לק"י

חלק יבש – תשובות:

<u>שאלה 1:</u> חסרונות של TCP :

1. הקשר בין שליטה בעומס למסירה אמינה: שליטה בעומס ב-TCP קשורה למנגנון המסירה האמינה שלו, שניהם מתבססים על אותו מנגנון חלון. בחירה זו אומרת שכל אובדן חבילה עשוי לעצור את התקדמות החלון עד שהחבילה האבודה משוחזרת כאשר מוכרז " time out" , מה שמוביל לחוסר יעילות מבחינת מסירת חבילות ביחס לזמן , במיוחד כאשר החבילה האבודה כבר עזבה את הרשת אך אובדנה מעכב את כל החבילות הבאות אחריה בחלון השולח.
2. Head of line blocking : בגלל שפרוטוקול TCP מעביר את הפקאטות אחת אחרי השנייה עם חשיבות לסדר, אז אם חבילה בודדת לא הגיע לצד המקבל, תהליך השליחה ייעצר והפאקטות שכבר הגיעו לצד המקבל שהן אחרי הפאקטה האבודה, לא יועברו לשכבת האפליקציה והמידע בהן לא ימומש עד שהחבילה האבודה משוחזרת ומועברת, מה שגורם לעיכובים אפשריים במימוש המידע הנשלח, אפילו אם החבילות הבאות הגיעו ליעד.
3. עיכוב עקב הקמת חיבור: ל-TCP נדרשת תהליך חיבור של שלושה שלבים (לחיצת היד המשולשת) כדי להקים חיבור, מה שיוצר עיכוב לפני שניתן לשלוח את הנתונים. בנוסף לכך אם נדרשת גם הצפנה של החיבור באמצעות TLS, נדרש סבב נוסף להחלפת אישורי האבטחה, מה שמגדיל עוד יותר את זמן ההקמה.

3 (אופציה ב). עיכוב לפני שליחת הנתונים. ל-TCP נדרש תהליך חיבור של שלושה שלבים (לחיצת היד המשולשת) כדי להקים חיבור, מה שמבזבז זמן לפני שניתן לשלוח נתונים על בדיקה שהצד המקבל באמת קשוב לצד השולח. בנוסף לכך אם נדרשת גם הצפנה של החיבור באמצעות TLS, נדרש סבב נוסף להחלפת אישורי האבטחה, שבו הצד השולח פונה לצד המקבל באישור אבטחה ואז המקבל עונה לו, מה שמגדיל עוד יותר את זמן ההקמה לחמישה שלבים.

4. הגבלות בגלל שדות קבועים בפרוטוקול: ה-TCP מורכב משדות בגודל קבוע, עם שדה אופציונלי מוגבל ל-40 בתים. בגלל השיפור במהירות של תעבורת הרשת, שדות שבעבר היה מספיק מספר מצומצם של בתים בשביל להציג את המידע המועבר, כעת מצריכים יותר בתים מה שגורם לכך שלא מנצלים את כל יכולות הרשת. לדוגמה : The sequence number fieldשבעבר היה צריך ארבעה בתים והיום בגלל מהירות האינטרנט מצריך הרבה יותר.

5. תלות בכתובת IP לזיהוי חיבור: למדנו בשיעור שפרוטוקול TCP משתמש בכתובות IP ומספרי פורטים כדי לזהות חיבור. אם כתובת ה-IP של נקודת קצה משתנה (בשל ניידות, Multi-Homing או NAT), החיבור הקיים יפסק ואז יהיה צריך לעשות הקמת קשר חדשה באמצעות לחיצת היד המשולשת, וזה גורם לעוד תעבורת רשת (עיכוב בזמן).

<u>שאלה 2:</u> חמשת התפקידים של פרוטוקול תעבורה הם:

1. הגדרת מזהה חיבור ומזהה נתונים
2. ניהול חיבור התעבורה: קביעת ID ייחודי המחבר בין שני קצוות החיבור ובכך מבטיח תקשורת אמינה בין שני הקצוות, הקמה ופירוק של החיבור, תמיכה בשינויים בכתובת IP של המארח ובקרה על החלפת מידע בין שתי הקצוות.
3. מסירת נתונים אמינה: מבטיח שהנתונים עוברים באופן אמין בין הקצוות, בעזרת מנגנונים כמו בקרת זרימה בעזרת הגדרת חלון ומניעת חסימת ראש התור.
4. בקרת עומס: ניהול מספר החבילות ברשת כדי למנוע עומס יתר ולהבטיח שידור נתונים יעיל.
5. אבטחה: מבטיח חיבור מוצפן ובכך מספק סודיות של הנתונים.

