

بررسی و مقایسه روش‌های مختلف شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل شبکه

امیرعلی مهاجرپور^۱، علی کریمپور^۲، ناصر پریز^۳

۱- کارشناس ارشد، مهندسی برق- کنترل، دانشگاه فردوسی مشهد، am_mo62@stu-mail.um.ac.ir

۲- استادیار، گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد، karimpor@um.ac.ir

۳- دانشیار، گروه برق، دانشگاه فردوسی مشهد، n_pariz@ferdowsi.ac.ir

چکیده

در این مقاله روش‌های متفاوت شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل شبکه، مورد بررسی قرار گرفته، دقت، سرعت و سادگی هر یک از این روش‌ها، مورد تحلیل قرار می‌گیرند. همچنین مدل هایبرید یک سیستم، که در نرم-افزار MATLAB شبیه‌سازی شده‌است، برای بررسی شبیه‌سازی دینامیک‌های سیستم معرفی می‌گردد. سپس در جهت به‌کارگیری شبیه‌ساز ns-2، یک تقریب اولر برای دینامیک‌های سیستم پیوسته، به کار برده می‌شود. کارایی این روش‌ها نسبت به هر دو مجموعه سیستم‌های کنترل شبکه و سیستم‌های کنترل بدون شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها ساختارهای مختلف معماری شبکه و تأثیر هر کدام از عوامل اثر گذارنده آن بر عملکرد سیستم کنترلی از جمله تعداد پلانتهای، سائز حافظه‌ی روترهای هر لینک و میزان ترافیکی که بر روی روتر قرار می‌گیرد، بیان می‌شوند.

واژه‌های کلیدی

سیستم‌های کنترل شبکه، شبیه‌ساز ns-2، مدل هایبرید، شبیه‌سازی پایه

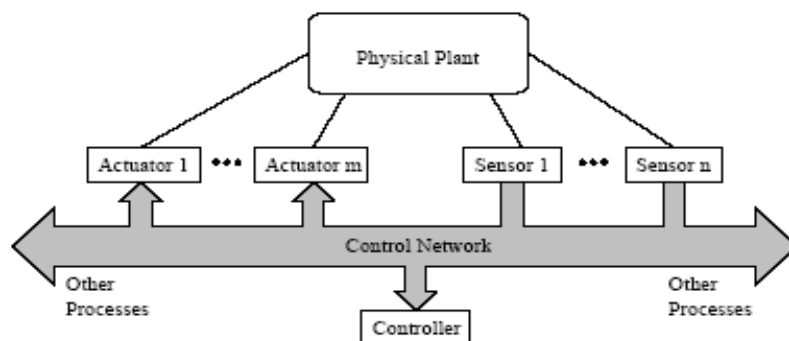
۱- مقدمه

از آنجا که در بسیاری از سیستم‌های کنترلی اجزاء سیستم به صورت توزیع شده می‌باشند، لزوم استفاده از سیستم‌های کنترل شبکه و مدلی برای آنالیز آنها مشخص می‌گردد. برخی از مزایای استفاده از سیستم کنترل شبکه به شرح زیر می‌باشند [۳]:

- قابلیت انتقال بالا.
- قابلیت پیاده‌سازی در محیط‌های صنعتی.
- تشخیص توانائی مناسب.
- قیمت تمام شده ارزان.
- همچنین برخی از مزایای این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های انتقال نقطه به نقطه عبارتند از [۳]:
- افزایش قابلیت اطمینان و آزمون‌پذیری آسانتر.
- بالا بردن کارایی سیستم.
- کاهش وزن، فضا، توان و سیم‌کشی مورد نیاز.

به طور کلی سیستم‌های کنترل فیدبک که در حلقه‌های آنها از یک سیستم شبکه استفاده شده‌باشد، سیستم کنترل شبکه (NCS) نامیده می‌شود. شکل (۱) یک سیستم کنترلی شبکه را نشان می‌دهد [۱ و ۲].

سیستم‌های کنترل شبکه به دو نوع اصلی سیستم‌های کنترل شبکه محلی و سیستم‌های کنترل شبکه گسترده تقسیم‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های کنترل شبکه محلی، اجزاء به‌وسیله اتصالات محلی به‌هم متصل می‌شوند. به‌طور معمول تعیین پارامترهای تأثیرگذار شبکه بر روی سیستم کنترلی مانند تأخیر و اتلاف اطلاعات در این سیستم‌ها امکان‌پذیر می‌باشند. در مقابل این سیستم‌ها، سیستم‌های کنترل شبکه گسترده می‌باشند، این سیستم‌ها به‌صورت توزیع شده بود و اجزاء سیستم به‌وسیله شبکه محلی و اینترنت با هم در ارتباط هستند [۲].



شکل ۱- ساختار سیستم کنترلی شبکه

$$h_i = H, \quad i \in \{1, \dots, N\},$$

$$t_i[k] = \left(k + \frac{i-1}{N}\right) h_i, \quad i \in \{1, \dots, N\}.$$

به طوری که h_i پریود نمونه‌برداری از پلانت i ام، $t_i[k]$ زمان k ام این نمونه از پلانت i ام، H پریود نمونه‌برداری در طراحی سیستم و N تعداد پلانت‌ها را مشخص می‌کنند. شکل (۳) تنظیم زمان‌بندی نمونه‌های پلانت‌ها را در حالت غیر تصادفی (ثابت) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان انتقال هر بسته از پهنای باند در نظر گرفته شده برای آن کوچکتر است. به طور دقیق‌تر:

$$\frac{P}{\eta} < \frac{H}{N}$$

به طوری که P سایز بسته‌ها، η پهنای باند سیستم کنترل شبکه و H و N همان مقادیر قبل می‌باشند. اگر این فرض درست نباشد، اتلاف اطلاعات رخ خواهد داد.

در حالت زمان‌بندی تصادفی زمان‌های نمونه‌برداری تصادفی می‌باشند. پلانت دارای یک پریود نمونه‌برداری ۲۰٪ بزرگتر یا کوچکتر از پریود نمونه‌برداری طراحی بوده و زمان‌بندی در طول مدت پریود نمونه‌برداری به صورت تصادفی می‌باشد. پریود نمونه‌برداری و زمان‌های نمونه‌برداری پلانت اول به فرم حالت ثابت (غیر تصادفی) انتخاب می‌شوند.

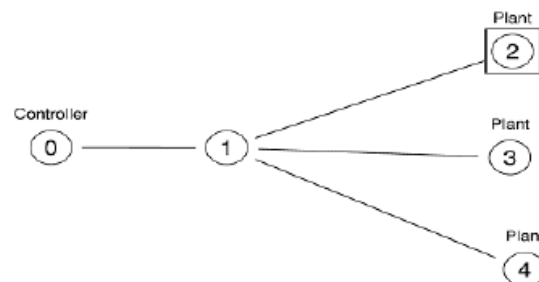
$$h_1 = H$$

$$t_1[k] = kh_1$$

سپس برای پلانت i ام مقادیر تصادفی $P_i \in [0.8, 1.2]$ و $\psi_i = [0, 1]$ در نظر گرفته شده، برای هر پلانت داریم.

