
מיתוג, תקשורת אל-חוטית, עץ פורש

2 יוני 2026
הרצאה 7

Some Slides Credits: Steve Zdancewic (UPenn), Kurose and Ross

נושאים להיום

- מיתוג
 - שכבה 2 (קישור)
 - שכבה 3 (רשת)
 - מנות נתונים
 - מעגל מדומה
- 802.11 אלחוטית
- אלגוריתם לעץ פורש

החלטת העברה

- איך המתג יודע לאן להעביר מנה?
- מסתכלים על כותרת המנה להחליט
- גישות נפוצות

ניתוב מקור
• פחות נפוץ

מעגל מדומה (או
מכוון חיבור)
• למשל, Frame
Relay, ATM

מנות נתונים (או
ללא חיבור)
• למשל, IP

ניתוב : נסיעה לעפולה מכנרת

אפשרות 1:

רשות הדרכים מציבה שלט בכל צומת להראות לאיזה כיוון לנסוע אם יש 200 יעדים אפשריים, צריכים 200 חיצים בכל צומת בכל צומת מחפשים בין 200 חיצים למצוא את החץ לעפולה.

אפשרות 2:

ראשית, שלח מישהו שיודע את הדרך. הוא מציב שלט בכל צומת עם השם "מייקל" וכיוון הנסיעה. צריך רק שיהיו כמה שלטים בכל צומת כמו מספר הנוסעים. הגדרת המסלול עולה הלוך ושוב אחד



שיטת מנות נתונים Datagram

כל מנה מכילה את כתובת היעד המלאה

- מספיק מידע כדי שכל מתג יוכל להחליט לאן המנה צריכה ללכת.

מאפיינים של שיטת Datagram :

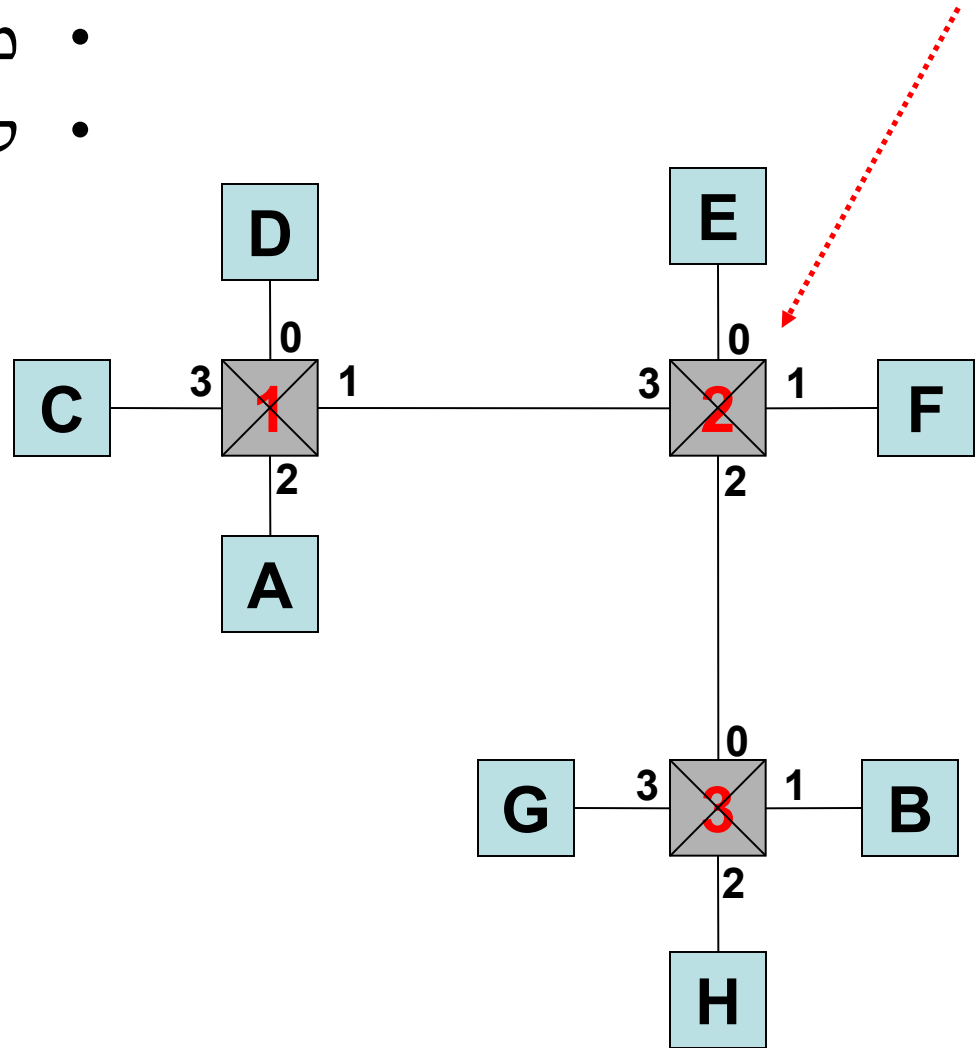
- ניתן לשלוח מנות **לכל מקום ובכל זמן**
- השולח **אינו יודע** אם הרשת יכולה להעביר את המנה עד היעד (או אם היעד זמין)
- כל מנה מועברת באופן **עצמאי** (שתי מנות עשויות לעבור במסלולים שונים)
- ניתן **לנתב מסביב** לכשלים ברשת

טבלאות ניתוב

- מכיל מידע על המסלול
- קל לקבוע אם הרשת ידועה (וסטטית)

טבלת ניתוב למתג 2

Dest.	Port
A	3
B	2
C	3
D	3
E	0
F	1
G	2
H	2



לנסוע מכנרת לעפולה

בעיה: מה אם יותר מאדם אחד בשם "מייקל" צריך לנסוע בצומת נתון?

פתרון:

ודא שלכל אדם יש שם ייחודי בכל צומת (לא חייב להיות גלובלי).
בכל צומת שים שלוש פיסות מידע: (א) שם, (ב) כיוון הנסיעה, (ג) שם בצומת
הבא.

דוגמה:

בצומת **צמח**: מיכאל, לך ישר. שם הבא: נח.
בצומת **כנרת**: נח, פנה שמאלה. שם הבא: סלמן.
בצומת **אלומות**: סלמן, לך ישר. השם הבא: עוזי.
בצומת **יבנאל**: עוזי, לך ימינה. שם הבא: פאדל.

נח

מייקל

מייקל

מייקל

גישת מעגל מדומה Virtual Circuit

- מגדיר את החיבור לפני העברת הנתונים

- מקצה משאבים במעגלים

- מגדיר את טבלאות העברה

היתרונות של גישת מעגלים מדומים

- ביצועים: עלות מיתוג לכל מנה נמוכה 


- אמינות: השהיה ותפוקה ידועים מראש

החסרונות

- זמן ההתקנה ארוך 

- לפחות RTT אחד - למה?

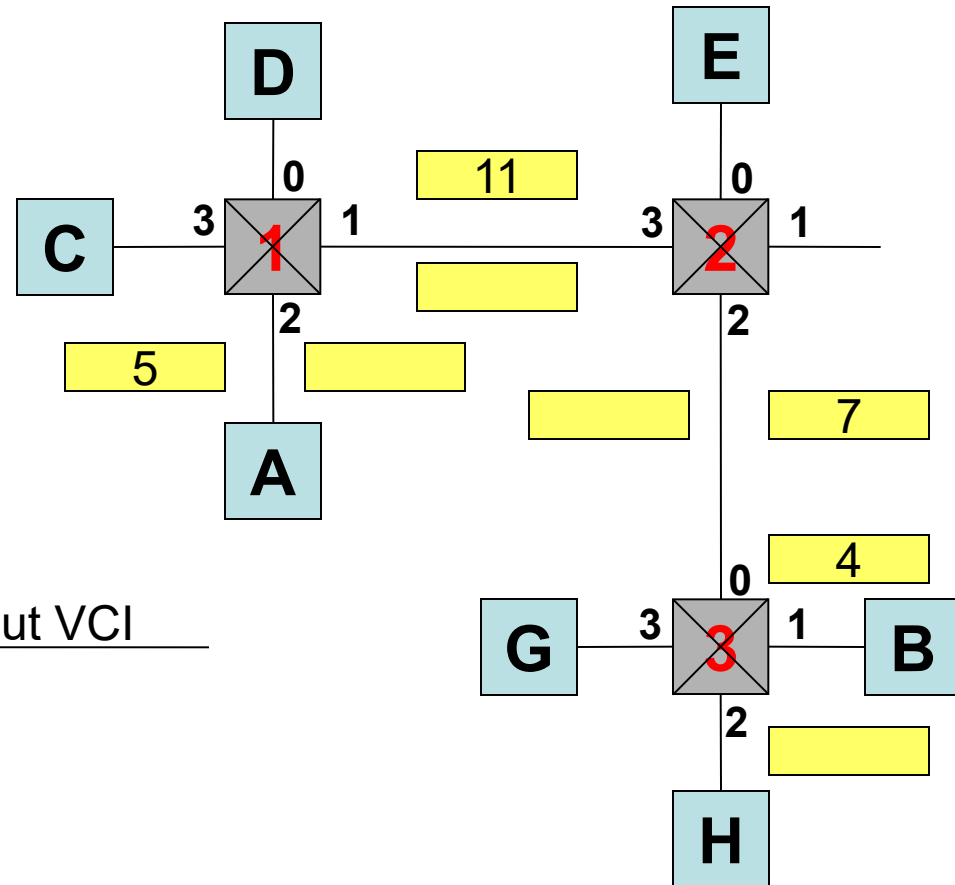
- סובלנות לתקלות

- מה אם המעגל נכשל במהלך השידור? 

מיתוג מעגלים מדומים

- $VCI =$ מזהה מעגל מדומה
- יציאה נכנסת $VCI+$ מזהים באופן ייחודי מעגל מדומה
- שלב ההתקנה ממלא את ערכי טבלת מעגלים בכל מתג

A רוצה לשלוח ל-B



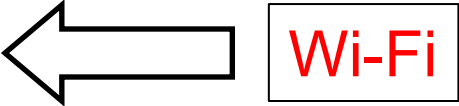
Switch	In Port	In VCI	Out port	Out VCI
1				
2				
3				

- מיתוג
 - שכבה 2 (קישור)
 - שכבה 3 (רשת)
 - מנות נתונים
 - מעגל מדומה
- 802.11 אלחוטית
- אלגוריתם לעץ פורש

Open Systems Interconnection (OSI)

מחשב קצה

מודל פורמלי – לא מימש אמיתי

Application אפליקציה	שולח הודעות (למשל, HTTP או FTP)
Presentation תצוגה	מטפל בפורמט נתונים (big- vs. little-endian, למשל)
Session שיחה	מנהל זרימות נתונים
Transport תעבורה	פרוטוקולי תהליך לתהליך
Network רשת	מנתב מנות בין צמתים ברשת
Link עורק	אורז סיביות בתוך מסגרות 
Physical פיזי	מעביר סיביות פשוטות על גבי הלינק

