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-افزارMATLAB 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. کارآیی 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 هرکدام از عوامل اثر گذارنده آن بر عملکرد سیستم کنترلی ازجمله تعداد پلانت‌ها، سایز حافظه‌ی روترهای هر لینک و میزان ترافیکی که بر روی روتر قرار می‌گیرد، بیان می‌شوند.

واژه‌های کلیدی

سیستم‌های کنترل شبکه، شبیه‌سازns-2، مدل‌هایبرید، شبیه‌سازی پایه

۱– مقدمه

به طور کلی سیستم‌های کنترل فیدبک که در حلقه‌های آنها از یک سیستم شبکه استفاده شده‌باشد، سیستم کنترل شبکه (NCS[۱]) نامیده می‌شود. شکل (۱) یک سیستم کنترلی شبکه را نشان می‌دهد [۲و۱].

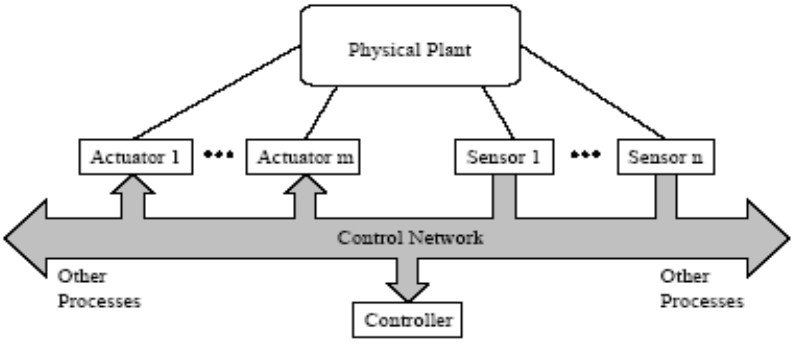
سیستم‌های کنترل شبکه به دو نوع اصلی سیستم‌های کنترل شبکه محلی و سیستم‌های کنترل شبکه گسترده تقسیم‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های کنترل شبکه محلی، اجزاء به‌وسیله اتصالات محلی به‌هم متصل می‌شوند. به‌طور معمول تعیین پارامترهای تأثیرگذار شبکه بر روی سیستم کنترلی مانند تأخیر و اتلاف اطلاعات در این سیستم‌ها امکان‌پذیر 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].

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 به‌شرح 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 کارآیی سیستم.
- کاهش وزن، فضا، توان و سیم‌کشی مورد نیاز.

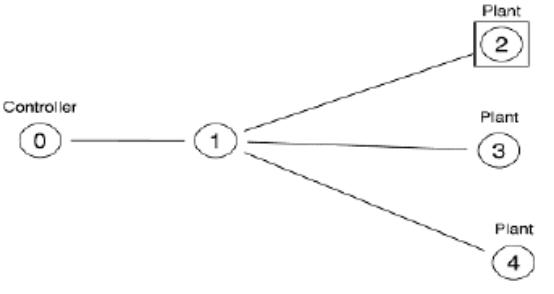


شکل۱- ساختار سیستم کنترلی شبکه

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 حافظهٔ 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 گره‌های۲، ۳ و ۴ قرار گرفته‌اند.



شکل۲- 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، به‌عبارت دیگر پریود نمونه‌برداری و زمان‌های نمونه‌برداری به‌صورت زیر می‌باشند:

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

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

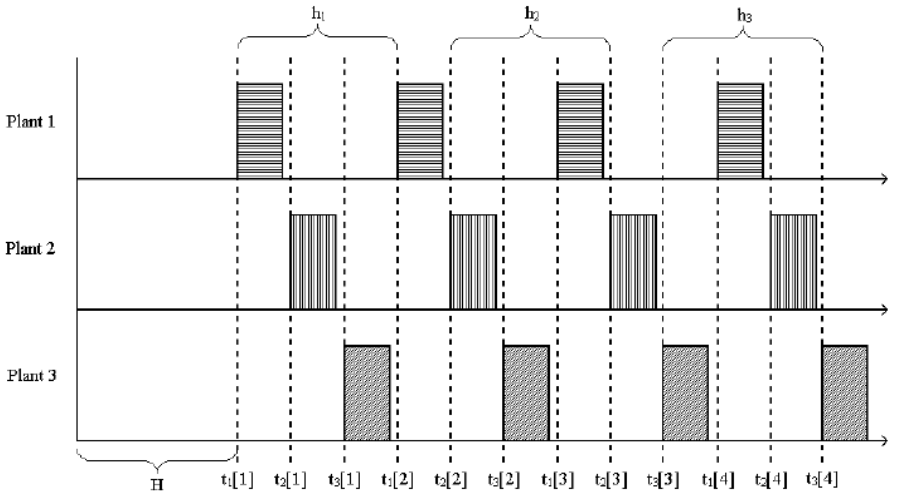
$$\frac{P}{\eta} < \frac{H}{N}$$

به‌طوری‌که 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.