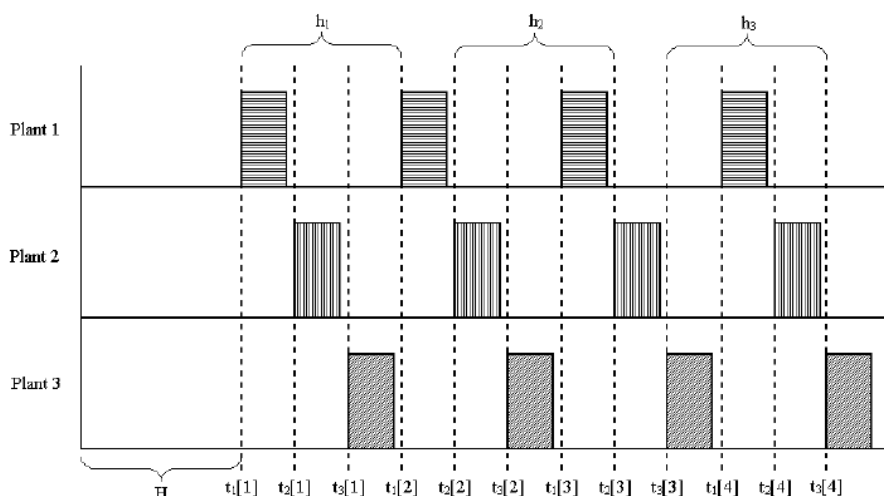
۲- ساختار سیستم کنترل شبکه

- کنترل‌کننده، سنسورها و عملکردها یک سیستم کنترل شبکه به عنوان گره‌های شبکه کامپیوتری در نظر گرفته می‌شوند، برخی عوامل مؤثر در عملکرد سیستم کنترل شبکه عبارتند از:
 - تعداد پلانت‌ها.
 - سایز حافظه روترهای هر لینک.
 - میزان ترافیکی که بر روی روتر قرار می‌گیرد.
- شکل (۲) ساختار یک سیستم کنترل شبکه را با ۳ پلانت و یک کنترل‌کننده نشان می‌دهد. کنترلر در گره صفر، روتر در گره یک و پلانت‌ها در گره‌های ۲، ۳ و ۴ قرار گرفته‌اند.

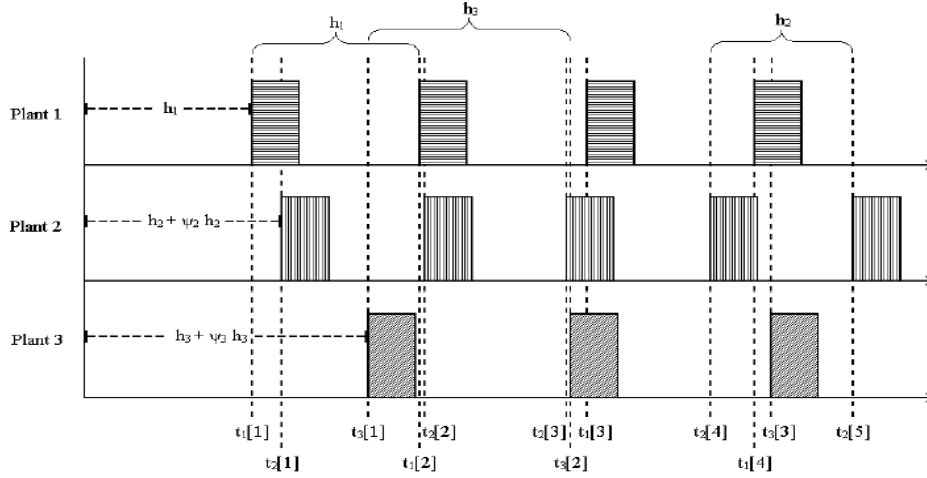


شکل ۲- نمونه ساختار سیستم کنترل شبکه با ۳ پلانت

برای زمان‌بندی انتقال نمونه‌های پلانت، دو حالت تصادفی و ثابت وجود دارد. در حالت ثابت، پلانت‌ها برای طراحی، دارای یک پریود نمونه‌برداری مشابه می‌باشند و بسته‌ها در فاصله‌های زمانی مساوی منتقل می‌شوند، به عبارت دیگر پریود نمونه‌برداری و زمان‌های نمونه‌برداری به صورت زیر می‌باشند:



شکل ۳- تنظیم زمان بندی حالت



ثابت

شکل ۴- زمان بندی حالت تصادفی

کنترلی وجود دارد. همچنین بسته‌های زیادی برای شبیه‌سازی عوامل گسسته در یک سیستم شبکه وجود دارد. هدف در شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل شبکه، شبیه‌سازی هم زمان هر دو مورد یعنی دینامیک‌های سیستم و عوامل شبکه می‌باشد.

۱-۳- TRUETIME

TRUETIME یک بسته نرم‌افزاری مطلب/سیمولینک است که توسط هنریکسون نوشته شده است و شبیه‌سازی رفتار موقتی هسته‌های چند برنامه‌ای^۲ و لحظه‌ای^۳ که شامل برنامه‌های کنترلی است را انجام دهد [۵ و ۶].

محیط شبیه‌سازی TRUETIME دو بلوک شبیه‌سازی را ارائه می‌نماید (یک بلوک کامپیوتری و یک بلوک شبکه) که هر دو

$$h_i = \rho_i H, \quad i \in \{2, \dots, N\}, \quad P_i \in [0.8, 1.2)$$

$$t_i[k] = (k + \psi_i) h_i,$$

$$i \in \{2, \dots, N\}, \quad k = \{1, \dots\}, \quad \psi_i = [0, 1).$$

شکل (۴) تنظیم زمان بندی نمونه‌های پلانت‌ها را در حالت تصادفی نشان می‌دهد. نمونه برداری پلانت‌ها به صورت تصادفی، باعث کاهش پهنای باند می‌شود، همچنین پهنای باند در زمان‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد [۴].

۳- روش‌های مختلف شبیه‌سازی سیستم‌های کنترل

شبکه

راه‌های زیادی برای شبیه‌سازی دینامیک‌های یک سیستم

مشخص را برای کد کردن دینامیک های پلانت، فهرست بندی ساده، محاسبات کنترلی و فهرست بندی در کد TCL از ns-2 فراهم کرده است.

استفاده از این روش بسیار آسان می باشد، اما نیاز به شبیه سازی پلانت به طور جداگانه می باشد. دو روش به کار رفته در این زمینه عبارتند از:

الف - حل از طریق یک بسته واسطه^۶:

پلانت های خطی را می توان با به کارگیری حل کننده خارجی شبیه سازی نمود. یک حل کننده خارجی⁷ ODE نامیده می شود و یک ابزار تک منظوره برای محاسبه حل یک معادله دیفرانسیل، را به کار می برد. همچنین می توان از مطلب برای حل ODE چند بعدی، مشابه حالتی که معادله دیفرانسیل $\dot{x} = Ax + Bu$ را حل می کند، برای یک سیستم کنترل شبکه داده شده، استفاده نمود. در این حالت مقادیر جدید از حل کننده خارجی حاصل می شوند و از فرمول:

$$x(t_f) = e^{A(t-t_i)} \left(x + \int_{t_i}^t e^{-As} B ds u \right), \quad (1)$$

به دست می آیند. از آنجایی که تکنیک های انتگرال گیری عددی برای سرعت عمل به کار می روند، مقادیری که از مطلب به دست می آیند، تقریبی می باشند. این روش تاحدی کند می باشد، زیرا به عنوان یک هسته، برنامه بایستی هر دفعه مجدداً آغاز شود و به همین علت حل کننده ODE خارجی نامیده می شود، این روش نتایج دقیق تولید می کند که براحتی قابل کد شدن هستند.

ب - اولر مرتبه یک جدید^۸:

پلانت ها را همچنین می توان با استفاده از اولر مرتبه یک در کنار کد ns-2 شبیه سازی کرد. در هر گام زمانی^۹ (که مقداری کوچکتر از سرعت نمونه برداری است)، $\frac{dy}{dx}$ از معادلات حالت تخمین زده شده و در طول گام زمانی اعمال می گردد. این روش از نظر دقت عموماً به اندازه روش های ذکر شده ی قبلی نیست ولی در مقابل اندکی سریعتر می باشد. به بهای از دست دادن سرعت پروسه می توان با انتخاب دوره زمانی به طور دلخواه، به روش حل ODE قدیم نزدیک گردید. پلانت های غیر خطی را نیز می توان با این روش شبیه سازی نمود.