<u>שאלה 3:</u>

לחיצת הידיים בQUIC מבצעת את לחיצת הידיים של transport וגם cryptographic
באותו הזמן תוך סיבוב זמן אחד.
לעומת זאת ב TCP נדרש סיבוב זמן אחד(RTT-1 (רק לבקשה להתחברות מצד השולח ולאחר מכן נדרשים עוד RTTS ל TLS handshake במקרה הצורך.

גם הלקוח וגם השרת בוחרים מזהי חיבור באופן עצמאי במהלך לחיצת היד, המשמשים לאורך כל חיבור מה שמאפשר לפאקטות לעבור בצורה נכונה גם אם כתובת הIP ההתחלתי משתנה. במקביל מתבצעת החלפת מפתחות TLS 1.3 הקובעת פרמטרית קריפטוגרפים כבר מההתחלה.
בהתחלה הלקוח שולח חבילה ראשונית המכילה את הפרמטרים ההצפנה הנדרשים לביסוס אבטחה, לאחר מכן השרת מגיב עם החבילה הראשונית שלו, הכוללת את תגובת ההצפנה שלו והוא יכול לשלוח חבילה שדורשת לנסות שוב להתחבר אם הוא צריך לאשר את כתובת הלקוח.
אחרי שהם החליפו את החבילה הראשונית הם יכולים להתחיל להחליף נתונים בצורה מוגנת.

לק"י
QUIC תומך גם בנתוני RTT-0, שבהם לקוח יכול לשלוח נתונים בחבילה הראשונה שלו בהתבסס על פרמטרים שנקבעו בהפעלה קודמת. וזה מקטין את זמן החיבורים הבאים.

ב-TCP, הקמת החיבור ואבטחתו מתרחשים בנפרד ודורשים לפחות 2 סיבובי זמן (2 RTTs) כדי להקים חיבור מאובטח. לעומת זאת QUIC מפשט את התהליך הזה על ידי שילוב שתי ההתחברויות לתוך סיבוב אחד ובכך משפר חלק מחסרונות TCP.

בנוסף לכך ב-TCP החיבור נעשה עם כתובת IP וכל שינוי יכול לשבש את החיבור, לעומת זאת בQUIC נעשה שימוש במזהי חיבור ולא בכתובת IP ולכן גם אם משנים את כתובת הIP החיבור יישאר חלק.

<u>שאלה 4:</u>
QUIC משתמש במבנה פאקטה גמיש שנועד לתמוך במגוון צרכים ואופטימיזציות.
המבנה הבסיסי מבדיל בין שני סוגי headers .

Long Header: משתמש בעיקר במהלך הגדרת החיבור הראשוני או כאשר מתבצעים שינויים משמעותיים בפרמטרים של החיבור.
זה כולל:
סוג: המטרה הספציפית של החבילה.
גרסה: הגרסה של הפרוטוקול OUIC שבה נעשה שימוש.
מזהה חיבור יעד ומקור: מזהים ייחודיים עבור הקצוות של החיבור.
מספר פאקטה: לכל פאקטה יש מספר זיהוי ובכך אנחנו יכולים לבצע מעקב אחר הפאקטות (מי נשלח ומי נאבד).
מטען (Payload): מידע מוצפן.

Short Header: משמש לאחר יצירת החיבור עבור פאקטות המכילות נתוני אפליקציה.
זה כולל:
מזהה חיבור יעד: לזיהוי החיבור המתמשך.
מספר פאקטה: בדומה ל Long Headerאך כאן הוא משמש לחיבורים שכבר נוצרו.
מטען (Payload): הוא מוצפן ומכיל בתוכו רצף של frames .

ל-TCP יש מבנה פאקטה קבוע, הכולל שדות בגודל קבוע ולעתים קרובות לא מנוצל. זה מגביל את האופן שבו TCP יכול להתפתח ולהשתנות.
לעומת זאת בפרוטוקול QUIC: headers של הפאקטות בנויים כך שהם ניתנים להרחבה ,מה שמאפשר דינמיות לפי המצב והצרכים הנוכחיים של החיבור.