בדומה לאתרנט, ל-802.11 יש
תווד משותף

- צריכים MAC
- משתמש בנסיגה אקספוננציאלית

בניגוד לאתרנט, ב-802.11

- אין דרך לזהות התנגשות תוד כדי שליחה
- לא כל השולחים מחוברים לכל המקבלים

מחשבים ברשת אל-חוטית

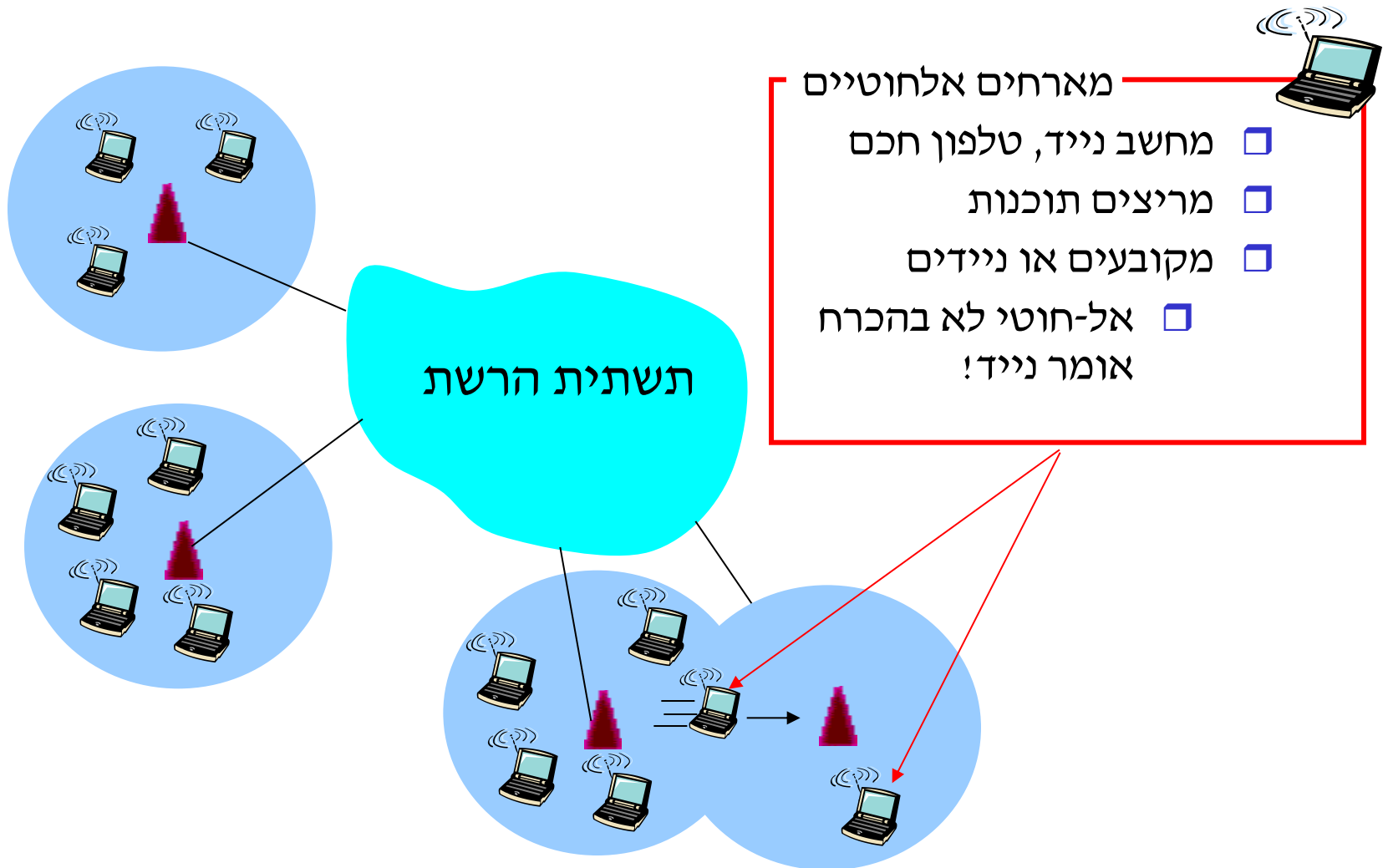
- מחשבים ניידים
- טלפונים חכמים
- טאבלטים
- מוצרים חכמים

מספר מנויי
חיבורים
אלחוטיים (ניידים)
עולה על מספר
מנויי חיבורים
קוויים (טלפון
רגיל)!

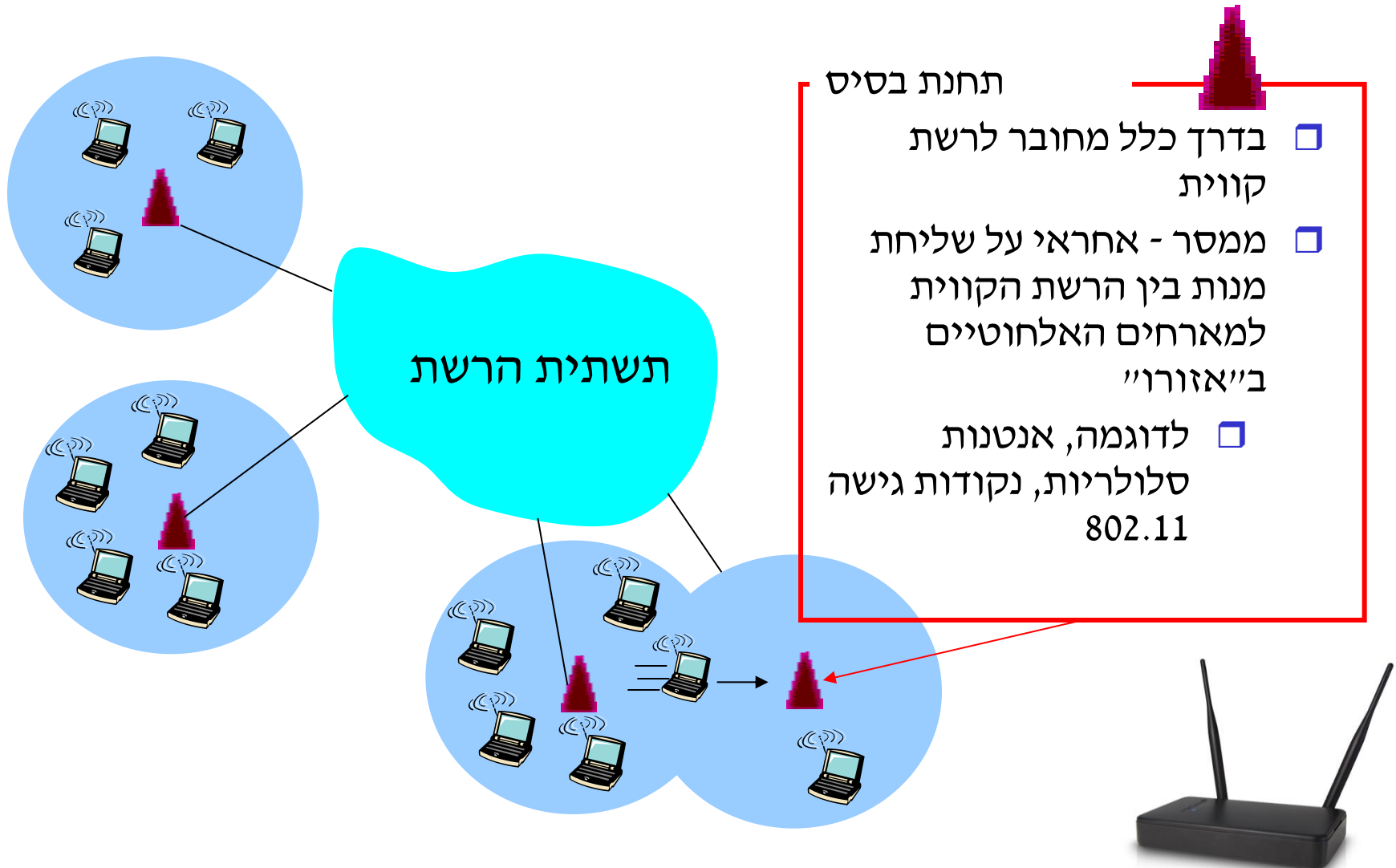
שני אתגרים חשובים (אך שונים)

- **אל-חוטית**: תקשורת באמצעות חיבור רדיו
- **ניוד**: טיפול במשתמש שמשנה את נקודת החיבור לרשת תוך כדי שיחה

