دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه کنترل و سیستم

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان

طراحی کنترل‌کننده تصادفی جهت کمینه‌سازی واریانس طول صف در شبکه‌های انتقال داده

نگارش: عطیه کشاورز محمدیان

استاد راهنما: دکتر حمید خالوزاده

بهمن ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

پدر عزیز

و مادر مهربانم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

تائیدیه هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان: **طراحی کنترل‌کننده تصادفی جهت کمینه‌سازی واریانس طول صف در شبکه‌های انتقال داده** توسط خانم عطیه کشاورز محمدیان صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته: **مهندسی برق** گرایش:**کنترل** با رتبه: مورد تائید قرار می‌دهند.

۱. استاد راهنما	آقای دکتر حمید خالوزاده	امضاء
۲. استاد مشاور		امضاء
۳. ممتحن خارجی	آقای دکتر محمدتقی حمیدی بهشتی	امضاء
۴. ممتحن داخلی	آقای دکتر محمدعلی نکویی	امضاء
۵. نماینده تحصیلات تکمیلی		امضاء

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان‌نامه : طراحی کنترل‌کننده تصادفی جهت کمینه‌سازی واریانس طول صف در شبکه‌های انتقال داده

استاد راهنما: دکتر حمید خالوزاده

دانشجو: عطیه کشاورز محمدیان

شماره دانشجویی: ۸۸۰۵۳۶۴

اینجانب عطیه کشاورز محمدیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش کنترل دانشکده‌ی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می‌باشد و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو

بهمن ۱۳۹۰

حق چاپ و تکثیر

حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هر گونه کپی‌برداری به صورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد. در ضمن، متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

بر خود لازم می‌دانم که از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر خالوزاده که راهنمایی این پروژه را برعهده داشتند و همواره پیگیری‌های دلسوزانه و راهنمایی‌هایشان پشتوانه علمی برای من بوده است، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین مراتب تشکر و امتنان خود را از آقایان، جناب دکتر محمدعلی نکویی و جناب دکتر حمیدی بهشتی به خاطر مطالعه پایان‌نامه و حضور در جلسه دفاعیه ابراز می‌دارم.

در پایان لازم می‌دانم از خانواده محترم خود که همواره در طول زندگیم از راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی‌دریغشان بهره‌مند بوده‌ام صمیمانه سپاس‌گذاری کنم.

چکیده

گسترش روزافزون شبکه اینترنت و افزایش تعداد کاربران، پدیده‌ای به نام تراکم به وجود آورده است. تراکم یکی از مشکلات اصلی در زمینه مهندسی ترافیک در اینترنت است که ناشی از بیشتر شدن تقاضای پهنای باند از ظرفیت شبکه و یا ازدیاد حجم داده در بافر مسیریاب‌های شبکه می‌باشد. تراکم باعث بروز مشکلات زیادی در شبکه مانند افزایش تأخیر، عدم استفاده از پهنای باند موجود شبکه، سرریز بافر مسیریاب‌ها، تلفات داده و در نهایت پدیده شکست تراکم می‌گردد.

روش‌های مختلفی برای کنترل تراکم در شبکه موجود است، که از آن جمله می‌توان کنترل تراکم در سمت فرستنده-گیرنده (روش انتها به انتها) و کنترل تراکم در سمت مسیریاب‌ها (روش میانی) را نام برد. در روش انتها به انتها با افزودن مکانیزم‌های پرهیز از تراکم به پروتکل شبکه با پدیده تراکم برخورد می‌گردد. در روش کنترل تراکم در مسیریاب‌ها، که مدیریت صف فعال نام دارد، سعی بر این است که با نظارت و کنترل طول صف در بافر مسیریاب‌ها از بروز تراکم جلوگیری گردد. روش‌های مدیریت صف فعال اهداف مختلفی مانند کاهش تأخیر در شبکه، کاهش نرخ تلفات داده، افزایش گذردهی و به وجود آوردن عدالت بین کاربران شبکه دارند.

