مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۱۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۳۵-۲۳

کنترل ازدحام شبکه TCP با استفاده از روش تخصیص طیف محدود: مطالعه مقایسه‌ای

طاهره حیدری‌نیاز[۱]، علیرضا الفی[۲]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی شاهرود، thaidaryniaz@yahoo.com

[۲] دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه صنعتی شاهرود، a_alfi@shahroodut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۴/۸/۱۷، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۵/۲/۲۳)

چکیده: ازدحام یکی از مطرح‌ترین مسائل در شبکه‌های داده است. زمانی که مقدار داده‌های ورودی به شبکه از ظرفیت شبکه تجاوز کند، ازدحام رخ می‌دهد. هدف از کنترل ازدحام حفظ اندازه صف در یک سطح مطلوب مشخص است که عملکرد شبکه به‌طور چشمگیری افت می‌کند. چنین شرایطی منجر به زمان تاخیر طولانی و حتی ممکن است منجر به ناپایداری شبکه گردد. هدف از این مقاله کنترل ازدحام شبکه TCP با استفاده از روش تخصیص طیف محدود و مقایسه آن با سایر روش‌های مرسوم دیگر شامل REM ,PI و H∞ می‌باشد. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی با آزمایش‌های مختلفی با درنظر گرفتن تغییرات دینامیک‌های شبکه در شبیه‌ساز شبکه NS-2 بررسی می‌گردد.

کلمات کلیدی: شبکه داده، کنترل ازدحام، مدیریت فعال صف، روش تخصیص طیف محدود.

TCP Congestion Control using Finite Spectrum Assignment: A Comparative Study

Tahereh HeidariNiaz, Alireza Alfi

Abstract: Congestion is one of the most well-known problems in data networks. The congestion occurres when the number of packets being transmitted through the network exceeds the packet handling capacity of the network. The aim of AQM is to keep the queue size at a certain desired level at which network performance falls off dramatically. This situation leads to long time delays, and may even result in instability in the network. The purpose of this paper is to design controller for congestion control of the TCP network using Finite Spectrum Assignment (FSA) technique and comparison with other conventional methods including Proportional-Integrator (PI), Random Early Detection (REM) and H∞. To evaluate the performance of the proposed controller, different experiments are conducted through NS-2 simulations by considering variations in network dynamics.

Keywords: Data networks, Congestion control, Active queue management, Finite spectrum assignment.

۱- مقدمه

با پیشرفت شبکه‌های داده به صورت امروزی و افزایش تعداد کاربران، مسأله کنترل ازدحام[1] یکی از مهمترین مسائلی است که نظر کارشناسان و محققان را به خود جلب کرده است [۱]. به هنگام وقوع ازدحام، کارایی شبکه به خاطر اشباع منابع شبکه مانند لینک‌های مخابراتی، سیکل‌های پردازنده و بافرهای حافظه کاهش می‌یابد. هنگامی که مجموع نرخ ورودی به لینک از ظرفیت آن بیشتر شود، بسته‌ها در یک بافر ذخیره می‌شوند. در صورتی که طول بافر محدود باشد، ادامه یافتن چنین روندی باعث خواهد شد که فضای کافی برای نگهداری بسته‌ها وجود نداشته و لذا بسته‌های ورودی دور ریخته شوند. در چنین حالتی

[1] Congestion

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

است که به خاطر اشباع شدن بافر، ازدحام به وجود می‌آید. کنترل ازدحام در اینترنت شامل الگوریتم‌های پنجره ازدحام TCP[1] و الگوریتم‌های مدیریت فعال صف (AQM)[2] است. الگوریتم‌های پنجره ازدحام TCP در میزبان های انتهایی و الگوریتم‌های AQM در مسیریاب‌ها[3] برای بالا بردن کارایی شبکه و کوچک کردن مقدار تأخیر صف اجرا می‌شوند.

در سال ۱۹۸۹ میلادی برای اولین‌بار ون‌جاکوبسن[4] [۲] دو راهکار کلی برای کنترل ازدحام ارائه داد. در راهکار اول، راه‌حل در نقاط ابتدایی و انتهایی ارسال بسته‌ها یعنی فرستنده و گیرنده است در حالی‌که در راهکار دوم، راه‌حل با اصلاح شبکه و با اتخاذ سیاستی در نقاط میانی شبکه یعنی مسیریاب‌ها مرتبط می‌باشد. در این راهکار، الگوریتم‌های لینک به عنوان عامل بالقوه‌ای برای بهتر شدن الگوریتم‌های مبدأ استفاده می‌شوند. AQM یک الگوریتم لینک است که به مدیریت فعال صف تعبیر می‌شود به‌گونه‌ای که یک صف در AQM با تنظیم قانون در گلوگاه مسیریاب اداره می‌شود. معروف‌ترین الگوریتم AQM، تشخیص زودرس تصادفی (RED[5]) است که به موجب آن، نقاط میانی شبکه قبل از پرشدن صف، اقدام به حذف برخی بسته‌ها به صورت تصادفی می‌نمایند [۳]. روش REM[6] [۴] نیز به عنوان یک راه‌حل دیگر در سال ۲۰۰۰ ارائه شد که در مقایسه با روش RED، از تعریف متفاوتی از ازدحام و تابع احتمال نشان‌دار استفاده می‌کند. با ارائه مدل ریاضی شبکه، محققین کوشیدند تا از نظریه کنترل جهت ارائه روش‌های جدید برای کنترل فعال صف استفاده کنند. ایده اصلی آن بود که قبل از پر شدن صف، حذف تصادفی بسته‌ها از یک قاعده کنترلی پیروی نماید. اولین کنترل‌کننده ارائه شده یک کنترل‌کننده ساده PI بود [۵]. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کنترل‌کننده ارائه شده نسبت به روش RED نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. سادگی روش PI و کارایی آن نسبت به RED موجب پیاده‌سازی تجاری آن گردید. روش‌های مختلف دیگری نیز برای دستیابی به این هدف تا کنون ارایه شده‌اند [۱۸-۶] که از شناخته‌ترین آنها می توان به روش‌های مبتنی بر پیش‌بین اسمیث[7] اشاره کرد [۱۹]. نقش عمده پیش‌بین اسمیث حذف اثر زمان تاخیر بر روی پایداری سیستم حلقه-بسته است [۲۰-۲۲]. آنچه اهیمت دارد این است که روش‌های مرسوم نمی‌توانند با ذات انفجاری دینامیک‌های شبکه تطبیق یابند. از دیدگاه کنترلی، الگوریتم‌های AQM موجود در تنظیم پارامترها و پایداری مقاوم دچار نقص هستند. این بدان معنی است که عملکرد آنها به تغییرات پارامترهای سیستم حساس است. از اینرو، این الگوریتم‌ها در تطبیق شبکه‌های پیچیده با افزایش ترافیک و تعداد کاربران ناتوان هستند. مهم‌ترین ویژگی این است که کنترل‌کننده در برابر تغییرات دینامیک‌های شبکه مقاوم باشد. لذا استفاده از روش‌های مقاوم مانند $H\infty$ برای کنترل ازدحام در [۲۳ و ۲۴] پیشنهاد شده است.

امروزه یک استراتژی کنترل مؤثر دیگر به نام تخصیص طیف محدود (FSA) برای سیستم‌های تأخیردار به ویژه سیستم‌های تأخیردار ناپایدار توسعه داده شده است. از آنجا که سیستم تحت بررسی یک سیستم تاخیردار است، این روش برای طراحی کنترل‌کننده AQM مورد استفاده قرا رگرفته است [۲۵]. هرچند، طراحی با درنظر گرفتن کنترل ازدحام انجام نشده و شبیه‌سازی‌ها در محیط NS2 گزارش نشده است. از اینرو، هدف این مقاله مقایسه عملکردی کنترل‌کننده FSA با سایر روش‌های کنترلی مرسوم ازدحام است. در این مقاله، برای مدل‌سازی شبکه داده از مدل ریاضی پیشنهادی توسط میسرا[8] [۲۶] استفاده می‌شود که یک مدل غیرخطی با تأخیر زمانی است و همواره دینامیک‌های آن در حال تغییر هستند. از اینرو به منظور طراحی کنترل کننده، ابتدا مدل خطی سیستم بدست می‌آید. برای آنالیز عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، آزمایشات مختلفی در محیط شبیه‌ساز شبکه NS-2 ارائه می‌شود و نتایج با روش‌های دیگر مرسوم شامل PI [۲۴]، REM [۱۲] و $H\infty$ مقایسه می‌گردد. این مقاله به صورت زیر مرتب شده است. در بخش ۲ مدل شبکه ارائه می‌شود. در بخش ۳ روش تخصیص طیف محدود بیان می‌شود. بخش ۴ به شبیه‌سازی و مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی اختصاص دارد. در پایان نیز نتیجه‌گیری و پیشنهادات آورده می‌شود.

۲- مدلسازی شبکه داده

شبکه TCP به عنوان سیستمی که دینامیک‌های آن همواره در حال تغییر می‌باشند همواره مورد توجه محققان بوده است. مدل میسرا یکی از بهترین مدل‌ها برای توصیف شبکه TCP می‌باشد که شبیه‌سازی‌ها نزدیک بودن این مدل ریاضی به سیستم واقعی را تأیید کرده‌اند. این مدل بر اساس مدل جریان سیال بدست آمده و یک مدل غیرخطی از شبکه ارائه می‌دهد. این مدل ریاضی سبب گردید شاخه‌ای جدید از تحقیقات برای مدیریت فعال به وجود آید. این بخش به مدل ریاضی استفاده شده در این مقاله اختصاص دارد.