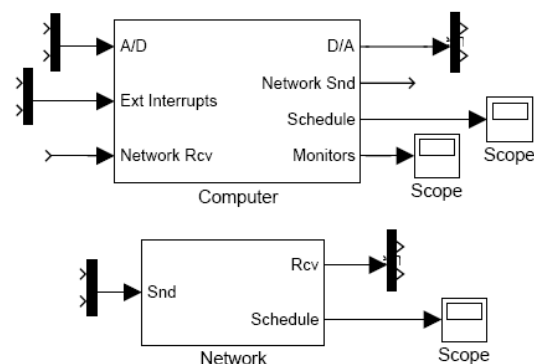
عموماً روش های تقریبی تنها روش های شبیه سازی یک پلانت غیر خطی هستند. تقریب های دیگر از جمله تقریب درجه بالای

event_drive هستند، بلوک کامپیوتری فعالیت یک کامپیوتر کنترل را شبیه سازی می کند که از آن جمله، اجرای برنامه و سوئیچینگ برای رشته های مشخص شده توسط کاربر و اینترپرایت های دستی می باشند. بلوک شبکه، دینامیک های شبکه را شبیه سازی می کند و بر مبنای آن پارامترهایی می باشد که کاربر وارد می نماید، مشابه ساختار پیام و یک تابع تقدم که برای مشخص کردن اولویت ترافیکی به کار می رود. شکل (۵) این دو بلوک را در محیط شبیه سازی TRUETIME نشان می دهد.

بلوک شبکه به اندازه کافی برای شبیه سازی انواع مختلف شبکه ها، که شامل شبکه های بر مبنای CAN و بر مبنای اینترنت می باشند، از قابلیت انعطاف مناسبی برخوردار می باشد. اما در حالت عمومی بلوک شبکه TRUETIME برای شبیه سازی شبکه های دلخواه و پیچیده ی اینترنت و شبکه های بر مبنای IP کافی نمی باشد.

۲-۳- شبیه ساز ns-2

این شبیه ساز یک بسته شبیه سازی شبکه می باشد که توسط بخش علوم اطلاعات دانشگاه کالیفرنیا جنوبی ارائه شده است [۷]. ns-2، شیء های^۴ قوی و بسیاری را برای شبیه سازی انواع مختلف شبکه ها و ساختارهای شبکه ای ارائه می کند و انواع مختلف گره ها و ترافیک های شبکه ای را دارا می باشد. همچنین نوع توزیعی



شکل ۵- بلوک های محیط شبیه سازی TRUETIME

ns-2 شامل ابزارهای مفید برای مطالعه شبکه ها می باشد که یک انیمیشن ترافیکی در یک شبکه را ارائه می نماید. شبیه ساز ns-2 برای شبیه سازی دینامیک های پیوسته و گسسته سیستم های پیچیده خطی و غیر خطی بسط یافته است. این شبیه سازی از طریق بسته عامل/پلانت^۵ به انجام می رسد و یک راه

رانگ - کوتا را می‌توان برای دقت بیشتر به کار برد.

۳-۳- شبیه‌سازی‌های نرم افزار MATLAB

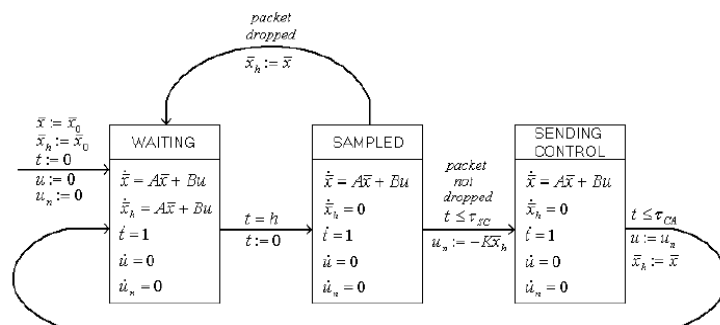
روش کار دیگری نیز وجود دارد که MATLAB برای آنالیز سیستم‌های کنترل شبکه ارائه کرده است. اگرچه بدون به کارگیری بسته‌های مخصوص (مثل TRUETIME) نمی‌توان به راحتی دینامیک‌های شبکه را در MATLAB شبیه‌سازی نمود، ولی می‌توان دینامیک‌های پلانت را برای چک کردن دقت شبیه‌سازی و مقایسه‌ی روش‌های شبیه‌سازی مشترک، شبیه‌سازی نمود.

شبیه‌سازی Naive (ساده): یک روش ساده شبیه‌سازی بوده که تقریب اول مرتبه یک را برای شبیه‌سازی به کار می‌برد و در طول زمان تکرار می‌شود. از تقریب خطی برای معادلات سیستم پلانت‌های غیرخطی یک پرپود ثابت نمونه‌برداری، یک تأخیر ثابت و بدون اتلاف اطلاعات استفاده می‌کند. اگر چه خروجی دقیق نمی‌باشد (نسبت به عدم دقت نسبی روش اولر، امکان از دست دادن بسته‌ها در شبیه‌سازی ns-2 و تأخیر متغیر)، این روش یک راه سریع و نه چندان واضح، برای چک کردن این که نتایج شبیه‌سازی در محدوده درست جواب هستند، را به دست می‌دهد. زمانی که یک فایل برای یک سیستم کنترل شبکه داده شده ایجاد می‌شود، می‌توان خروجی آن را با خروجی شبیه‌سازی Naive مقایسه نمود. **شبیه‌سازی هایبرید^{۱۰} سیستم‌ها:** برای شبیه‌سازی می‌توان از مدل هایبرید سیستم‌ها بهره گرفت. یک سیستم هایبرید سیستمی است که شامل دینامیک‌های گسسته و پیوسته می‌باشد.

روش هایبرید با ایده‌ی یک سیستم کنترل شبکه کاملاً هم‌خوانی دارد، به طوری که یک سیستم کنترل شبکه شامل هر دو دینامیک پیوسته و گسسته، سنسورها، کنترلرها، عملگرها و ارتباطات شبکه‌ای، در این سیستم می‌توانند به عنوان وقایع گسسته مدل شوند [۸]. اگر دینامیک‌های سیستم کاملاً مشخص شوند، مدل هایبرید سیستم را می‌توان مستقیماً به کار برد. شکل (۶) مدل هایبرید یک سیستم کنترل شبکه با دینامیک‌های خطی، را نشان می‌دهد. متغیرهای حالت برای این مدل عبارتند از $\bar{x} \in R^n$ (که مقدار لحظه‌ای متغیرهای حالت پیوسته را شامل می‌شود) و $\bar{x}_h \in R^n$ که برای نمونه‌برداری به کار می‌رود و مقدار متغیرهای