در این پایان‌نامه کنترل‌کننده‌ای جهت مدیریت صف فعال در شبکه‌های اینترنتی با پروتکل معروف TCP (پروتکل کنترل انتقال) طراحی شده است. هدف از طراحی کنترل‌کننده در این پایان‌نامه پایدارسازی طول صف حول مقدار مطلوب و کاهش نوسانات تأخیر به منظور افزایش کارایی شبکه می‌باشد. بدین منظور ابتدا به معرفی و مرور شبکه‌های کامپیوتری و اجزای مختلف آن‌ها، مطالعه پروتکل‌های مختلف و مدل‌سازی جریان سیال شبکه‌های TCP پرداخته شده است. در ادامه پدیده تراکم مورد مطالعه قرار گرفته و روش‌های مختلف مدیریت صف فعالی که تاکنون برای جلوگیری از تراکم ارائه گردیده‌اند معرفی شده است. سپس به تنظیم پارامترهای دو روش غالب مدیریت صف فعال، یعنی روش RED و روش PID، توسط الگوریتم ژنتیک به منظور کاهش جیتر (نوسانات تأخیر) در شبکه پرداخته شده است. در انتها روش کنترل‌کننده حداقل واریانس تعمیم‌یافته برای سیستم‌های غیرخطی به منظور مدیریت صف فعال برای پایدارسازی طول صف حول مقدار مطلوب و کاهش جیتر در شبکه ارائه شده است. با انجام شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز شبکه *ns*2 کارایی و عملکرد این روش در مقایسه با روش‌های موجود و عملی RED و PI بررسی شده است.

کلمات کلیدی : کنترل تراکم – مدیریت صف فعال – پروتکل کنترل انتقال – جیتر – الگوریتم ژنتیک – کنترل حداقل واریانس تعمیم‌یافته غیرخطی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- پیشگفتار ۱

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ پیشینه تحقیقات ۳

۱-۳ ساختار پایان‌نامه ۷

فصل ۲- مروری بر شبکه‌های کامپیوتری ۹

۲-۱ مقدمه ۹

۲-۲ مروری بر شبکه‌های کامپیوتری ۹

۲-۲-۱ توپولوژی‌های مختلف شبکه ۱۰

۲-۲-۲ تقسیم‌بندی جغرافیایی شبکه‌ها ۱۳

۲-۲-۳ مفاهیم و اجزای شبکه‌های کامپیوتری ۱۴

۲-۳ پروتکل TCP ۲۰

۲-۴ پروتکل‌های مختلف TCP ۲۱

۲-۴-۱ پروتکل TCP-Tahoe ۲۲

۲-۴-۲ پروتکل TCP-Reno (TCP استاندارد) ۲۳

۲-۴-۳ پروتکل TRP-NewReno ۲۵

۲-۴-۴ پروتکل TCP-SACK ۲۵

۲-۴-۵ پروتکل TCP-Vegas ۲۶

۲-۴-۶ پروتکل High Speed-TCP ۲۷

۲-۴-۷ پروتکل FAST-TCP ۲۸

فصل ۳- مدل‌سازی TCP ۳۰

۳-۱ مقدمه ۳۰

۳-۲ مدل‌سازی جریان سیال TCP ۳۰

۳-۲-۱ مدل‌سازی تلفات ۳۱
۳-۲-۲ مدل‌سازی ترافیک ۳۳
۳-۲-۳ معادلات دیفرانسیل تصادفی پواسونی توصیف کننده رفتار TCP ۳۳
۳-۲-۴ تحلیل معادلات دیفرانسیل تصادفی پواسونی توصیف کننده رفتار TCP ۳۴
۳-۲-۵ معادلات دیفرانسیل غیر تصادفی توصیف کننده رفتار TCP ۳۵
۳-۲-۶ خطی‌سازی معادلات دیفرانسیل توصیف کننده TCP ۳۸
۳-۲-۷ گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل توصیف کننده TCP ۳۹
۳-۲-۸ مدل‌سازی HighSpeed-TCP (HSTCP) ۳۹