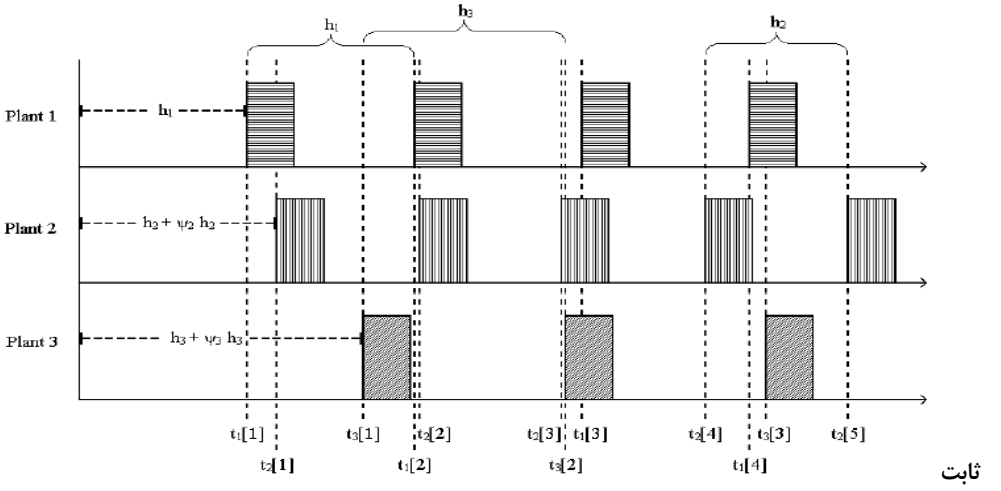
در حالت زمان‌بندی تصادفی زمان‌های نمونه‌برداری تصادفی می‌باشند. پلانت دارای یک پریود نمونه‌برداری ۲۰ ٪ بزرگتر یا کوچکتر از پریود نمونه‌برداری طراحی بوده و زمان‌بندی در طول مدت پریود نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی می‌باشد. پریود نمونه‌برداری و زمان‌های نمونه‌برداری پلانت اول به فرم حالت ثابت (غیرتصادفی)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

$$h_1 = H$$
$$t_1[k] = kh_1$$

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



شکل۳- تنظیم زمان‌بندی حالت



شکل۴- زمان‌بندی حالت تصادفی

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

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

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

شکل (۴) تنظیم زمان‌بندی نمونه‌های پلانت‌ها را در حالت تصادفی نشان می‌دهد. نمونه‌برداری پلانت‌ها به‌صورت 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 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.

۳-۱- TRUETIME

TRUETIME یک بستهٔ نرم‌افزاری مطلب/سیمولینک است که توسط هنریکسون نوشته شده است و شبیه‌سازی رفتار موقتی هسته‌های چند برنامه‌ای[۲] و لحظه‌ای[۳] که شامل برنامه‌های کنترلری است را انجام دهد [۶ و۵].

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

event_drive هستند، بلوک کامپیوتری فعالیت یک کامپیوتر کنترل را شبیه‌سازی می‌کند که از آن جمله، اجرای برنامه و سوئیچینگ برای رشته‌های مشخص شده توسط کاربر و اینتراپت‌های دستی می‌باشند. بلوک شبکه، دینامیک‌های شبکه را شبیه‌سازی می‌کند و بر مبنای آن پارامترهایی می‌باشد که کاربر وارد می‌نماید، مشابه ساختار پیام و یک تابع تقدم که برای مشخص کردن اولویت ترافیکی به‌کار می‌رود. شکل (۵) این دو بلوک را در محیط شبیه‌سازی TRUETIME نشان می‌دهد.

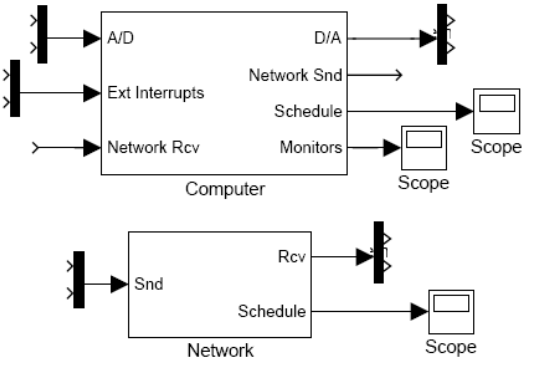
بلوک شبکه به‌اندازه کافی برای شبیه‌سازی انواع مختلف شبکه‌ها، که شامل شبکه‌های بر مبنای CAN و برمبنای اینترنت می‌باشند، از قابلیت انعطاف مناسبی برخوردار می‌باشد.

اما در حالت عمومی بلوک شبکه TRUETIME برای شبیه‌سازی شبکه‌های دلخواه و پیچیده‌ی اینترنت و شبکه‌های برمبنایIP کافی نمی‌باشد.

۲–۳– شبیه‌سازns-2

این شبیه‌ساز یک بسته شبیه‌سازی شبکه می‌باشد که توسط بخش علوم اطلاعات دانشگاه کالیفرنیای جنوبی ارائه شده است[۷].

ns-2، شیء‌های[۴] قوی و بسیاری را برای شبیه‌سازی انواع مختلف شبکه‌ها و ساختارهای شبکه‌ای ارائه می‌کند و انواع مختلف گره‌ها و ترافیک‌های شبکه‌ای را دارا می‌باشد. همچنین نوع توزیعی



شکل۵- بلوک‌های محیط شبیه‌سازی TRUETIME

ns-2 شامل ابزارهای مفید برای مطالعه شبکه‌ها می‌باشد که یک انیمیشن ترافیکی در یک شبکه را ارائه می‌نماید.

شبیه‌سازns-2 برای شبیه‌سازی دینامیک‌های پیوسته و گسسته سیستم‌های پیچیده خطی و غیرخطی بسط یافته است. این شبیه‌سازی از طریق بستهٔ عامل/پلانت[۵] به انجام می‌رسد و یک راه مشخص را برای کد کردن دینامیک‌های پلانت، فهرست‌بندی ساده، محاسبات کنترلی و فهرست‌بندی در کد TCL ازns-2 فراهم کرده است.

