TCP, בקרת גודש, פרוטוקולי דבק

30 יוני 2026
הרצאה 11

Some Slides Credits: Steve Zdancewic (UPenn)

נושאים להיום

- TCP
  - לחיצת יד ויסודות
  - בקרת גודש
- פרוטוקולי דבק
  - ICMP

Transmission Control Protocol (TCP)

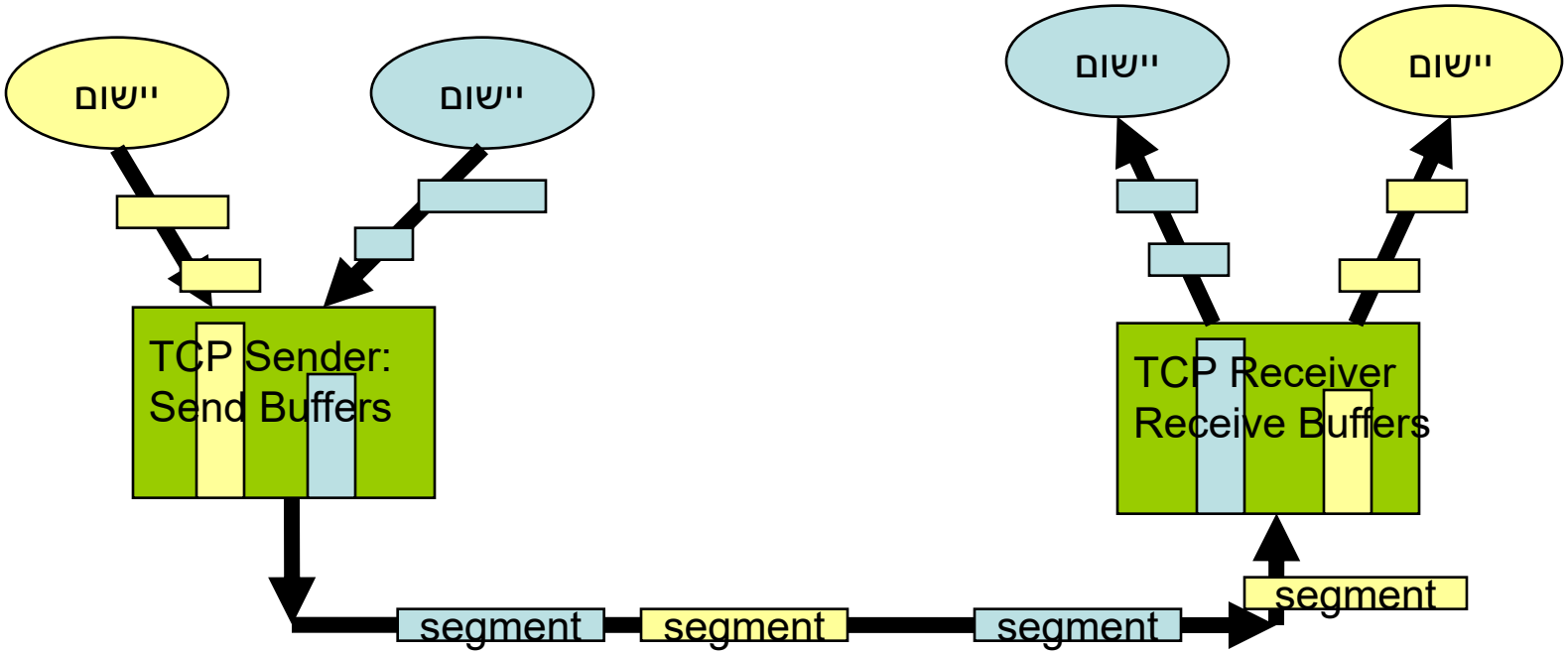
- הפרוטוקול בקרת שידור

- הפרוטוקול הנפוץ ביותר לשליחת זרימת נתונים בצורה אמינה
  - אמינה, מספקת שליחת זרימת בתים בסדר
  - דו-כיווני (Full Duplex) : זוג זרמים, אחד לכל כיוון
  - מנגנונים לבקרת הזרימה ולבקרת הגודש
  - כמו UDP, עובד עם פורטים (ports)

- בנוי על גבי IP בלבד, לכן נקרא TCP/IP
  - תקן יצא בשנת 1980

מודל TCP מקצה לקצה

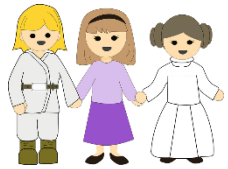
- השימוש במחסניות מתקנת שגיאות אך עלולה לגרום לעיכובים
- Segment – מקטע ולא מנה