فصل ۴- تراکم در شبکه و روش‌های مقابله با آن ۴۳

۴-۱ مقدمه ۴۳

۴-۲ روش‌های مدیریت صف فعال ۴۵
۴-۲-۱ الگوریتم Drop-tail ۴۷
۴-۲-۲ الگوریتم RED ۴۷
۴-۲-۳ الگوریتم FRED ۴۹
۴-۲-۴ الگوریتم SRED ۵۰
۴-۲-۵ الگوریتم ARED ۵۰
۴-۲-۶ الگوریتم Gentle RED ۵۰
۴-۲-۷ الگوریتم CHOKE ۵۱
۴-۲-۸ الگوریتم REM ۵۱
۴-۲-۹ الگوریتم BLUE ۵۲
۴-۲-۱۰ الگوریتم AVQ ۵۲
۴-۲-۱۱ روش‌های کنترلی ۵۳

۴-۳ معیارهای ارزیابی عملکرد AQM ۵۶
۴-۳-۱ طول صف ۵۶
۴-۳-۲ تأخیر ۵۷
۴-۳-۳ نوسانات تأخیر (جیتر) ۵۷
۴-۳-۴ گذردهی ۵۷
۴-۳-۵ نرخ تلفات ۵۸
۴-۳-۶ عدالت ۵۸

فصل ۵- طراحی کنترل‌کننده برای کمینه‌سازی واریانس طول صف ۵۹

۵-۱ مقدمه ۵۹

۵-۲ تنظیم پارامترهای الگوریتم RED و کنترل‌کننده PID توسط الگوریتم ژنتیک به منظور کمینه‌سازی واریانس طول صف در شبکه‌های TCP/AQM ۶۰

۵-۲-۱ مروری برالگوریتم ژنتیک ۶۰

۵-۲-۲ تنظیم پارامترهای الگوریتم RED توسط الگوریتم ژنتیک به منظور کمینه‌سازی واریانس طول صف در شبکه‌های TCP/AQM ۶۲

۵-۲-۳ تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID توسط الگوریتم ژنتیک به منظور کمینه‌سازی واریانس طول صف در شبکه‌های TCP/AQM ۶۵

۵-۳ مدیریت صف فعال در شبکه‌های TCP بر اساس کنترل‌کننده حداقل واریانس تعمیم‌یافته برای سیستم‌های غیرخطی ۶۷

۵-۳-۱ کنترل‌کننده حداقل واریانس تعمیم‌یافته برای سیستم‌های غیرخطی ۶۸

۵-۳-۲ تحلیل پایداری ۷۱

۵-۳-۳ مدیریت صف فعال در شبکه‌های TCP بر اساس کنترل‌کننده حداقل واریانس تعمیم‌یافته برای سیستم‌های غیرخطی ۷۲