حالت پیوسته را وقتی از سیستم نمونه‌برداری می‌شود، بیان می‌کند، $t \in R$ یک تایمر بوده و $u \in R$ مقدار لحظه‌ای سیگنال کنترل و $u_h \in R$ که مقدار جدید سیگنال کنترل، هنگامی که در کنترلر محاسبه می‌شود و قبل از آنکه به عملگر برسد، را شامل می‌شوند. در این مدل، τ_{sc} تأخیر سنسور نسبت به کنترلر را مشخص می‌کند، τ_{ca} تأخیر کنترلر به عملگر را دربردارد، h پرپود نمونه‌برداری سیستم، A و B ماتریس‌های سیستم و K ماتریس فیدبک می‌باشند. در این مدل باید $h \geq \tau_{sc} + \tau_{ca}$ ، به عبارت دیگر، کل تأخیر از سنسور تا کنترل کننده و از کنترل کننده تا عملگر باید کمتر از پرپود نمونه‌برداری باشد. اگر تأخیرها کران دار باشند به عنوان مثال $ah \geq \tau_{sc} + \tau_{ca}$ برای $\alpha \in Z^+$ و $\alpha > 1$ سیستم را می‌توان با اضافه کردن حالت‌ها و متغیرهای جدید در جهت بیان اثر تأخیر مدل نمود. به عنوان حالت اولیه اگر سیگنال کنترل صفر گردد، برای مدت یک پرپود نمونه‌برداری سیستم در حالت انتظار^{۱۱} باقی می‌ماند. این حالت بسیار شبیه رفتار شبیه‌ساز ns-2 می‌باشد (صورت اولیه سیگنال کنترلی وجود ندارد). در زمان h نمونه‌های سیستم ثابت شده‌است و سیستم حالت نمونه‌برداری شده به خود می‌گیرد و زمان صفر می‌شود. اگر بسته نمونه از دست برود، سیستم تا زمان پرپود نمونه‌برداری بعدی به حالت انتظار بر می‌گردد. و در صورتی که بسته از دست نرود بعد از زمان تأخیر سنسور به کنترلر، یک سیگنال کنترل جدید محاسبه می‌شود که وابسته به مسیر فیدبک می‌باشد، سیستم به حالت ارسال^{۱۲} می‌رود. سپس، بعد از تأخیر کنترلر نسبت به عملگر، سیگنال کنترل واقعی به مقدار جدیدش بازیابی^{۱۳} می‌شود و سیستم به حالت انتظار برمی‌گردد.

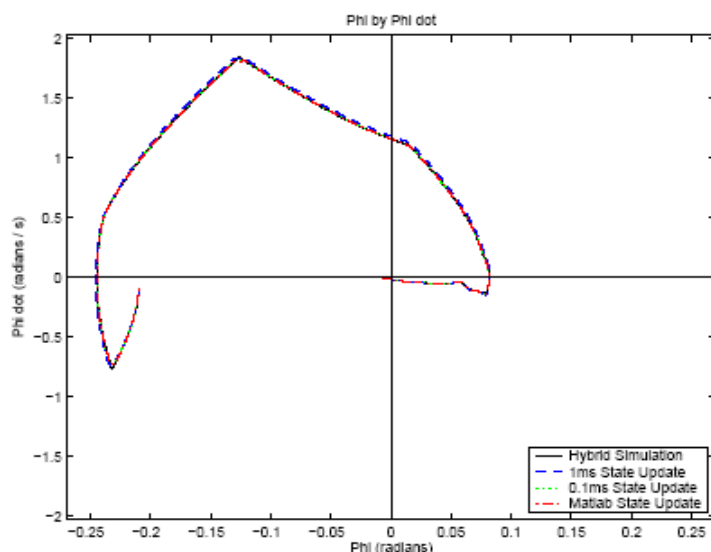
نتایج: با به کارگیری مدل هایبرید سیستم، می‌توان دقت شبیه‌سازی دینامیک‌ها را برای روش‌های مشخص قبل چک نمود. در مورد دینامیک‌های شبکه (ارسال یا دریافت اطلاعات و تلفات اطلاعات) می‌توان از شبیه‌سازی شبکه بر مبنای ns-2 استفاده نمود. برای به دست آوردن نتایج، شبیه‌سازی، وقتی عرض باند T_1 در شبکه بیشتر از نقطه اشباع باشد و قسمت عمده‌ای از بسته‌های اطلاعاتی سنسور تا کنترلر از صف خارج شوند، انجام می‌گردد. ابتدا دقت تقریب‌های خطی سیستم پاندول معکوس بررسی می‌گردد.



شکل ۶- مدل هایبرید یک سیستم کنترل شبکه

مطلب بیان می‌کند. در این شبیه‌سازی خطی سیستم‌ها و شبیه‌سازی هیبرید و حل خارجی ODE نتایج نزدیک بهم و مشخصی دارند. همچنین روش اولر با گام زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه بسیار به روش‌های ذکر شده نزدیک می‌باشد.

شکل (۷) شبیه‌سازی هایبریدسیستم را برای سیستم پاندول معکوس نشان می‌دهد [۹]. (1ms state update) یک تقریب اولر با گام زمانی، ۱ میلی‌ثانیه را مشخص می‌کند، (0.1ms state update) یک تقریب اولر با گام زمانی ۰/۱ میلی‌ثانیه را در بردارد. (matlab state update) حل خارجی ODE را با به‌کارگیری کد



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی برای پاندول معکوس

حل‌کننده‌ها^{۱۱} دیده نمی‌شود، به عبارت دیگر قابلیت تحلیل در برخی زمان‌های رخ دادن وقایع را، ندارند. در شکل (۸) می‌توان گوشه‌ها را از یک نمای نزدیک مشاهده کرد.

جدول ۱- زمان اجرای روش‌های متفاوت شبیه‌سازی

روش شبیه‌سازی	مدت اجرا (ثانیه)
External ODE Solution	1055
Euler, 1ms	13
Euler, 0.1ms	100

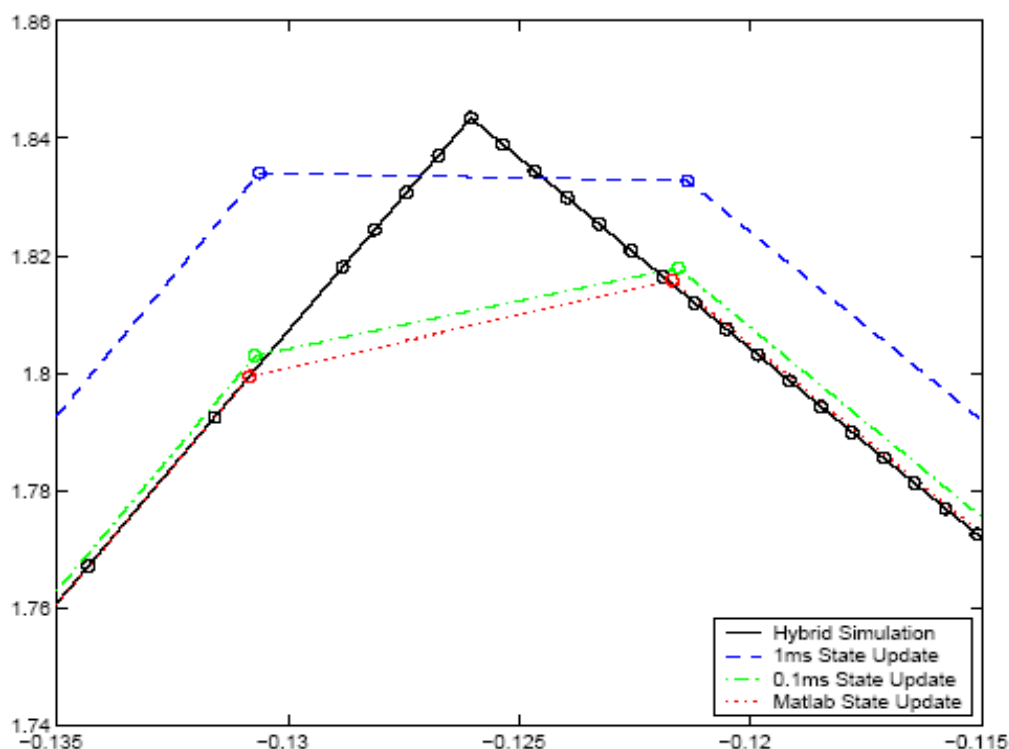
همچنین در شکل (۹) شبیه‌سازی‌های متفاوت سیستم پاندول معکوس با معادلات سیستم غیرخطی مقایسه می‌گردد. در

تقریب اولر با تایم‌استپ ۱ میلی‌ثانیه روشی با کمترین دقت است اما همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هنوز نتایج دقیق و قابل‌انتظاری را دارا می‌باشد.