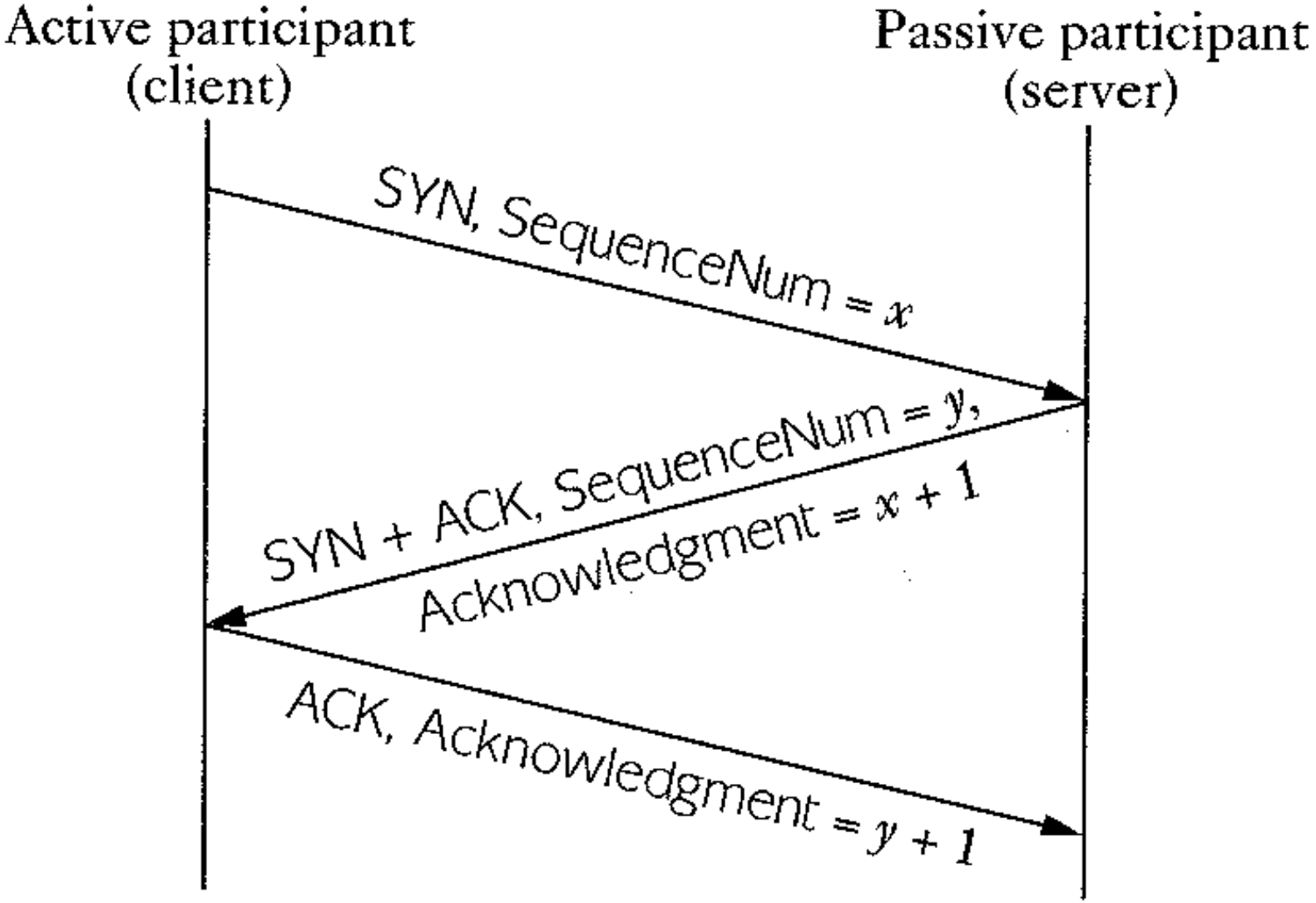
תבנית המקטע

- דגלים
  - SYN –
  - FIN –
  - RESET –
  - PUSH –
  - URG –
  - ACK –

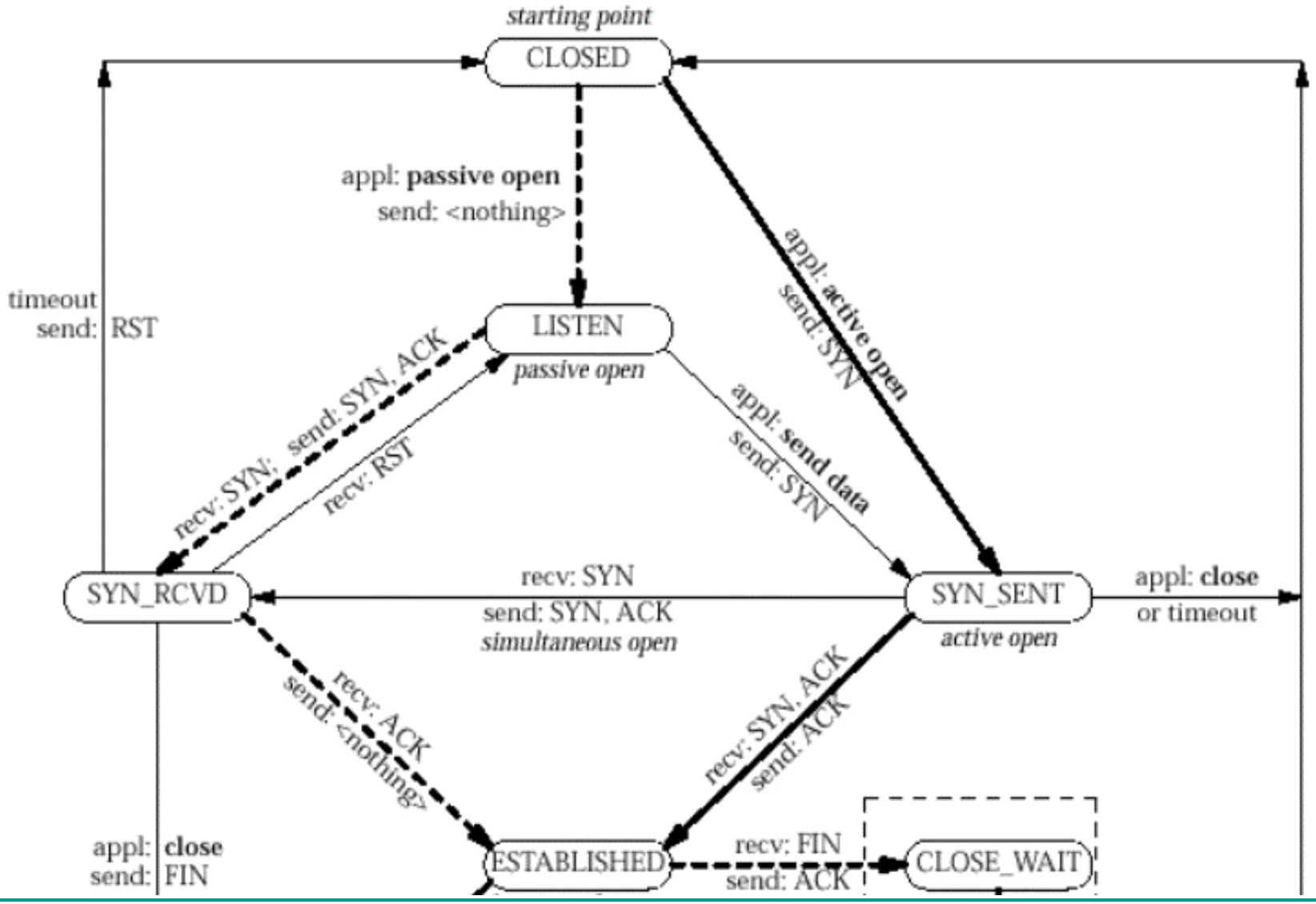
0			15	31
Source Port פורט מקור			Destination Port פורט יעד	
Sequence Number מספר רץ				
Acknowledgement אישור קבלה				
HL	0	Flags דגלים	Advertised Window חלון המפורסם	
Checksum			Urgent Pointer מצביע דחוף	
Options (variable) תוספות				
Data נתונים				