בנוסף לכך בTCP אובדן חבילה אחת משפיע על מעבר כל הפאקטות שאחריו כלומר לא ניתן לעבד פאקטות עוקבות עד לשחזור החבילה האבודה, לעומת זאת QUIC מאפשר בתוך אותו חיבור למספר זרמים להתקדם באופן עצמאי ובכך אובדן בזרם אחד אינו משפיע על אחרים.

<u>שאלה 5:</u>
טיפול בהגעה מאוחרת של פאקטה: אם חבילה מגיעה באיחור ניתן עדיין להשתמש בה על מנת להשלים את כל הזרם, שימוש בחבילה זו מונעת שידורים חוזרים מיותרים.

אובדן פאקטה: במקרה של אובדן פאקטה הפרוטוקול לא שולח את החבילה עצמה אלא את הנתונים הדרושים בחבילות חדשות.
QUIC משתמשת במנגנון Probing Timeout (PTO), כאשר חבילה שדורשת אישור קבלה נשלחת, QUIC מפעיל טיימר עבור תקופת PTO. הטיימר מתחיל לספור מרגע שליחת החבילה. כאשר הטיימר מגיע לסיומו, QUIC שולחת נתונים חדשים או מבצעת העברה מחדש של נתונים שלא התקבלו כדי לבדוק את מצב מסלול הרשת. שלב זה מסייע להתאושש במהירות מכשלון מסלול אפשרי או עומסים חמורים.

<u>שאלה 6:</u>
בקרת עומס ב-QUIC מתבצעת בשיטה מתקדמת שמפרידה בין הניהול של תנודות ברשת לבין אמינות המשלוח:

1. הפרדה בין בקרת עומס לבין טיפול באמינות: QUIC מטפלת בניהול עומס על ידי שימוש במספרי חבילות על מנת לעקוב אחר חבילות שנשלחו ולא התקבלו תגובה להן, מה שמאפשר לה גמישות בהתאמת התגובה למצב הרשת. האמינות מובטחת על ידי זמני המעבר והתגובה של החבילות.

2. שילוב של אלגוריתמים מוכרים: במקום לפתח גישות חדשות לבקרת עומס, QUIC מתבססת על עקרונות מאלגוריתמים קיימים ומוכרים כמו Reno ו-Cubic.

לק"י

3. שמירה על חלון העומס בלחץ קבוע: במקרה של איבוד חבילות, QUIC בודקת האם התרחש עומס עמיד שמחייב להקטין את החלון. זהו תהליך שמתבצע רק אם נקבע שהתרחש עומס לאורך זמן בכמה מקרים ולא רק על פי מקרה בודד.

4. הזמנים בין שליחת חבילות: QUIC מחשבת את הזמן שחלף בין השליחה לקבלת תגובה עבור חבילה, מה שמאפשר לה להתאים את קצב השליחה בהתאם לזמן התגובה הממוצע ברשת.

5. התאמת קצב השליחה לגודל החלון ולגודל החבילה: כדי לשמור על יעילות, QUIC מתאימה את קצב השליחה שלה לגודל החלון ולגודל החבילות, כדי להבטיח שלא נשלח יותר מידי נתונים בבת אחת ולמנוע עומס יתר על הרשת.

הגישה הזו של QUIC לבקרת עומס מאפשרת לה להיות יעילה יותר וגמישה בהתמודדות עם תנאי רשת משתנים, תוך שמירה על ביצועים גבוהים ואמינות בתקשורת.

לק"י

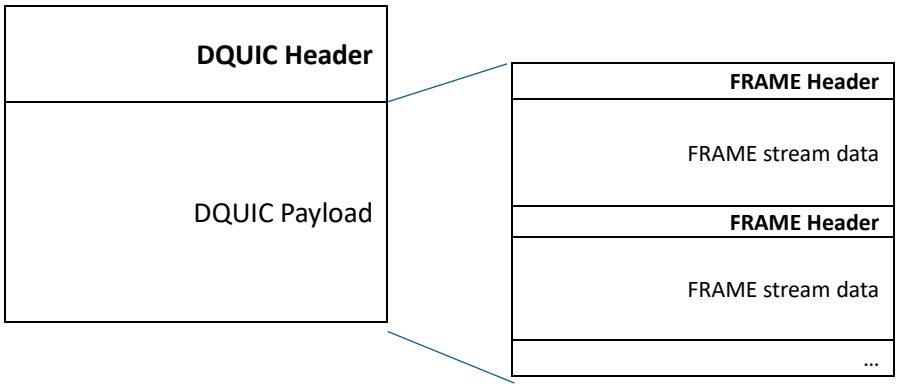
חלק רטוב - פרוטוקול DQUIC: DQUIC - Github

בחרנו לממש את החלק הראשון, ריבוי זרימות וקראנו לפרוטוקול שלנו Demo QUIC (בקיצור DQUIC) .

