن سر ریز شده و بیرون بریزد که در این صورت سیستم عملاً ناپایدار شده است. جهت تحلیل پایداری هر مخزن، ظرفیت جذب انرژی مطلق مخزن ۱ و ۲ در نقاط تعادل باید تعریف شود. در اینجا ظرفیت جذب انرژی سیستم معادل حداکثر حجم آب است که می شود داخل مخزن ریخت بدون آنکه سرریز شود.

$$EAC_{abs\ i} = A_i H_i$$

که در آن  $A_i$  سطح مقطع و  $H_i$  ارتفاع مخزن  $A_i$  می باشد.

اگر سطح آب در هر کدام از مخازن از ارتفاع ماکزیموم مخزن تجاوز نماید، آب از مخزن سر ریز شده و سیستم ناپایدار می گردد. بنابراین برای هر مود می توان یک ظرفیت جذب انرژی بر اساس ظرفیت حجمی آن تعیین نمود. در ارتباط با شق دوم پایداری باید فرکانس سوئیچ مورد نیاز بر اساس دینامیک سیستم را بدست آورد و آنرا با مشخصات فیزیکی سوئیچ  $\omega$  مقایسه نمود. اگر سوئیچ  $\omega$  از نظر مکانیکی توانایی سوئیچ کردن با آن فرکانس را نداشت، پایداری سیستم از این نظر دچار اختلال خواهد شد.

### ب - سیستم چند عاملی تعقیب<sup>۱۶</sup> و گریز<sup>۱۷</sup>

در این مثال، دو خودروی زمینی بدون سرنشین<sup>۱۸</sup> با همکاری یکدیگر سعی در دستگیری یک خودروی فراری (خودروی زمینی بدون سرنشین) را دارند [۲۱]. هر عامل (خودروی تعقیب کننده) دارای سنسور های بینایی جهت تشخیص خودروی در حال فرار و سنسور های مناسب جهت تشخیص موانع و اندازه گیری موقعیت آن ها نسبت به مرجع می باشد. دینامیک زمان هر خودرو توسط روابط زیر توصیف می شود.

$$\dot{X} = v \cos(\theta)$$

$$\dot{Y} = v \sin(\theta) \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

جائیکه  $X$  و  $Y$  مرکز جرم و  $\theta$  جهت خودرو می باشد. سیستم

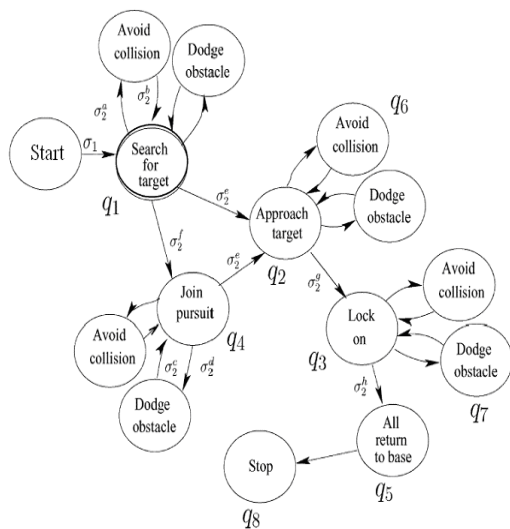
(۸) همچنین می تواند در فرم کلی زیر نشان داده شود.

$$\dot{x} = f_{UGV}(x, u)$$

جائیکه  $x = [X, Y, \theta]^T$  بردار حالت بوده و  $u = [v, \omega]^T$

بردار ورودی برای اهداف کنترلی می باشد که در آن

زاویه ای مربوطه می باشند.  
 طرح منطقی دستگیری هدف، شامل ۸ مود نشان داده شده در شکل (۵) می باشد. فهرست حوادث در جدول شماره (۱) داده شده است. مود پیش فرض کنترلی برای، جستجو برای هدف<sup>۱۹</sup> می باشد که در آن محیط اطراف توسط سنسورها بطور تصادفی جاروب شده تا هدف پیدا گردد و یا آنکه بر اثر رخداد جدیدی، خودرو به مود "به سمت هدف رفتن"<sup>۲۰</sup> و یا مود "تعقیب تیمی"<sup>۲۱</sup> سوئیچ نماید. در این مود، خودرو جستجوی خود را رها کرده و به سمت هدف می رود و یا به طرف مختصات هم تیمی خود می رود. به هدف نزدیک شده و بر روی هدف قفل می نماید و بتدریج هدف دستگیر می شود.