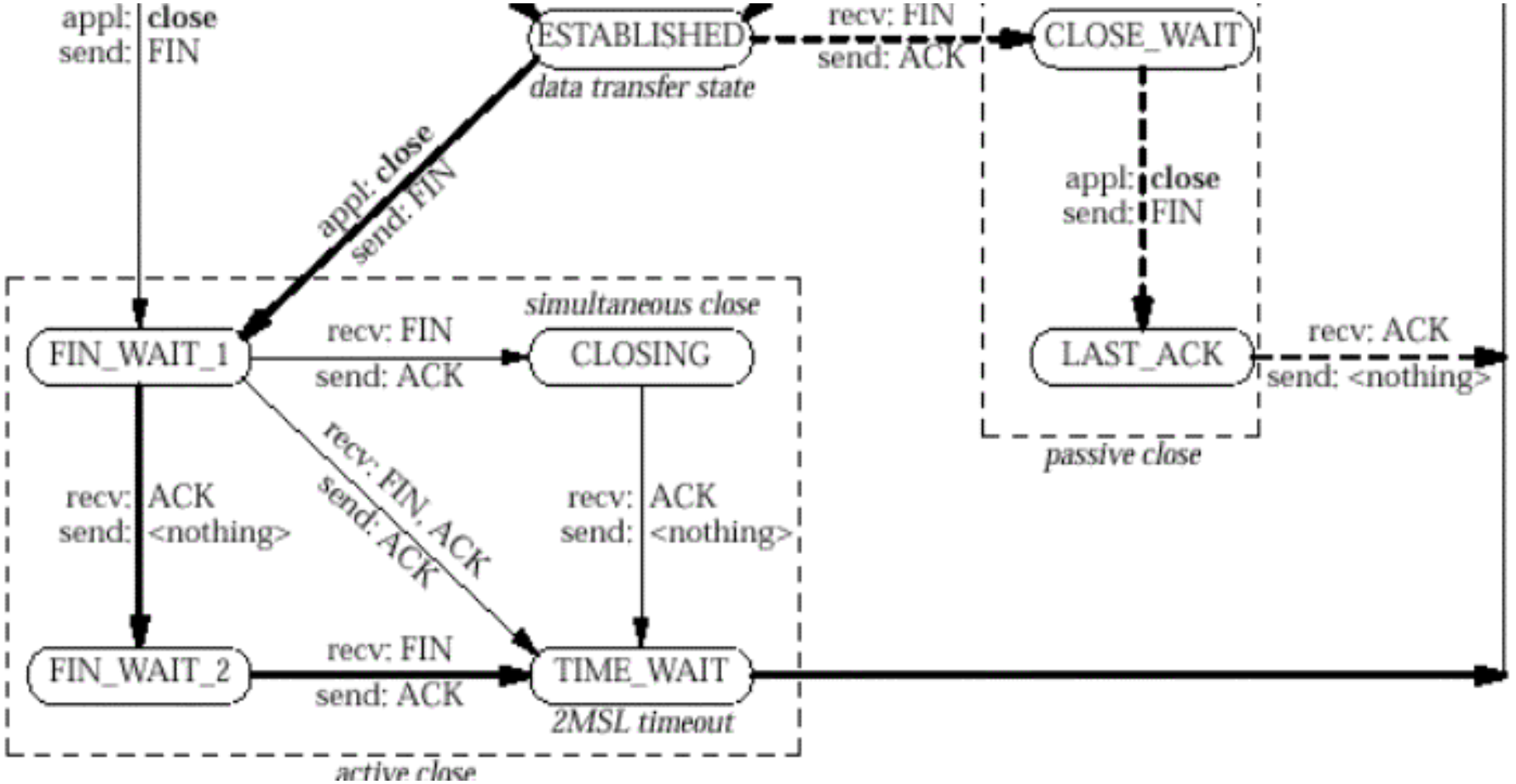
לחיצת יד תלת-שלבית



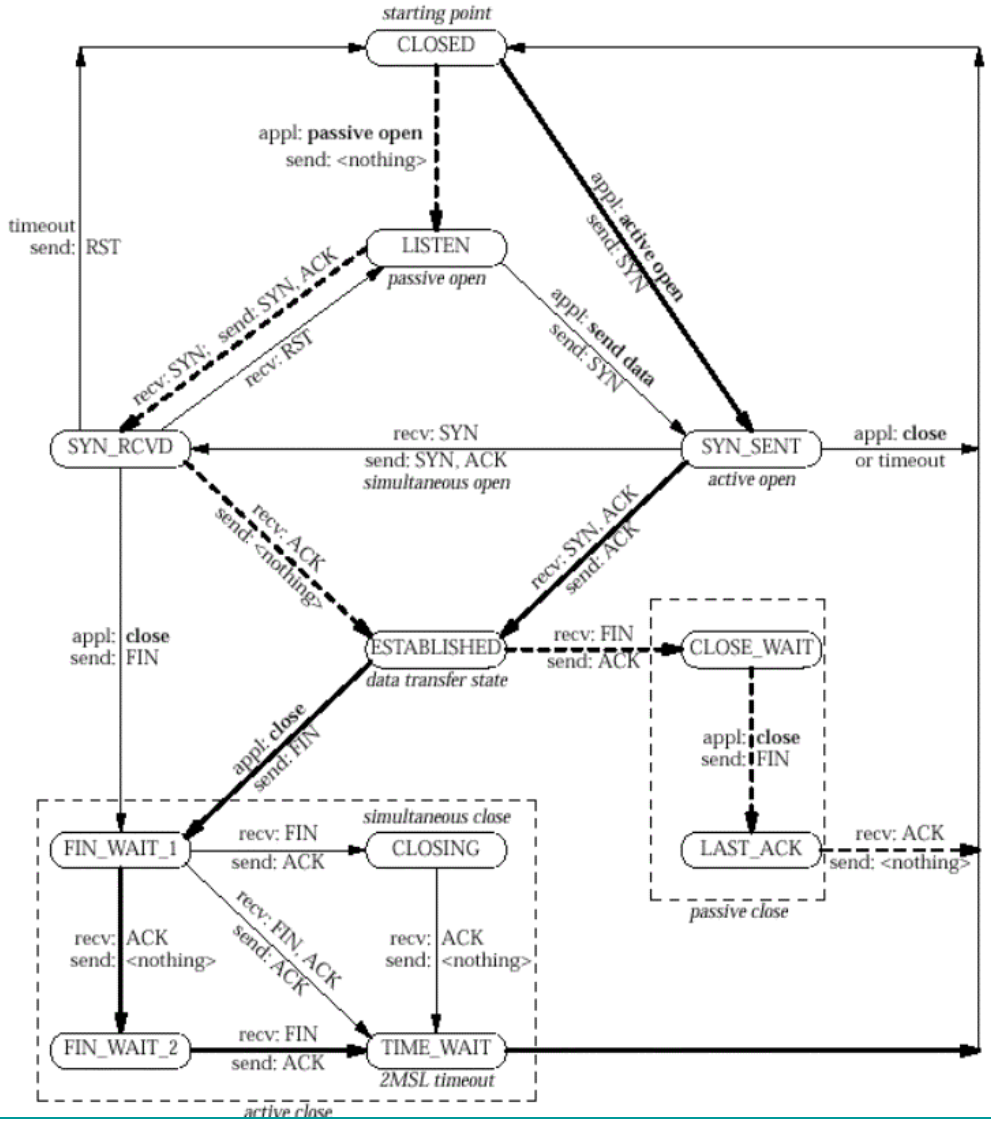
מכונת המצבים של TCP



מכונת המצבים של TCP



מכונת המצבים של TCP



שני דגלים

PUSH

- פיסת נתונים קריטית לשולח
- השולח מגדיר סיבית PUSH במקטע

התוצאה:

- ה-TCP של השולח ישלח את הנתונים מייד (לא תשמור במחסנית עד שהוא קרוב ל-MTU)
- ה-TCP של המקבל ישלח את הנתונים לאפליקציה מייד, ללא שמירה במחסנית

URG

- לשולח יש נתונים דחופים

SYN	FIN	RST	PSH	URG	ACK
-	-	-	-	1	-

Urgent Pointer =100

Byte #	0	100	101	500
	Urgent Data		נתונים אחרים	

- ה-TCP של המקבל יעביר את הנתונים לאפליקציה בעדיפות גבוה

שולח ומקבל TCP

שולח TCP

- מחזיק מחסנית שליחה
- היישום השולח חסום עד שיש מקום במחסנית לקלוט את הבתים
- חלון ההזזה מאחסן את הנתונים עד שהם יאושרו על ידי המקבל
- חלון ההזזה גדל וקטן בצורה דינמית
- aw משפיע על הגודל

מקבל TCP

- מחזיק מחסנית קלט עבור היישום
  - היישום רואה רק בתים נכונים בסדר
- מפרסם $aw = (bsize - filled)$ כחלון מפורסם עבור חלון הזזה
- עוקב אחרי הבתים שהגיעו בסדר (ackBytes)
- מגיב עם ackBytes ו-aw בכל שליחה
  - אם aw=0, אין מקום במחסנית הקבלה
  - נשלח בדרך כלל עם גורם מכפיל