استفاده از این روش بسیار آسان می‌باشد، اما نیاز به شبیه‌سازی پلانت به‌طور جداگانه می‌باشد. دو روش به کار رفته در این زمینه عبارتند از:

الف ــ حل از طریق یک بسته واسطه[۶]:

پلانت‌های خطی را می‌توان با به‌کارگیری حل‌کننده خارجی شبیه‌سازی نمود. یک حل‌کننده خارجی ODE[7] نامیده می‌شود و یک ابزار تک‌منظوره برای محاسبه حل یک معادله دیفرانسیل، را به‌کار می‌برد. همچنین می‌توان از مطلب برای حل ODE چند بعدی، مشابه حالتی که معادله‌ی دیفرانسیل $\dot{x} = Ax + Bu$ را حل می‌کند، برای یک سیستم کنترل شبکه داده شده، استفاده نمود. در این حالت مقادیر جدید از حل‌کننده خارجی حاصـــل می‌شوند و از فرمول:

$$x(t_f) = e^{A(t-t)}\left(x + \int_t^t e^{-As} B ds u\right), \qquad (۱)$$

به‌دست می‌آیند. از آنجایی‌که تکنیک‌های انتگرال‌گیری عددی برای سرعت عمل به‌کار می‌روند، مقادیری که از مطلب به‌دست می‌آیند، تقریبی می‌باشند. این روش تاحدی کند می‌باشد، زیرا به عنوان یک هسته، برنامه بایستی هر دفعه مجدداً آغاز شود و به همین علت حل‌کننده ODE خارجی نامیده می‌شود، این روش نتایج دقیق تولید می‌کند که براحتی قابل کد شدن هستند.

ب ــ اولر مرتبه یک جدید[۸]:

پلانت‌ها را همچنین می‌توان با استفاده از اولر مرتبه یک در کنار کد ns-2 شبیه‌سازی کرد. در هر گام زمانی[۹] (که مقداری کوچکتر از سرعت نمونه‌برداری است)، $\frac{dy}{dx}$ از معادلات حالت تخمین زده شده و در طول گام زمانی اعمال می‌گردد. این روش از نظر دقت عموماً به اندازه روش‌های ذکر شده‌ی قبلی نیست ولی در مقابل اندکی سریعتر می‌باشد. به بهای از دست دادن سرعت پروسه می‌توان با انتخاب دوره زمانی به طور دلخواه، به روش حل ODE قدیم نزدیک گردید. پلانت‌های غیرخطی را نیز می‌توان با این روش شبیه‌سازی نمود.

عموماً روش‌های تقریبی تنها روش‌های شبیه‌سازی یک پلانت غیرخطی هستند. تقریب‌های دیگر از جمله تقریب درجه بالای

رانگ ـ کوتا را می‌توان برای دقت بیشتر به‌کار برد.

۳–۳– شبیه‌سازی‌های نرم افزار MATLAB

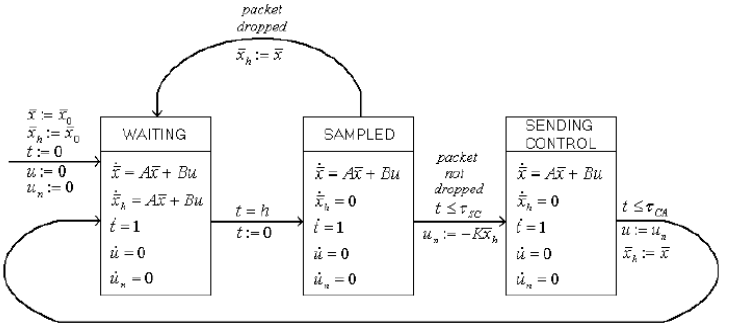
روش کار دیگری نیز وجود دارد که MATLAB برای آنالیز سیستم‌های کنترل شبکه ارائه کرده است. اگرچه بدون به‌کارگیری بسته‌های مخصوص (مثلTRUETIME) نمی‌توان به‌راحتی دینامیک‌های شبکه را در MATLAB شبیه‌سازی نمود، ولی می‌توان دینامیک‌های پلانت را برای چک‌کردن دقت شبیه‌سازی و مقایسه‌ی روش‌های شبیه‌سازی مشترک، شبیه‌سازی نمود.

شبیه‌سازی Naive (ساده): یک روش ساده شبیه‌سازی بوده که تقریب اولر مرتبه یک را برای شبیه‌سازی به‌کار می‌برد و در طول زمان تکرار می‌شود. از تقریب خطی برای معادلات سیستم پلانت‌های غیرخطی یک پریود 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 چک‌کردن این‌که 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.

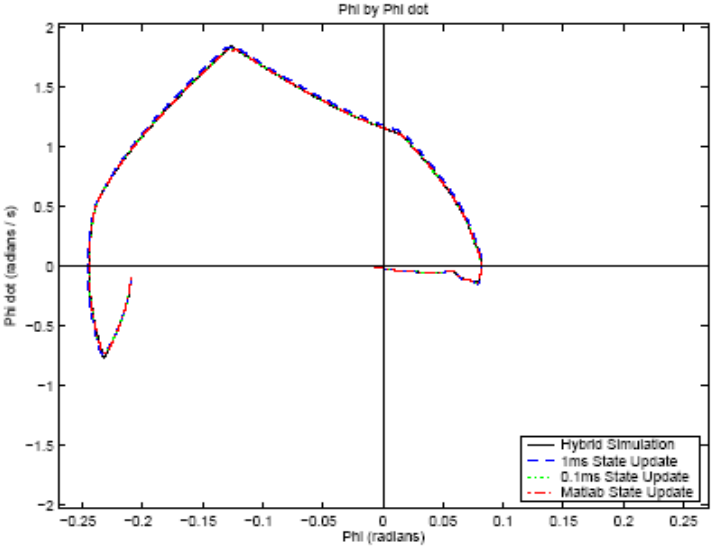
روش هایبرید با ایده‌ی یک سیستم کنترل شبکه کاملاً هم‌خوانی دارد، به‌طوری‌که یک سیستم کنترل شبکه شامل هر دو دینامیک پیوسته وگسسته، سنسورها، کنترلرها، عملگرها و ارتباطات شبکه‌ای، در این سیستم می‌توانند به‌عنوان وقایع گسسته مدل شوند[۸]. اگر دینامیک‌های سیستم کاملاً مشخص شوند، مدل هایبرید سیستم را می‌توان مستقیماً به‌کار برد. شکل(۶) مدل هایبرید یک سیستم کنترل شبکه با دینامیک‌های خطی، را نشان می‌دهد. متغیرهای حالت برای این مدل عبارتند از $\overline{x} \in R^n$ (که مقدار لحظه‌ای متغیرهای حالت پیوسته را شامل می‌شود) و $\overline{x}_h \in R^n$ که برای نمونه‌برداری به‌کار 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، هنگامی‌که 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 پریود نمونه‌برداری سیستم، A و B ماتریس‌های سیستم و K ماتریس فیدبک می‌باشند. در این مدل باید $h \geq \tau_{sc} + \tau_{ca}$، به‌عبارت دیگر، کل تأخیر از سنسور تا کنترل‌کننده و از کنترل‌کننده تا عملگر باید کمتر از پریود نمونه‌برداری باشد. اگر تأخیرها کران‌دار باشند به‌عنوان مثال $\alpha h \geq \tau_{sc} + \tau_{ca}$ برای $\alpha \in Z^+$ و $\alpha > 1$ سیستم را می‌توان با اضافه کردن حالت‌ها و متغیرهای جدید در جهت بیان اثر تأخیر مدل نمود. به‌عنوان حالت اولیه اگر سیگنال کنترل صفر گردد، برای مدت یک پریود 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 پریود نمونه‌برداری بعدی به حالت انتظار بر می‌گردد. و در صورتی‌که بسته از دست نرود بعد از زمان تأخیر سنسور به کنترلر، یک سیگنال کنترل جدید محاسبه می‌شود که وابسته به مسیر فیدبک می‌باشد، سیستم به‌حالت 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 به‌کارگیری 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 به‌دست آوردن نتایج، شبیه‌سازی، وقتی عرض باند T۱ 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.