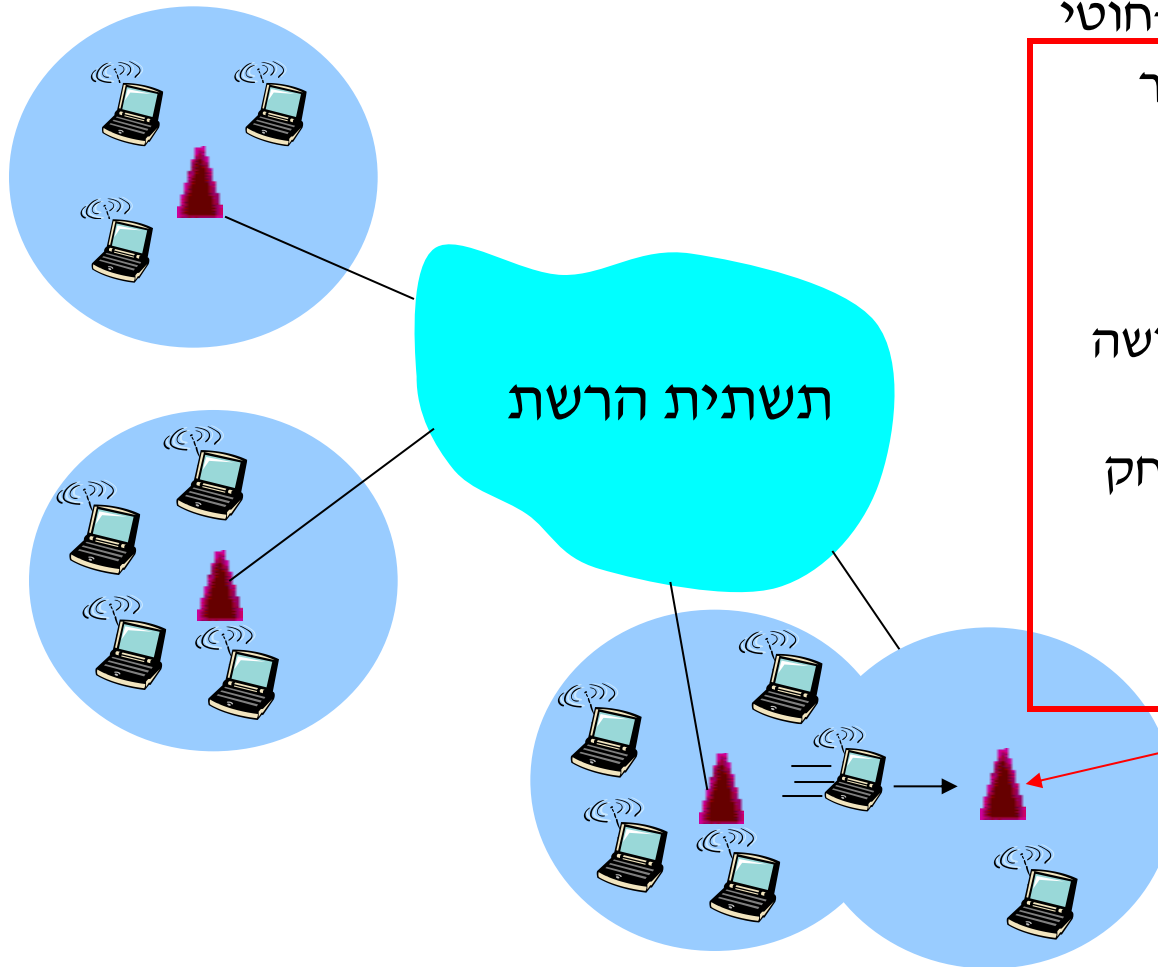
רכיבים של רשת אלחוטית



רכיבים של רשת אלחוטית



רכיבים של רשת אלחוטית

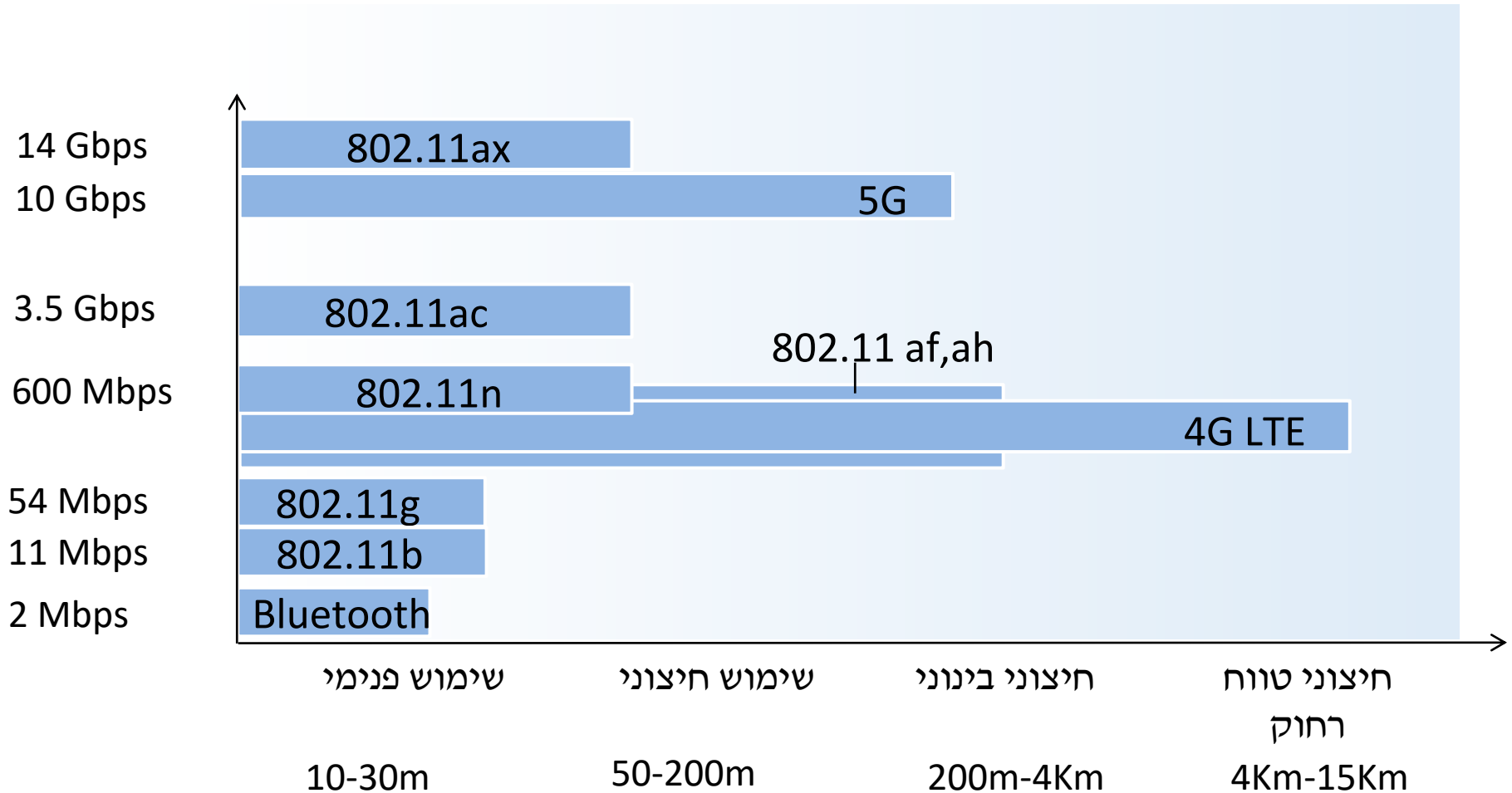


חיבור האל-חוטי



- משמש בדרך כלל כחיבור מניידים לתחנת בסיס
- משמש גם כחיבור לקו "עמוד השדרה"
- מתאם עם פרוטוקול לגישה מרובה לחיבור
- קצבי נתונים שונים, מרחק שידור

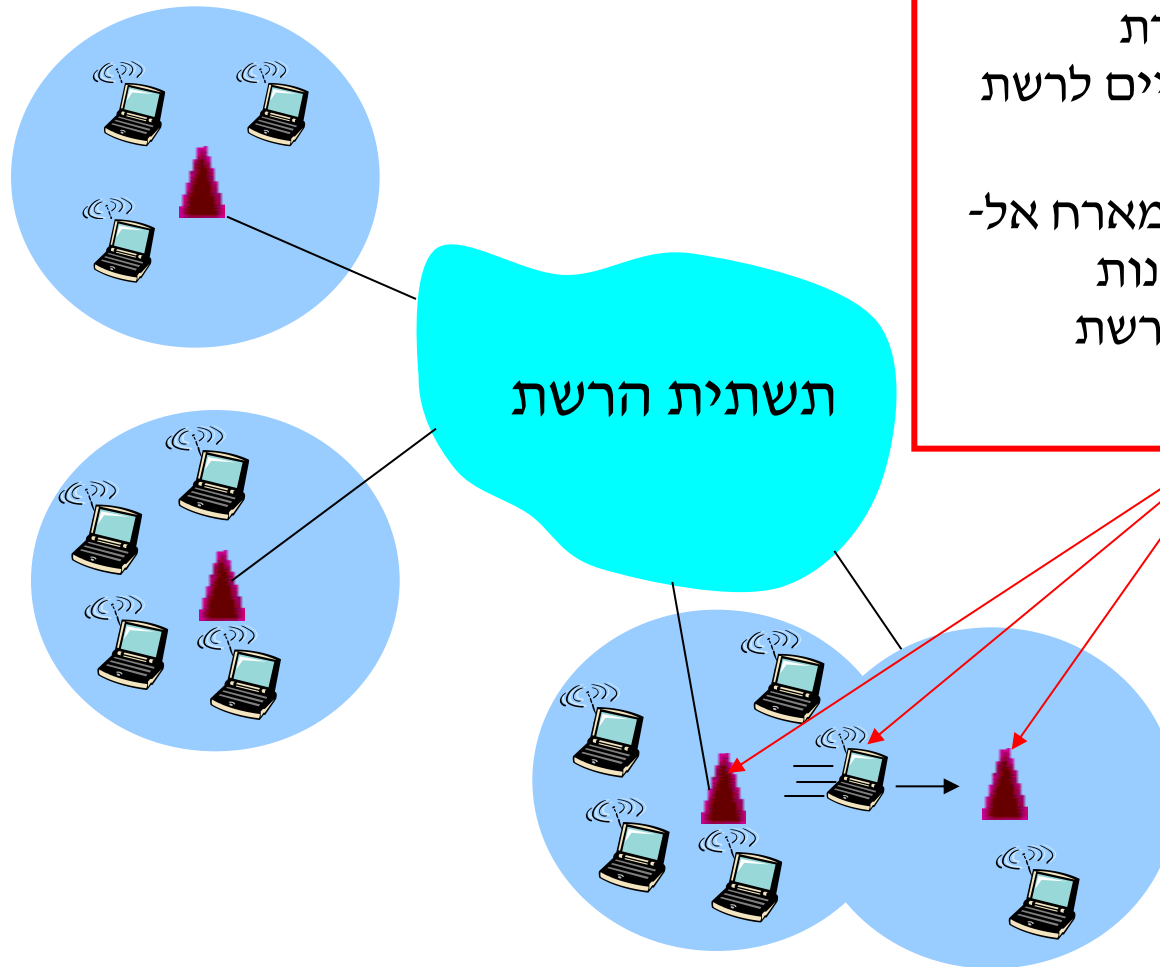
מאפיינים של תקני קישור אלחוטי נבחרים



תקני 802.11 אל-חוטי (Wi-Fi LAN)

IEEE 802.11 standard	Year	Max data rate	Range	Frequency
802.11b	1999	11 Mbps	30 m	2.4 Ghz
802.11g	2003	54 Mbps	30 m	2.4 Ghz
802.11n (WiFi 4)	2009	600	70 m	2.4, 5 Ghz
802.11ac (WiFi 5)	2013	3.47 Gpbs	70 m	5 Ghz
802.11ax (WiFi 6)	2021	14 Gbps	70 m	2.4, 5 Ghz
802.11af	2014	35 – 560 Mbps	1 Km	unused TV bands (54-790 MHz)
802.11ah	2017	347 Mbps	1 Km	900 Mhz
802.11be (WiFi 7)	2024	0.4-23,059 Mbps	30-120m	2.4, 5, 6 GHz
802.11bn (WiFi8)	2028 (exp)	100,000 Mbps	30-120 m	2.4, 5, 6 GHz

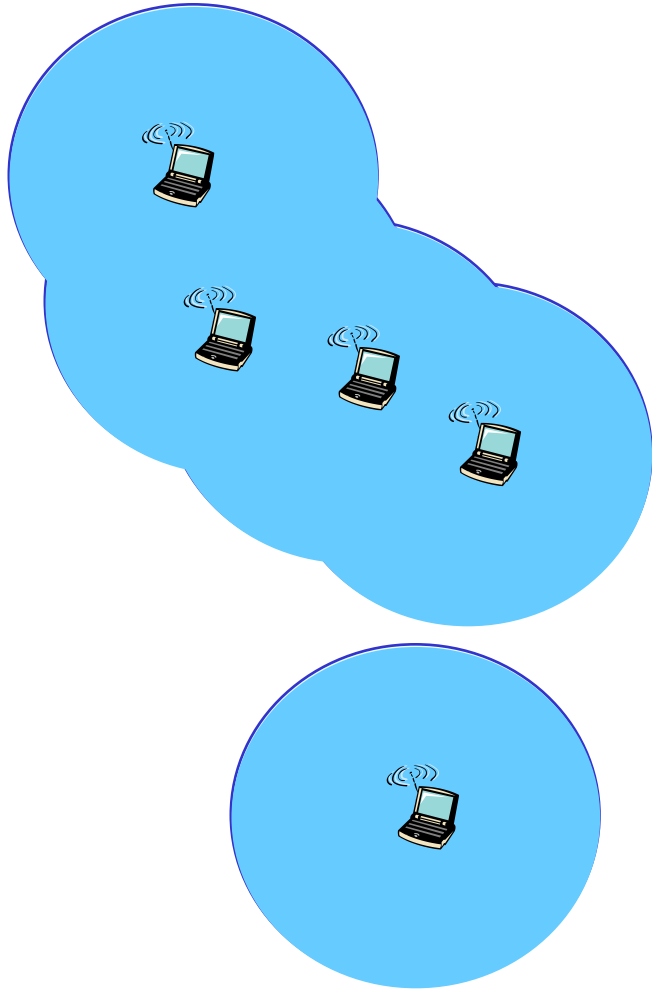
רכיבים של רשת אלחוטית



תצורת תשתית

- תחנת בסיס מחברת מארחים אל-חוטיים לרשת הקווית העולמית
- העברת אחריות: מארח אל-חוטי עובר בין תחנות שמחברות אותו לרשת הקווית העולמית