אינטראקציה פשוטה של חלון מפורסם

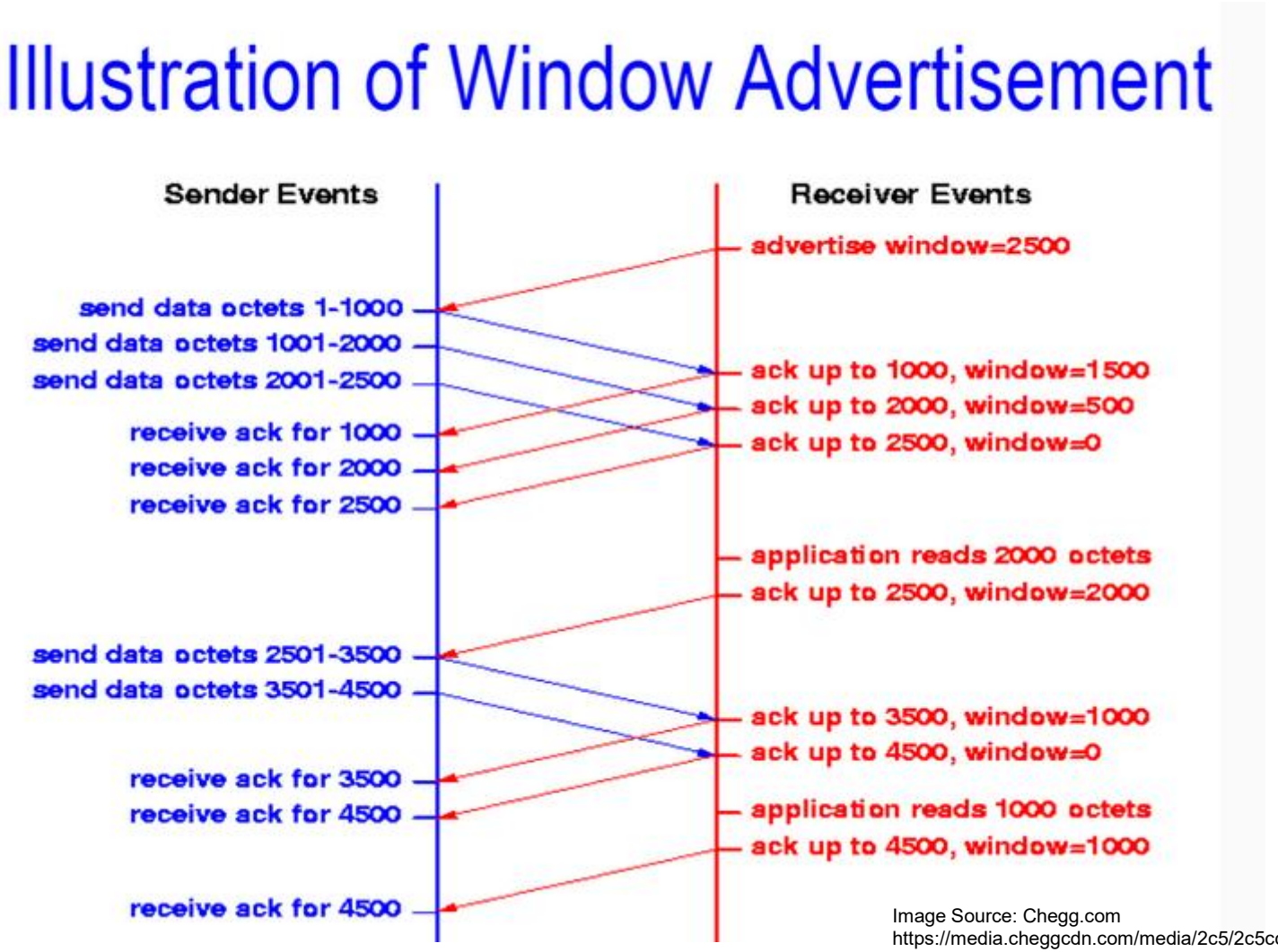


Image Source: Chegg.com
https://media.cheggcdn.com/media/2c5/2c5cc97c-eb97-4376-b57d-0257161bf650/php3ADfPM.png

עד כה

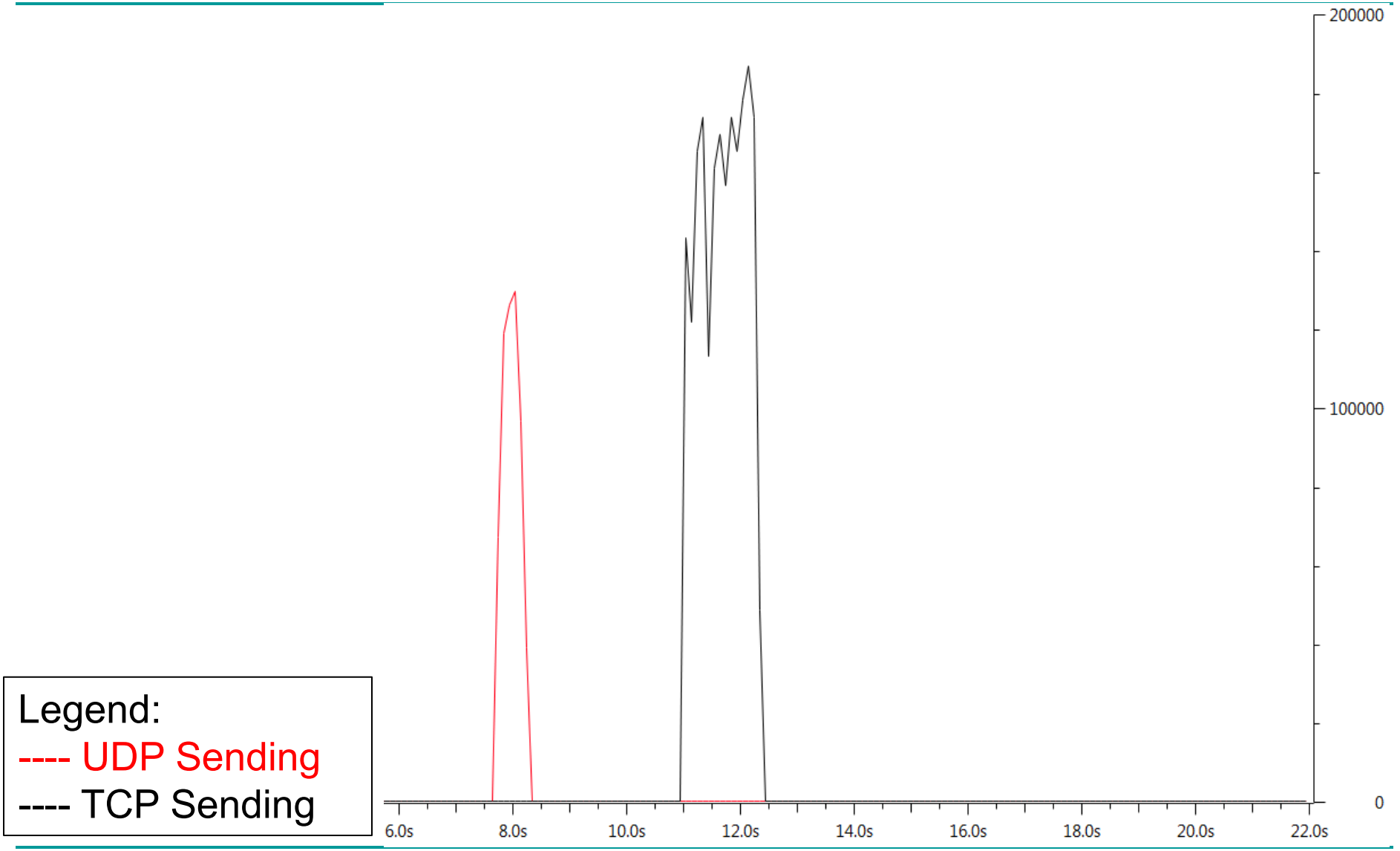
- TCP
  - לחיצת יד ויסודות
  - בקרת גודש
- פרוטוקולי דבק
  - ICMP

בקרת הזרימה ובקרת הגודש ב-TCP

- בקרת הזרימה לעומת בקרת הגודש
  - בקרת הזרימה מגינה על **המקבל** מפני הצפה (aw)
  - בקרת הגודש מגינה על **הרשת** מפני הצפה.