شکل۶- مدل هایبرید یک سیستم کنترل شبکه

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 میلی ثانیه را در بردارد. (matlab state update) حل خارجی ODE را با به‌کارگیری کد مطلب بیان می‌کند. در این شبیه‌سازی خطی سیستم‌ها و شبیه‌سازی هیبرید و حل خارجی ODE نتایج نزدیک به‌هم و مشخصی دارند. همچنین روش اولر با گام زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه بسیار به روش‌های ذکر شده نزدیک می‌باشد.



شکل۷- نتایج شبیه سازی برای پاندول معکوس

تقریب اولر با تایم‌استپ ۱ میلی‌ثانیه روشی با کمترین دقت است اما همان‌طورکه ملاحظه می‌شود، هنوز نتایج دقیق و قابل انتظاری را دارا می‌باشد.

با توجه به این واقعیت که شبیه‌سازی بر مبنای ns-2 به‌صورت پریودیک از خروجی نمونه‌برداری می‌کند، معمولاً در حالات سیستم (مثل دریافت بسته‌های کنترل و اعمال پریودیک) 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 حل‌کننده‌ل‌ها[۱۴] دیده نمی‌شود، به‌عبارت دیگر قابلیت تحلیل در برخی زمان‌های رخ دادن وقایع را، ندارند. در شکل(۸) می‌توان گوشه‌ها را از یک نمای نزدیک مشاهده کرد.

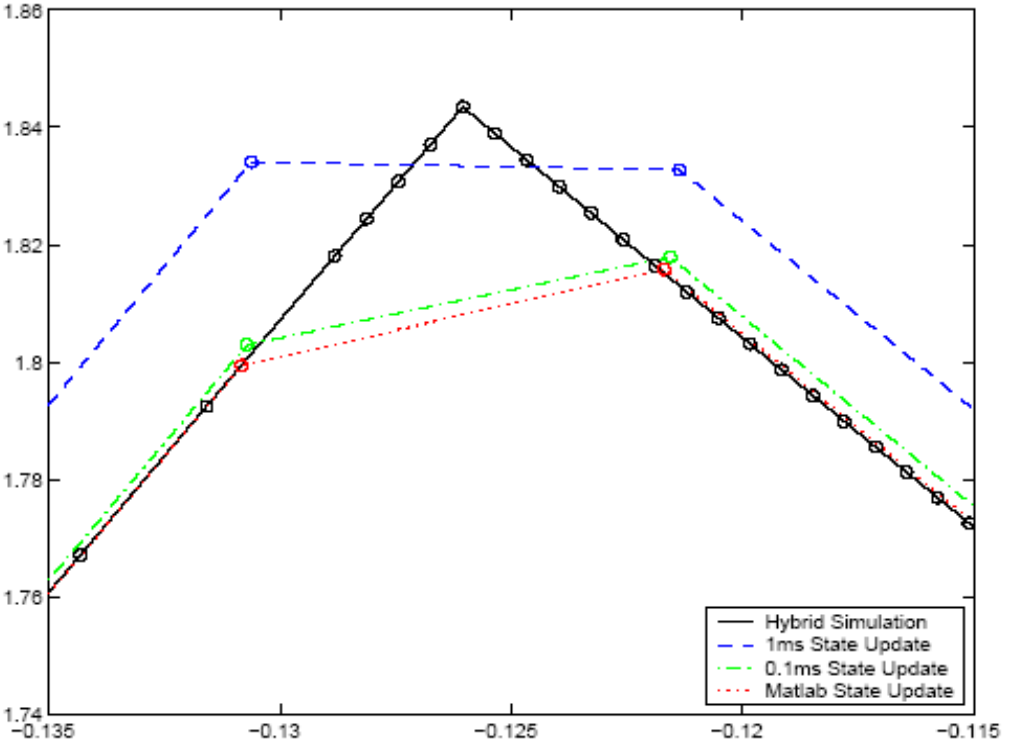
جدول۱- زمان اجرای روش‌های متفاوت شبیه‌سازی