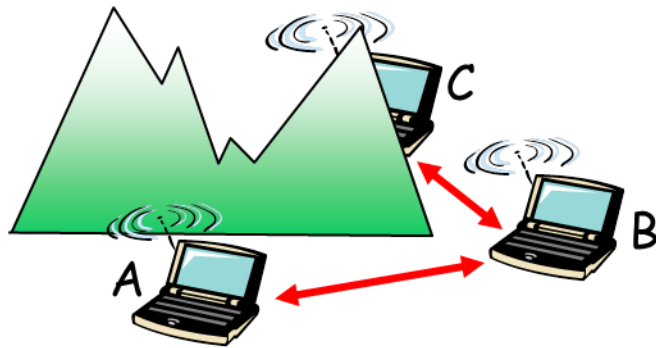
רכיבים של רשת אלחוטית



תצורת אד הוק

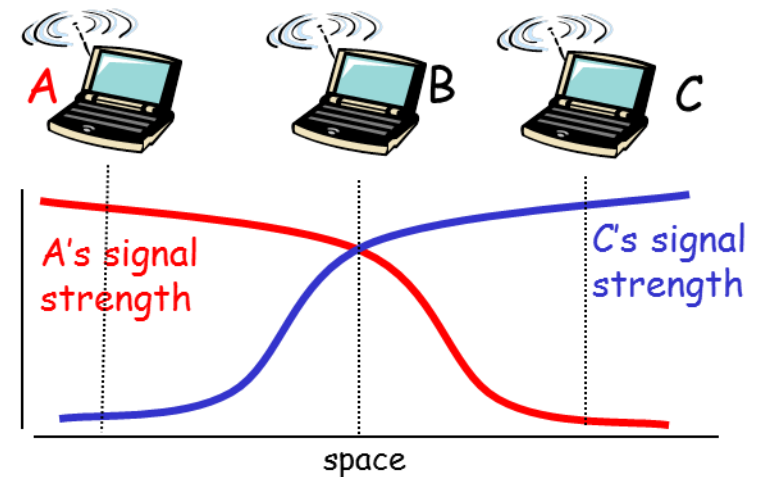
- אין תחנות בסיס
- מארחים יכולים לשדר רק למארחים אחרים בתווך כיסוי החיבור
- מארחים מארגנים את עצמם לרשת: מנתבים בינם לבין עצמם

בעיית הצומת הנסתר



בעיית הצומת הנסתר

- B, A שומעים אחד את השני
- B, C שומעים אחד את השני
- A, C לא שומעים אחד את השני
- כלומר, A ו-C לא יודעים שהם מתנגשים ב-B



הנחתת האות

- B, A שומעים אחד את השני
- B, C שומעים אחד את השני
- A, C לא שומעים אחד את השני מתנגשים אצל B

בעיית הצומת החשוף



בעיית הצומת החשוף

- B, C שומעים אחד את השני
- B רוצה לשדר ל-A
- C רוצה לשדר ל-D

הנחתת האות

- B, C שומעים אחד את השני
- A, C לא שומעים אחד את השני
- D, B לא שומעים אחד את השני

- B צריך לדעת ש-D לא שומע את B ולכן ניתן לשדר

תחומי ההתנגשות מורכבים יותר

התווד משותף

פרוטוקול MAC מותאים ומורחב
• פרוטוקול להזמנת חלונות שליחה

אופן הפעולה : CSMA/CA

- *Carrier Sensing Multiple Access with Collision Avoidance*
- חש התווד גישה מרובה עם מניעת התנגשויות

פרוטוקול MAC : CSMA/CA

שולח 802.11

1. אם חשים שערוך השידור פנוי ל-DIFS זמן, משדרים את כל המסגרת (ללא CD)

2. אם חשים שערוך השידור בשימוש

1. מתחילים עם טיימר נסיגה אקראי

2. הטיימר סופר לאחור בזמן שהערוך פנוי

3. משדרים כאשר הטיימר נגמר

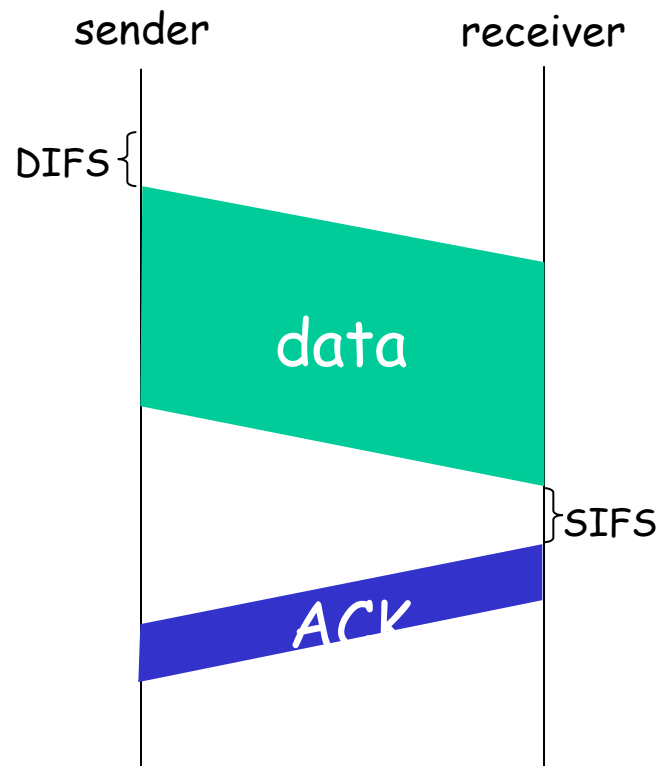
3. אם לא מקבלים ACK, מגדילים את טווח הטיימר, חזור ל-2

מקבל 802.11

1. אם המסגרת התקבלה בסדר

2. שדר ACK אחרי SIFS זמן (צריכים

ACK בגלל בעיית הצומת הנסתר)



ערכים ל-SIFS/DIFS

תקן	SIFS	Slot Time	DIFS = SIFS+ 2 × Slot Time
IEEE 802.11-1997 (FHSS)	$28\mu s$	$50\mu s$	$128\mu s$
IEEE 802.11-1997 (DSSS)	$10\mu s$	$20\mu s$	$50\mu s$
IEEE 802.11b	$10\mu s$	$20\mu s$	$50\mu s$
IEEE 802.11a	$16\mu s$	$9\mu s$	$34\mu s$
IEEE 802.11g	$10\mu s$	9 or $20\mu s$	28 or $50\mu s$
IEEE 802.11n (2.4 GHz)	$10\mu s$	9 or $20\mu s$	28 or $50\mu s$
IEEE 802.11n (5 GHz)	$16\mu s$	$9\mu s$	$34\mu s$
IEEE 802.11ac	$16\mu s$	$9\mu s$	$34\mu s$

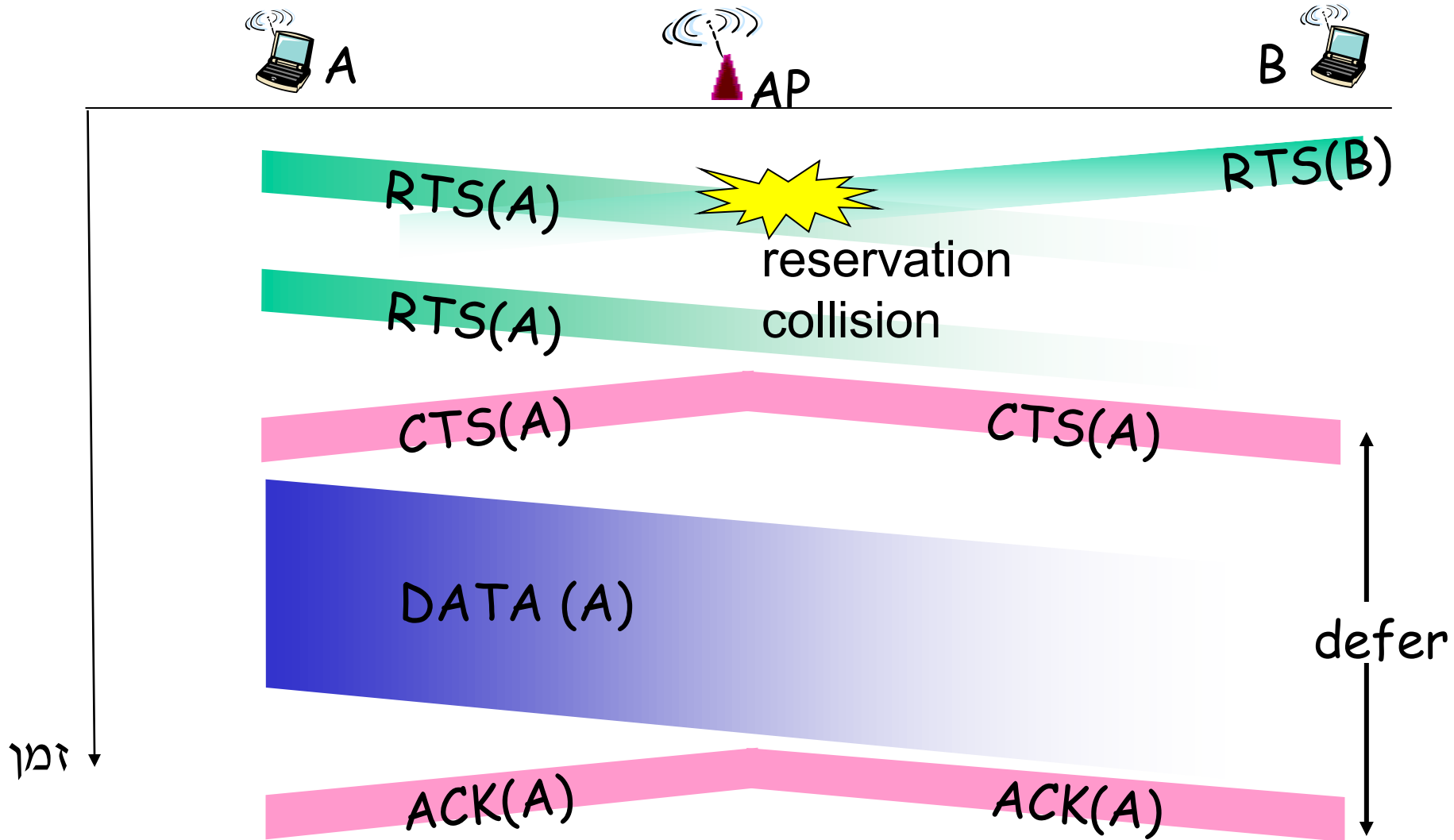
מניעת התנגשויות

רעיון: לאפשר לשולח "להזמין" ערוץ לשידור מסגרת במקום לגשת אקראית לתווך: למנוע התנגשות מסגרות ארוכות