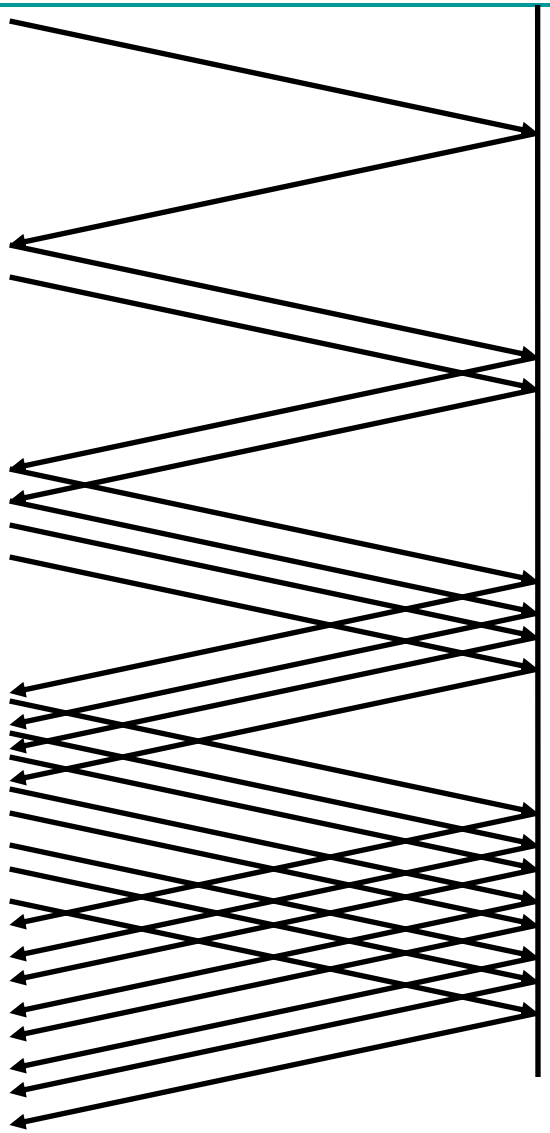
- בקרת הגודש ב-TCP
  - עלייה תוספתית / ירידה כפולה
  - התחלה איטית
  - שידור חוזר מהיר והתאוששות מהירה

שליחה ב-TCP לעומת שליחה ב-UDP



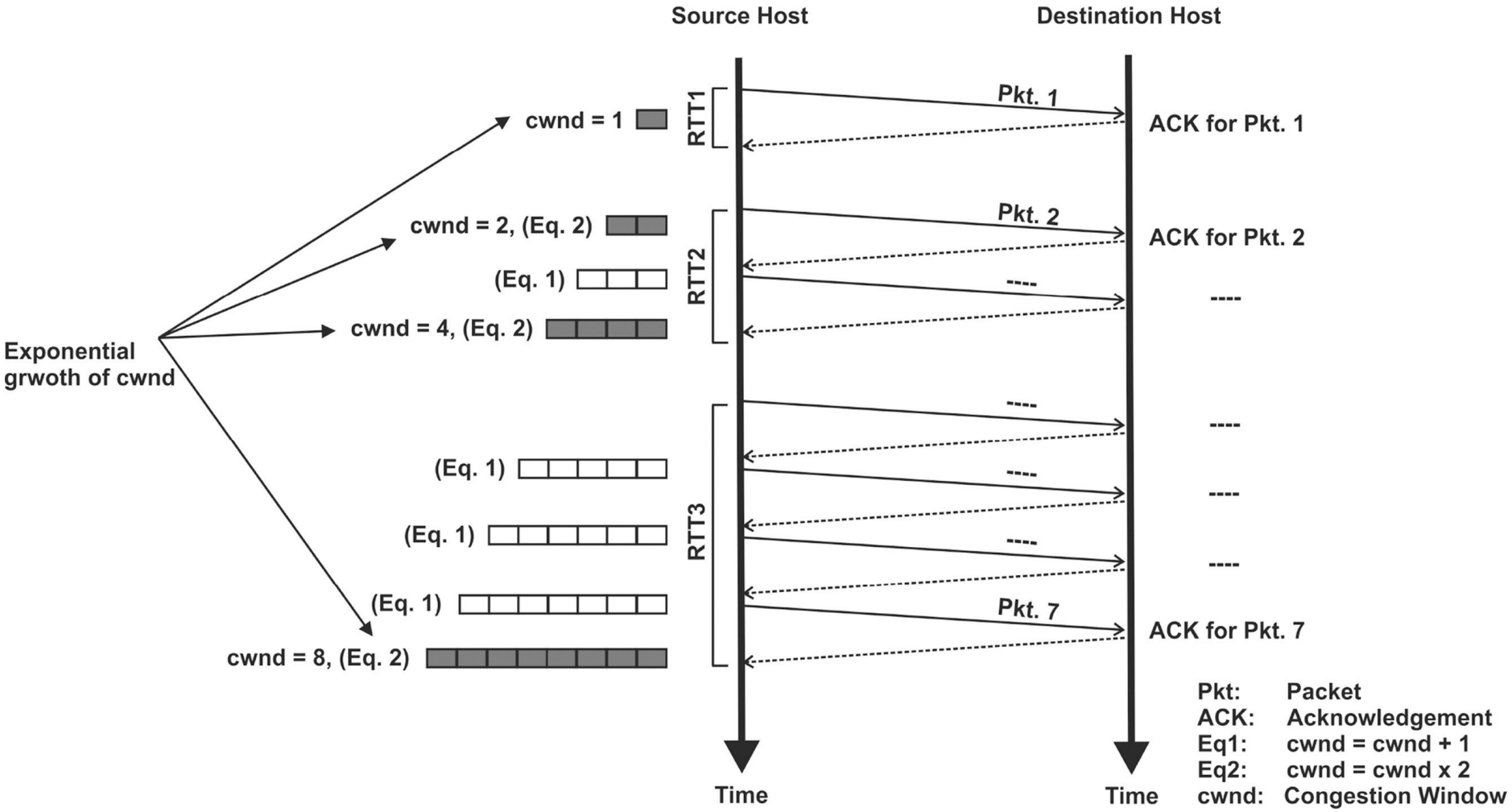
התחלה איטית ב-TCP

- אם נאתחל את cw לגודל החלון המרבי של השולח ונתחיל בשליחת כל החלון בבת אחת, אנחנו עלולים לגרום לעומס על הרשת
- במקום, נתחיל "לאט" על ידי הגדרת cw=2 מקטעים (מינימום 576 בתים)
- כאשר מגיע האישור ACK, נגדיל לפי כמות החבילות שאושרו (למעשה cw מכפיל כל RTT)
- המשך כך עד ש-ACKs לא מגיעים או עד שבקרת הזרימה שולטת.
  - SWS=min(cw,aw)



התחלה איטית בתמונה

Fig. 2. Exponential growth of congestion window during slow start phase (Wang et al., 2014).