חלק א': **מבנה הפאקטות**

DQUIC Header כולל בתוכו:
packet_type – סוג החבילה.
packet_number – מספר החבילה לחיבור הספציפי.
DQUIC Frame כולל בתוכו:
stram_id – מספר סידורי של הזרימה.
frame_type – סוג הframe.
offset – מסמן את מספר הבתים שהתקבלו ואושרו על ידי הצד המקבל.
length – אורך המידע שנמצא מיד לאחר הframe בפאקטה הנוכחית.

המחשה:



חלק ב': **מחלקות**

Class DQUICHeader
במחלקה זו מימשנו מבנה של header של פאקטת DQUIC .
שדות: packet_type , packet_nuumber המשמשים לזיהוי סוג החבילה והמספר הסידורי שלה לחיבור הנוכחי.

Class DQUICFrame
במחלקה זו מימשנו מבנה של header של frame ספציפי בתוך פאקטת DQUIC.
שדות: stream_id, frame_type, offset, length (ההסבר בקוד כמשמעות שם השדה).

Class Connection
מחלקה זו מייצגת חיבור. כאשר נוצר קשר בין שתי נקודות קצה, הסוקט שומר נתונים על כל חיבור באמצעות המחלקה הזו.
שדות: addr, conn_id, sent_packet_number, recv_packet_number המייצגים נתונים פשוטים על כל חיבור.
stream_bytes_ack – מילון המחזיק את נתוני הקבלה עבור כל stream בפורמט: (stream_id : bytes_received)
stream_bytes_sent – מילון המחזיק את נתוני השליחה עבור כל stream בפורמט: (stream_id : bytes_sent)

Class DQUIC
המחלקה העיקרית של הפרויקט.

שדות:
sock – סוקט UDP דרכו בפועל מתבצעת התקשורת.
connections – רשימת כל החיבורים של הסוקט.

פונקציות:

bind – מתפקדת כמו bind של UDP, מחברת את הסוקט לכתובת נתונה.

לק"י

Send_to – אחת מהפונקציות העיקריות של הפרוטוקול. מקבלת מילון בפורמט (stream_id : data) ושולחת את המידע לפי הסטרימים המתאימים תוך מימוש עקרון הריבוי זרימות של פרוטוקול QUIC.
שלב א – connection. תחילה הפונקציה בודקת אם הכתובת כבר נמצאת ברשימת החיבורים של האובייקט, אם לא היא מוסיפה אותה בתור connection חדש.
שלב ב – הכנות. עבור כל סטרים שנדרש לשלוח הפונקציה מגרילה גודל סטרים בבתים, יוצרת עבורו פריים, ומוסיפה את הסטרים לרשימת הסטרימים של החיבור (כלומר כל connection של האובייקט שומר כמה בתים נשלחו בכל סטרים).
שלב ג – שליחה וקבלת ack. הפונקציה שולחת את האובייקטים מכל סטרים שעדיין לא סיים לשלוח את האובייקטים שלו. עבור כל חבילה שנשלחת הפונקציה מחכה לקבלת ack, מעדכנת את החיבור והפריים שהמקבל קיבל את המידע וממשיכה לשליחה של עוד מידע. הפונקציה מגבילה את כמות הסטרימים שיכולים להיכנס בכל פאקטה (לפי ערך נתון) ולכן לפני כל שליחה של פאקטה מתבצעת הגרלה על איזה סטרים 'יכנס' לחבילה.
שלב ד – מדדים. בסיום השליחה הפונקציה מדפיסה את המדדים של השליח

Recv_from – אחת מהפונקציות העיקריות של הפרוטוקול. הפונקציה מקבלת את מספר הבתים המקסימלי לקבל. מחזירה את כתובת השולח ומילון של האובייקטים בפורמט: (stream_id : data).
שלב א - connection. תחילה הפונקציה בודקת אם הכתובת כבר נמצאת ברשימת החיבורים של האובייקט, אם לא היא מוסיפה אותה בתור connection חדש.
שלב ב – פענוח החבילה לפי סטרימים, עדכון השדות הרלוונטים והחזרת פאקטת ack.
שלב ג – החזרת כתובת השולח והמידע שהגיע.