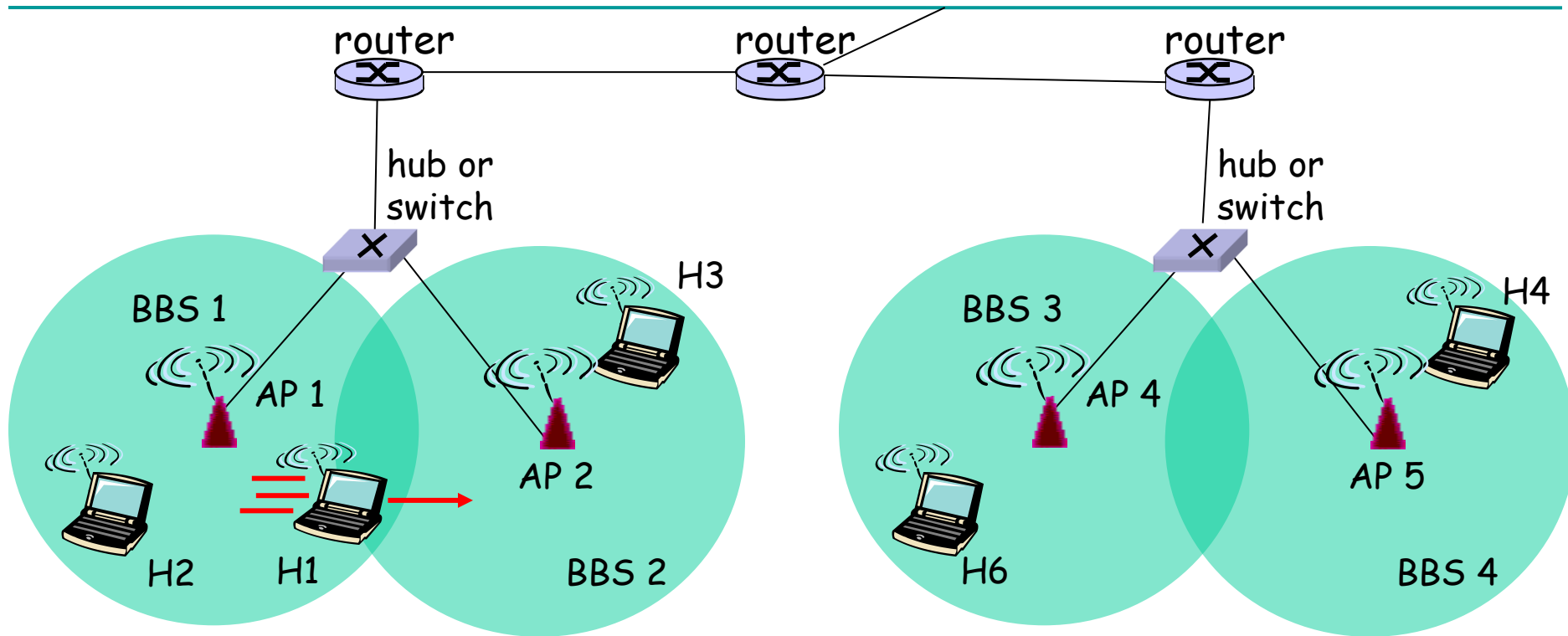
- השולח משדר תחילה מנה קטנה עם בקשה לשליחה (RTS) לתחנת הבסיס על ידי CSMA
 - RTS מכיל את שם המבקש ואורך הנתונים לשדר
 - RTS-ים עדיין עלולים להתנגש זה בזה (אבל הם קצרים)
- BS משדרת CTS (פנוי לשדר) כתגובה ל-RTS
 - מהדהד את שם המארח שאושר בקשתו ואורך הנתונים שיישלח
- CTS נשמע על ידי כולם
 - השולח משדר מסגרת נתונים
 - תחנות אחרות מחכות

מונע לחלוטין התנגשויות של מסגרות נתונים
על ידי מנות הזמנה קטנות!

מניעת התנגשויות : RTS-CTS

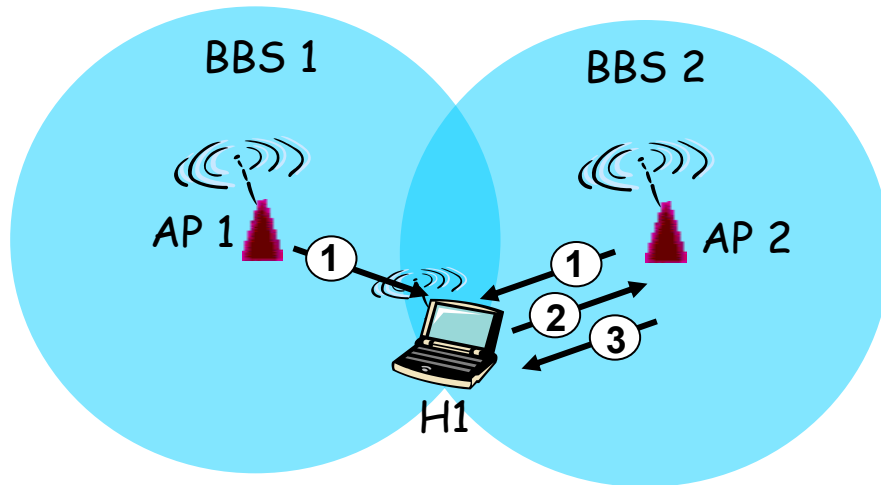


נקודות גישה אלחוטיות



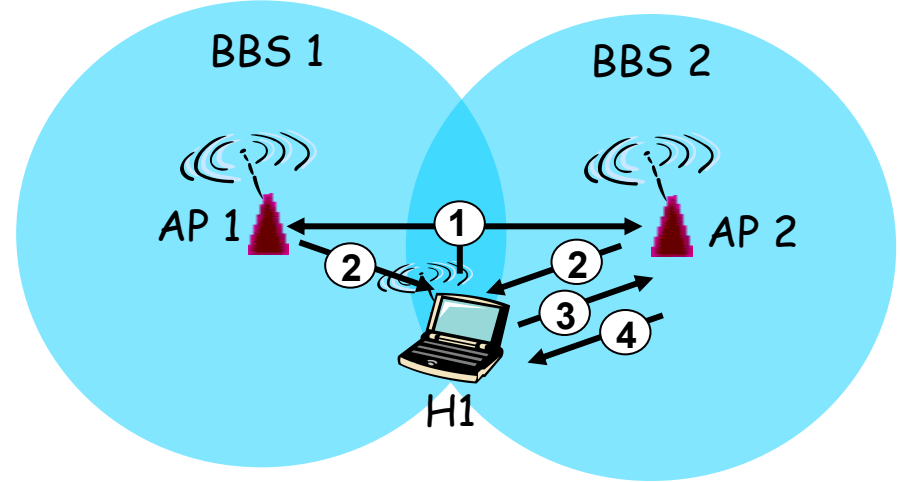
- מערכת הפצה: תשתית רשת קווית מחברת בין נתבים
- ניידות: H1 זו ימינה, רואה את AP2 יותר חזק מ-AP1, מבקש לעבור ל-AP2

סריקה : אקטיבית ופסיבית



סריקה פסיבית :

1. מסגרות מגדלור (Beacon) נשלחות מנקודות גישה
2. מסגרת "בקשת שיוך" (Association Request) נשלחה : H1 ל-AP שנבחר
3. מסגרת "תגובת שיוך" (Association Response) נשלחה : H1 ל-AP נבחרת



סריקה פעילה :

1. שידור מסגרת "בקשת בדיקה" (Probe Request) מ-H1
2. מסגרת "תגובת בדיקה" (Probe Response) נשלחה מ-AP-ים
3. שולחים מסגרת בקשת שיוך : H1 ל-AP שנבחר
4. מסגרת "תגובת שיוך" נשלחה : H1 ל-AP נבחרת



802.11 בעיות אבטחה

מניעת שימוש

- בקשות שיוך (וניתוק) לא מאובטחים

רחרוח מנות יותר חמור

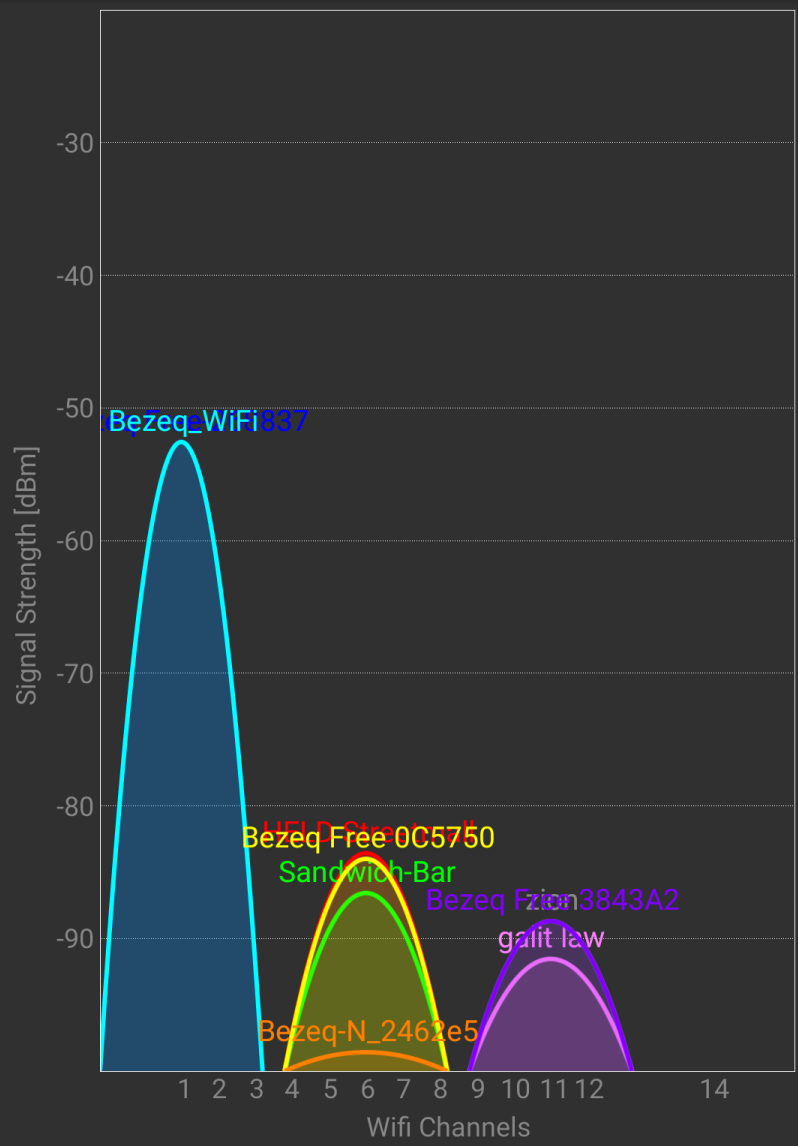
- לא צריכים חיבור פיזי
- טווח ארוך (6 רחובות טיפוסיים)
- תקני הצפנה ישנים (WEP, WEP2) היו גרועים מאוד

קחו קורס באבטחת מידע ותקשורת ללמוד יותר

“Wi-Fi WPA : עדיף Protected Access”