۲-۱ مدل ریاضی شبکه

مدل ساده شده TCP با N منبع TCP مشابه و یک مسیریاب، برای تعیین مقدار متوسط تغییرات و دینامیک صف مسیریاب ارائه شد. این مدل وابسته به تغییرات شبکه است که با معادلات (۱) تا (۳) بیان می‌شود [۲۶].

$$\dot{w}(t)=\frac{1}{R(t)}-\frac{w(t)w\left(t-R(t)\right)}{2R\left(t-R(t)\right)}p\left(t-R(t)\right), \qquad (۱)$$

[1] Transmission Control Protocol
[2] Active Queue Management
[3] Ruter
[4] Jacobson
[5] Random Early Detection
[6] Random Exponential Marking
[7] Smith Predictor
[8] Misra

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

$$\dot{q}(t)=\begin{cases}\dfrac{w(t)}{R(t)}N(t)-C(t) & q>0\\ \max\left\{0,\dfrac{w(t)}{R(t)}N(t)-C(t)\right\} & q=0\end{cases} \quad (۲)$$

$$R(t)=\frac{q(t)}{C(t)}+T_d \quad (۳)$$

در روابط فوق، $q(t)$ طول صف مورد نظر در لینک گلوگاه مسیریاب، $w(t)$ اندازه مورد نظر برای پنجره TCP، $C(t)$ ظرفیت لینک (بسته / ثانیه)، $R(t)$ زمان رفت وبرگشت (RTT) ، $p(t)$ احتمال مارک‌دار شدن بسته در مسیریاب، $N(t)$ فاکتور بار TCP و T_d زمان تاخیر انتشار (ثانیه).

توجه شود که طول صف $q(t)$ واندازه پنجره $w(t)$ کمیت‌های محدود و مثبت هستند یعنی $q_0\in[0,q_{\max}]$ و $w_0\in[0,w_{\max}]$ که $q_{\max}$ و $w_{\max}$ به ترتیب ظرفیت بافر و حداکثر اندازه پنجره را نشان می‌دهند. هرچند احتمال مارک‌دار شدن/حذف بسته‌ها تنها مقادیر ۰ و ۱ می‌گیرد. رابطه (۱) از دو بخش افزاینده و کاهنده تشکیل شده است. بخش افزاینده نشان می‌دهد که به ازای تغییرات در بازه یک رفت و برگشت زمانی، مقدار پنجره تراکم به اندازه یک واحد افزایش می‌یابد. این امر در مرحله جلوگیری از ازدحام پروتکل TCP اتفاق می افتد. در بدست آوردن این مدل فرض شده است که جریان TCP به مرحله جلوگیری از ازدحام رسیده و فقط تغییرات پنجره ازدحام در این مرحله در معادله ظاهر شده است. این فرض در مورد جریان های بلندمدت مانند FTP که به جریان های فیلی[1] معروف هستند، صحیح می‌باشد. بخش کاهنده نشان می‌دهد که در صورت بروز تلفات مقدار پنجره ازدحام بایستی نصف گردد. رابطه (۲) مربوط به نقاط میانی می‌باشد که بر اساس دینامیک تغییرات طول صف بیان می‌شود. این رابطه نیز از دو بخش کاهنده و افزاینده تشکیل شده است. بخش کاهنده که همان ظرفیت نقاط میانی است، نماینده میزان پردازش بسته‌ها در واحد زمان می‌باشد و بخش افزاینده میزان بسته‌هایی که در واحد زمان به صف می‌رسند را نشان می‌دهد [۲۶].

۲-۲ خطی‌سازی

برای خطی‌سازی تعداد بسته‌های TCP و ظرفیت لینک ثابت فرض می‌شود یعنی $N(t)=N$ و $C(t)=C$ [۱۱ و۲۴]. نقطه کار (q_0,w_0,p_0) با فرض $\dot{q}=0,\ \dot{w}=0$ در روابط (۱) و(۳) تعیین می‌شود.

$$\begin{aligned}&\dot{w}=0\Rightarrow w_0^2p_0=2\\ &\dot{q}=0\Rightarrow w_0=\frac{R_0C}{N};\quad R_0=\frac{q_0}{C}+T_d\end{aligned} \quad (۴)$$

بردار پارامترهای شبکه $\eta=(N,C,T_d)$ می‌باشد و نقاط کار واقعی $\Omega\eta$ با رابطه زیر بیان می‌شوند.

$$\Omega\eta=\{(w_0,q_0,p_0):\ w_0\in(0,\bar{w}),q_0\in(0,\bar{q}),p_0\in(0,1)\}$$

در صورت درنظر گرفتن مقادیری برای $\Omega\eta$، می‌توان پارامترهای شبکه η را بدست آورد.

$$\dot{w}(t)=\frac{1}{R_0}-\frac{w(t)w(t-R_0)}{2\left(\frac{q(t-R_0)}{C}+T_d\right)}p(t-R_0)$$

$$\dot{q}(t)=\begin{cases}\dfrac{N}{\frac{q(t-R_0)}{C}}w(t)-C & q>0\\ max\left\{0,\dfrac{N}{\frac{q(t-R_0)}{C}}w(t)-C\right\} & q=0\end{cases} \quad (۵)$$

بنابراین خطی‌سازی در نقطه تعادل منجر به روابط زیر خواهد شد [۲۵]:

$$\delta\dot{w}(t)=-\frac{2N}{R_0^2C}\delta w(t)-\frac{R_0C^2}{2N^2}\delta p(t-R_0), \quad (۶)$$

$$\delta\dot{w}(t)=-\frac{2N}{R_0^2C}\delta w(t)-\frac{R_0C^2}{2N^2}\delta p(t-R_0), \quad (۷)$$

که در آن $\delta w=w-w_0$، $\delta p=p-p_0$ و $\delta q=q-q_0$.

لازم به ذکر است که برای خطی‌سازی، تأخیر زمانی با فرض $w>>1$ با "$(t-R_0)$" جایگزین می‌شود. با گرفتن تبدیل لاپلاس از روابط (۶) و (۷)، تابع تبدیل سیستم به صورت زیر بدست می‌آید.

$$G(s)=\frac{K_me^{-sR}}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (۸)$$

که در آن $T_1=R^2C/2N$ ،$T_2=R$ و $K_m=(RC)^3/4N^2$

۳- FSA

در این بخش به تشریح روش FSA برای کنترل ازدحام در شبکه داده می‌پردازیم. این تکنیک یک روش مؤثر برای کنترل سیستم‌های تأخیر زمانی است. تابع تبدیل کلی زیر را در نظر بگیرید.

$$G(s)=P(s)e^{-sh}=C(sI-A)^{-1}Be^{-sh} \quad (۹)$$

که در آن A، B و C ماتریس‌هایی با ابعاد مناسب برای تحقق فضای حالت متناظر هستند. FSA قانون کنترل پسخوردی زیر را با استفاده از حالت های پیش‌بینی شده $x_p(t)$ تعیین می کند:

$$\begin{aligned}&u(t)=Fx_p(t)\\ &x_p(t)=e^{Ah}x(t)+\int_0^h e^{A\xi}Bu(t-\xi)d\xi\end{aligned} \quad (۱۰)$$

سیستم حلقه-بسته منتج شده پایدار است اگر $A+BF$ پایدار باشد. با این طرح کنترلی، ترم تأخیر از فرایند طراحی حذف می‌شود. الگوریتم‌های

[1] Elephant flow

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

کنترلی متفاوتی بر اساس FSA بسته به درجات مختلفی از پیچیدگی سیستم ارائه شده است [۲۷]. در این بخش ابتدا الگوریتم عمومی و سپس الگوریتم ردیابی مجانبی و تنظیم سیستم‌های پایدار FSA تحت خطاهای مدل‌سازی مورد استفاده در این مقاله بیان می‌شود.

۳-۱ الگوریتم عمومی FSA

الگوریتم FSA برای سیستم‌های تأخیر زمانی [۲۸] در واقع یک تعمیم از تخصیص قطب حوزه فرکانس ولوویچ[1] برای سیستم‌های بدون تأخیر می‌باشد [۲۹]. فرایند بدون تأخیر زیر را در نظر بگیرید:

$$Y(s)=G(s)U(s)=\frac{a(s)}{b(s)}U(s) \qquad (۱۱)$$

که در آن $a(s)$ و $b(s)$ به ترتیب چندجمله‌ای‌های نسبت به هم متباین با درجه m و n ($0\le m\le n-1$) هستند.

چندجمله‌ای مشخصه مطلوب سیستم حلقه-بسته را با $p(s)$ نمایش می‌دهیم که یک چندجمله‌ای مونیک[2] با درجه n است. علاوه‌براین، $b(s)$-$p(s)$ را با $f(s)$ نشام می‌دهیم که اغلب از درجه n-1 می‌باشد. یک چندجمله‌ای پایدار مجانبی مونیک درجه n-1 را نیز به عنوان $q(s)$ درنظر می‌گیریم که در واقع بیانگرچندجمله‌ای مشخصه رویتگر مرتبه کاهش‌یافته لیونبرگر است که یک تخمین حالت $\hat{x}(t)$ از روی ورودی و خروجی در دسترس را نتیجه می‌دهد. با درنظر گرفتن معادله چندجمله‌ای

$$k(s)b(s)+h(s)a(s)=q(s)f(s) \qquad (۱۲)$$

که در آن $k(s)$ و $h(s)$ چندجمله‌ای‌های مجهول هستند.