فصل ۶- شبیه‌سازی ۷۵

۶-۱ مقدمه ۷۵

۶-۲ انجام آزمایش‌ها برای روش RED و PID با پارامترهای تنظیم شده توسط GA ۷۵

۶-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی ۷۶

۶-۳ انجام آزمایش‌ها برای روش NGMV ۷۸

۶-۳-۱ آزمایش اول (شرایط نامی) ۷۸

۶-۳-۲ آزمایش دوم (بررسی اثر بار متغیر) ۸۱

۶-۳-۳ آزمایش سوم (بررسی اثر محدودیت ظرفیت بافر) ۸۴

۶-۳-۴ آزمایش چهارم (بررسی اثر بار زیاد) ۸۷

۶-۳-۵ آزمایش پنجم (بررسی اثر ECN) ۹۰

۶-۳-۶ آزمایش ششم (بررسی اثر جریان‌های http) ۹۳

۶-۳-۷ آزمایش هفتم (بررسی اثر جریان‌های UDP) ۹۶

۶-۳-۸ آزمایش هشتم (بررسی اثر پهنای باند متغیر) ۹۹

۶-۳-۹ آزمایش نهم (بررسی اثر تأخیر انتشار زیاد) ۱۰۲

فصل ۷- نتیجه‌گیری ۱۰۶

۷-۱ مقدمه..... ۱۰۶

۷-۲ نتیجه‌گیری ۱۰۶

۷-۳ پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده ۱۰۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱) توپولوژی خطی ۱۰
شکل (۲-۲) توپولوژی حلقوی ۱۱
شکل (۲-۳) توپولوژی ستاره‌ای ۱۲
شکل (۲-۴) توپولوژی توری ۱۲
شکل (۲-۵) توپولوژی درختی ۱۳
شکل (۲-۶) توپولوژی ترکیبی ۱۳
شکل (۲-۷) ساختار داخلی مسیریاب ۱۶
شکل (۲-۸) لینک گلوگاه ۱۷
شکل (۲-۹) لایه‌بندی شبکه در مدل OSI و TCP/IP ۱۸
شکل (۲-۱۰) ساختار یک بسته شامل سرآیند، داده و دنباله ۱۹
شکل (۲-۱۱) تحولات زمانی اندازه پنجره تراکم در پروتکل TCP-Tahoe ۲۲
شکل (۲-۱۲) بروز تلفات TO ۲۳
شکل (۲-۱۳) تحولات زمانی اندازه پنجره تراکم در پروتکل TCP-Reno ۲۴
شکل (۲-۱۴) بروز تلفات TD ۲۵
شکل (۲-۱۵) چگونگی تغییر فاز در پروتکل TCP-Reno ۲۵
شکل (۲-۱۶) تحولات زمانی اندازه پنجره تراکم در پروتکل TCP-Vegas ۲۶
شکل (۳-۱) مدل‌سازی تلفات ۳۲
شکل (۳-۲) بلوک دیاگرام سیستم خطی شده ۳۸
شکل (۴-۱) عملکرد AQM ۴۵
شکل (۴-۲) رابطه طول صف و احتمال دور انداختن بسته‌ها در الگوریتم Drop-tail ۴۷
شکل (۴-۳) رابطه طول صف و احتمال دور انداختن بسته‌ها در الگوریتم RED ۴۸
شکل (۴-۴) رابطه طول صف و احتمال دور انداختن بسته‌ها در الگوریتم Gentle RED ۵۱
شکل (۴-۵) سیستم کنترل حلقه‌بسته TCP/AQM ۵۴
شکل (۵-۱) توپولوژی شبکه مورد نظر برای روش GA-RED و GA-PID ۶۳
شکل (۵-۲) مقدار تابع هزینه بر حسب تکرار در روش GA-RED ۶۴
شکل (۵-۳) (a) طول صف (b) اندازه پنجره (c) احتمال دور ریختن بسته‌ها در روش GA-RED... ۶۵

شکل (۵-۴) مقدار تابع هزینه بر حسب تکرار در روش GA-PID ۶۶
شکل (۵-۵) (a) طول صف (b) اندازه پنجره (c) احتمال دور ریختن بسته‌ها در روش GA-PID ۶۷
شکل (۵-۶) استراتژی کنترل‌کننده حداقل واریانس تعمیم‌یافته برای سیستم‌های غیرخطی ۶۹
شکل (۵-۷) چگونگی تولید سیگنال کنترلی در روش NGMV ۷۱
شکل (۵-۸) نمای کلی سیستم TCP/AQM ۷۲
شکل (۶-۱) طول صف در روش RED با پارامترهای تنظیم شده توسط GA ۷۶
شکل (۶-۲) طول صف در روش PID با پارامترهای تنظیم شده توسط GA ۷۷
شکل (۶-۳) طول صف در آزمایش اول (شرایط نامی) ۸۰
شکل (۶-۴) طول صف در آزمایش دوم (بررسی اثر بار متغیر) ۸۳
شکل (۶-۵) طول صف در آزمایش سوم (بررسی اثر محدودیت ظرفیت بافر) ۸۶
شکل (۶-۶) طول صف در آزمایش چهارم (بررسی اثر زیاد) ۸۹
شکل (۶-۷) طول صف در آزمایش پنجم (بررسی اثر ECN) ۹۲
شکل (۶-۸) طول صف در آزمایش ششم (بررسی اثر جریان‌های http) ۹۵
شکل (۶-۹) طول صف در آزمایش هفتم (بررسی اثر جریان‌های UDP) ۹۸
شکل (۶-۱۰) طول صف در آزمایش هشتم (بررسی اثر پهنای باند متغیر) ۱۰۱
شکل (۶-۱۱) طول صف در آزمایش نهم (بررسی اثر تأخیر انتشار زیاد) ۱۰۴