- נכנס בתקון 802.11i
- עובד עם הצפנה חזקה - AES

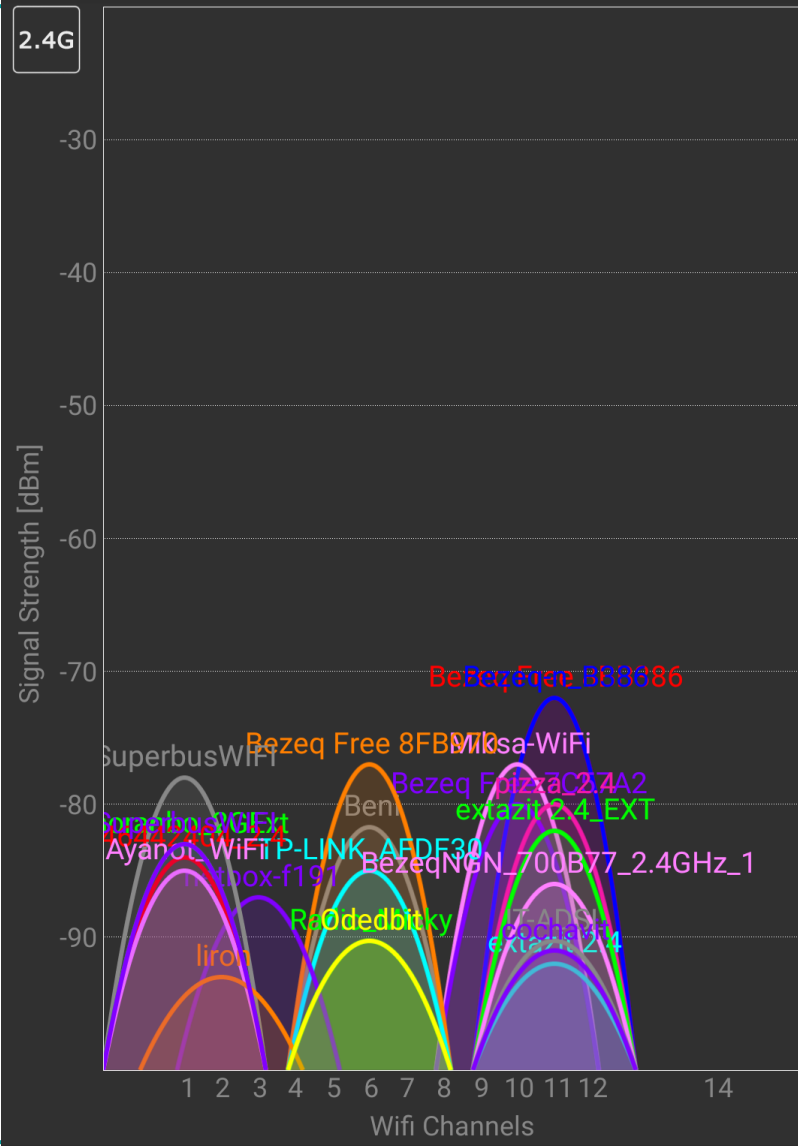
Wifi Analyzer



KS



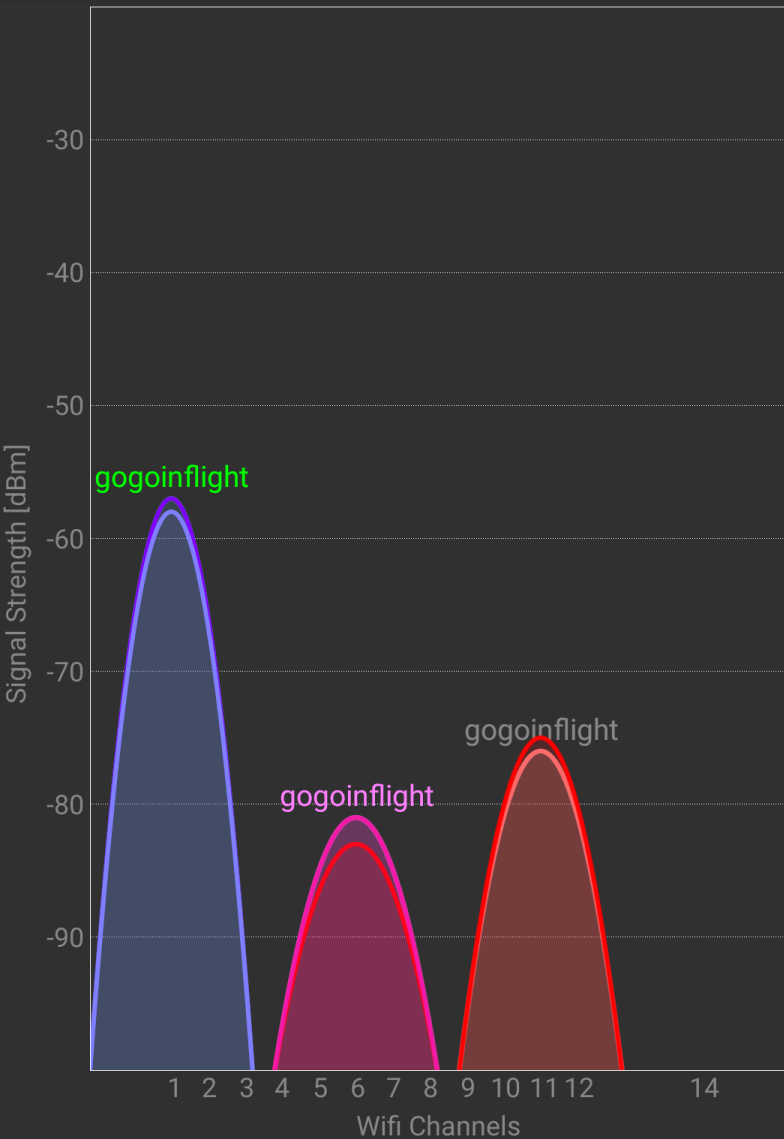
Wifi Analyzer



Wifi Analyzer



19:49

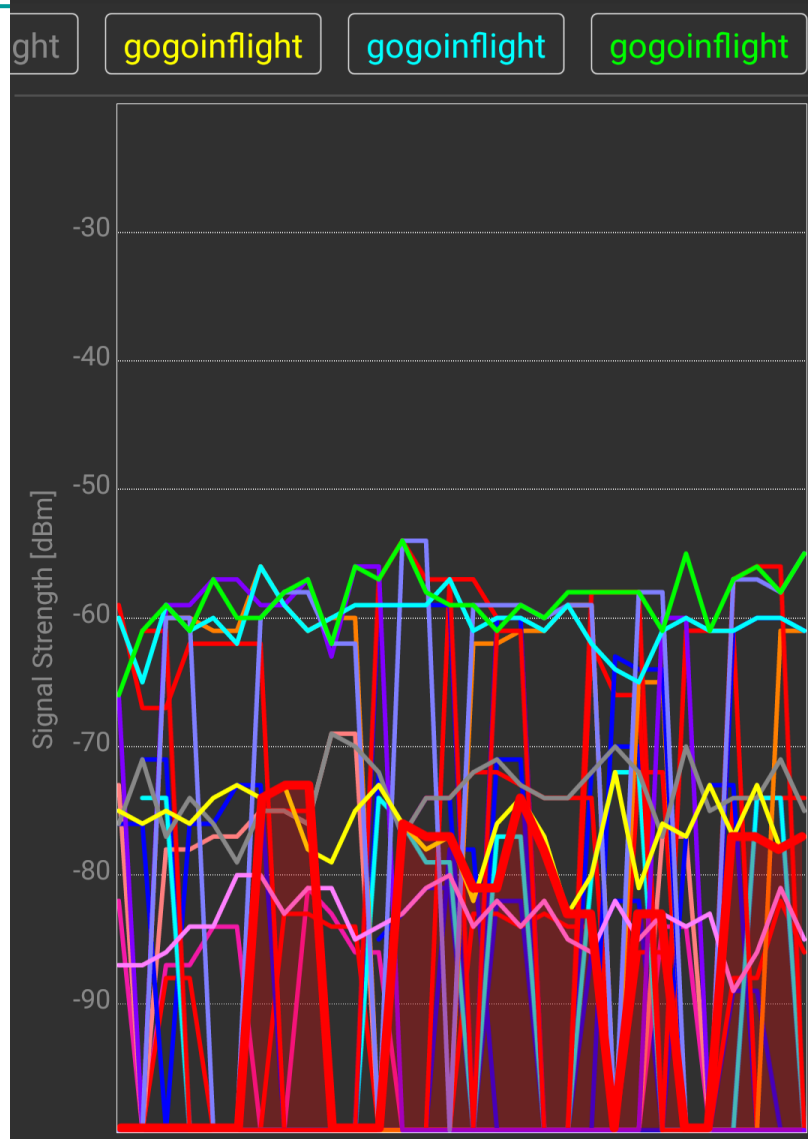


ata and Computer C

Wifi Analyzer



19:50



ata and Computer C

Plane WiFi

A screenshot of the 'Wifi Analyzer' application on an Android phone. The status bar at the top shows airplane mode is active and the time is 19:50. The app title is 'Wifi Analyzer'. A yellow warning icon and the text 'Not connected!' are displayed. Below, a list of detected WiFi networks is shown. Each entry includes a signal strength icon, channel information, frequency, and a signal strength bar with a numerical value in dBm. The networks are:

- gogoinflight (...)**: CH, -58 dBm, [ESS]
- ? (...)**: CH, -58 dBm, [WPA2-PSK-CCMP][ESS]
- ? (...)**: CH, -63 dBm, [WEP][ESS], 5G
- ? (5c:a4:8a:d8:59:d2)**: CH 44, 5220 MHz, -72 dBm, CISCO SYSTEMS, INC, [WEP][ESS], 5G
- ? (c0:7b:bc:92:79:92)**: CH 36, 5180 MHz, -63 dBm, CISCO SYSTEMS, INC, [WEP][ESS], 5G



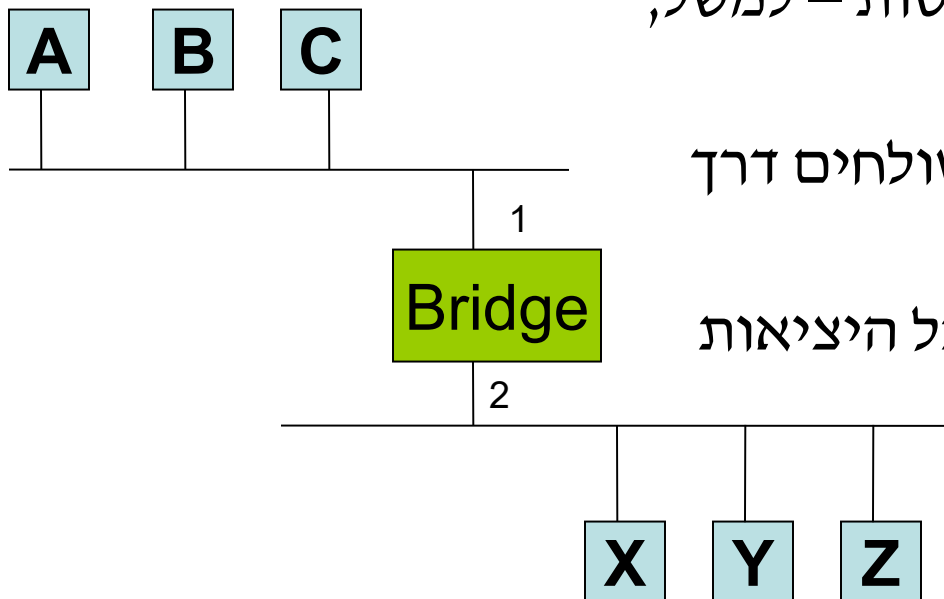
- מיתוג
 - שכבה 2 (קישור)
 - שכבה 3 (רשת)
 - מנות נתונים
 - מעגל מדומה
- 802.11 אלחוטית
- אלגוריתם לעץ פורש

גשרים ומתגי LAN

- גשר (Bridge) מקבל מסגרות LAN ביציאה אחת ומוציא אותן ביציאה אחרת.
- אופטימיזציה: מעביר רק מסגרות מתאימות