شکل ۵: تعیین توالی مود های یک تیم "خودروی زمینی بدون سرنشین"

جدول ۱: فهرست حوادث برای تیم "خودروی زمینی بدون سرنشین"

حوادث	تفسیر
$\sigma_2^a$	دیگر خودرو ها قابل رویت بوده و برخورد امکانپذیر میباشد
$\sigma_2^b$	چیزی قابل رویت نمی باشد
$\sigma_2^c$	مانعی دیگر دیده نمیشود
$\sigma_2^d$	هدف در زاویه دید می باشد
$\sigma_2^e$	هدف توسط عضو تیم بدست آورده شده است
$\sigma_2^g$	هدف به اندازه کافی نزدیک برای دستگیری می باشد
$\sigma_2^h$	هدف دستگیر شده است

<sup>19</sup> Search for Target

<sup>20</sup> Approach Target

<sup>21</sup> Join Pursuit

<sup>16</sup> Pursuit

<sup>17</sup> Evasion

<sup>18</sup> Unmanned Ground Vehicle



در عمل، اگر عامل ها (خودروی زمینی بدون سرنشین) واژگون شوند، ناپایدار می گردند. اگر سرعت های انتقالی و زاویه ای خودروها از حد مجاز  $v_{EAC}$  و  $\omega_{EAC}$  تجاوز نماید، واژگون می شوند. این مقادیر مرز های مناطق غیر مجاز درون هر مود را نشان می دهند. ظرفیت جذب انرژی مطلق هر یک از عامل ها بر اساس انرژی جنبشی آن ها در  $v_{EAC}$  و  $\omega_{EAC}$  داده شده است.

$$EAC_{abs}(x_e) = \left( \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \right) \Big|_{v=v_{EAC}}^{\omega=\omega_{EAC}} \quad (9)$$

چنانکه  $m, I$  نشان دهنده جرم و اینرسی می باشند. بدلیل آنکه هیچگونه محدودیت های فیزیکی در این مثال ذکر نشده است، بنابراین  $EAC_{abs}(x_e)$  درون هر مود مثبت بوده و انرژی جذب شده عامل ها کمتر از  $EAC_{abs}(x_e)$  برای تمام شرایط مجاز می باشد. نهایتاً، سوئیچ بین مود ها بگونه ای طراحی شده است که انتقال ممنوع انجام نشود. بنابراین هر یک از عامل ها (خودروها) داخلی پایدار می باشند.

تیم چند عاملی وقتی ناپایدار می گردد که هدف نهایی (دستگیری عامل فراری به دلایل هماهنگی ضعیف و یا تصادف با دیگر عامل ها و یا موانع ویا موارد مشابه) قابل دسترسی نباشد. تیم به هدف  $\Theta_d$  (دستگیری عامل فراری) در زمان های محدود در صورتی نزدیک می شود که از شرایط اولیه  $\Theta_0$  با قید

$$\Xi(\Theta_0) < EAC_{abs}(\Theta_d)$$

آغاز به کار کرده باشد. مقدار انرژی  $EAC_{abs}(\Theta_d)$  مرتبط به پارامتر هایی از قبیل هماهنگی سیستم های چند عاملی، تاخیر در ارتباطات و توانمندی عامل ها در تشخیص هدف، موانع، یکدیگر و ظرفیت انرژی ذخیره شده مطلق هر عامل می باشد. سیستم چند عاملی بطوری طراحی شده است که رابطه

$$EAC_{abs}(\Theta_d) > 0$$

برقرار می باشد. بعلاوه، سیستم چند عاملی با گذشت زمان به هدف نزدیک می شود، به عبارت دیگر

$$EAC_{inst}(\Theta_d, \Theta_k) \rightarrow EAC_{abs}(\Theta_d) \text{ as } k \rightarrow \infty$$