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

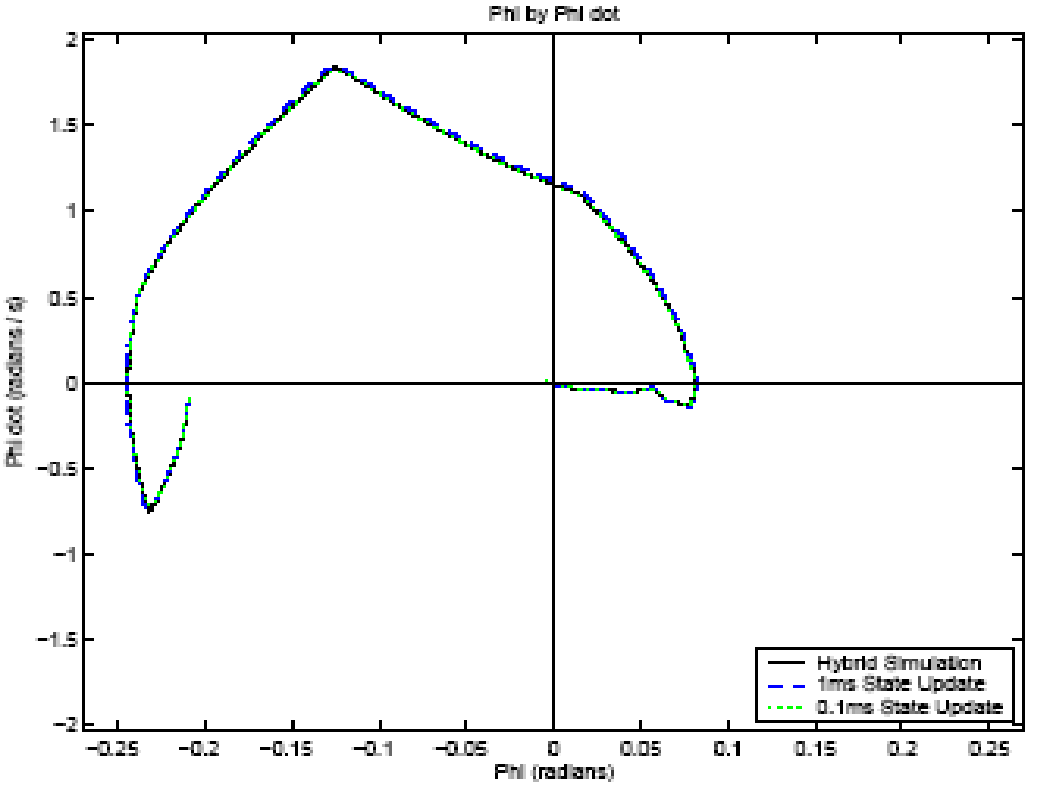
همچنین در شکل (۹) شبیه‌سازی‌های متفاوت سیستم پاندول معکوس با معادلات سیستم غیرخطی مقایسه می‌گردد. در

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.

روش‌های شبیه‌سازی خطی (حل ODE خارجی و اولر خطی با استپ تایم ۱ms و۰/۱ms) با شبیه‌سازی هایبرید سیستم با دینامیک‌های خطی مقایسه شده‌است؛ همچنین روش‌های غیرخطی (تقریب غیرخطی اولر با زمان‌های استپ۱ ms و۰/۱ms) با شبیه‌سازی هایبرید سیستم با دینامیک‌های غیرخطی مقایسه شده است.



شکل۸- نمودار فاز در «گوشه‌ها»



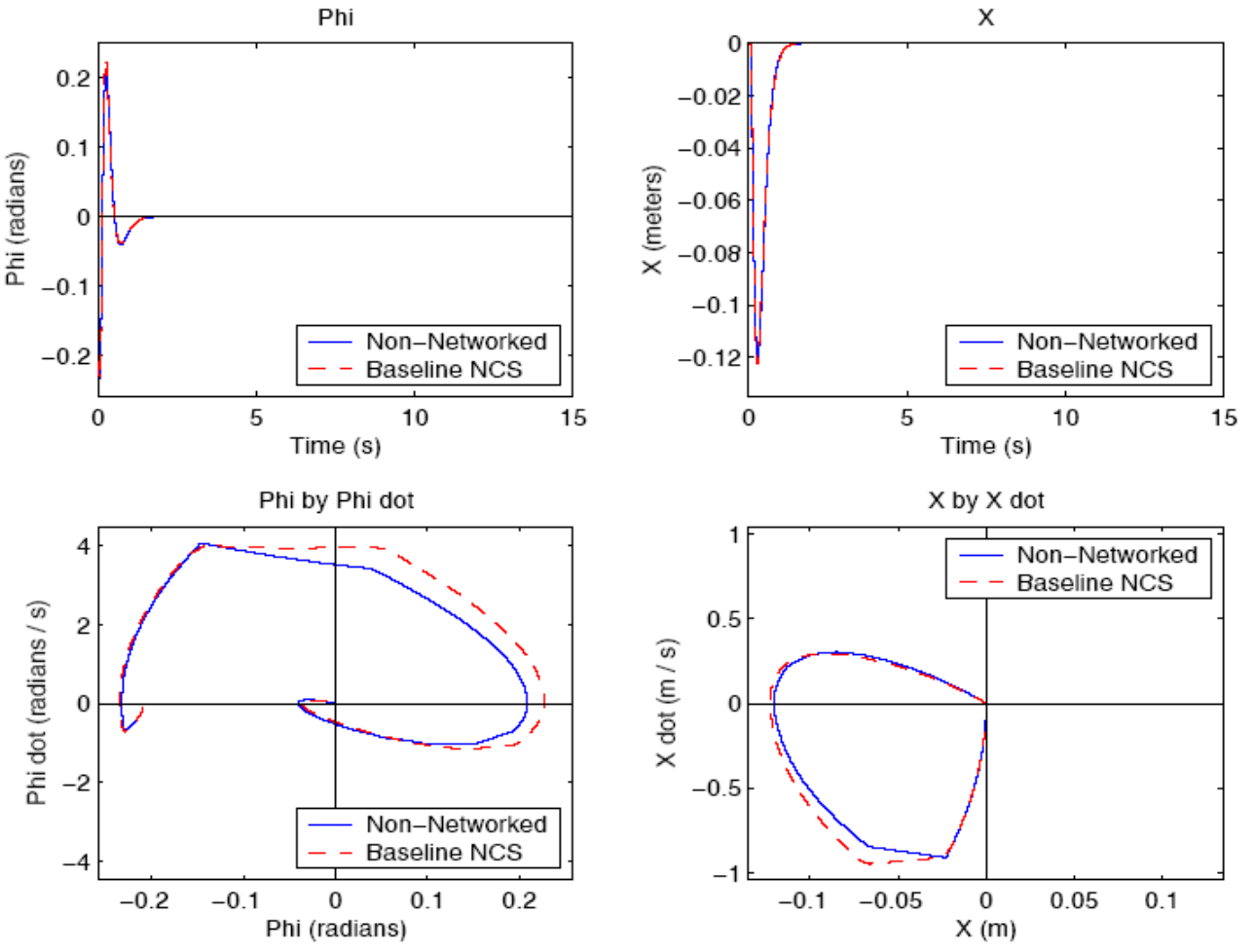
شکل۹- شبیه‌سازی‌های پاندول معکوس با معادلات