معادله (۱۲) حل یکتایی برای $k(s)$ و $h(s)$ بدست می‌دهد که اغلب به ترتیب از درجه n-2 و n-1 می‌باشند. با استفاده از $k(s)$ و $h(s)$ بدست آمده قانون کنترل به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$U(s)=\frac{k(s)}{q(s)}U(s)+\frac{h(s)}{q(s)}Y(s)+R(s) \qquad (۱۳)$$

که در آن $R(s)$ تبدیل لاپلاس ورودی مرجع است. قانون کنترل (۱۳) در حوزه زمان عبارتست از

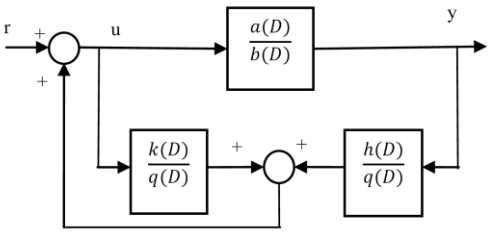
$$u(t)=\frac{k(D)}{q(D)}u(t)+\frac{h(D)}{q(D)}y(t)+r(t) \qquad (۱۴)$$

که در آن D عملگر دیفرانسیل است. همچنین، kq^{-1} و hq^{-1} به ترتیب پایدار اکیدا سره و پایدار سره می‌باشند.

شکل ۱ سیستم کنترل منتج شده را نشان می‌دهد.

حال فرایند تأخیردار زیر را درنظر بگیرید:

$$Y(s)=G(s)U(s)=\frac{a(s)}{b(s)}e^{-Ls}U(s) \qquad (۱۵)$$



شکل ۱: سیستم کنترل جایابی قطب برای فرایند بدون تأخیر

که $L>0$ زمان تأخیر و $a(s)/b(s)$ تابع گویای متباین و اکیدا سره از مرتبه n با $b(s)$ مونیک می‌باشد.

فرض می‌شود که $b(s)$ صفرهای مکرر ندارد. فرایند با تأخیر، ابعادی نامحدود دارد و تمام حالت‌های فرایند وتابع زمانی $u(\tau)$, $t\text{-}L\le\tau\le t$ به عنوان مجموعه $x(t)$ درنظر گرفته می‌شود. بدیهی است که جایابی قطب به پسخورد تمامی حالت‌ها با ضرایب مناسب نیاز دارد. هرچند روش فضای حالت توسعه‌یافته در [۳۰] از ایده دیگری برای پسخورد حالت های پیش‌بینی شده $x(t+L)$ استفاده کرده است. راهکاری که ارائه می شود تقریباً به ایده قبلی وابسته است. حالت‌های فرایند $x(t)$ می‌توانند از $u(t\text{-}L)$ و $y(t)$ تخمین زده می‌شوند، به طوری‌که ترم اول قانون کنترل (۱۴) به $k(D)u(t\text{-}L)$ تغییر می‌کند. برای این‌که نتایجی مشابه نتایج بدست آمده در حوزه زمان بدست آوریم، مقداری سعی و خطا در تعیین مناسب ضرایب پسخورد برای $u(\tau)$ مورد نیاز است. چون $u(\tau)$ ابعادی نامحدود دارد، ضرایب فرم تابع زمانی به خود می‌گیرند. چندجمله‌ای مونیک حلقه-بسته مورد نیاز از درجه n را با $p(s)$ و چندجمله‌ای رویتگر از درجه n-1 را با $q(s)$ نشان می‌دهیم. تعریف می‌کنیم:

$$f(s)=b(s)-p(s) \qquad (۱۶)$$

تابع $f(s)b^{-1}(s)$ را درنظر بگیرید. از آنجایی که $f(s)$ اغلب از درجه n-1 و $b(s)$ از درجه n بوده و فرض می‌شود $b(s)$ صفرهای مکرر نداشته باشد، بسط جزئی کسری از $f(s)b^{-1}(s)$ به صورت

$$\frac{f(s)}{b(s)}=\sum_{i=1}^{n}\frac{c_i}{s-d_i} \qquad (۱۷)$$

ممکن بوده که d_i (i=1,2,…,n) ، n قطب مجزای سیستم هستند. از طرفی $k(s)$ و $h(s)$ از حل معادله چندجمله‌ای

$$k(s)b(s)+h(s)a(s)=q(s)f_L(s) \qquad (۱۸)$$

بدست می‌آید که

$$f_L(s)=b(s)\sum_{i=1}^{n}\frac{c_i e^{d_i L}}{s-d_i} \qquad (۱۹)$$

چندجمله‌ای از درجه n-1 و $k(s)/q(s)$ و $h(s)/q(s)$ سره می‌باشند. در نهایت قانون کنترل $u(t)$ با استفاده از رابطه (۲۰) بدست می‌آید [۲۷]:

[1] Wolovich
[2] Monic

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

$$u(t)=\frac{k(D)}{q(D)}u(t-L)+\frac{h(D)}{q(D)}y(t)+\int_{-L}^{0}\sum_{i=1}^{n}c_i e^{-d_i\theta}u(t+\theta)d\theta+r(t) \quad (۲۰)$$

طرح کلی FSA در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۷]. از آنجایی که سیستم TCP یک سیستم تک ورودی-تک خروجی تأخیردار با قطب‌های مجزاست، الگوریتم اصلاح شده FSA با موضوع ردیابی سیستم تحت کنترل را در ادامه بیان می‌کنیم.

۳-۲ الگوریتم اصلاح شده FSA

ردیابی همواره یکی از مشخصه‌های مطلوب برای هر سیستم کنترل است. برای دستیابی به این هدف ، طرح FSA اصلاح شده پیشنهاد گردید که ساختار کلی آن در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۷].

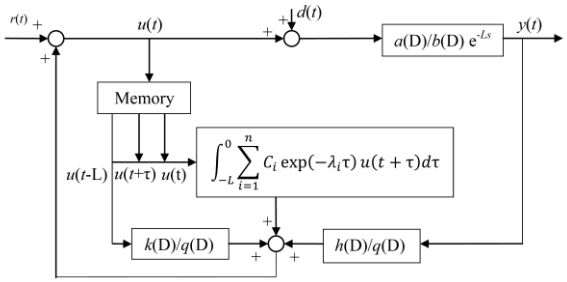
فرض کنید فرایند تحت مطالعه با رابطه زیر بیان شود:

$$Y(s)=G_p(s)U(s)=\frac{a_p(s)}{b_p(s)}e^{-Ls}U(s) \quad (۲۱)$$

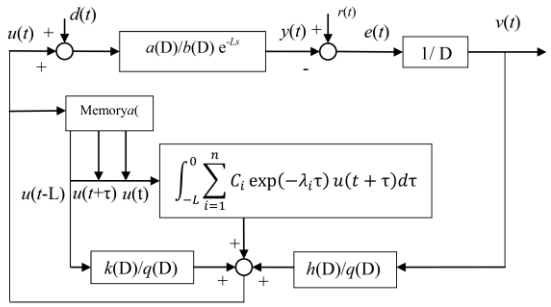
که در آن $a_p(s)/b_p(s)$ تابع گویای متباین و سره با $b_p(s)$ مونیک است. فرایند تعمیم یافته شامل فرایند و یک انتگرال‌گیر با تابع تبدیل زیر نمایش داده می‌شود:

$$G(s)=\frac{a(s)}{b(s)}e^{-Ls} \quad (۲۲)$$

که $a(s)=-a_p(s)$ و $b(s)=s\,b_p(s)$.



شکل ۲: سیستم FSA



شکل ۳: سیستم FSA اصلاح‌شده

توجه کنید که در روش FSA اصلاح شده فرایند واقعی با $G_p(s)$ و فرایند تعمیم یافته با $G(s)$ نمایش داده می‌شود. فرض شده است که فرایند صفری در $s=0$ ندارد. بنابراین $a(s)$ و $b(s)$ متباین هستند. در شکل ۳، سیگنال‌های v و u به عنوان خروجی و ورودی سیستم با تابع تبدیل $G(s)$ می‌باشند، در حالی که $f(s)$، $f_L(s)$، $k(s)$ و $h(s)$ همانند روابط (۱۶) تا (۱۹) تعریف می‌شوند. قانون کنترل اصلاح شده برابر است با [۲۷]:

$$u(t)=\frac{k(D)}{q(D)}u(t-L)+\frac{h(D)}{q(D)}v(t)+\int_{-L}^{0}\sum_{i=1}^{n}c_i e^{-d_i\theta}u(t+\theta)d\theta \quad (۲۳)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از (۲۳) داریم:

$$U(s)=\frac{k(s)}{q(s)}U(s)e^{-Ls}+\frac{h(s)}{q(s)}v(s)+\frac{f(s)}{b(s)}U(s)-\frac{f_L(s)}{b(s)}U(s)e^{-Ls} \quad (۲۴)$$

حال تابع تبدیل حلقه-بسته به صورت زیر بدست می‌آید.

$$Y(s)=\frac{-h(s)a(s)}{p(s)q(s)}e^{-Ls}R(s) \quad (۲۵)$$

واضح است سیستم نامی پایدار است به شرطی که $p(s)$ و $q(s)$ چندجمله‌ای‌های هرویتز باشند.