אלגוריתמי בקרת הגודש ב-TCP

- Vegas - שונה מאוד, שעון מעורר לכל מנה

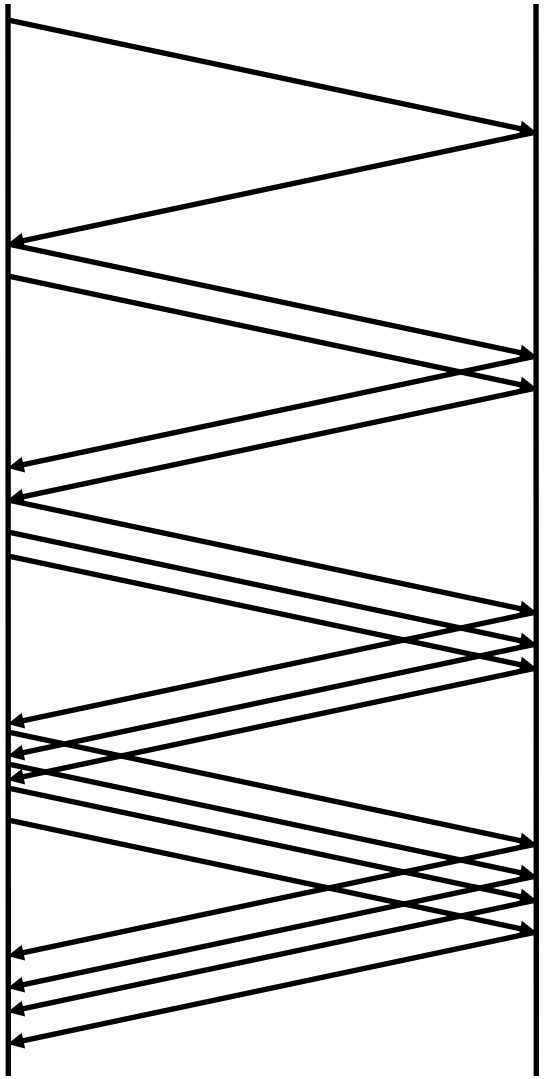
- Tahoe (ישן יותר)
- SACK - שונה מאוד, משתמש באישורי קבלה נקודתיות
  - מה הגיע - טווחים של ACKs לא רציפים
- Reno - שקפים הבאים
- New Reno - קצת שונה
  - כיצד להתמודד עם נפילות מרובות והגעה לא לפי הסדר

Image credits: https://www.redbubble.com, ebay.com, http://gclipart.com/clipart-potato_8434/

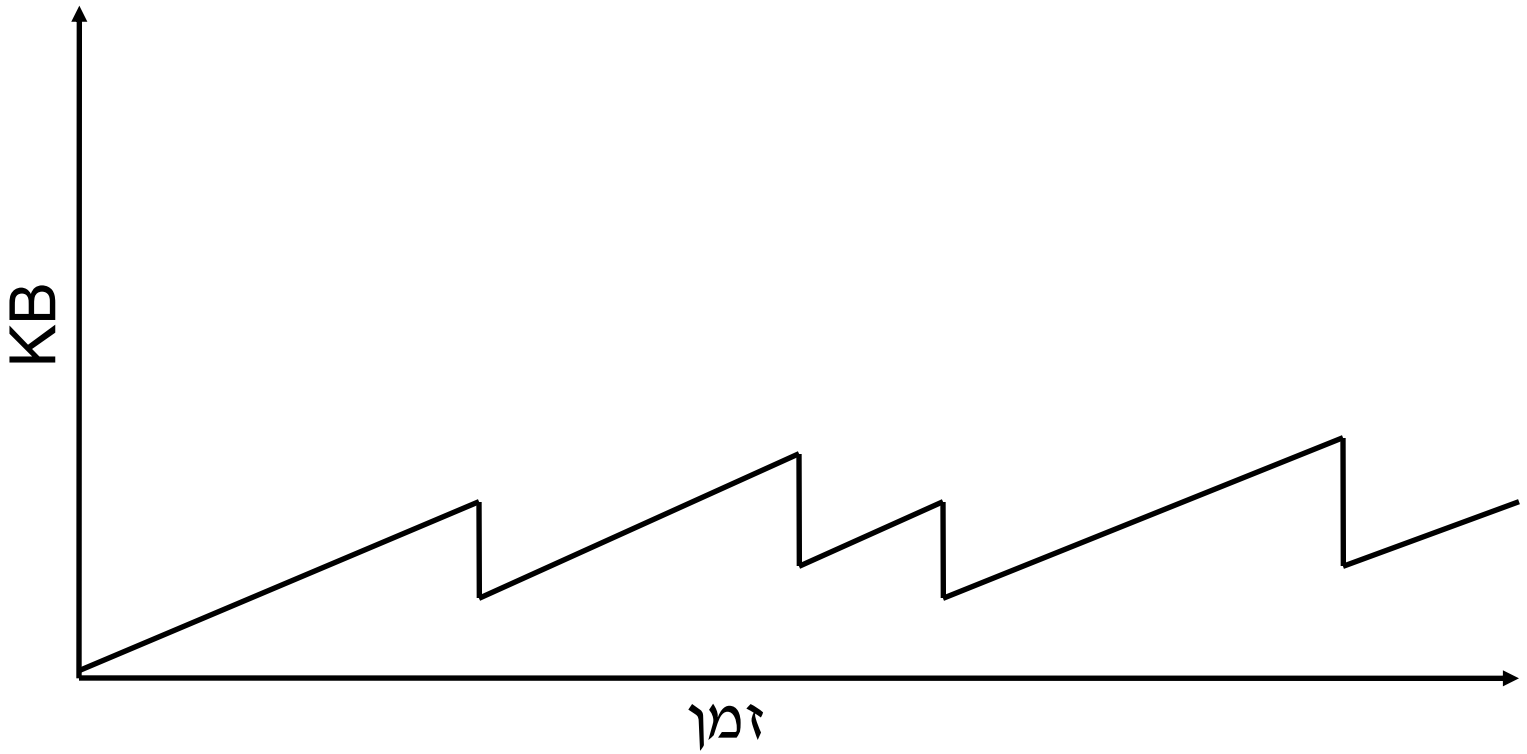
Image source: cafepress.com

Reno AIMD

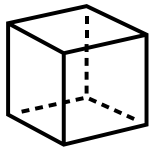
- CongestionWindow (cw) חלון הגודש
- משתנה שעוזר לשלוט על מספר המקטעים שנשלחו שעוד לא אושרו (עובד יחד עם ה-aw)
- cw גדל באופן ליניארי בכל RTT עד שמתחילים לא לקבל אישורי קבלה Acks
- כאשר לא קבלנו ACK עד לפני זמן פג התוקף, cw יורד בחצי $(cw = cw \times 0.5)$ כדי להוריד את הלחץ על הרשת.
- נקרא "עלייה תוספתית / ירידה בכפל".
  - Additive Increase / Multiplicative Decrease



דפוס מסור TCP



TCP CUBIC



$$W(t) = C(t-K)^3 + W_{max} \quad (1)$$

where C is a CUBIC parameter, t is the elapsed time from the last window reduction, and K is the time period that the above function takes to increase W to W_{max} when there is no further loss event and is calculated by using the following equation:

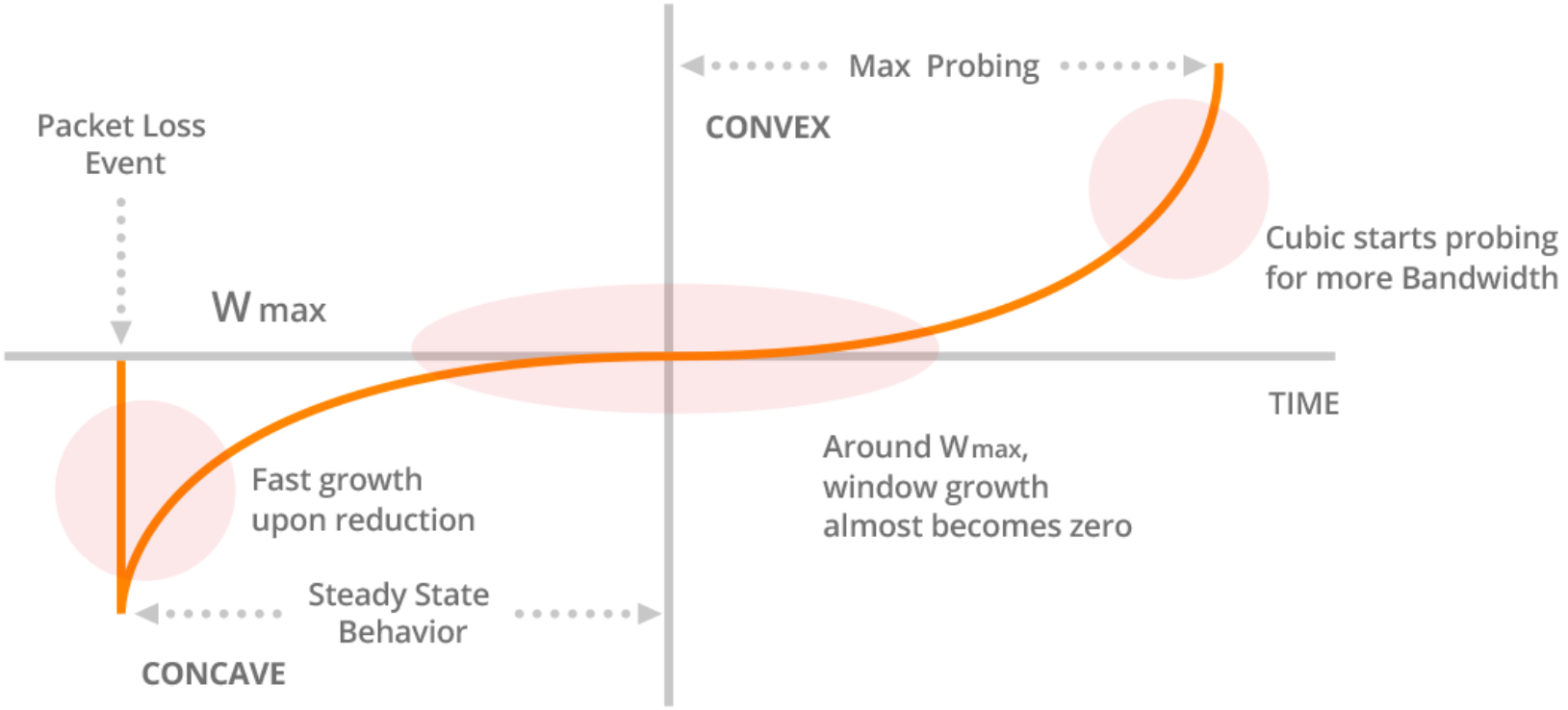
$$K = \sqrt[3]{\frac{W_{max}\beta}{C}} \quad (2)$$

- מיועד לחיבורי רשת עם RTT ארוך והרבה רוחב פס
  - תחשבו על ענן
- במקום AIMD שיורד ב-50%, יורדים ב-20%
- גידול החלון מבוסס על:
  - $\beta = 0.2, C = 0.4$

Sangtae Ha, Injong Rhee, and Lisong Xu. 2008. CUBIC: a new TCP-friendly high-speed TCP variant. SIGOPS Oper. Syst. Rev. 42, 5 (July 2008), 64–74. https://doi.org/10.1145/1400097.1400105

הגרף של TCP CUBIC

https://www.noction.com/blog/tcp-transmission-control-protocol-congestion-control



אלגוריתמים לבקרת הגודש

מערכת הפעלה/מערכת	אלגוריתם ברירת מחדל לבקרת גודש TCP
MacOS	TCP CUBIC
Microsoft Windows	TCP Compound
Linux	TCP CUBIC
Sun Solaris	TCP Fusion
YouTube (Google)	TCP BBR
Android	TCP CUBIC
iOS	TCP CUBIC
Amazon CloudFront	TCP BBR
Facebook	COPA (?) over QUIC

בינה מלאכותית לבקרת הגודש?

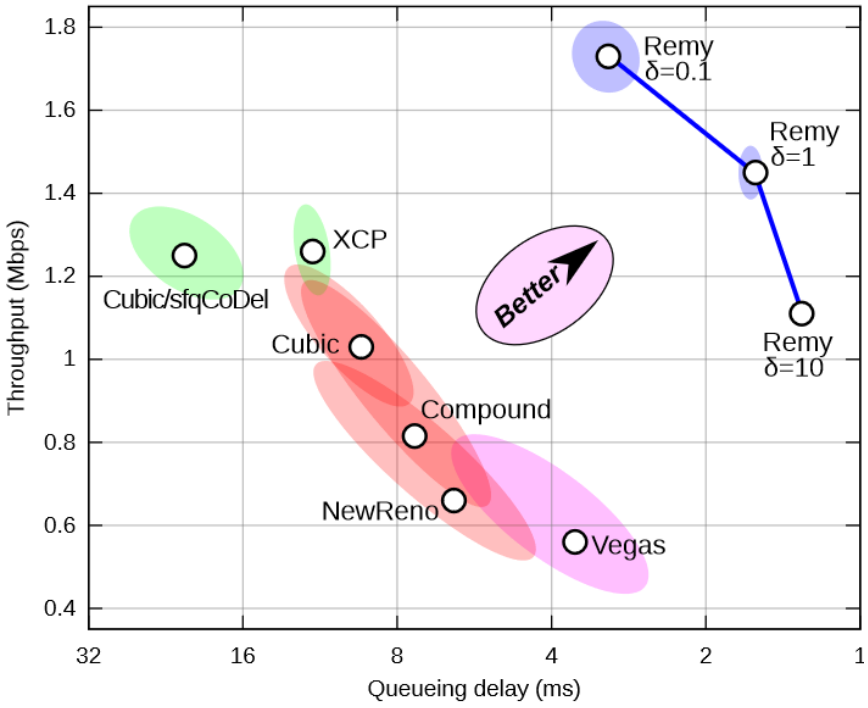


Figure 4: Results for each of the schemes over a 15 Mbps dumbbell topology with $n = 8$ senders, each alternating between flows of exponentially-distributed byte length (mean 100 kilobytes) and exponentially-distributed off time (mean 0.5 s). Medians and 1-σ ellipses are shown. The blue line represents the efficient frontier, which here is defined entirely by the RemyCCs.

https://web.mit.edu/remy/TCPexMachina.pdf

TCP ex Machina: Computer-Generated Congestion Control

by Keith Winstein and Hari Balakrishnan
MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory
(SIGCOMM 2013)