در جدول (۱) زمان اجرای روش شبیه‌سازی بیان شده‌است. چارچوب کاری شبیه‌سازی بر مبنای ns-2، بسته عامل/پلانت را به‌کار 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 به‌کار برد. اگرچه روش‌های فوق‌الذکر با حداقل دقت می‌باشند اما تقریب درون خطی اولر با تایم‌استپ ۱ ms بهترین دقت را با توجه به زمان شبیه‌سازی می‌دهد.

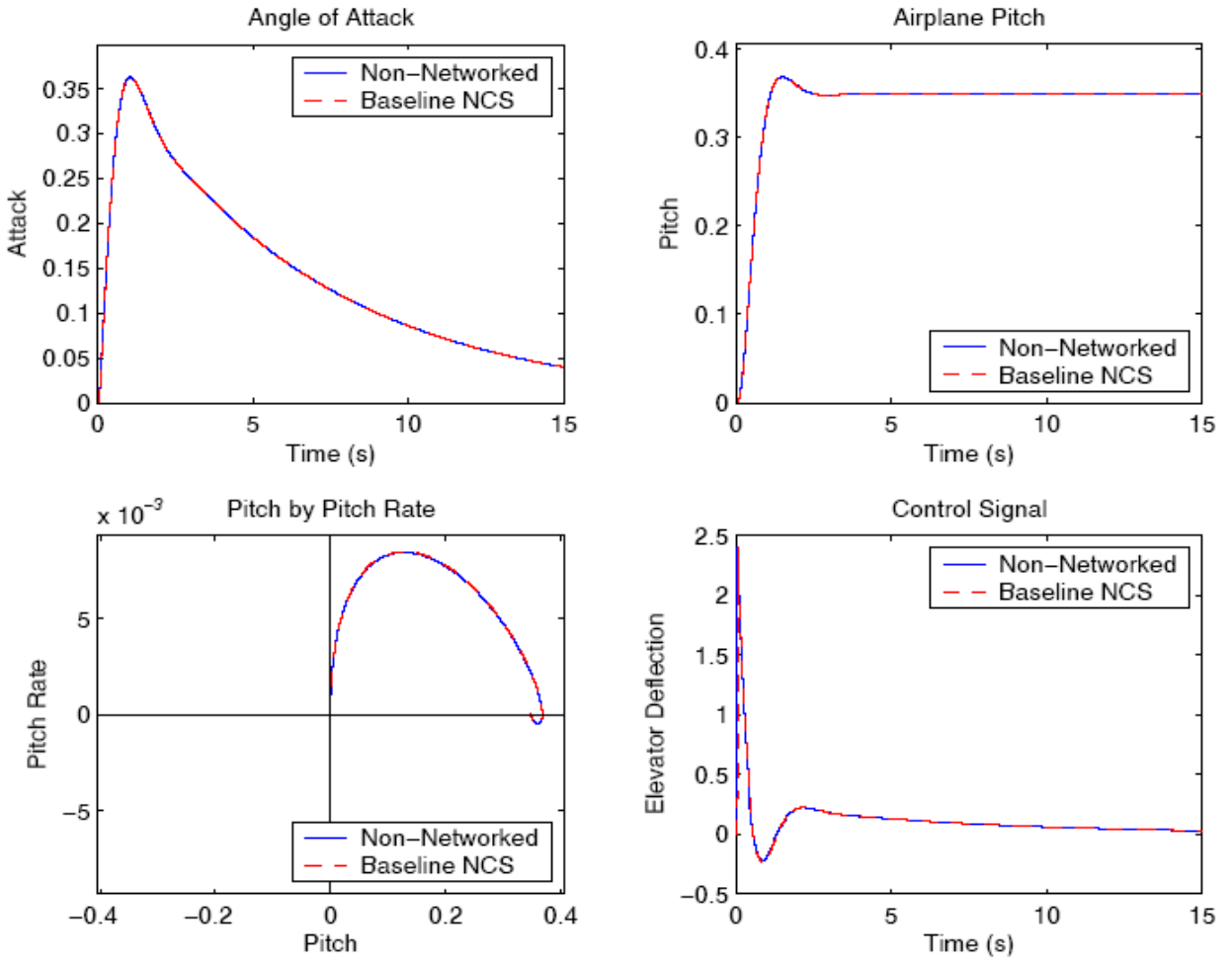
۴– شبیه‌سازی‌های پایه

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

شکل(۱۰) سیستم حالت پایه را در برابر سیستم پاندول معکوس شبکه نشده، نشان می‌دهد. نتایج این بررسی پایه، تأخیرهای ثابت و کوچک سنسور به کنترل‌کننده و کنترل‌کننده به عملگر (هر کدام به میزان۱/۵۱ms) 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.