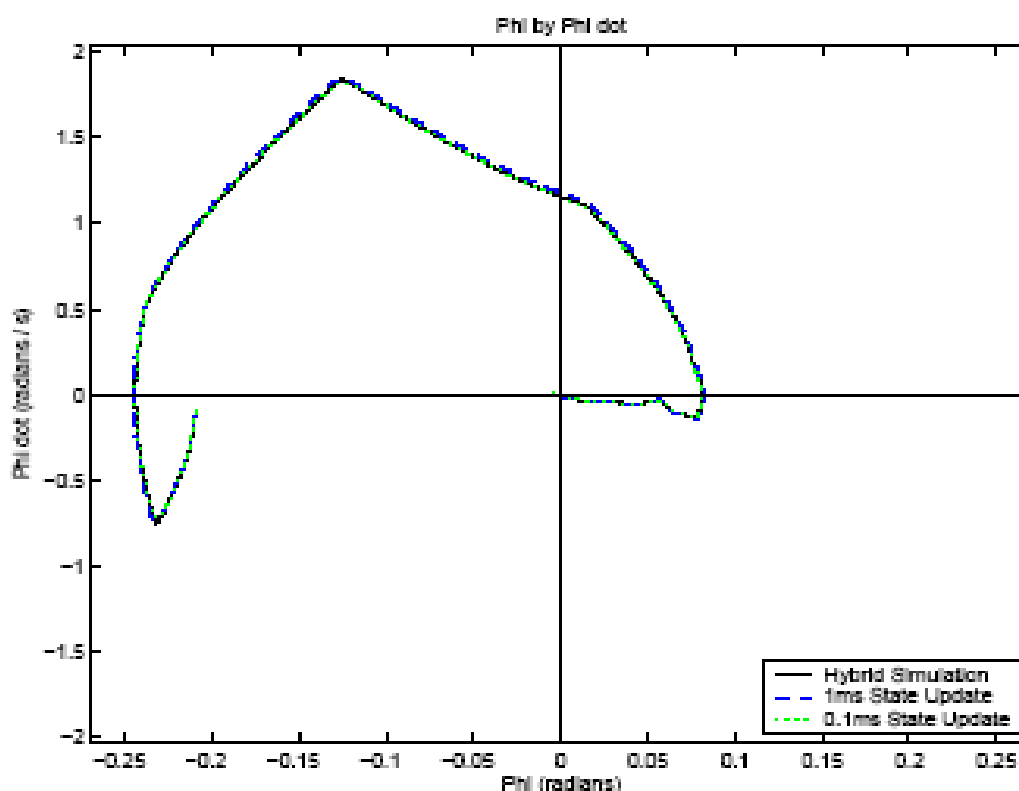
با توجه به این واقعیت که شبیه‌سازی بر مبنای ns-2 به صورت پررودیک از خروجی نمونه‌برداری می‌کند، معمولاً در حالات سیستم (مثل دریافت بسته‌های کنترل و اعمال پررودیک) بین لحظات نمونه‌برداری تغییراتی اتفاق می‌افتد. بدین خاطر، شبیه‌سازی هایبرید در نمودار فاز، «گوشه‌ها» را نشان می‌دهد (با توجه به دقت حل‌کننده ODE مطلب در ردیابی وقایع). این مورد در سایر

روش‌های شبیه‌سازی خطی (حل ODE خارجی و اولر خطی با استپ تایم ۱ms و ۰/۱ms) با شبیه‌سازی هایبرید سیستم با دینامیک‌های خطی مقایسه شده‌است؛ همچنین روش‌های غیرخطی (تقریب غیرخطی اولر با زمان‌های استپ ۱ms و ۰/۱ms) با شبیه‌سازی هایبرید سیستم با دینامیک‌های غیرخطی مقایسه شده است.

شبیه‌سازی‌های غیرخطی، تقریب اولر با گام زمانی ۱۰۰ ms به خروجی هایبرید نزدیک است. با بزرگ کردن گام زمانی در روش اولر به نتایج خوبی می‌رسیم، ولی دقیق نمی‌باشد. به دلیل دقت بالا و قدرت حل‌کننده ODE مطلب در ردیابی وقایع، فرضبر آن است که شبیه‌سازی هایبرید دقیق‌ترین شبیه‌سازی برای دینامیک‌های سیستم می‌باشد. برای اندازه‌گیری دقت سایر روش‌ها، می‌توانیم بردارهای حالت آنها را با شبیه‌سازی هایبرید مقایسه نماییم.



شکل ۸- نمودار فاز در «گوشه‌ها»



شکل ۹- شبیه‌سازی‌های پاندول معکوس با معادلات

شبکه نشده، نشان می‌دهد. نتایج این بررسی پایه، تأخیرهای ثابت و کوچک سنسور به کنترل‌کننده و کنترل‌کننده به عملگر (هر کدام به میزان ۱/۵۱ms) را نسبت به تأخیرهای ثابت انتقال در طول مسیرهای شبکه مشخص می‌سازد. این تأخیرها باعث می‌شود که حالت سیستم پاندول معکوس متفاوت با سیستم شبکه نشده در یک نقطه و زمان مشخص باشد. این تفاوت در حالت سیستم، تفاوت در سیگنال کنترل را موجب می‌شود، که در حقیقت این سیگنال تغییر یافته به سیستم اعمال می‌شود. شکل (۱۱) حالت سیستم و سیگنال کنترل را برای سیستم پیچ کنترل نشان می‌دهد [۹]. خطاها در حالت سیگنال کنترل به میزان اندکی از نتایج حاصله برای پاندول معکوس، کوچکتر هستند. دلیل آن این است که سیستم پیچ کنترل در مقایسه با پاندول معکوس دینامیک‌های کندتری دارد و حساسیت کمتری نسبتاً به تأخیر دارا می‌باشد.