۴- اعتبارسنجی و مقایسه کنترل‌کننده با استفاده از شبیه‌ساز NS-2

۴-۱ طراحی کنترل‌کننده

در این بخش یک کنترل‌کننده FSA را با استفاده از الگوریتم FSA اصلاح شده طراحی می‌کنیم. با توجه به رابطه (۸) و با درنظر گرفتن $N=60$,$C=3750(15Mbit/s)$,$R=0.246$ [۸و۵]، تابع تبدیل سیستم عبارتست از:

$$G_p=\frac{5.45\times10^4}{(1.9s+1)(0.246s+1)}e^{-0.246s} \quad (۲۶)$$

از تعریف قطب غالب [۳۱] و از رابطه اخیر، کنترل‌کننده FSA اصلاح شده را برای سیستم درجه ۱ زیر طراحی می‌کنیم.

$$G_p(s)=\frac{k_m/T_1T_2}{(s+1/T_1)(s+1/T_2)}e^{-Rs}\approx\frac{k_m/T_1}{(s+1/T_1)}e^{-Rs}=\frac{2.868\times10^4}{s+0.526}e^{-0.246s} \quad (۲۷)$$

حال سیستم تعمیم یافته را به صورت زیر درنظر می‌گیریم:

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

$$G(s)=\frac{-2.868\times10^{4}}{s(s+0.526)}e^{-0.246s} \quad (۲۸)$$

چندجمله‌ای مشخصه حلقه-بسته مطلوب را با فرض $w_0=1.05$, $\xi=1$ تعیین می‌کنیم.

$$p(s)=s^2+2\xi w_0 s+w_0^2=s^2+2.1s+1.1 \quad (۲۹)$$

چندجمله‌ای رویتگر برابر است با

$$q(s)=s+\frac{1}{T_1}=s+0.526 \quad (۳۰)$$

$k(s)$ و $h(s)$ نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned}k(s)&=\left(\frac{1}{\tau}-2\xi w_0+w_0^2\tau\right)e^{-\frac{L}{\tau}}-w_0^2\tau\\&=(0.526-2.1+2.094)e^{-\frac{0.246}{1.9}}-2.094\\&=-1.53\end{aligned} \quad (۳۰)$$

$$\begin{aligned}h(s)&=\frac{w_0^2\tau}{k_p}s+\frac{w_0^2}{k_p}\\&=\frac{2.094}{5.45\times10^4}s+\frac{1.1}{5.45\times10^4}\\&=0.384\times10^{-4}s+0.202\times10^{-4}\end{aligned} \quad (۳۱)$$

از روابط (۱۶) و (۱۹) داریم:

$$\begin{aligned}f(s)&=b(s)-p(s)=-1.547s-1.1\\f_L(s)&=b(s)\sum_{i=1}^{n}\frac{c_i e^{d_i L}}{s-d_i}=-1.63s-1.1\end{aligned} \quad (۳۲)$$

بنابراین قانون کنترل از رابطه (۲۴) عبارتست از:

$$\begin{aligned}U(s)=&\frac{-1.528}{s+0.526}e^{-0.246s}U(s)\\&+\frac{0.384\times10^{-4}s+0.202\times10^{-4}}{s+0.526}v(s)\\&+\frac{-1.574s-1.1}{s^2+0.526s}U(s)\end{aligned} \quad (۳۳)$$

۴-۲ اعتبارسنجی و مقایسه عملکردی

به منظور اعتبارسنجی کنترل‌کننده پیشنهادی آزمایشات مختلفی درنظر گرفته می‌شود که در نرم‌افزار شبیه‌ساز شبکه به نام NS-2 پیاده‌سازی می‌گردد. شبیه‌ساز شبکه (نسخه ۲) که با نام NS-2 شناخته می‌شود [۳۲و۳۳] به طور ساده یک ابزار شبیه‌سازی رخداد-گسسته است که در مطالعه طبیعت شبکه‌های ارتباطی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به کمک NS-2 شبیه‌سازی پروتکل‌ها و عملکردها (مثل TCP و UDP و الگوریتم‌های مسیریابی و مدیریت صف و ...) در شبکه سیمی و شبکه‌های بی‌سیم به خوبی قابل انجام هستند. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی برای TCP New Reno با **اندازه بافر روتر ۸۰۰** پیاده‌سازی شده و سپس نتایج بدست آمده با سایر کنترل‌کننده‌ها شامل PI [۲۴] REM, [۱۲] و H∞ مقایسه می‌گردد. لذا باتوجه به [۳۴و۵] یک مجموعه آزمایش شامل ۷ مورد که در این آزمایشات طیف گسترده‌ای از شرایط شبکه به منظور انجام یک مقایسه مناسب بین الگوریتم‌های موجود و الگوریتم طراحی شده را در برمی‌گیرند.

در آزمایش‌های ۱، ۲ و۳ عملکرد سیستم با تغییرات در تعداد جریان ها به عنوان پارامتر اصلی مطرح می شوند. در این آزمایشات جریان‌ها تنها از بسته‌های FTP ساخته شده‌اند که معمولاً جریان‌های فیلی نامیده می‌شوند، زیرا این جریان‌ها طول عمر بالایی دارند. برای پایداری بافر مسیریاب این جریان‌ها مفید هستند، زیرا آنها برای مدت طولانی نگه داشته می‌شوند و تغییرات بزرگی اتفاق نمی‌افتد. همچنین همراه با جریان‌های فیلی، بسته‌هایی که موشی نامیده می‌شود نیز وجود دارند که بسته‌های TCP با طول عمر کوتاه هستند که برای ترافیک وب استفاده می‌شوند. ترافیک HTTP از درخواست‌های کوچک صفحه ساخته می‌شود، دانلودهایی کوچک از سرورهایی که میزبان صفحات وب هستند. از دید مسیریاب، این نوع از ترافیک رفتار متنوع‌تری از صف را شامل می‌شود که برخی الگوریتم‌های AQM سعی بر جلوگیری از آن را دارند. در آزمایشات ۴، ۵ و۶ رفتار الگوریتم‌ها را تحت انواع مختلفی از جریان ها مطالعه خواهیم کرد. در این آزمایش‌ها از پارامتر N (تعداد جریان‌ها) در تشریح دینامیک سیستم استفاده شده است. این پارامتر تعداد کل جریان‌هایی که از مسیریاب عبور می‌کنند را نمایش می‌دهد، در حالی‌که همه جریان‌ها دارای ویژگی مشابه نیستند. یادآوری می‌شود هدف از کنترل ازدحام نگه داشتن اندازه صف Q در مقدار مطلوب Q_R است. در طراحی کنترل‌کننده H∞ از روش ارایه شده در [۳۵] استفاده شده که تابع تبدیل کنترل‌کننده حاصل عبارتست از

$$\frac{1.33\times10^{7}s^3+1.221\times10^{8}s^2+3.097\times10^{8}s+1.36\times10^{8}}{s^4+7.716\times10^{4}s^3+9.339\times10^{8}s^2+1.857\times10^{12}s+5.56\times10^{12}}$$

در شبیه‌سازی کنترل‌کننده PI با تابع تبدیل $(1.882+\frac{1.816}{s})\times10^{-5}$ [۲۴] درنظر گرفته شده است. پارامترهای مورد استفاده در REM نیز عبارتند از نرخ پاسخ $c=0.001$ و ثابت $\phi=1.001$ [۱۲].

آزمایش اول: آزمایش اول حول نقطه کار انجام می‌شود. تنظیمات عبارتند از:

- تعداد جریان (N): ۶۰ جریان FTP
- زمان رفت و برگشت بسته (RTT): 246ms (با طول صف در نقطه مرجع)
- ظرفیت مسیریاب: 3750 pkt/sec (مطابق با 15Mb/s برای متوسط اندازه بسته 500)

نتایج این شبیه‌سازی در شکل‌های ۴ و ۵ و جدول ۱ آورده شده است. همانطور که شکل ۴ نشان می‌دهد کنترل‌کننده H∞ دارای عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌های REM, PI, FSA می باشد و در مدت زمان کوتاه‌تری اندازه صف را به مقدار مورد نظر می‌رساند در

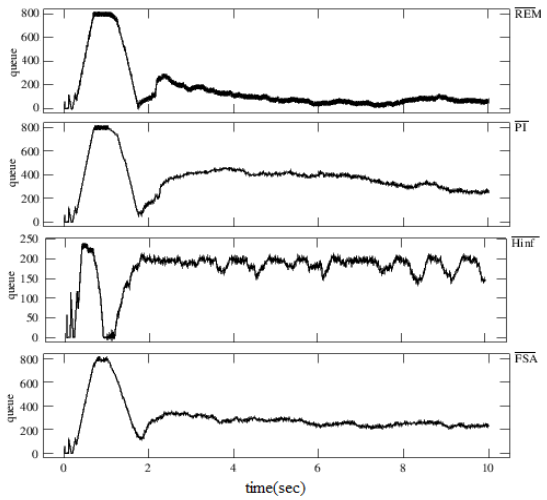
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

حالی که سایر کنترل‌کننده‌ها در ابتدای شبیه‌سازی با سرریز شدن صف مواجه هستند. از شکل ۵ نیز نتیجه می‌شود که کنترل‌کننده H∞ برای تنظیم طول صف در مقدار مرجع تعداد بسته‌های بیشتری را حذف می‌کند تا از سرریز شدن بافر جلوگیری کند. جدول ۱ مقایسه برخی پارامترهای شبکه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف را نشان می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود در تمام مدت شبیه‌سازی، میانگین طول صف با استفاده از کنترل‌کننده H∞ در مقایسه با سایر کنترل‌کننده‌ها در مقدار مطلوب‌تری قرار دارد.