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۶-۱) نتایج روش RED و PID ۷۷
جدول (۶-۲) آزمایش اول ۸۱
جدول (۶-۳) آزمایش دوم ۸۴
جدول (۶-۴) آزمایش سوم ۸۷
جدول (۶-۵) آزمایش چهارم ۹۰
جدول (۶-۶) آزمایش پنجم ۹۳
جدول (۶-۷) آزمایش ششم ۹۶
جدول (۶-۸) آزمایش هفتم ۹۹
جدول (۶-۹) آزمایش هشتم ۱۰۲
جدول (۶-۱۰) آزمایش نهم ۱۰۵

فهرست علائم و اختصارات

ACK	Acknowledgment
AQM	Active Queue Management
ARED	Adaptive Random Early Detection
AVQ	Adaptive Virtual Queue
CHOKE	Choose and Keep for Responsive Flows
CRC	Cyclic Redundancy Check
ECN	Explicit Congestion Notification
FIFO	First Input First Output
FPI	Fuzzy Proportional-Integral
FRED	Fair Random Early Detection
FTP	File Transfer Protocol
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IP	Internet Protocol
ISO	International Standard Organization
LAN	Local Area Network
MAN	Metropolitan Area Network
NGMV	Nonlinear Generalized Minimum Variance
OSI	Open System Interconnection
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Derivative
QoS	Quality of Service
RED	Random Early Detection
REM	Random Exponential Marking
RRED	Robust Random Early Detection
RTT	Round Trip Time
SACK	Selective Acknowledgment
SNMP	Simple Network Management Protocol
SRED	Stabilized Random Early Detection
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol

فصل ۱

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

اینترنت یک شبکه کامپیوتری گسترده است که از اتصال میلیون‌ها کامپیوتر در سرتاسر دنیا به وجود آمده است. شبکه اینترنت به علت افزایش تعداد کاربران روز به روز در حال گسترش است. با افزایش تعداد کاربران، تقاضای پهنای باند نیز افزایش می‌یابد. همچنین با گذشت زمان، نیاز برای سرعت‌های بالای ارتباطات روز به روز افزایش می‌یابد. با افزایش تقاضا برای پهنای باند و خدمات و افزایش حجم اطلاعات انتقالی، ممکن است با پدیده‌ای به نام تراکم[1] در شبکه مواجه گردیم. تراکم در شبکه زمانی رخ می‌دهد که تقاضای پهنای باند از پهنای باند موجود در شبکه بیشتر گردد و یا نرخ ارسال داده‌های ورودی به یک گره از نرخ خروج آن‌ها بیشتر باشد. در این حالت می‌گوییم در گره مورد نظر تراکم رخ داده است. از آن‌جا که یک شبکه کامپیوتری مانند اینترنت از اتصال چندین کامپیوتر به یکدیگر برای به اشتراک گذاردن اطلاعات و یا منابع سخت‌افزاری به وجود می‌آید، برای چگونگی اتصال و ارتباط بین این کامپیوترها و کنترل ارتباطات آن‌ها مجموعه قوانین و مقرراتی تحت عنوان پروتکل تعریف می‌گردد. در واقع پروتکل تعیین کننده مشخصات شبکه مانند روش‌های دستیابی، سرعت انتقال داده، توپولوژی‌های فیزیکی پذیرفته شده توسط شبکه و نحوه کابل‌کشی در شبکه می‌باشد. از آن‌جا که برخی از این مشخصات مربوط به مسائل سخت‌افزاری و برخی دیگر از جنس نرم‌افزاری می‌باشند، پیشنهاد شده است که طراحی شبکه‌های کامپیوتری به صورت لایه‌ای صورت گیرد و هر کدام از این مسائل در لایه مربوط به خود بررسی گردند. بدین منظور، سازمان جهانی استاندارد[2] (ISO) یک مدل هفت لایه‌ای برای پیشگیری از سلیقه‌ای شدن لایه‌بندی شبکه به نام اتصال بین شبکه‌ای باز[3] (OSI) پیشنهاد کرد. بعدها مدل TCP/IP با استفاده از این مدل، یک مدل چهار لایه‌ای پیشنهاد نمود که هم‌اکنون مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل، مسائل فیزیکی