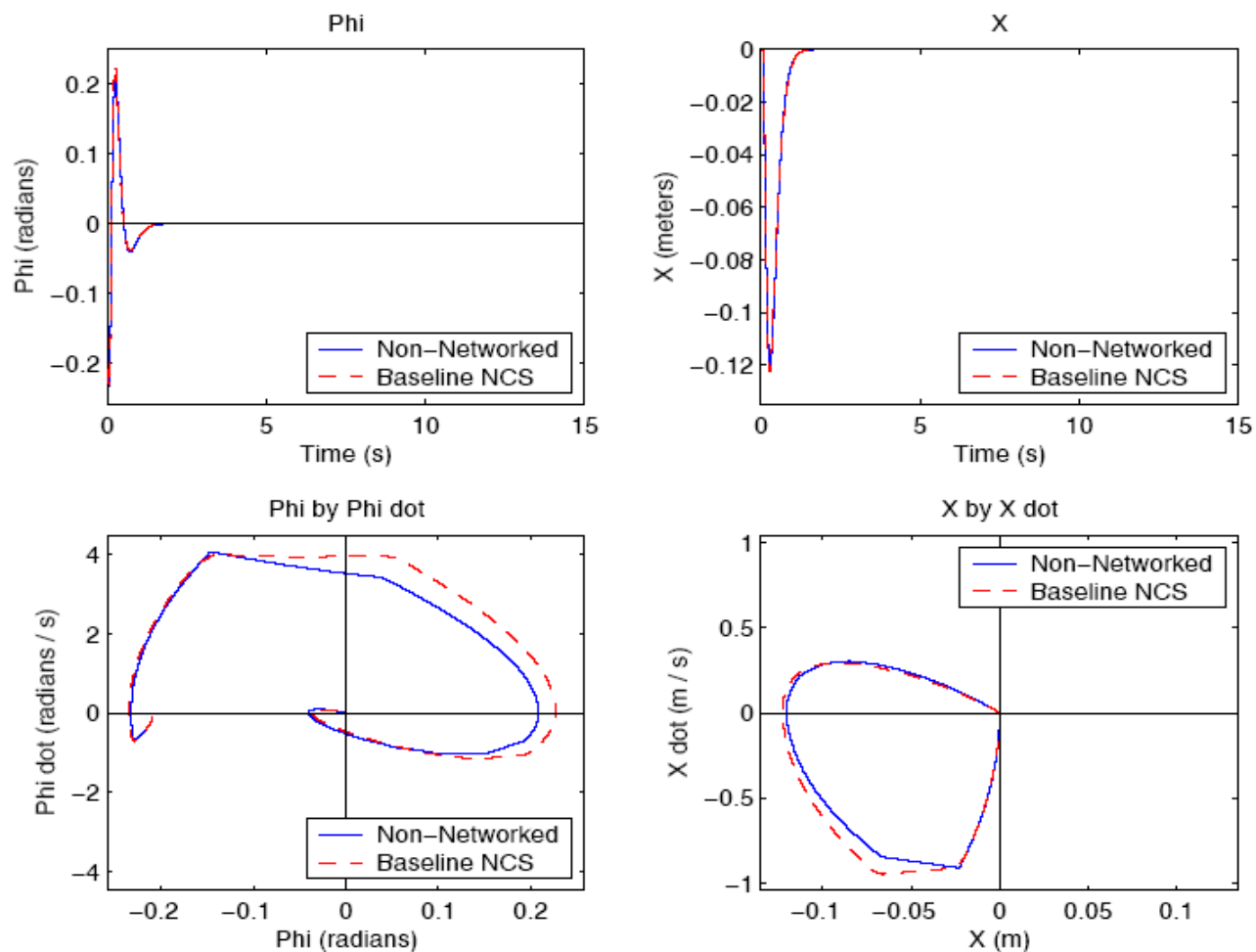
در جدول (۱) زمان اجرای روش

شبیه‌سازی بیان شده است. چارچوب کاری شبیه‌سازی بر مبنای MS-2، بسته عامل/پلانت را به کار می‌برد و انعطاف‌پذیرترین روش در شبیه‌سازی دینامیک‌های پلانت و شبکه‌های پیچیده‌ی دلخواه می‌باشد. در مجموع برای شبیه‌سازی دقیق دینامیکی سیستم می‌توان هر کدام از روش‌های فوق را به کار برد. اگرچه روش‌های فوق‌الذکر با حداقل دقت می‌باشند اما تقریب درون خطی اولر با تایم‌استپ ۱ms بهترین دقت را با توجه به زمان شبیه‌سازی می‌دهد.

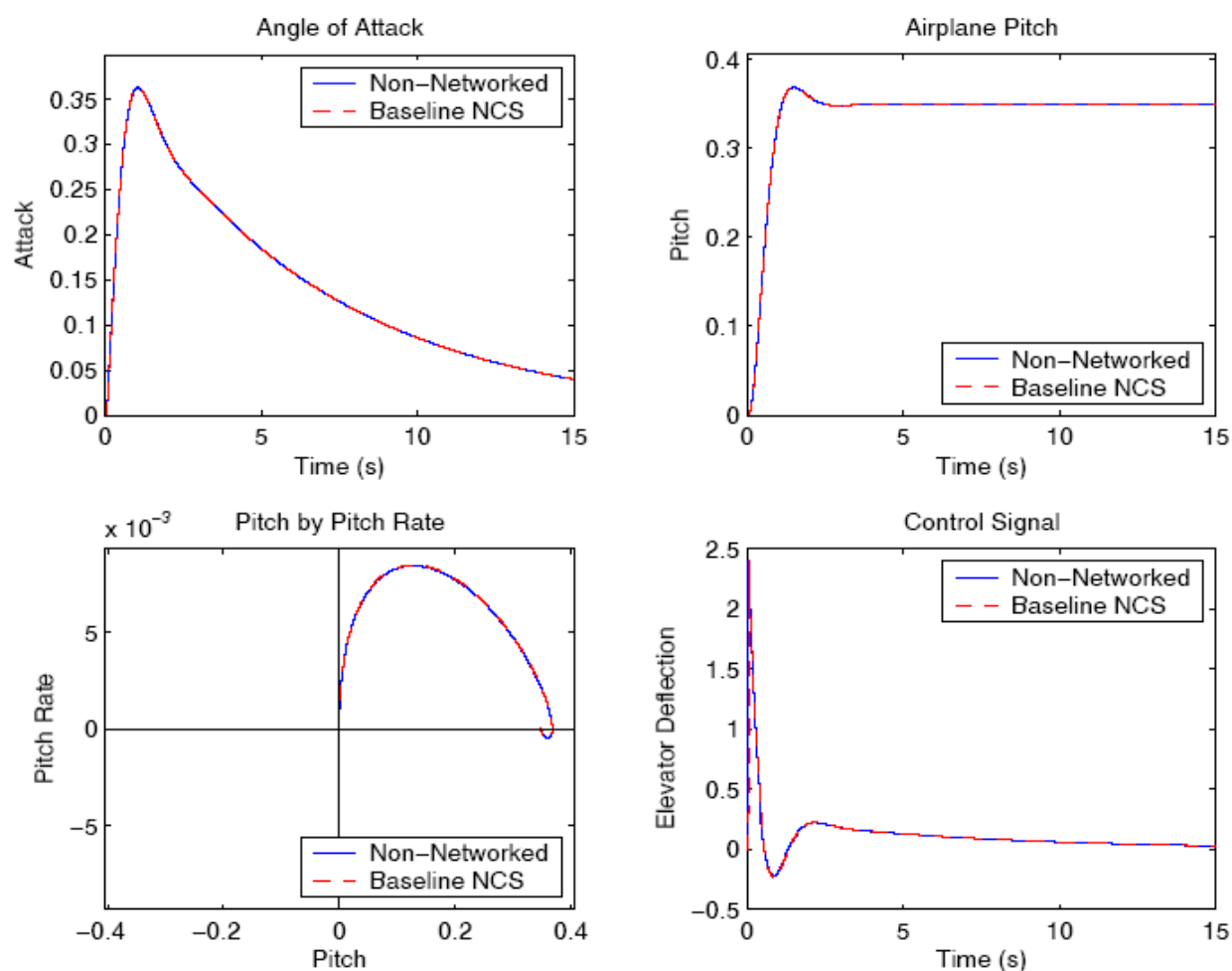
۴- شبیه‌سازی‌های پایه

به‌عنوان اولین گام برای درک تأثیر شبکه بر یک سیستم کنترلی، کارایی یک سیستم کنترل شبکه «یده‌آل» در مقابل یک سیستم گسسته با زمان و شبکه نشده مقایسه می‌شود. ابتدا سیستم پاندول معکوس فقط با یک پلانت از شبکه شبیه‌سازی شده است (که پرپود نمونه برداری ۵۰ms می‌باشد).

شکل (۱۰) سیستم حالت پایه را در برابر سیستم پاندول معکوس



شکل ۱۰- مقایسه سیستم پاندول معکوس در حالت پایه و شبکه نشده



شکل ۱۱- مقایسه سیستم پیچ کنترل در حالت پایه و شبکه نشده

تأخیرهای سنسور به کنترل کننده و کنترل کننده به عملگر مشخص می‌باشند.