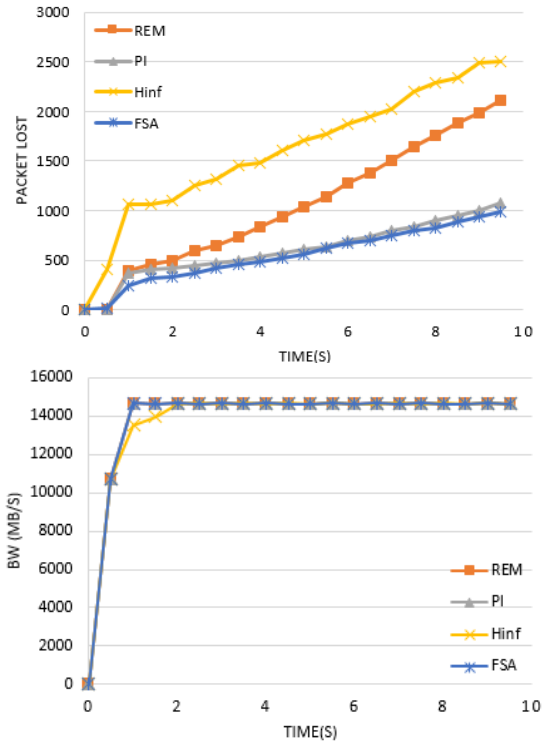
آزمایش دوم: این آزمایش از همان توپولوژی آزمایش ۱ استفاده می‌کند، با این تفاوت که تعداد جریان‌ها کاهش یافته است. تنظیمات این آزمایش به قرار زیر است:

- تعداد جریان FTP (N): ۳۰ جریان
- زمان رفت وبرگشت (RTT): 246ms

نتایج در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. هنگامی که جریان‌ها را به تعداد قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهیم، عملکرد برخی کنترل‌کننده‌ها مانند REM مختل می‌شود. همانطور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود کنترل‌کننده REM بهره‌وری کافی از صف ندارد این در حالی است که سایر کنترل‌کننده‌ها به خوبی طول صف را مدیریت کرده و تقریبا در تمام مدت شبیه‌سازی طول صف در مقدار مرجع نگه داشته می‌شود. با مقایسه شکل ۵ و ۶ ملاحظه می‌کنیم در یک بازه زمانی کوتاه (ثانیه ۱ تا ۲ شبیه‌سازی) کنترل‌کننده H∞ برای تنظیم طول صف در مقدار مرجع میزان حذف بسته‌ها را به طور چشمگیری بالا برده است. با توجه به مقایسه انجام شده در جدول ۲، کنترل‌کننده H∞ دارای قابلیت گذردهی (بازدهی) کمتری نسبت به سایر کنترل‌کننده‌ها می‌باشد و در نتیجه نرخ حذف بسته بالاتری دارد.



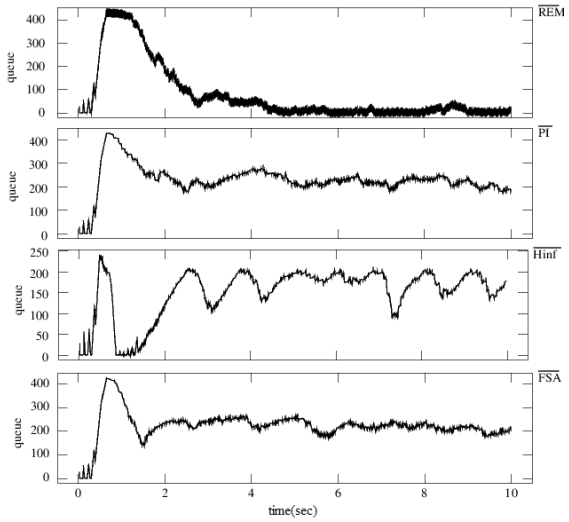
شکل ۴ : پاسخ سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف در آزمایش اول



شکل ۵ : نمودار حذف بسته در بافر مسیریاب و پهنای باند لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش اول

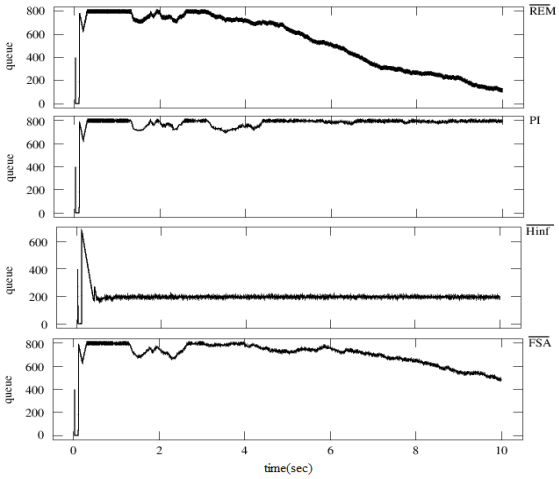
جدول ۱: عملکرد روش‌های مختلف بر روی لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش اول

Method	Pkts sent (Mbps)	Pkts dropped (Mbps)	Loss ratio %	Average queue	Link throughput %
REM	19.022	1.189	6.25	160.067	98.840
PI	18.585	0.752	4.04	360.915	98.840
H∞	19.189	1.47	7.66	168.632	98.207
FSA	18.594	0.761	4.092	303.683	98.843

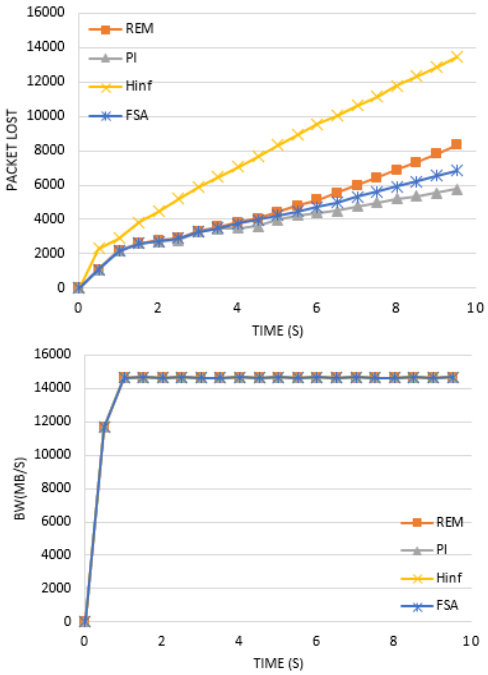


شکل ۶ : پاسخ سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف در آزمایش دوم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]



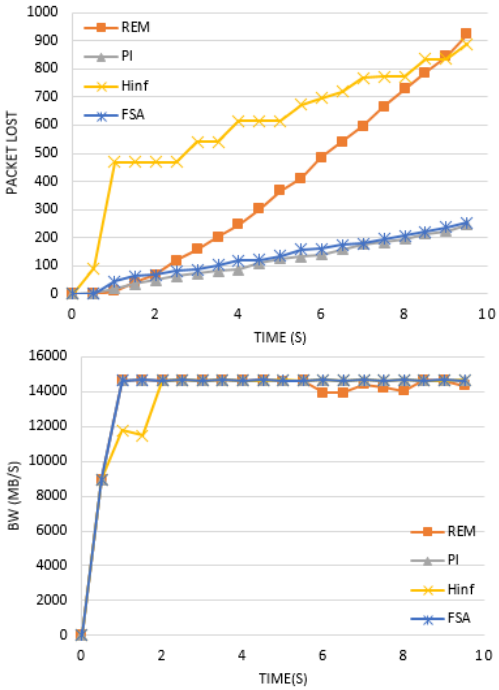
شکل ۸ : پاسخ سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف در آزمایش سوم



شکل ۹ : نمودار حذف بسته در بافر مسیریاب و پهنای باند لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش سوم

جدول ۳ : عملکرد روش های مختلف روی لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش سوم

Method	Pkts sent (Mbps)	Pkts dropped (Mbps)	Loss ratio %	Average queue	Link throughput %
REM	22.766	4.547	19.972	532.561	99.173
PI	22.035	3.816	17.318	712.157	99.174
H∞	25.435	7.216	28.37	212.753	99.174
FSA	22.321	4.102	18.377	654.246	99.174



شکل ۷ : نمودار حذف بسته در بافر مسیریاب و پهنای باند لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش دوم

جدول ۲: عملکرد روش های مختلف بر روی لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش دوم

Method	Pkts sent (Mbps)	Pkts dropped (Mbps)	Loss ratio %	Average queue	Link throughput %
REM	17.968	0.506	2.816	80.487	96.94
PI	18.018	0.322	1.787	212.929	98.244
H∞	17.955	0.632	3.52	136.513	96.17
FSA	18.053	0.357	1.977	209.365	98.244

آزمایش سوم: در این آزمایش عملکرد کنترل کننده در حالی که تعداد جریان ها به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد، بررسی می‌شود. تنظیمات این آزمایش به قرار زیر است:

- تعداد جریان‌ها (N): ۴۰۰ جریان FTP، سایر پارامترها همانند آزمایش ۱ و۲ ثابت هستند.