برقرار می باشد. این به آن معنی می باشد که مجموعه هدف  $\Theta_d$  بطور مجانبی پایدار و یا بطور هم ارز سیستم چند عاملی پایدار می

فرامین اصلی کنترل مربوط به هر مود، مجموعه ای از حرکات چرخشی و رو به جلو برای جستجوی محیط اطراف تولید می کند. کنترل اولیه مودها در جدول (۲) داده شده است. در مود  $q_1$ ،  $q_2$  یک سرعت ثابت و  $\theta_i$  جهت خودروی  $i$ ام می باشد. در مود  $q_2$ ،  $q_3$  فاصله اقلیدسی<sup>۲۲</sup> بین خودروی  $i$ ام و خودروی در حال فرار می باشد. در مود  $q_3$ ،  $q_4$ ،  $q_5$  جهت اولین و دومین خودروی زمینی بدون سرنشین می باشند. در مود  $q_5$ ،  $q_6$  فاصله اقلیدسی بین خودروی  $i$ ام و نقطه شروع عملیات می باشد. تابع  $\omega$  در مودهای ششم و هفتم یک میدان برداری دافع<sup>۲۳</sup> با رابطه مربع معکوس فاصله بین خودرو و هدف تولید می کند. در این تابع

$$\tilde{\theta} = \text{atan2}(Y_{ob} - Y_i, X_{ob} - X_i)$$

که در آن  $(X_i, Y_i)$  مختصات خودرو و  $(X_{ob}, Y_{ob})$  موقعیت تخمین زده شده مانع (هدف عدم برخورد با مانع) می باشد. در این روش، خودروی زمینی بدون سرنشین، سعی بر عدم برخورد با دیگر خودروها (UGV)، هدف و موانع موجود در محیط خواهد بود.

جدول ۲: فرامین اصلی کنترل خودروی بدون سرنشین

مود	برچسب	فرامین اصلی کنترل
$q_1$	جستجو برای هدف	$v = \text{fwd}, \omega = \text{rnd } \theta_i$
$q_2$	نزدیک شدن به هدف	$v = K_1 \rho_1, \omega = 0$
$q_3$	قفل کردن بر روی هدف	$v = K_1 \rho_1 \cos(\theta_p - \theta_i),$ $\omega = K_3(\theta_p - \theta_i) + K_4(\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_i)$
$q_4$	ملحق شدن به تعقیب	$v = K_5 \rho_2 \cos(\theta_1 - \theta_2),$ $\omega = K_6(\theta_1 - \theta_2) + K_7(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)$
$q_5$	برگشت به پایگاه	$v = K_8 \rho_3, \omega = K_9(\theta_i - \theta_b)$
$q_{6,7}$	دوری از تصادف و فرار از موانع	$v = 0, \omega = f_{AC}(d)(\pi - \tilde{\theta} - \theta_i)$
$q_8$	توقف	$v = 0, \omega = 0$