وقتی صف شروع به پر شدن می‌کند، تأخیر سنسور به کنترلر زیاد شده و بسته‌های جدیدالورود، در حافظه باقی مانده تا صف خالی گردد، همچنین زمانی که صف پر گردید، از دست رفتن بسته‌ها آغاز می‌شود، اگرچه سیستم در لبه اشباع عرض باند قرار دارد و همراه با تأخیرهای مختلف، اتلاف اطلاعات نیز وجود دارد، سیستم پاندول معکوس کارایی شبیه به سیستم پایه را نشان می‌دهد.

شکل (۱۴) حالت سیستم پیچ کنترل را وقتی ۱۴۷ پلانت در شبکه با یکدیگر در ارتباط می‌باشند را نشان می‌دهد [۹]. حالت سیستم به سیستم پایه نزدیک می‌باشد اگرچه تأخیرهای سنسور به کنترلر آن طولانی‌تر و متغیر با زمان می‌باشد. با توجه به اینکه هر دو سیستم در یک پروید نمونه‌برداری شده و دارای بسته‌های

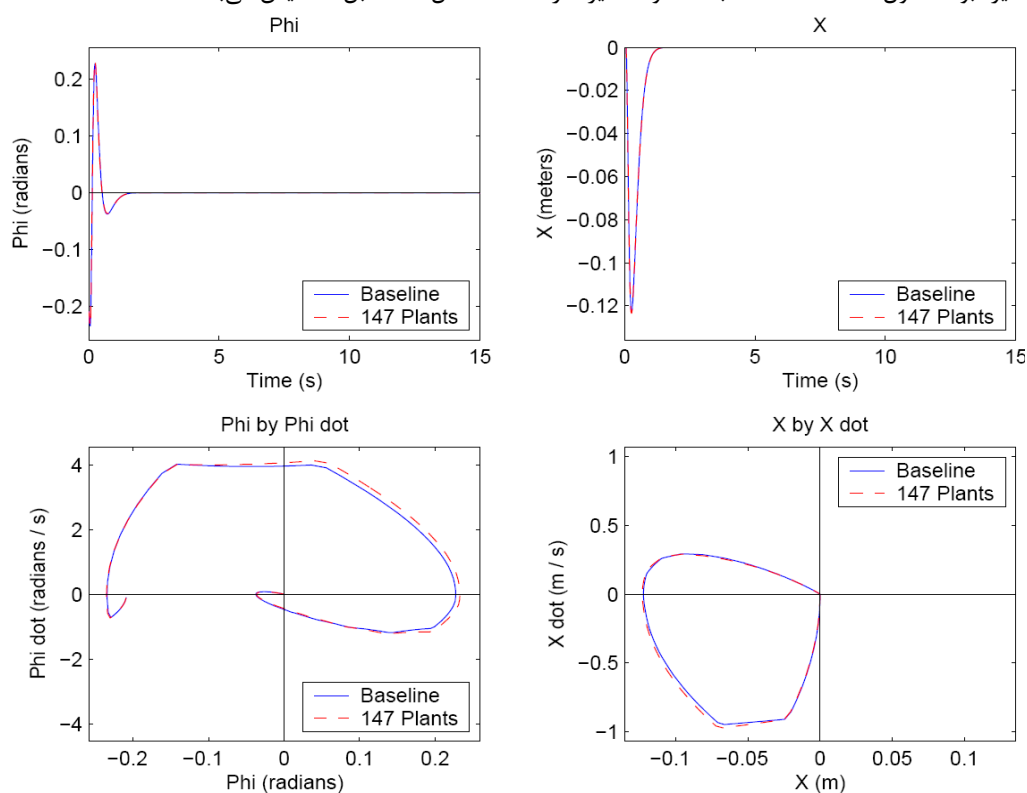
۵- پلانتهای متعدد

در شبیه‌سازی پایه در سیستم کنترل شبکه، تنها گره‌هایی که به شبکه متصل شده‌اند، کنترل کننده و پلانت مورد نظر می‌باشند. این ترکیب عرض باند کمتری از سیستم را به کار می‌برد. به منظور استفاده بیشتر از عرض باند، سیستم کنترل شبکه با ۱۴۷ پلانت که به کنترل کننده متصل شده‌اند، شبیه‌سازی شده است. فهرست نمونه‌های پلانت در شبکه بر مبنای غیر رندم تنظیم شده است، شکل (۱۲) کارایی سیستم پاندول معکوس را در زمانی که ۱۴۷ پلانت به شبکه متصل می‌گردند، نشان می‌دهد [۹]. در این حالت، عرض باند خط اندکی افزایش می‌یابد. به این دلیل، بعضی بسته‌ها از سنسور تا کنترل کننده از دست می‌روند.

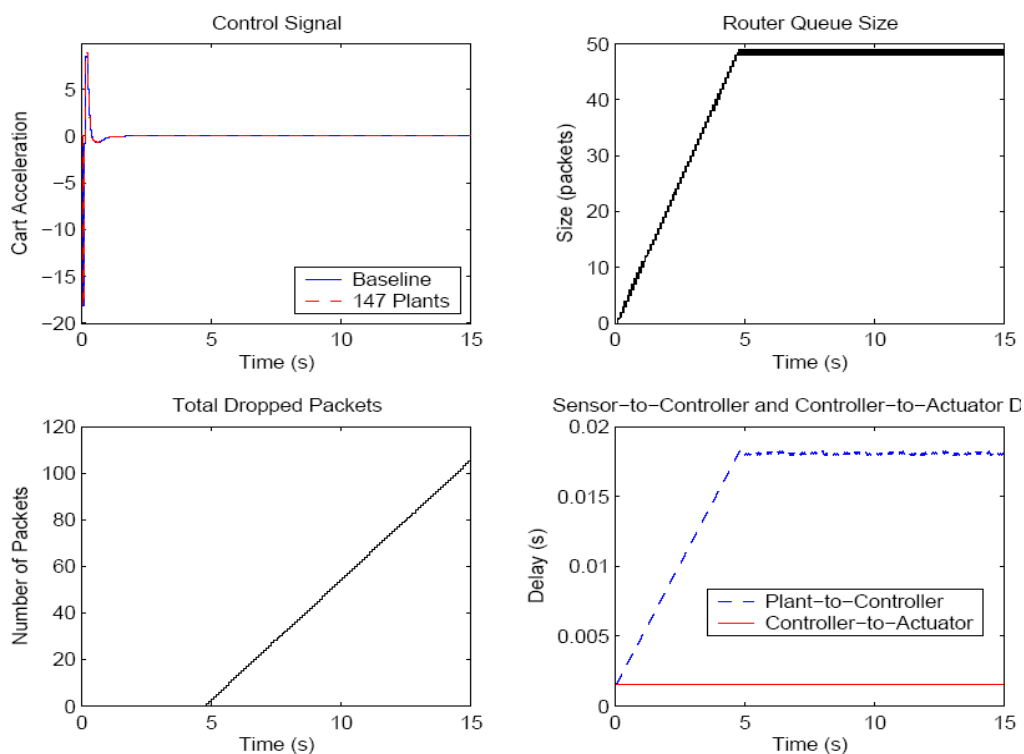
شکل (۱۲) سیگنال کنترل این سیستم را نشان می‌دهد که در آن تعداد بسته‌های در صف، تعداد بسته‌های از دست رفته در خط و

شکل (۱۴) قابل تشخیص می باشد.