نتایج این شبیه‌سازی در شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۳ آورده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود کنترل‌کننده H∞ پاسخ مناسبتری نسبت به سایر کنترل‌کننده‌ها به افزایش بار نشان می‌دهد. سایر کنترل‌کننده‌ها زمان زیادی برای رسیدن به طول صف پایدار نیاز دارند. همانطور که از شکل ۸ ملاحظه می‌شود سایر کنترل‌کننده‌ها از جمله REM, PI و FSA با سرریز شدن بافر مواجه هستند. با مشاهده جدول ۳ ملاحظه می‌کنیم تمامی کنترل‌کننده‌ها دارای قابلیت گذردهی یکسانی می‌باشند. همچنین کنترل‌کننده H∞ در مقایسه با سایر کنترل‌کننده‌ها، میانگین طول صف مطلوب‌تری دارد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

آزمایش چهارم: در این آزمایش تعداد زیادی از جریان ها با ویژگی‌های مختلف درنظر گرفته می‌شود. بدین منظور ترکیبی از جریان های بسته FTP و HTTP، از طریق مسیریاب فرستاده می‌شوند. تنظیمات برای این آزمایش عبارتند از:

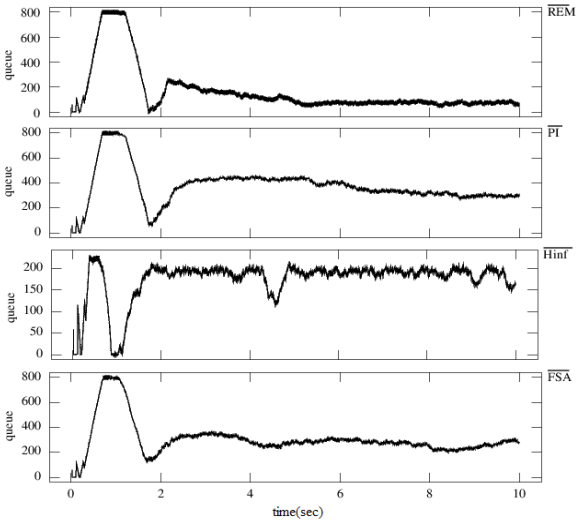
- تعداد جریان (N): ۶۰جریان FTP و ۱۸۰جریان HTTP (۱۸۰ مشتری و یک سرور)
- RTT: ثابت

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و جدول ۴ آورده شده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی و H∞ قادر به تنظیم صف در مقدار مرجع هستند. این در حالی است که کنترل‌کننده‌های REM و PI با سرریز شدن بافر در ابتدای شبیه‌سازی نیز مواجه هستند. همچنین از شکل ۱۱ و مقایسه انجام شده در جدول ۴ بیان می کنند برای دست یابی به طول صف مطلوب، تعداد بسته‌های بیشتری توسط کنترل‌کننده H∞ حذف شده است.

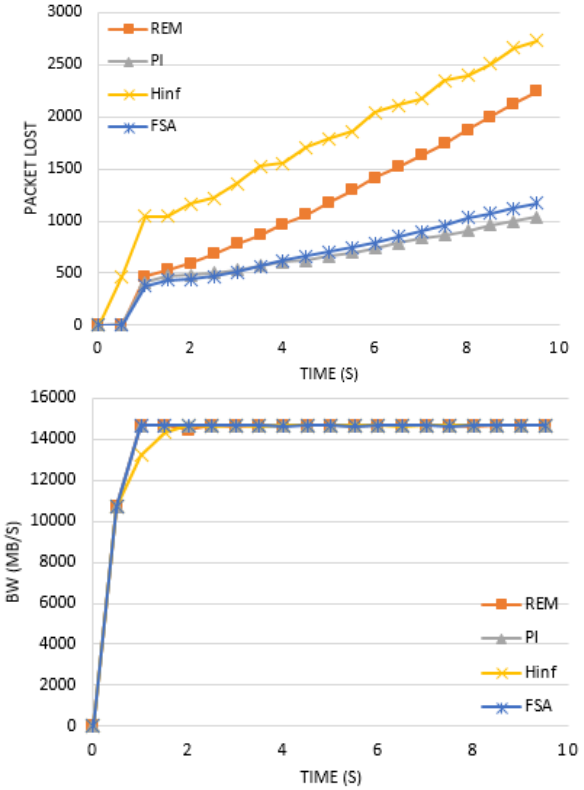
آزمایش پنجم: در این آزمایش، ساختار آزمایش ۴ ثابت نگه داشته می‌شود، در حالی که تعداد اتصالات FTP و HTTP افزایش می‌یابد. تنظیمات این آزمایش عبارتند از :

- تعداد جریان(N) : ۱۸۰جریان FTP و ۳۶۰ جریان HTTP (۳۶۰ مشتری و یک سرور).

نتایج افزایش تعداد جریان‌ها، که در واقع اصلی‌ترین آزمایش در بررسی عملکرد کنترل‌کننده می‌باشد، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و جدول ۵ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود کنترل‌کننده‌های PI، REM و FSA با سرریز شدن بافر در ابتدای شبیه‌سازی مواجه هستند و تقریباً مدت زمان زیادی طول می‌کشد تا به حالت پایدار برسد.



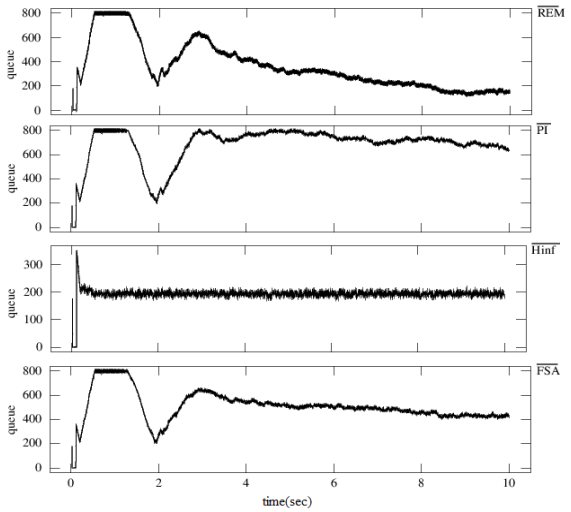
شکل ۱۰ : پاسخ سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف در آزمایش چهارم



شکل ۱۱ : نمودار حذف بسته در بافر و پهنای باند لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش چهارم

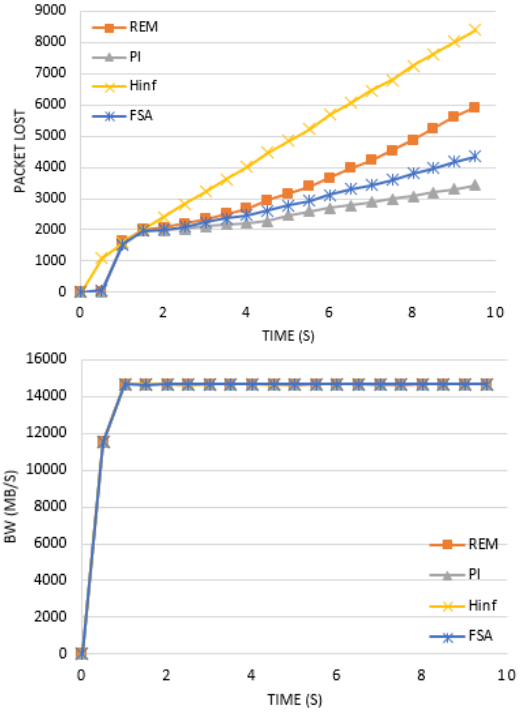
جدول ۴ : عملکرد روش های مختلف در آزمایش چهارم

Method	Pkts sent (Mbps)	Pkts dropped (Mbps)	Loss ratio %	Average queue	Link throughput %
REM	20.288	1.261	6.215	163.933	98.772
PI	19.787	0.842	4.255	365.579	98.85
H∞	20.459	1.597	7.8	172.358	98.25
FSA	19.909	0.902	4.53	309.451	98.85



شکل ۱۲: پاسخ سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف در آزمایش پنجم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]



شکل ۱۳ : نمودار حذف بسته در بافر مسیریاب و پهنای باند لینک گلوگاه در آزمایش پنجم

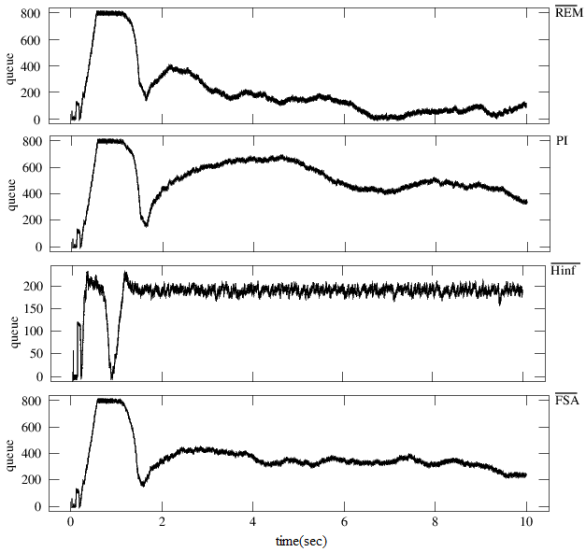
جدول ۵ : عملکرد روش های مختلف در آزمایش پنجم