An Experimental Study of the Learnability of Congestion Control

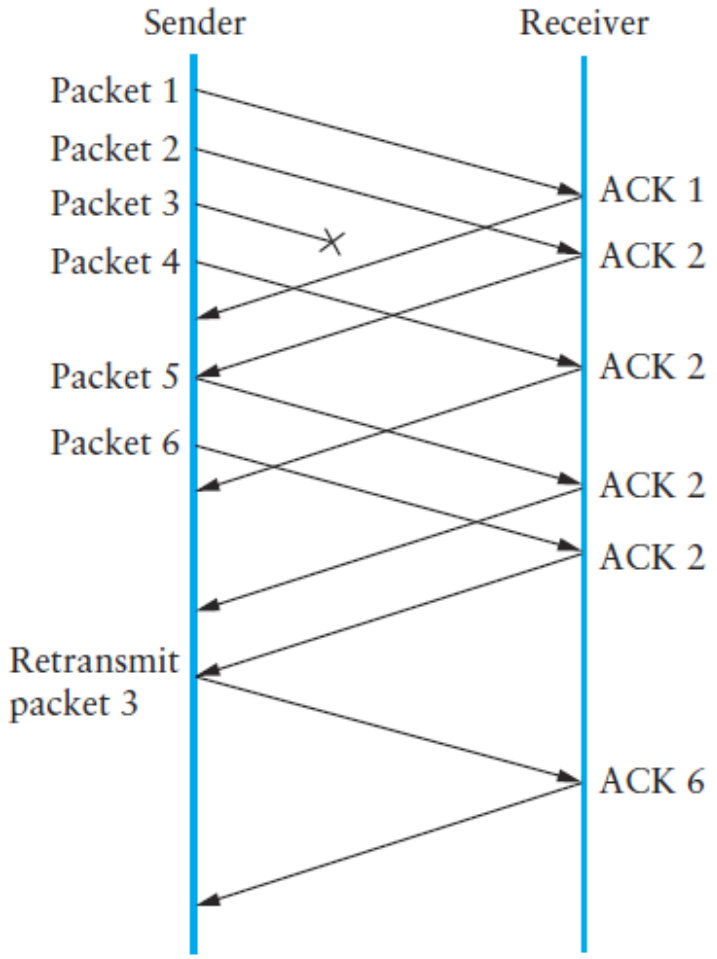
by Anirudh Sivaraman, Keith Winstein, Pratiksha Thaker, and Hari Balakrishnan
MIT Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory
(SIGCOMM 2014)

Remy is a computer program that figures out how computers can best cooperate to share a network.

Remy creates end-to-end congestion-control algorithms that plug into the Transmission Control Protocol (TCP). These computer-generated algorithms can achieve **higher performance** and **greater fairness** than the most sophisticated human-designed schemes.

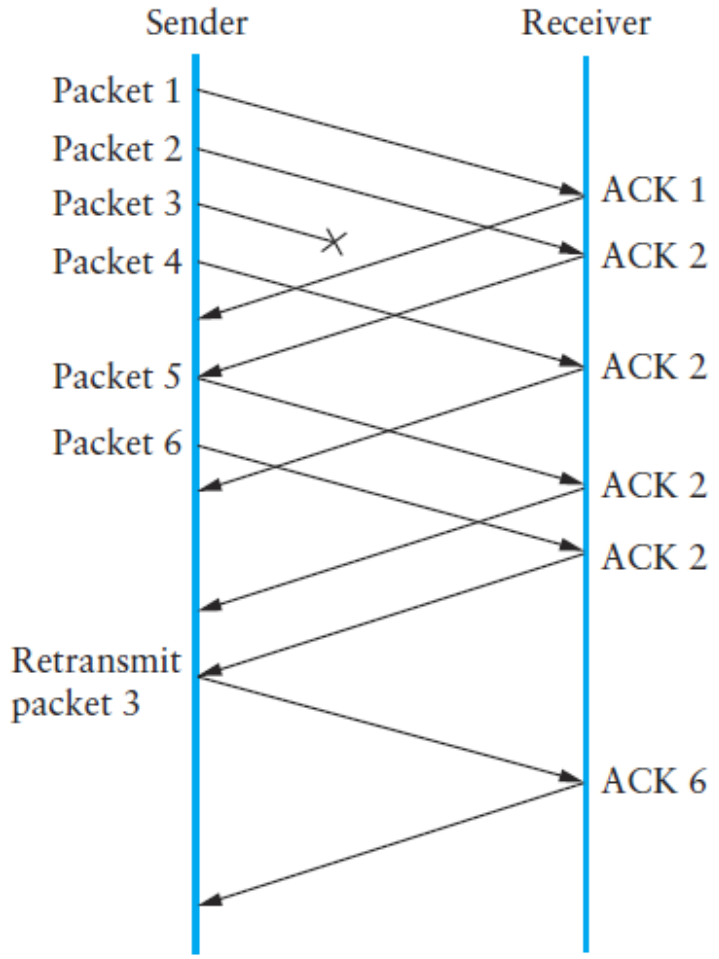
TCP : שליחה חוזרת מהירה

- אובדן מנה בודדת יכול להאט את השליחה של מנות אחרות
- צריכים להגיע לפג תוקף של שעון המעורר וסביר להניח שאם מחכים הרבה החיבור יתנתק או נצטרך להתחיל את ה-cw מחדש



TCP : שליחה חוזרת מהירה

- אלטרנטיבה : שליחה חוזרת מהירה
- שולח ACK-ים מצטברים כפי שראינו בחלון הזזה
- אם מגיעים 3 ACK-ים כפולים, שלח את המקטע הבא מחדש
  - ACK כפול פירושו מנות ללא נתונים
  - מאשרים משהו שכבר אושר ועם אותו aw
- יכול להגדיל את התפוקה ב-20%
- לא פותר את כל הבעיות (אם SWS קטן או נמצא באמצע התחלה איטית)



עד כה

- TCP
  - לחיצת יד ויסודות
  - בקרת גודש
- פרוטוקולי דבק
  - ICMP

פרוטוקולי "דבק"

צריכים דרך לטפל
בשגיאות ברשת

צריכים דרך למפות
כתובות ברמה אחת
לכתובות ברמה אחרת.

- למשל: כתובות פיזית (אתרנט)
  לכתובת IP

צריכים דרך לחלק
כתובות IP

- מה לגבי מחשבים שנכנסים
  ויוצאים?

ICMP: Internet Control Message Protocol

- פרוטוקול להודעות בקרה באינטרנט
- אוסף הודעות שגיאה ובקרה
- נשלח חזרה למקור כאשר הנתב או המארח אינם יכולים לעבד את המנה כראוי
- דוגמאות לשגיאות:
  - לא ניתן להגיע למארח היעד
  - תהליך ההרכבה מחדש נכשל
  - TTL הגיע ל-0
  - Checksum של כותרת ה-IP נכשל
- דוגמה לבקרה:
- הפניה מחדש – מודיע למקור על מסלול טוב יותר

הקלטה לדוגמה של ICMP

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
155	22.572657000	10.0.0.3	64.233.166.160	ICMP	106	Echo (ping) request id=0x0001, seq=44/11264, ttl=1 (no response found!)
156	22.573156000	10.0.0.138	10.0.0.3	ICMP	134	Time-to-live exceeded (Time to live exceeded in transit)
157	22.627346000	10.0.0.3	64.233.166.160	ICMP	106	Echo (ping) request id=0x0001, seq=45/11520, ttl=1 (no response found!)
158	22.628191000	10.0.0.138	10.0.0.3	ICMP	134	Time-to-live exceeded (Time to live exceeded in transit)
159	22.628941000	10.0.0.3	64.233.166.160	ICMP	106	Echo (ping) request id=0x0001, seq=46/11776, ttl=1 (no response found!)

```
Frame 155: 106 bytes on wire (848 bits), 106 bytes captured (848 bits) on interface 0
Ethernet II, Src: Dell_e6:7f:66 (44:a8:42:e6:7f:66), Dst: D-Link_75:8a:ab (00:22:b0:75:8a:ab)
Internet Protocol Version 4, Src: 10.0.0.3 (10.0.0.3), Dst: 64.233.166.160 (64.233.166.160)
Internet Control Message Protocol
  Type: 8 (Echo (ping) request)
  Code: 0
  Checksum: 0xf7d2 [correct]
  Identifier (BE): 1 (0x0001)
  Identifier (LE): 256 (0x0100)
  Sequence number (BE): 44 (0x002c)
  Sequence number (LE): 11264 (0x2c00)
  [No response seen]
  Data (64 bytes)
```

סיום

- TCP
  - לחיצת יד ויסודות
  - בקרת גודש
- פרוטוקולי דבק
  - ICMP