גשר לומד

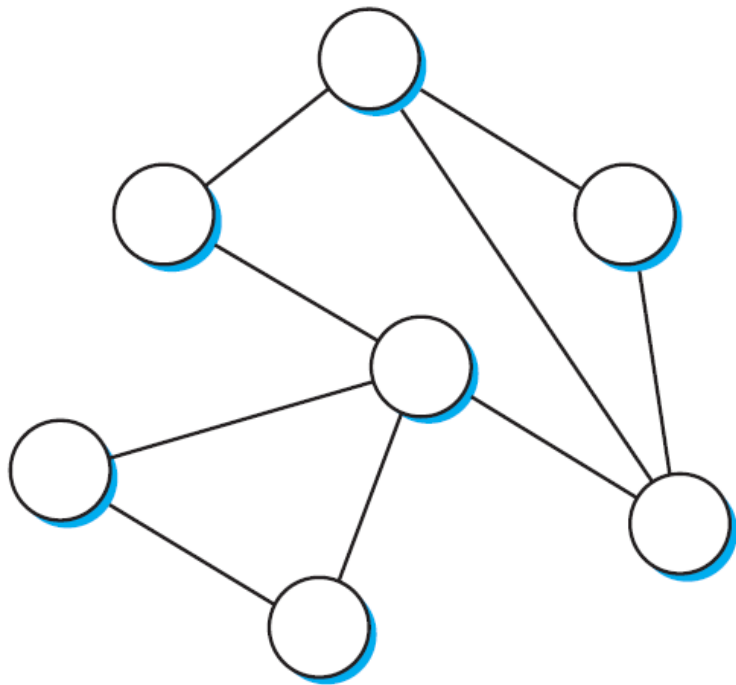
- רושם כתובת "שולח" ממסגרות נכנסות – למשל, ממקור S מיציאה מספר P
- מוסיף רשומה שלהגיע לכתובת S, שולחים דרך P
- אם אין רשומה בטבלה, משדרים לכל היציאות



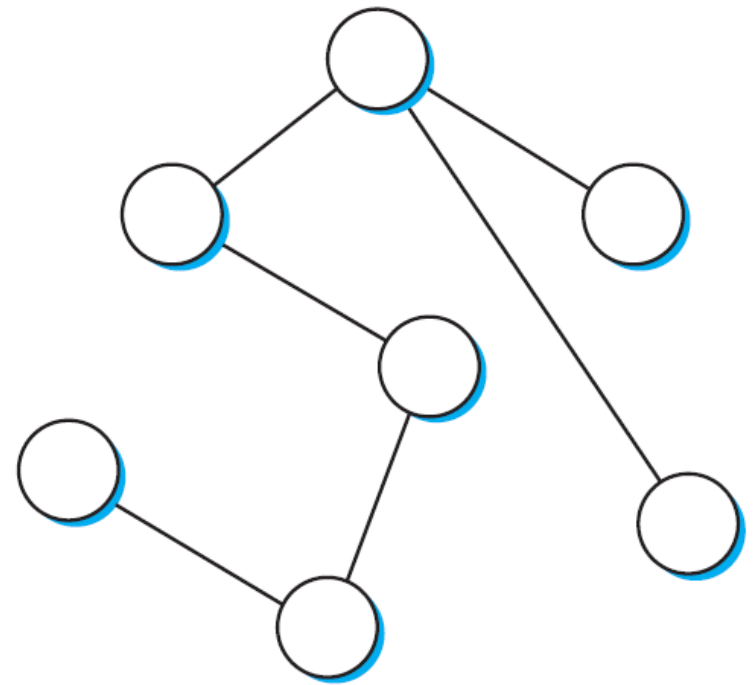
בעיה : לולאות

- מסגרת עלולה להיות משודרת מחדש לנצח
- ניתן למנוע על ידי בנייה מקפידה, אבל:
 - קשה, במיוחד ניהול
 - לעתים קרובות רוצים חיבורים נוספים כגיבוי
- פתרון:
 - הגבלת יציאות לאלה ששייכות לעץ פורש
 - אלגוריתם בסיסי: רדיה פרלמן מחברת Digital
 - תקן 802.1 לגשרי LAN מבוסס על האלגוריתם
 - 2004: שיפורים כדי להאיץ את קצב ההתכנסות

מהו עץ פורש?



(a)



(b)

Algorhyme

I think that I shall never see
a graph more lovely than a tree.
A tree whose crucial property
is loop-free connectivity.
A tree that must be sure to span
so packets can reach every LAN.
First, the root must be selected.
By ID, it is elected.
Least-cost paths from root are
traced.
In the tree, these paths are placed.
A mesh is made by folks like me,
then bridges find a spanning tree.

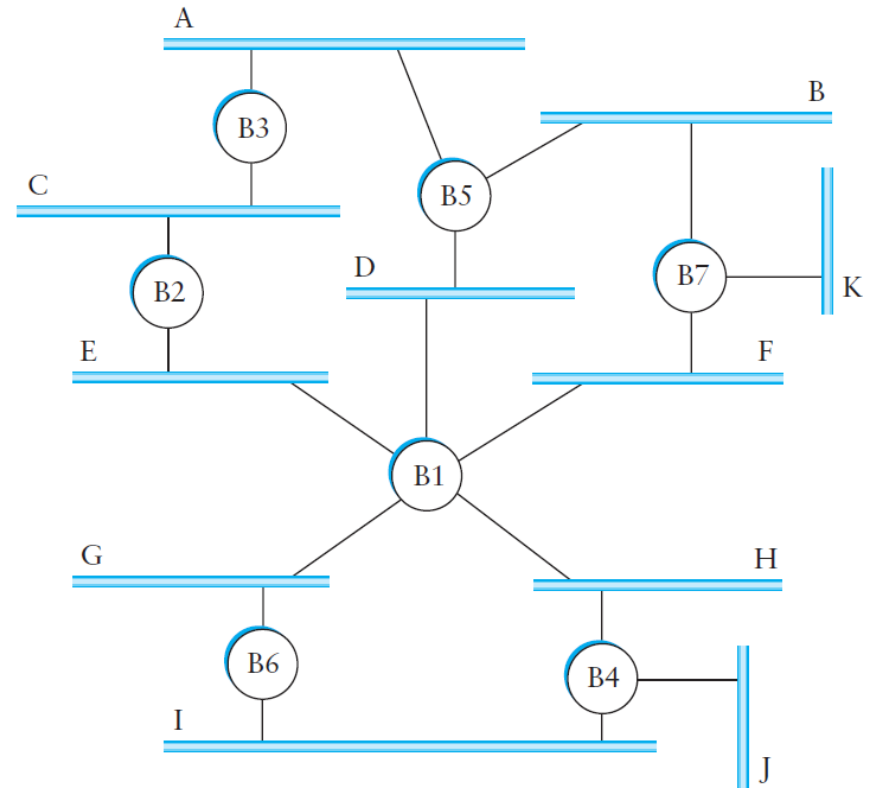
Radia Perlman



מושגי עץ פורש

מושגי יסוד :

- נבחר **גשר שורש אחד**
 - לכל תת-רשת חייב להיות נתיב אחד להגיע לגשר השורש
- כל גשר עשוי להיות מחובר **לתת-רשתות מרובות** (ולקבל מהן מנות)
 - רק **הגשר האחראי** יעביר מנות לכיוון השורש
- כל גשר יודע איזה מהיציאות **הינה הקרובה ביותר** לשורש
 - נקרא **יציאת השורש**



אלגוריתם עץ פורש

פרסומת ($ROOT, dist, SENDER$)

- $ROOT$ מספר זהות של השורש
- $dist$ כמות הצעדים אל השורש $ROOT$
- $SENDER$ מזהה של השולח

כל גשר מתחיל עם ההנחה שהוא השורש ומתחיל לפרסם את עצמו

אם גשר מקבל פרסומת יותר טובה, הוא מפסיק לפרסם את עצמו

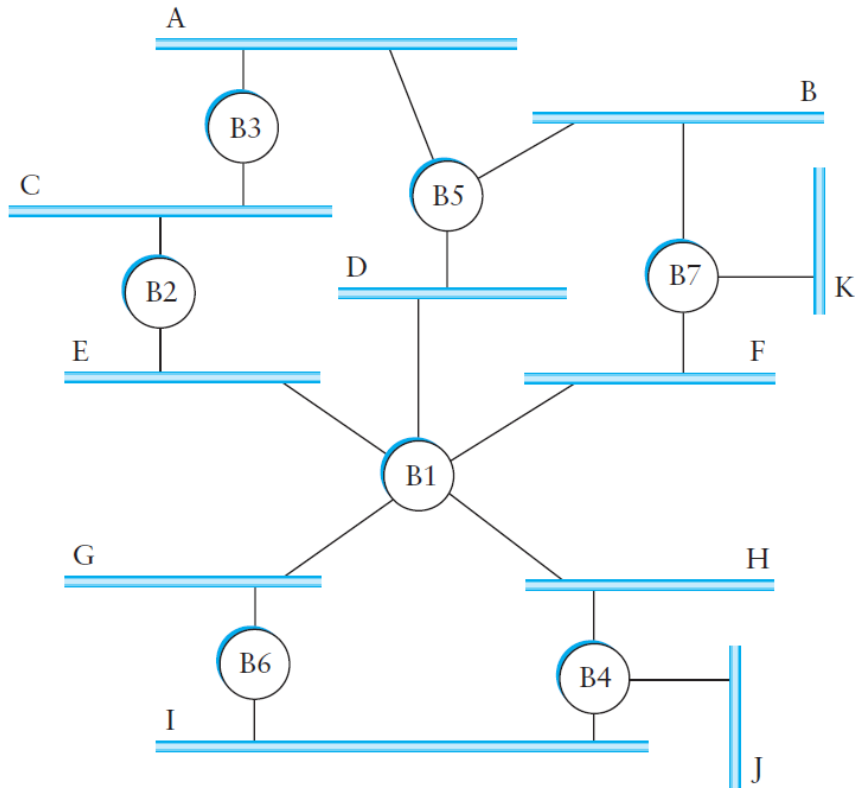
- יותר טובה כלומר $ROOT$ ID יותר קטן או $ROOT$ ID זהה ו- $dist$ יותר קטן
- הגשר זוכר מאיפה הפרסומת הטובה ביותר הגיעה - **Root Port**

בחירות **לגשרים אחראים** בוזמני

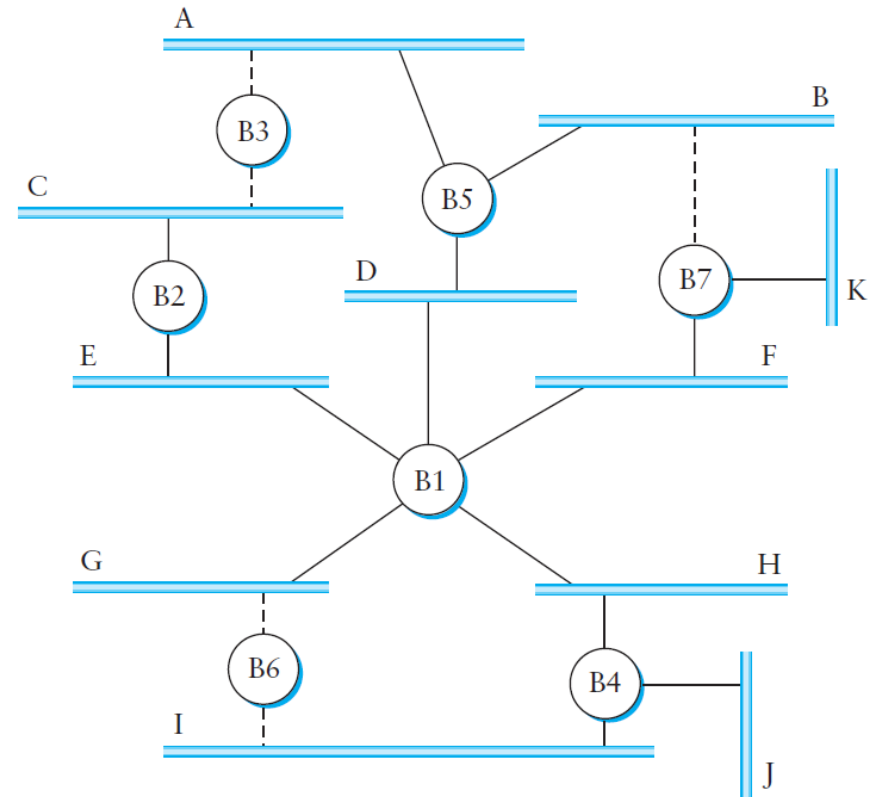
- מרחק הקטן ביותר ל- $ROOT$ או מרחק זהה ו-ID יותר קטן
- אם גשר שומע דרך יותר קצרה אל השורש על יציאה מסויימת, הוא יודע שהוא לא **הגשר האחראי** על אותו תת-רשת