Method	Pkts sent (Mbps)	Pkts dropped (Mbps)	Loss ratio %	Average queue	Link throughput %
REM	23.169	3.303	14.256	354.522	99.128
PI	22.243	2.416	10.86	651.173	99.13
H∞	24.486	4.603	18.798	193.145	99.13
FSA	22.686	2.732	12.04	506.754	99.13

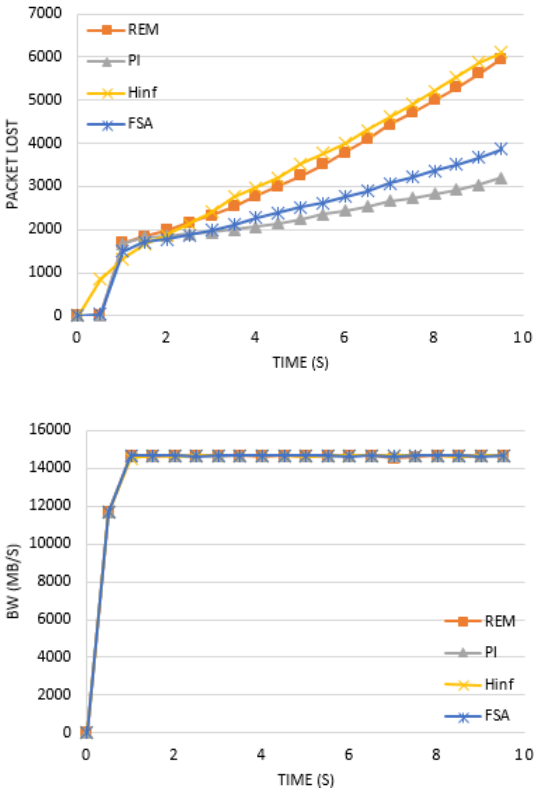
آزمایش ششم: TCP تنها پروتکل مورد استفاده در لایه انتقال نیست. پروتکل دیگری به نام UDP همراه با کاربردهای چندرسانه‌ای و ارتباط محاوره روی وب نیز معرفی شده است. UDP یک ارتباط best-effort را ارائه می‌کند، بدین معنی که اگر برخی بسته‌ها بین دو نقطه انتهایی از دست بروند (گم شوند) پروتکل UDP ارسال داده را بدون حمل خطا ادامه می‌دهد. UDP سیستم تطبیقی و پنجره انتقال متغیر ندارد. در این آزمایش جریان‌های TCP همانند آزمایش ۵ تنظیم شده وترافیک UDP، ۱۰٪ جریان‌های FTP انتخاب شده است. سایر تنظیمات در این آزمایش به قرار زیر است:

- تعداد جریان(N) : ۱۸۰جریان FTP و ۳۶۰ جریان HTTP (۳۶۰ مشتری و یک سرور) و ۶ جریان CBR UDP.

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و جدول ۶ آورده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که برخلاف سایر کنترل‌کننده‌ها که با سرریز شدن بافر در ابتدای شبیه‌سازی مواجه‌اند، کنترل‌کننده H∞ از ابتدای شبیه‌سازی به خوبی اندازه صف را در مقدار مرجع نگه می‌دارد. این در حالی است که برخی کنترل‌کننده‌ها مانند PI و REM در طول مدت شبیه‌سازی نتوانسته طول صف را در مقدار مورد نظر تنظیم کند.



شکل ۱۴: پاسخ سیستم با کنترل‌کننده‌های مختلف در آزمایش ششم



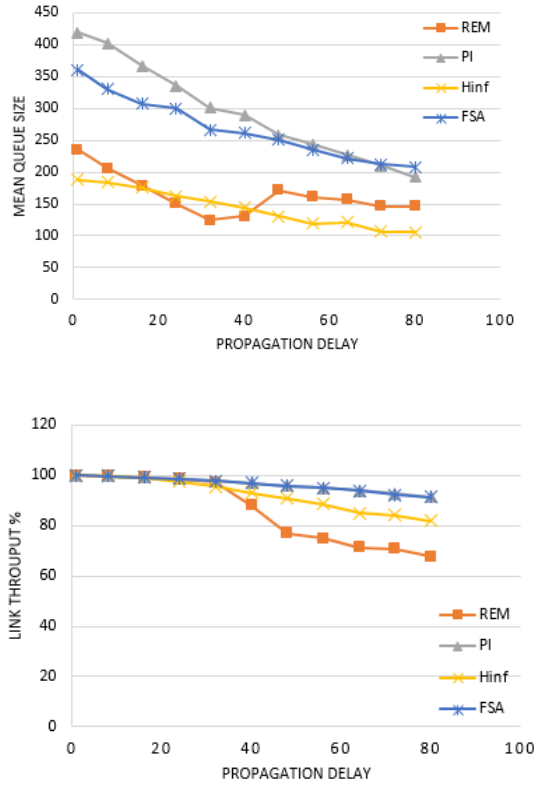
شکل ۱۵: نمودار حذف بسته و پهنای باند لینک گلوگاه مسیریاب در آزمایش ششم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

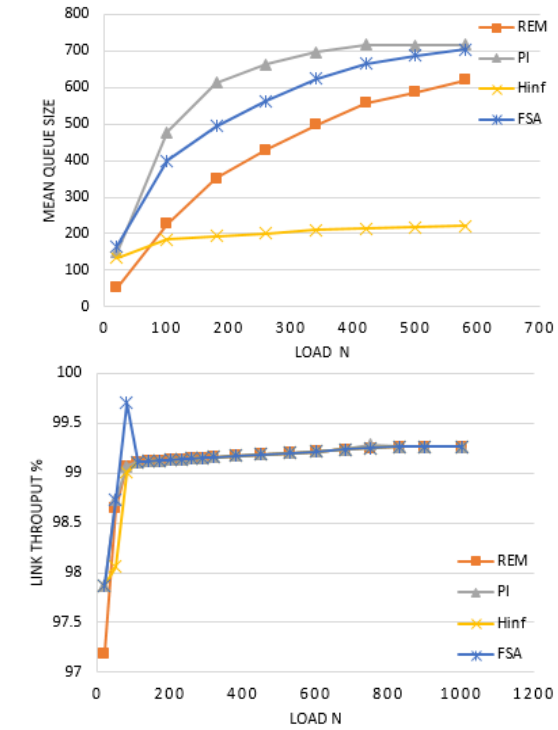
آزمایش هفتم: در این آزمایش عملکرد کنترل‌کننده در برابر تغییر پارامترهای اساسی شبکه شامل RTT ، تعداد بار و ظرفیت لینک مسیریاب بررسی می‌شود. باتوجه به اینکه RTT از رابطه 2*(propagation time + latency time + queuing time) =RTT محاسبه می‌شود که در آن زمان صف‌بندی باتوجه به طول صف مرجع بدست می‌آید یعنی q/C، بنابراین برای تغییر RTT کافیست زمان انتشار propagation time را تغییر دهیم. شکل ۱۶ میانگین طول صف را در برابر تغییرات تأخیر انتشار (TP) بین ۱ تا ۸۰ میلی ثانیه را نشان می‌دهد. کنترل‌کننده H∞ بهترین عملکرد، پایداری صف و پایداری مقاوم را در برابر تغییرات TP را دارد. با افزایش TP میانگین طول صف با استفاده کنترل‌کننده H∞ نوسان کمتری دارد و در تمام مدت شبیه‌سازی پایدارتر است. در ادامه اثرات تغییر تعداد جریان ها روی برخی پارامترهای شبکه را ملاحظه خواهیم کرد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۷ آورده شده است. همانطور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند کنترل‌کننده H∞ عملکرد مقاوم تری را در برابر تغییرات بار از خود نشان می‌دهد در حالی که REM، PI و FSA در برابر تغییرات بار مقاوم نیستند و منجر به انحراف طول صف از مقدار مرجع (۲۰۰ بسته) می‌شوند. با افزایش هرچه بیشتر بار، طول صف در کنترل‌کننده‌های REM، PI و FSA نیز بیشتر می‌شود به طوری که در انتهای شبیه‌سازی طول صف به ۷۰۰ بسته همگرا می‌شود این در حالی است که کنترل‌کننده H∞ در تمام مدت شبیه‌سازی طول صف را تقریباً در مرجع نگه می‌دارد. در نهایت تغیرات ظرفیت لینک مسیریاب را مورد بررسی قرار می دهیم. علت چنین انتخابی این است که ظرفیت لینک در هر لحظه با زمان تغییر می کند و اندازه‌گیری آن کار ساده ای نیست. لذا ضروری است عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به تغییرات ظرفیت لینک مورد بررسی قرار گیرد. در این حالت تمامی پارامترها در مقدار نامی باقی خواهند ماند تنها ظرفیت لینک مسیریاب را تغییر می‌دهیم. نتایج در شکل ۱۸ آورده شده است. از شکل ۱۸ ملاحظه می‌شود کنترل کننده H∞ ثبات بیشتری در مقابل تغییرات ظرفیت لینک از خود نشان می دهد و در تمام مدت زمان شبیه‌سازی طول صف دارای نوسان کمتری می‌باشد.