شکل۱۰- مقایسه سیستم پاندول معکوس در حالت پایه و شبکه نشده



شکل۱۱- مقایسه سیستم پیچ کنترل در حالت پایه و شبکه نشده

۵– پلانت‌های متعدد

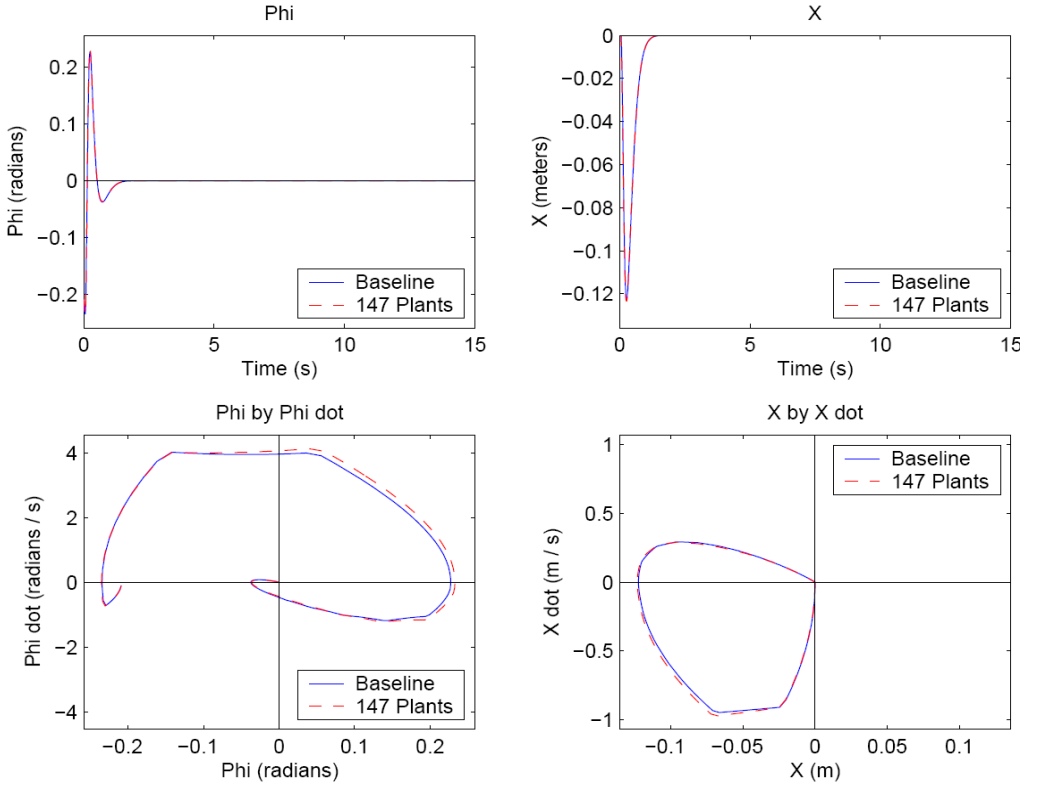
در شبیه‌سازی پایه در سیستم کنترل شبکه، تنها گره‌هایی که به شبکه متصل شده‌اند، کنترل‌کننده و پلانت مورد نظر می‌باشند. این ترکیب عرض باند کمتری از سیستم را به‌کار می‌برد. به‌منظور استفاده بیشتر از عرض باند، سیستم کنترل شبکه با ۱۴۷ پلانت که به کنترل‌کننده متصل شده‌اند، شبیه‌سازی شده است. فهرست نمونه‌های پلانت در شبکه بر مبنای غیر رندم تنظیم شده است، شکل (۱۲) کارایی سیستم پاندول معکوس را در زمانی‌که 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 کنترل‌کننده از دست می‌روند.

شکل (۱۳) سیگنال کنترل این سیستم را نشان می‌دهد که در آن تعداد بسته‌های در صف، تعداد بسته‌های از دست رفته در خط و تأخیرهای سنسور به کنترل‌کننده و کنترل‌کننده به عملگر مشخص می‌باشند.

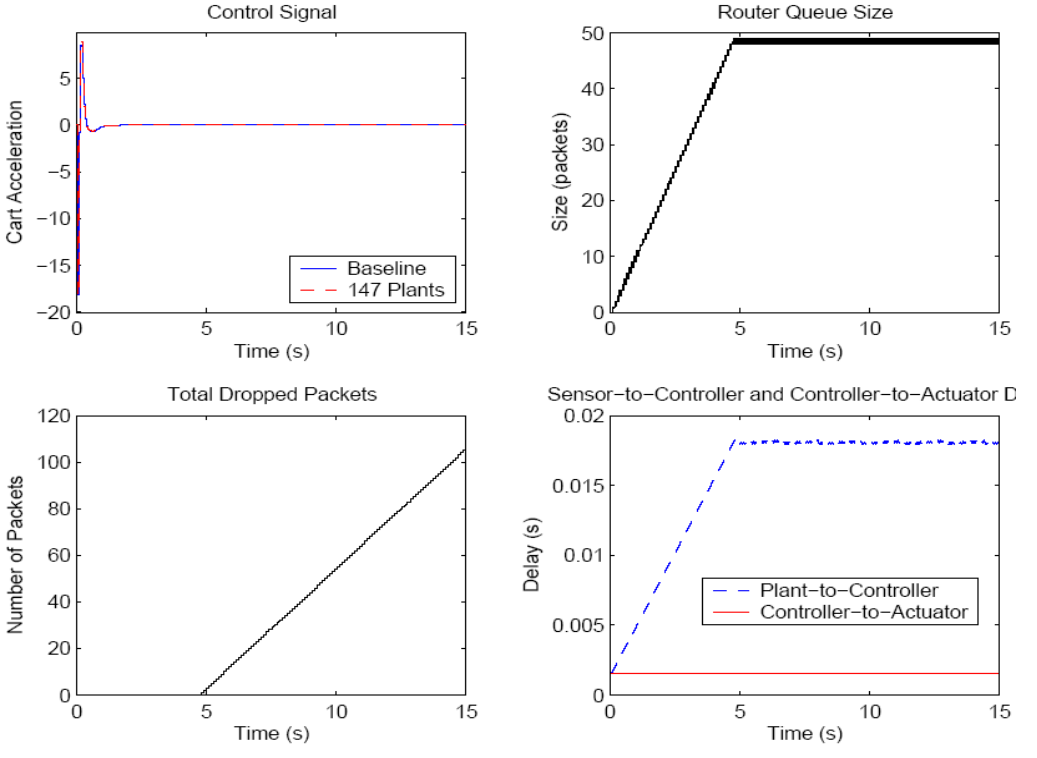
وقتی صف شروع به پرشدن می‌کند، تأخیر سنسور به کنترلر زیاد شده و بسته‌های جدیدالورود، در حافظه باقی مانده تا صف خالی گردد، همچنین زمانی که صف پر گردید، از دست رفتن بسته‌ها آغاز می‌شود، اگرچه سیستم در لبه اشباع عرض باند قرار دارد و همراه با تأخیرهای مختلف، اتلاف اطلاعات نیز وجود دارد، سیستم پاندول معکوس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