<sup>22</sup> Distance Euclidean

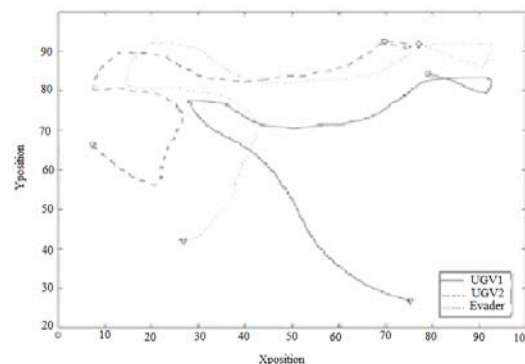
<sup>23</sup> Repulsive Vector Field

از پیش تعریف شده می باشند. مفهوم ظرفیت جذب انرژی مقدار ماکزیموم انرژی می باشد که هر سیستم در هر نقطه تعادل خود میتواند جذب کند قبل از اینکه به وضعیت برگشت ناپذیر برود. در این تحقیق، هدف اصلی در بسط مفهوم ظرفیت جذب انرژی در توسعه معیارهای تحلیل پایداری سیستم های چند عاملی در برگیرنده تکامل حالت های پیوسته درون هر مود و سوئیچینگ بین مود ها می باشد. در ادامه مقایسه ای بین روش پیشنهادی و روش لیاپانوف انجام شده و شباهت ها و تفاوت ها بیان شده است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده تحلیل مناسبتر و ملموس تر روش پیشنهادی در مقایسه با روش های معمول می باشد. دیدگاه های آتی نویسندگان در توسعه و استفاده از روش پیشنهادی در تحلیل پایداری گروه<sup>۲۴</sup> و سیستم های چند عاملی دیگر می باشد.

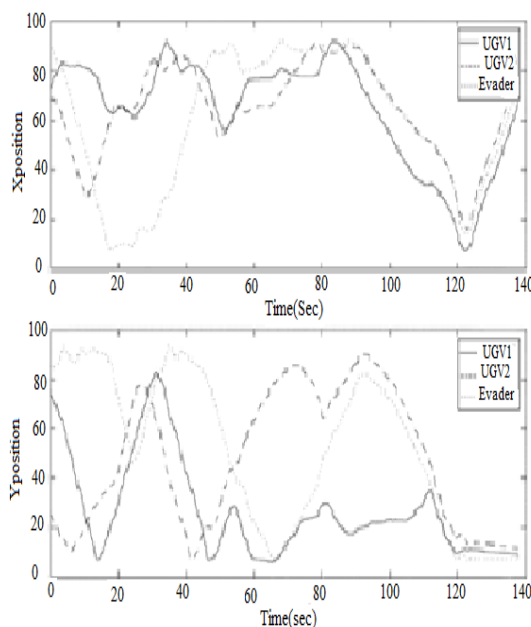
### مراجع

- [1] Xiaohua, L. and J. L. Feng Wang, "Simulation system of Production Scheduling Multi-Agent-Based," World Congress on Computer Science and Inf. Eng. (2009).
- [2] Leitão, P., "Agent-based Distributed Manufacturing Control: A State-of-the-art Survey," International Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 22, no. 7, pp. 979-991, Elsevier, (2009).
- [3] H. Hattori, Y. and Y. Nakajima, and T. Ishida, "Modeling Behaviors for Multi-Agent Traffic Simulation," In Proceeding of Autonomous Agents and Multiagent Systems, 6<sup>th</sup> Workshop on Agents in Traffic and Transportation, Toronto, Canada, (2010).
- [4] Khalil, H. K., "Nonlinear Systems," Prentice Hall, 3th edn., (2001).
- [5] Krstic, M. and I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, "Nonlinear and Adaptive Control Design," John Wiley & Sons, (1995).
- [6] Willems, J., "Dissipative dynamical systems, part i: General theory," Arch. Rat. Mech. An. 45, (1972).
- [7] Chli, M. and P. D. Wilde, and R. Ribeiro, "Stability of Multi-Agent Systems," Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp 551-556, Piscataway, NJ, (2003).
- [8] Moreau, L., "Stability of Multiagent Systems With Time-Dependent Communication Links," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 50, no. 2, pp. 169-182, Feb. (2005).

باشد. شبیه سازی های انجام شده نیز نشان دهنده دستگیری عامل فراری در زمان محدود می باشند. نتایج شبیه سازی در شکل های (۶) و (۷) نشان داده شده اند. با توجه به این نتایج، عامل فراری در مدت زمان ۱۲۰ ثانیه دستگیر شده است. بنابراین با توجه به موارد اشاره شده در بخش سوم در خصوص پایداری عامل و سیستم چند عاملی، می توان نتیجه گرفت که این سیستم پایدار است.