---

[1] - Congestion
[2] - International Standard Organization
[3] - Open System Interconnection

مانند نوع کابل‌کشی و نوع توپولوژی شبکه در لایه اول یعنی لایه پیوند[۱] صورت می‌گیرد. لایه دوم که لایه شبکه[۲] نام دارد از پروتکل اینترنت IP[۳] جهت مسیریابی داده‌ها در شبکه استفاده می‌کند. در لایه سوم یعنی لایه انتقال[۴] از پروتکل کنترل انتقال TCP[۵] به منظور تضمین انتقال اطلاعات به صورت صحیح استفاده می‌شود. لایه آخر نیز لایه کاربرد[۶] نام دارد و از پروتکل‌هایی مانند FTP[۷] و http[۸] جهت انتقال فایل و صفحات وب استفاده می‌کند. کاربران شبکه تنها با لایه آخر یعنی لایه کاربرد سر و کار دارند.

گفته شد که عملیات مسیریابی داده‌ها در لایه شبکه صورت می‌گیرد. این عمل توسط مسیریاب‌ها[۹] انجام می‌شود. مسیریاب‌ها جزئی از شبکه هستند که وظیفه مسیریابی داده‌های انتقالی بین مکان‌های مختلف یک شبکه را بر عهده دارند و بیشترین تراکم در شبکه در آن‌ها اتفاق می‌افتد. داده‌های انتقالی در شبکه به بخش‌هایی به نام بسته[۱۰] با حجم حدودی بین نیم تا چند کیلو بایت تقسیم می‌شوند. این بسته‌ها توسط فرستنده ارسال شده و وارد شبکه می‌گردند و در مسیر خود وارد مسیریاب‌ها می‌شوند. مسیریاب‌ها با پردازش بسته‌ها و خواندن اطلاعاتی از آن‌ها مانند آدرس مبدأ و مقصد، آن‌ها را به درگاه خروجی متناسب با مقصدشان ارسال می‌کند. از آن‌جا که پردازش و مسیریابی بسته‌ها نیازمند زمان می‌باشد، بسته‌های ورودی به مسیریاب داخل یک بافر در مسیریاب قرار می‌گیرند و تشکیل یک صف[۱۱] می‌دهند تا به نوبت پردازش و ارسال گردند. در صورتی که نرخ داده‌های ورودی به مسیریاب بیشتر از نرخ خروج آن‌ها باشد، به مرور زمان ظرفیت بافر مسیریاب پر می‌شود و بسته‌های بعدی که به مسیریاب می‌رسند دور ریخته می‌شوند. گیرنده‌هایی که از پروتکل TCP استفاده می‌کنند، با دریافت هر بسته، بسته کوچکی به نام ACK[۱۲] به فرستنده ارسال می‌کنند تا فرستنده از تحویل صحیح بسته‌ها مطمئن شود. مدت زمان ارسال یک بسته تا رسیدن ACK مربوط به آن یک زمان چرخش مسافرتی (RTT)[۱۳] نامیده می‌شود. در صورت پر بودن بافر مسیریاب‌ها و تلف شدن بسته‌ها، ACK مربوط به آن‌ها به فرستنده نمی‌رسد و فرستنده اقدام به