شکل(۱۴) حالت سیستم پیچ کنترل را وقتی۱۴۷ 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 پریود نمونه‌برداری شده و دارای بسته‌های

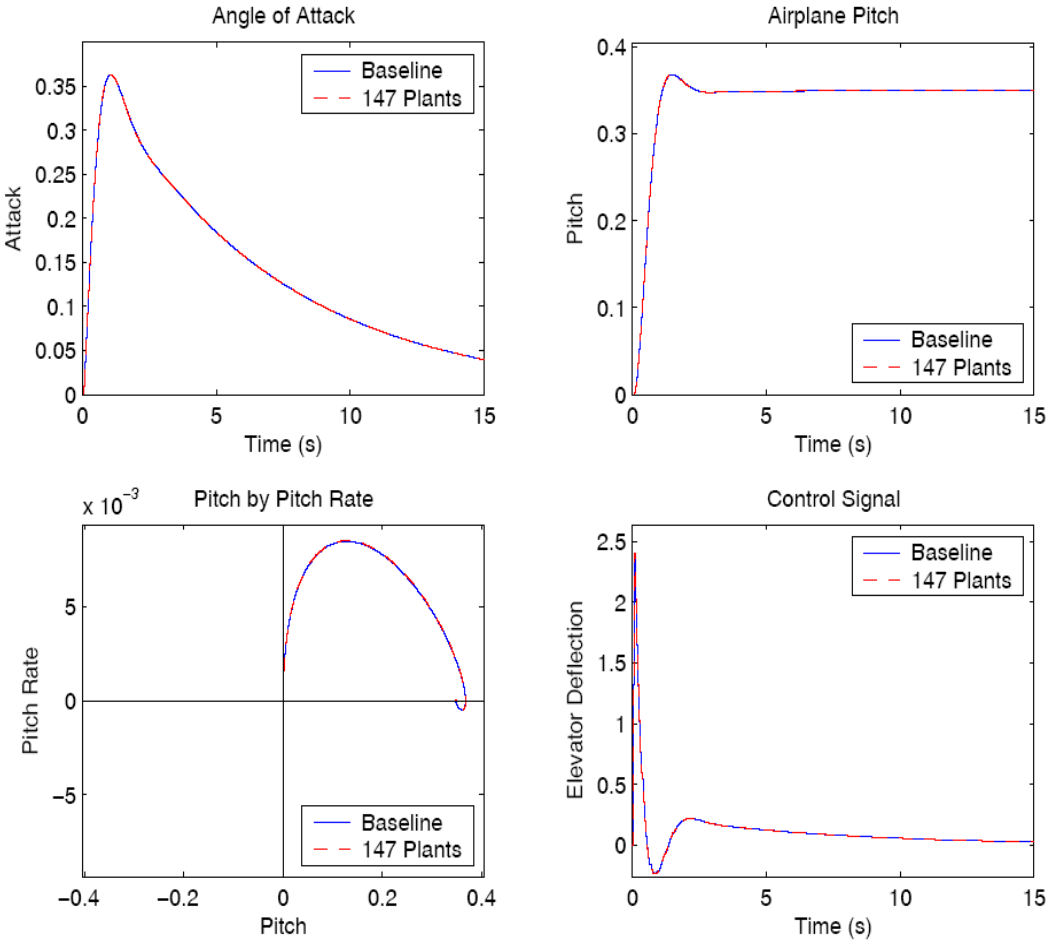
اطلاعاتی هم‌سایز بوده طول صف، تلفات شبکه‌ها و تأخیر در شکل(۱۴) قابل تشخیص می‌باشند.



شکل۱۲- مقایسه سیستم پاندول معکوس در حالت پایه و ۱۴۷ پلانت



شکل۱۳- سیگنال کنترل و نحوه تاخیر و اتلاف اطلاعات درسیستم پاندول معکوس



شکل۱۴- مقایسه سیستم پیچ کنترل در حالت پایه و ۱۴۷ پلانت در شبکه

۶– نتیجه‌گیری

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

در روش مدل هایبرید 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 به‌کار برد. اگرچه روش‌های ذکر شده با حداقل دقت می‌باشند، تقریب درون خطی اولر با تایم‌استپms ۱بهترین 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, SanDiego, 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).

[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

[7] Vegas, Dec. 10-13, 2002.

[8] 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 به‌صورت زیر می باشند:

۱- معادلات پاندول معکوس:

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

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

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

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