جدول ۶ : عملکرد روش‌های مختلف در آزمایش ششم

Method	Pkts sent (Mbps)	Pkts dropped (Mbps)	Loss ratio %	Average queue	Link throughput %
REM	17.768	1.607	9.044	190.646	99.103
PI	16.944	0.942	5.56	507.532	99.177
H∞	18.120	1.972	10.88	182.396	99.131
FSA	17.138	1.094	6.38	362.672	99.177

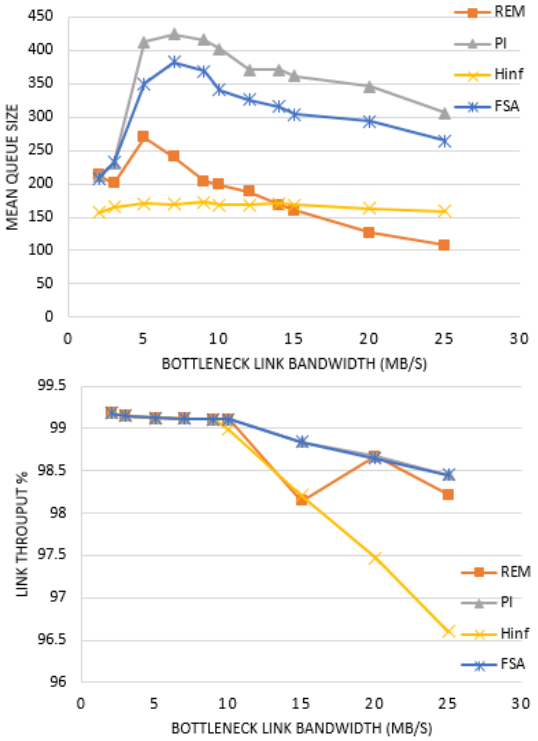


شکل ۱۶ : عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف با تغییرات RTT در آزمایش هفتم



شکل ۱۷: عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف با تغییرات تعداد بار در آزمایش هفتم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]



شکل ۱۸: عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف با تغییرات ظرفیت لینک مسیریاب در آزمایش هفتم

۸- نتیجه‌گیری

شبکه TCP به عنوان یک سیستم با تأخیر زمانی که دینامیک‌های آن همواره در حال تغییر است شناخته می‌شود. هدف از ارائه این مقاله مطالعه مقایسه ای روش FSA برای کنترل ازدحام شبکه TCP با سایر روش‌های مرسوم است. طبق نتایج حاصل از اعتبار سنجی کنترل‌کننده در شبیه‌ساز شبکه NS-2، ملاحظه شد اندازه صف با استفاده از کنترل‌کننده H∞ دارای ثبات بیشتری می‌باشد. همچنین این روش در برابر تغییرات پارامترهای اساسی شبکه از جمله ظرفیت لینک گلوگاه مسیریاب، RTT و بار عملکرد مقاوم‌تری از خود نشان داده و از افزایش ناگهانی طول صف جلوگیری می‌کند این کنترل‌کننده رفتار مطلوب‌تری نیز در برابر انواع مختلفی از جریان‌ها از خود نشان داده و اندازه صف را به خوبی در مقدار مرجع نگه می‌دارد. همچنین، در مقایسه با کنترل‌کننده‌های PI و REM ، عملکرد کنترل‌کننده FSA مناسب‌تر است.

مراجع

[1] D.D. Clark, “The design philosophy of the DARPA internetprotocols”, Proc. of SIGCOMM, pp.106-114, 1988.

[2] V. Jacobson, “Congestion avoidance and control”, in Proc. of SIGCOMM, pp. 158-173, 1988.

[3] S. Floyd, V. Jacobson, “Random early detection gateways for congestion avoidance”, IEEE/ACM Trans on Networking, vol. 3, pp. 115-156, 1993.

[4] S. Athuraliya, V.H. Li, S.H. Low, Q. Yin, “REM: Active queue management”, IEEE Network, pp. 48-53, 2001.

[5] C.V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, W. Gong, “On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows“, in Proc. IEEE INFOCOM, vol. 3, pp. 1726- 1734, 2001.

[6] S. Ryu, C. Rump, C. Qiao, Advances in internet congestion control, IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 5, no. 1, pp. 28-38, 2003.

[7] S. Pourmohammad, A. Fekih, D. Perkins, “Stable queue management in communication networks”, Control Engineering Practice, vol. 37, pp. 67–79, 2015.

[8] C.V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, W. Gong, “Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows”, IEEE Trans on Automatic Control, vol. 47, pp. 945–959, 2002.

[9] E. Lochin, T. Bruno, “Managing Internet routers congested links with a Kohonen-RED queue”, Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 24, pp. 77–86, 2011.

[10] M.S. Mahmoud, M.M. Hassan Hamid, “Feedback control methods for router management”, IET Control Theory and Applications, vol. 5, pp. 1509–1522, 2011.

[11] Q. Chen, O.W.W. Yang, “Robust controller design for AQM router”, IEEE Trans on Automatic Control, vol. 52, pp. 938–943, 2007.

[12] C. Zhou, J. He, Q. Chen, “A robust active queue management scheme for network congestion control”, Computers and Electrical Engineering, vol. 39, pp. 285–294, 2013.

[13] D. Cavendish, M. Gerla, S. Mascolo, “A control theoretical approach to congestion control in packet networks”, IEEE/ACM Trans on Networking, vol. 12, pp. 893–906, 2004.

[14] C. Sall, E.C.E. Alaoui, S. Doubabi, E.M.E. Warraki, “Design of a robust digital controller for congestion control in Internet”, Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 19, pp. 301–313, 2011.

[15] C. Zhou, J. He, Q. Chen, “A robust active queue management scheme for network congestion control”, Computers and Electrical Engineering, vol. 39, pp. 285–294, 2013.

[16] P. Anelli, R. Diana, E. Lochin, “Favor Queue: A parameterless active queue management to improve TCP traffic performance”, Computer Networks 60, pp. 171–186, 2014.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]

[17] H. Bedi, S. Roy, S. Shiva," Mitigating congestion based DoS attacks with an enhanced AQM technique", Computer Communications, vol. 56, pp. 60–73, 2015.

[18] Q. Xu, J. Sun, "A simple active queue management based on the prediction of the packet arrival rate", Journal of Network and Computer Applications, vol. 42, pp. 12-20, 2014.

[19] L.D. Cicco, S. Mascolo, S.I. Niculescu, "Robust stability analysis of Smith predictor-based congestion control algorithms for computer networks", Automatica, vol. 47, pp. 1685–1692, 2011.

[20] M.R. Matausek, A.I. Ribic. "Control of stable, integrating and unstable processes by the modified Smith predictor", Journal of Process Control, vol. 22, pp. 338– 343, 2012.

[21] J. Zhang, L.I. Ping, "Robust H∞ control method of time-delay systems based on Smith predictor", Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering, pp. 1310-1313, 2002.

[22] O.J.M. Smith, "Closer control of loops with dead time", Chem. Eng. Progress, vol. 53, pp. 217–219, 1957.

[23] K. Chavan, R.G. Kumar, M.N. Belur, A. Karandikar, "Robust active queue management for wireless networks", IEEE Trans Control Syst Tech, vol. 19, pp. 1630-1638, 2011.

[24] L.Yu, M. Ma, W. Hu, Z. Shi, Y. Shu, "Design of parameter tunable robust controller for active queue management based on H∞ control theory", Journal of Network and Computer Applications, vol. 34, pp. 750–764, 2011.

[25] D. Melchor-Aguilar, On the stability of AQM controllers supporting TCP flows, Topics in Time Delay Systems, LNCIS 388, pp. 269–279, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.

[26] C.V. Misra, W.B. Gong, D. Towsley, "Fluid-based analysis of a network of AQM router supporting TCP flows with an application to RED", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 30, pp. 151-160, 2000.

[27] Q.G. Wang, T.H. Lee, K.K. Tan, "Finite spectrum assignment for time-delay system", London, U.K.: Sp Springer-verlag, 1999.

[28] K. Ichikawa, "Frequency-domain pole assignment and exact model matching for delay system", Int Journal of Control, vol. 41, pp. 1015-1024, 1985.

[29] W.A. Wolovich, "Linear Multivariable system", New York: Springer Verlag, 1974.

[30] Furukawa.F, Shimemura.E, "Predictive control for systems with delay", Int Journal of Control, vol. 37, pp. 399-412, 1983.

[31] H. U. Unal, D. M. Aguilar, D. Ustebay, S. I. Niculescu, H. Ozbay, "Comparison of PI controllers designed for the delay model of TCP/AQM Networks", Computer Communications, vol. 36, pp. 1225–1234, 2013

[32] NS-2 Network Simulator. http://www.isi.edu/nsnam/ns/ [accessed at April 2008]. Postel J. Transmission control protocol, RFC 793; 1981.

[33] The VINT Project, "The NS manual (formerly ns Notes and Documentation)", http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc.

[34] C.V. Hollot, V. Misra, D. Towsley, W. Gong, "A control theoretic analysis of RED", Proceedings of IEEE Infocom 2001, Anchorage, Alaska, pp. 1510–1519, 2001.

[35] J. Zhang, L.I. Ping, "Robust H∞ control method of time-delay systems based on Smith predictor", Proceedings of IEEE Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering , pp. 1310-1313, 2002.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.1.3.3]