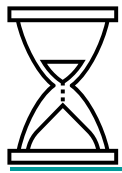
דוגמה לעץ פורש

לפני



אחרי

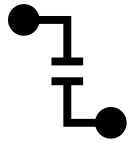




תחזוקת עצים פורשים

גשר השורש הוא האחרון שמייצר פרסומות

- הוא שולח פרסומות מפעם לפעם



- אם גשר מבחין שהוא לא שמע פרסומת במשך זמן מה (טיימר), הוא מפעיל את האלגוריתם שוב

- זיהוי אוטומטי של כשלים ושינויים בטופולוגית הרשת

פרוטוקול עץ פורש מהיר

- עדכון לפרוטוקול משנת 2004

תפקיד יציאת גיבוי

- דרך נוספת להגיע מגשר לאותו תת-רשת
- אותו גשר, רק יציאה שונה

תפקיד יציאה חלופית

- דרך נוספת להגיע לשורש
- חלופה ליציאת השורש

מצבי גשר אפשריים

- Discarding
- Learning
- Forwarding

סנכרון בין גשרים יותר מהיר

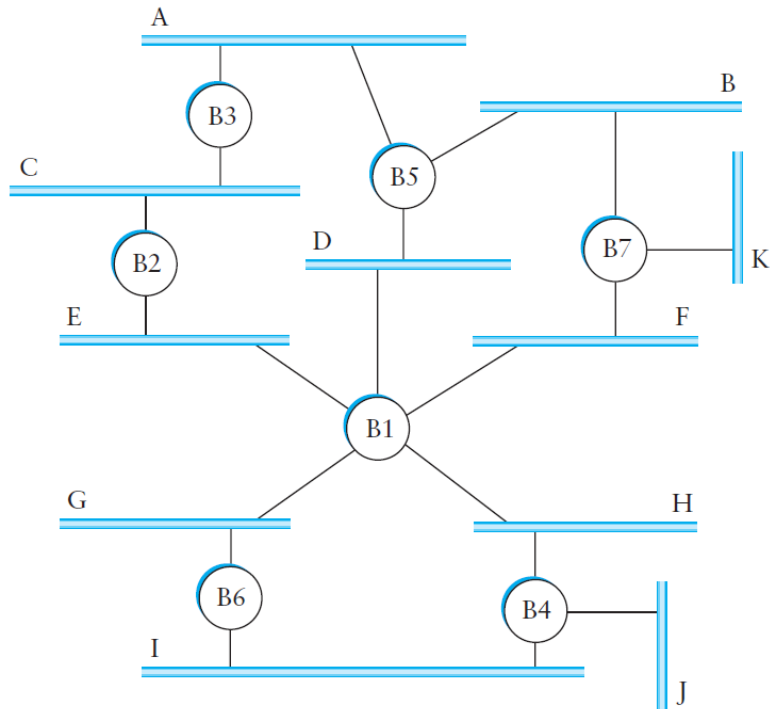
- משא ומתן, לא רק הקשבה להודעות
- מסיים את הכול תוך $3X$ "Hello Time"

כל גשר שולח מנות כל "Hello Time"

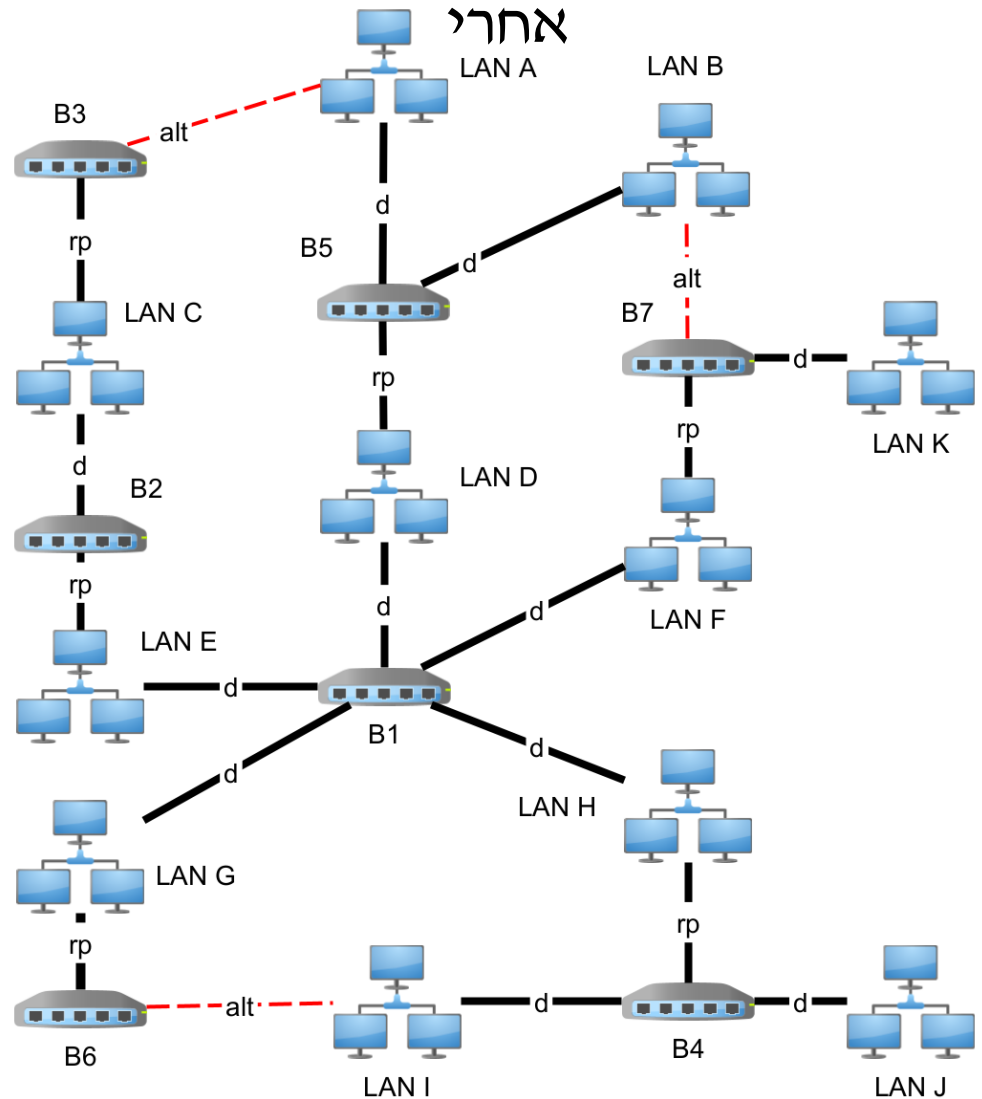
- לא רק בתגובה להודעות השורש

דוגמה לעץ פורש מהיר

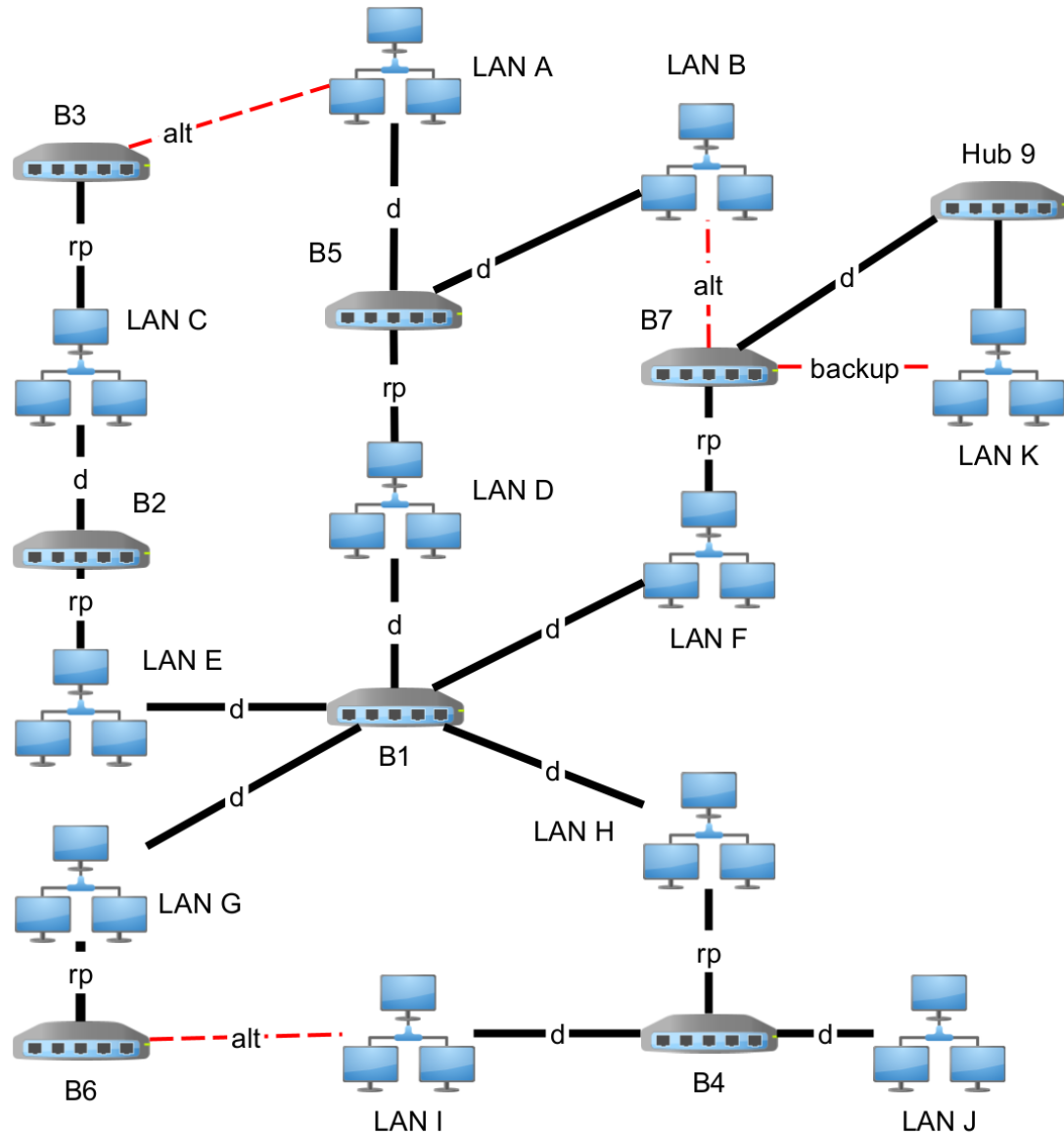
לפני



אחרי



דוגמה עם יציאת גיבוי



שימו לב
לרכזת!

- מיתוג
 - שכבה 2 (קישור)
 - שכבה 3 (רשת)
 - מנות נתונים
 - מעגל מדומה
- 802.11 אלחוטית
- אלגוריתם לעץ פורש