شکل ۶: مختصات حرکتی خودروهای تعقیب گر و فراری



شکل ۷: مسیر حرکت خودروهای تعقیب گر و فراری

### ۶ - جمع بندی و دیدگاه های آتی

مفهوم ظرفیت جذب انرژی در تحلیل پایداری عامل و سیستم های چند عاملی گسترش داده شده است، جاییکه عامل یک موجود هاپرید در نظر گرفته شده است و سیستم های چند عاملی، گروهی از عامل ها می باشند که با همکاری یکدیگر بدنبال رسیدن به یک هدف

<sup>24</sup> Swarm

- Simulation”, Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, (2002).
- [20] Garcia, E. and J. Estremera and P. Gonzalez de Santos, “A comparative study of stability margins for walking machines,” *Robotica*, volume 20, pp 595–606, (2002).
- [21] Garcia, E. and P. Gonzalez de Santos, “An improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effects,” *Robotica*, volume 23, pp. 13–20, (2005).
- [22] Fregene, K. and D. C. Kennedy, and D. W. L. Wang, “Toward a Systems- and Control-Oriented Agent Framework,” *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 35, No. 5, pp 999-1012, Oct. (Oct., 2005).
- [23] Van Der Schaft, A. “Port-Hamiltonian Systems: an Introductory Survey,” in *Proceedings of the International Congress of Mathematicians*, Madrid, Spain, (2006).
- [24] Siljak, D. D. “Decentralized control complex systems,” Academic Press INC., (1991).
- [25] Ortega, R. and A. Van Der Schaft, and B. Maschke & G. Escobar, “Energy-shaping of Port-Controlled Hamiltonian Systems by Interconnection,” in *proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*, Phoenix, Arizona, (1999).
- [26] Liberzon, D. and A. S. Morse, “Basic Problems in stability and Design of Switched Systems,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol.19, no.5, pp.59-70, (1999).
- [27] Branicky, M. S. “Multiple Lyapunov Functions and other Analysis Tools for Switched and Hybrid Systems,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 43, no. 4, pp. 475–482, (1998).
- [28] Guenther, O. and T. Hogg, and B. A. Huberman, “Learning in Multiagent Control of Smart Matter,” in *proceeding of AAAI97 Workshop on Multiagent Learning*, (1997).
- [29] Bak, T. and R. Izadi-Zamanabadi, “Lecture Notes-hybrid systems,” Department of Control Engineering, Aalborg University, Aalborg, Denmark, (Oct. 27, 2004).
- [9] Gazi, V. and K. M. Passino, “Stability analysis of swarms,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 48, No. 4, pp. 692-697, Apr. (2003).
- [10] Olfati-Saber, R. and R. M. Murray, “Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, no. 9, pp. 1520–1533, Sep. (2004).
- [11] Lee, L. C. and H. S. Nwana and D. T. Ndumu, and P. De Wilde, “The stability, scalability and performance of multi-agent systems,” *BT Technol J*, Vol 16, No 3, pp 94-103, July (1998).
- [12] <http://www.modelica.org>
- [13] Lewis, R., “ Modeling control systems using IEC61499: applying function blocks to distributed systems,” *Institution of Electrical Engineers, U.K.*, (2001).
- [14] Jamshidifar, A. A. and A. Afshar, A. Salari, “FBLab, an IEC61499 based software tool for modeling of distributed control systems,” *proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Control Application*, Istanbul, Turkey, pp. (551-556), June (2003).
- [15] Jamshidifar, A. A. and A. Afshar, “Application of Object-oriented Approach to Large-Scale System, a Case Study,” *Proceedings of the 2004 IFAC International Conference on Large-Scale Systems*, Osaka, Japan, pp. 537-541, July (2004).
- [16] Jamshidifar, A. A. and A. Afshar, “Stability Analysis of Large-Scale Agent-Based Systems,” *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Information, Control and Innovative Computing*, pp. 382-385, Beijing, China, (2006).
- [17] Jamshidifar, A. A. and A. Afshar, “Energy Absorption Capacity: A New Concept for Stability Analysis of Nonlinear Dynamic Systems,” *Asian Journal of Control*, Vol.11, no.1, pp.1-9, (2008).
- [18] Wellstead, P. E., “Introduction to Physical Pystem Modelling,” Academic press LTD., (1979).
- [19] Golo, G., “Interconnection Structures in Port-Based Modelling: Tools for Analysis and