---

1 - Link Layer
2 - Network Layer
3 - Internet Protocol
4 - Transport Layer
5 - Transmission Control Protocol
6 - Application Layer
7 - File Transfer Protocol
8 - Hypertext Transfer Protocol
9 - Router
10 - Packet
11 - Queue
12 - Acknowledgment
13 - Round Trip Time

ارسال مجدد این بسته‌ها کرده و تراکم در شبکه افزایش می‌یابد تا جایی که پدیده‌ای به نام شکست تراکم[1] رخ داده و شبکه به طور کلی از کار می‌افتد.

۱-۲ پیشینه تحقیقات

تاکنون روش‌های مختلفی برای حل مسأله تراکم ارائه شده است. یک دسته از این روش‌ها روش‌های استاتیکی می‌باشند. در این روش‌ها با افزایش پهنای باند و افزایش ظرفیت بافر سعی بر این است که از وقوع تراکم جلوگیری شود. این روش‌ها چندان کارساز نیستند زیرا تقاضای پهنای باند روز به روز در حال افزایش است و هر چه پهنای باند افزایش یابد تقاضا برای آن نیز افزایش می‌یابد. افزایش ظرفیت بافر نیز چندان مناسب به نظر نمی‌رسد زیرا منجر به افزایش تأخیر در شبکه می‌گردد که نامطلوب است. با افزایش تأخیر، فرستنده ACK مربوط به بسته‌های تأخیری را به موقع دریافت نمی‌کند و با تصور از دست رفتن آن بسته‌ها اقدام به ارسال مجدد آن‌ها می‌کند. این ارسال‌های مجدد و بی‌دلیل منجر به افزایش تراکم در شبکه و تشدید آن می‌گردند.

دسته دیگر روش‌های مقابله با تراکم روش‌های انتها به انتها[2] می‌باشند که در لایه انتقال به کار می‌روند. در این روش‌ها با استفاده از به کارگیری الگوریتم‌هایی جهت مقابله با تراکم در پروتکل شبکه، با مسأله تراکم برخورد می‌گردد. بدین منظور مفهومی به نام اندازه پنجره تراکم[3] به کار گرفته می‌شود. اندازه پنجره تراکم تعیین می‌کند که فرستنده چه تعداد بسته را می‌تواند ارسال کند بدون این که منتظر دریافت ACK مربوط به بسته‌های قبلی بماند. بنابراین می‌توان با تغییر اندازه پنجره و کم و زیاد کردن آن، نرخ ارسال بسته‌ها در شبکه را تنظیم نمود. پروتکل TCP با استفاده از پنجره تراکم دینامیکی به مقابله با تراکم می‌پردازد. این پروتکل که رایج‌ترین پروتکل به کار گرفته شده در اینترنت می‌باشد، تلفات داده را نشانه بروز تراکم در شبکه در نظر می‌گیرد. در این پروتکل در صورت دریافت ACK مربوط به بسته‌های ارسالی پیشین، اندازه پنجره در هر RTT افزایش می‌یابد. ولی در صورت عدم دریافت ACK بسته‌ها، پروتکل TCP در فرستنده متوجه از دست رفتن بسته‌ها به دلیل بروز تراکم در شبکه گشته و ضمن ارسال مجدد بسته‌های تلف شده، نرخ ارسال توسط کاهش اندازه پنجره کاهش می‌یابد. این روش به این دلیل انتها به انتها نامیده می‌شود که کنترل تراکم فقط در نقاط انتهایی شبکه یعنی در فرستنده و گیرنده انجام می‌شود و در نقاط میانی شبکه هیچ عملی صورت نمی‌گیرد. یکی از نقاط ضعف این روش این است که هیچ کاری برای پیش‌گیری از تراکم صورت نمی‌گیرد و پروتکل شبکه تنها پس از وقوع تراکم و تلفات بسته‌ها اقدام به کاهش نرخ ارسال