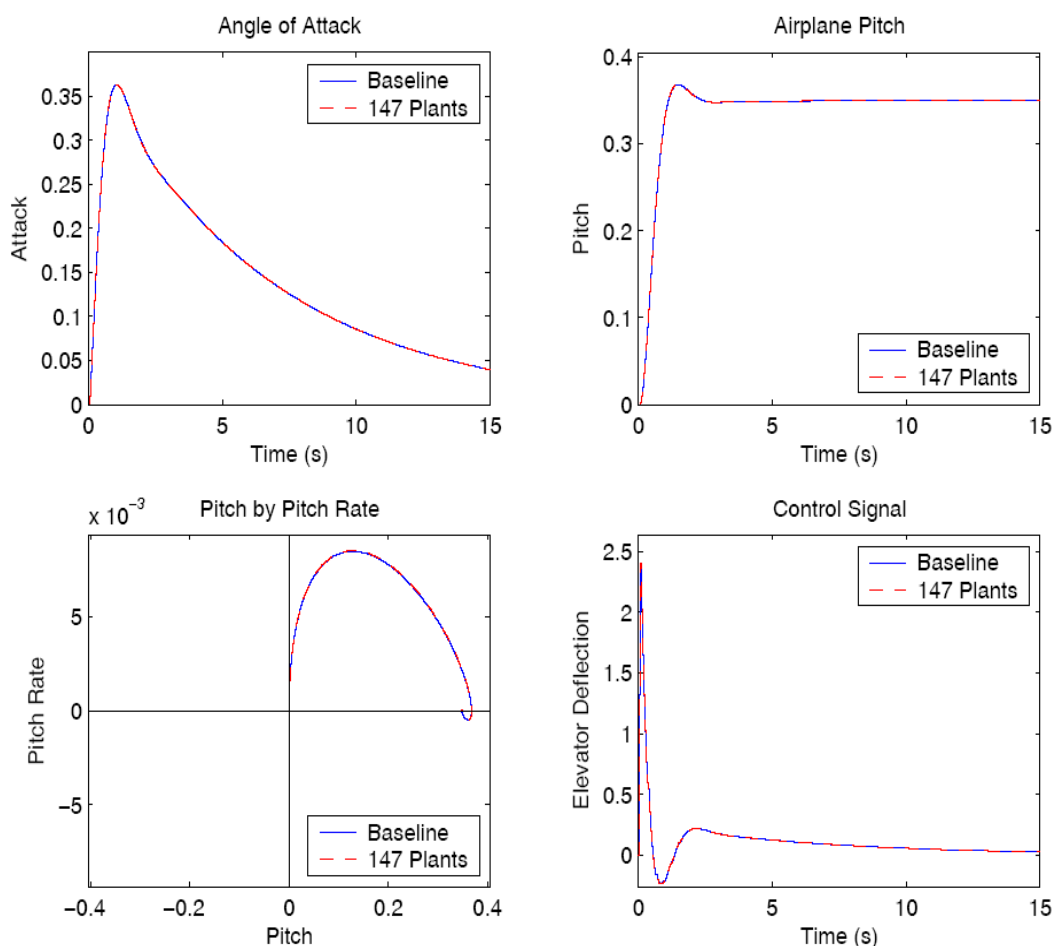
اطلاعاتی همسایز بوده طول صف، تلفات شبکه ها و تأخیر در



شکل ۱۲- مقایسه سیستم پاندول معکوس در حالت پایه و ۱۴۷ پلانت



شکل ۱۳- سیگنال کنترل و نحوه تاخیر و اتلاف اطلاعات در سیستم پاندول معکوس



شکل ۱۴- مقایسه سیستم پیچ کنترل در حالت پایه و ۱۴۷ پلانت در شبکه

روش‌های ذکر شده با حداقل دقت می‌باشند، تقریب درون خطی اولر با تایم استپ ۱ms بهترین دقت را با توجه به زمان شبیه‌سازی می‌دهد.

۷- مراجع

- [1] G. C. Walsh, Ye. Hong, and L. Bushnell **Stability Analysis of Networked Control Systems**, in Proc. American Control Conf, San Diego, CA, June 1999, pp.2876-2880.
- [2] G. Zhang, G. Wang and Q. Song, "**Analysis and Design of Networked Control Systems**", Information and Control, Vol. 36, No. 3, pp. 371-379, 2007 (in Chinese).
- [3] Wei Zhang "**Stability Analysis of Networked Control Systems**", PhD. thesis, Case Western Reserve University, 2001.
- [4] **Computer networks** by S. Tanenbaum, (book,1997).

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی ساختار سیستم‌های کنترل شبکه و بررسی مختصر عملکرد آنها، جدیدترین روش‌های شبیه‌سازی این سیستم‌ها معرفی، روش کار در هرکدام مورد بررسی قرار گرفته و با هم مقایسه گردید. نتایج زیر مشاهده شد:

در روش مدل‌های پیرید سیستم، دقت بالا بوده و می‌توان با استفاده از آن دقت شبیه‌سازی دینامیک‌ها را برای سایر روش‌ها چک نمود. در مورد دینامیک‌های شبکه (ارسال یا دریافت اطلاعات و تلفات اطلاعات) می‌توان از شبیه‌سازی شبکه بر مبنای ns-2 استفاده نمود.

چارچوب کاری شبیه‌سازی بر مبنای ns-2 انعطاف‌پذیرترین روش در شبیه‌سازی دینامیک‌های پلانت و شبکه‌های پیچیده‌ی دلخواه می‌باشد. در مجموع برای شبیه‌سازی دقیق دینامیکی سیستم می‌توان هر کدام از روش‌های ذکر شده را به کار برد. اگرچه

۲- سیستم پیچ کنترل:

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.313 & 56.7 & 0 \\ -0.0139 & -0.426 & 0 \\ 0 & 56.7 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.232 \\ 0.0203 \\ 0 \end{bmatrix} \delta,$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + [0] \delta,$$

۹- پی‌نوشت‌ها

- 1- Networked Control System
- 2- Multi Task
- 3- Real- Time
- 4- Object
- 5- Agent/Plant
- 6- Linked Package
- 7- Ordinary Differential Equations
- 8- In-Line First-Order Euler Update
- 9- Time Step
- 10- Hybrid
- 11- Waiting
- 12- Sending Control
- 13- Update
- 14- Solvers

- [5] Henriksson, Anton Cervin, **TRUETIME: Real-time Control System Simulation with ATLAB/Simulink**, Karl-Erik Azén Department of Automatic ControlLund Institute of Technology ox 118, SE-221 00 Lund, Sweden, 2002.
- [6] M. S. Branicky, M. P. Stephen and Wei Zhang, **"Stability of Networked Control Systems With Time" Varying Transmission period**, Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, Las Vegas, Dec. 10-13, 2002.
- [7] M. S. Branicky, L. Vincenzo, M. P. Stephen **"Networked Control System Co-Simulation for Co-Design"**, Proc. of the American Control Conf. Colorado USA: Denever, 2003, 3341-3346.
- [9] Kim Cheong So, **"Delay Modeling And Controller Desing For Networked Control Systems"**, Ph.D. thesis. University of East Anglia, 2001.

[۱۰] " بررسی اثرات شبکه انتقال داده بر عملکرد سیستم‌های کنترل"، امیر علی مهاجرپور، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۶.

۸- پیوست

معادلات در نظر گرفته شده برای سیستم پاندول معکوس و پیچ کنترل به صورت زیر می باشد:

۱- معادلات پاندول معکوس:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \phi \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{3g}{4L} & -\frac{3B_R}{4mL^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -\frac{3}{4L} \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \phi \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + [0]u.$$

$$g = 9.8, \quad m = 8kg, \quad L = 0.125m, \quad B_R = 0.1$$