---

[1] - Congestion Collapse
[2] - End-to-End
[3] - Congestion Window Size

در فرستنده می‌کند. قدیمی‌ترین نوع این پروتکل TCP-Tahoe نام داشت[۱]. پس از آن گونه‌های مختلفی از TCP جهت اصلاح رفتار و بهبود عملکرد آن ارائه شده‌اند. به عنوان مثال می‌توان از پروتکل‌های TCP-Reno، TCP-NewReno و TCP-SACK نام برد[۲]-[۴]. گونه‌ای دیگری به نام TCP-Vegas با مانیتورینگ تغییرات تأخیر در شبکه سعی در پیش‌گیری از تراکم دارد و افزایش تأخیر را به منزله وقوع تراکم در شبکه تلقی کرده و نرخ ارسال خود را در صورت افزایش تأخیر، کاهش می‌دهد[۵].

دسته دیگر روش مقابله با تراکم روشی میانی است که مدیریت صف فعال (AQM)[1] نامیده می‌شود. این روش در لایه شبکه یعنی در مسیریاب‌ها به کار گرفته شده و برای تشخیص و پیشگیری از وقوع تراکم در شبکه تعریف و ارائه شده است. در این روش با مانیتور کردن طول صف در مسیریاب، یک احتمال متناسب با طول صف به بسته‌های ورودی به مسیریاب در هر RTT نسبت داده می‌شود. هر کدام از بسته‌های ورودی به مسیریاب در یک RTT با یک احتمال دور ریخته می‌شوند. در واقع روش مدیریت صف فعال منتظر نمی‌ماند تا صف به طور کامل پر شود بلکه با مانیتور کردن طول صف سعی بر کنترل آن دارد؛ به این صورت که با دور ریختن برخی از بسته‌های ورودی به مسیریاب در حالی که هنوز مسیریاب کاملا پر نشده است باعث می‌شود فرستنده با عدم دریافت ACK مربوط به بسته‌های دور ریخته شده مواجه گشته و ضمن ارسال مجدد این بسته‌ها، اندازه پنجره را کاهش دهد. با کاهش اندازه پنجره، نرخ ارسال بسته‌ها کاهش یافته و از پر شدن کامل طول صف و وقوع تراکم جلوگیری می‌شود. چگونگی تولید احتمال مربوط به دور ریختن بسته‌ها، بستگی به روشی دارد که در AQM به کار گرفته می‌شود.

معروف‌ترین روش AQM الگوریتم کشف تصادفی زودهنگام (RED)[2] می‌باشد که در سال ۱۹۹۳ توسط فلوید[3] و ژاکوبسن[4] [۶] ارائه گردید. در این روش در صورتی که طول متوسط صف از یک آستانه پایین کمتر باشد، احتمال دور ریختن بسته‌ها برابر صفر قرار داده شده و همه بسته‌هایی که در یک RTT به مسیریاب می‌رسند وارد بافر شده و هیچ کدام دور ریخته نمی‌شود. در صورتی که طول متوسط صف از یک آستانه بالا بیشتر باشد، احتمال دور ریختن بسته‌ها برابر یک قرار داده شده و تمامی بسته‌هایی که در یک RTT به مسیریاب می‌رسند دور ریخته می‌شوند و هیچ‌کدام وارد بافر نمی‌شود. در صورتی که طول متوسط صف بین این دو آستانه باشد، احتمال دور ریختن بسته‌های رسیده به مسیریاب در یک RTT متناسب با طول متوسط صف محاسبه می‌گردد و این احتمال به

[1] - Active Queue Management
[2] - Random Early Detection
[3] - S. Floyd
[4] - V. Jacobson