Close – הפונקציה סוגרת את סוקט הUDP.

<u>חלק ג':</u> **מימוש במודל שרת ולקוח + הקלטת WireShark**

כמו שניתן לראות בקבצים המצורפים, מימשנו מודל שרת-לקוח שמשתמשים בפרוטוקול בצורה הבאה:
שלב א – הלקוח מבקש מספר אובייקטים כאשר לכל אובייקט שהוא מבקש יש מספר stream שעליו הלקוח מבקש לקבל אותו.
שלב ב – השרת מקבל את הבקשה, מעבד אותה ושולח ללקוח את האובייקטים על מספרי ה stream שהוא ביקש.
(הערה: לא הסברנו פרטים טכניים שלא רלוונטים לשימוש של הצדדים בפרוטוקול כמו איזה בדיוק פריטים הלקוח מבקש וכדומה. ניתן לראות את הכל בצורה מפורטת בקוד)

נתבונן בשני השלבים של התקשורת:

```
PS C:\Users\User\PycharmProjects\DQUIC> python .\server.py
Generating 10 objects...
Generating objects complete!
Generating DQUIC socket...
DQUIC socket is up!
Waiting for requests...
Detailed client request:
Stream:5, Object:2, Actual size: 1577269
Stream:8, Object:3, Actual size: 2057245
total objects size: 3634514
Sending objects...


------------------------------------- STATES -------------------------------------

(a)+(b)+(c): Streams info
Stream: 5, Stream size: 1991 bytes, Total bytes sent: 1577269, Pace: 4430365.38 B/s, 2224.64 Packet/s
Stream: 8, Stream size: 1139 bytes, Total bytes sent: 2057245, Pace: 2282039.34 B/s, 2003.34 Packet/s

(d)+(e): Connection info:
Received data pace: 4031655.89 Bytes/s, 2006.67 Packets/s

----------------------------------------------------------------------------------

Sending finishing msg
Socket closed
PS C:\Users\User\PycharmProjects\DQUIC>
```

הרצת השרת, קבלת בקשה מהלקוח ושליחת הקבצים.
בסיום, הדפסת מדדים.

לק"י

```
PS C:\Users\User\PycharmProjects\DQUIC> python .\client.py 2
Generating DQUIC socket...
Sending request: 5:2 8:3
Waiting for response...

Start receiving
Receiving completed!

total packets received: 1809
In stream:5, object number:2 object size:1577269
In stream:8, object number:3 object size:2057245

Socket closed
PS C:\Users\User\PycharmProjects\DQUIC>
```

הרצת הלקוח עם ארגומנט 2 (יבקש מהשרת 2 קבצים כלשהם).
שליחת הבקשה וקבלת המידע.
הדפסת מדדים.

שלב הבקשה מהשרת, ניתן לראות שגודל החבילה הוא קטן (קיים גם ACK על הבקשה).
כאמור, הWireShark לא מכיר את הפרוטוקול שלנו לכן אנחנו רואים כאילו הכל נשלח על UDP (זה באמת מה שקורה)

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	127.0.0.1	127.0.0.1	UDP	64	51426 → 9999 Len=32
2	0.000229	127.0.0.1	127.0.0.1	UDP	57	9999 → 51426 Len=25

```
▸ Frame 1: 64 bytes on wire (512 bits), 64 bytes captured (512 bits) on interface \Device\NPF_Loopback, id 0
▸ Null/Loopback
▸ Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
▸ User Datagram Protocol, Src Port: 51426, Dst Port: 9999
▾ Data (32 bytes)
    Data: 0300000000000000420000000500000000000000000000000007353a3220383a33
    [Length: 32]
```

דוגמא לשתיים מהפאקטות שנשלחה ובנוסף, פאקטת הACK שהוחזרה על ידי הלקוח (בתמונה רואים רק על הפאקטה הראשונה). ניתן לראות שגודל הפאקטות נשאר זהה וזה קורה כי הגדרנו לכל סטרים גודל קבוע (רנדומי) וכל חבילה יכולה להכיל עד 7 סטרימים, לכן במקרה הזה הגודל הוא קבוע

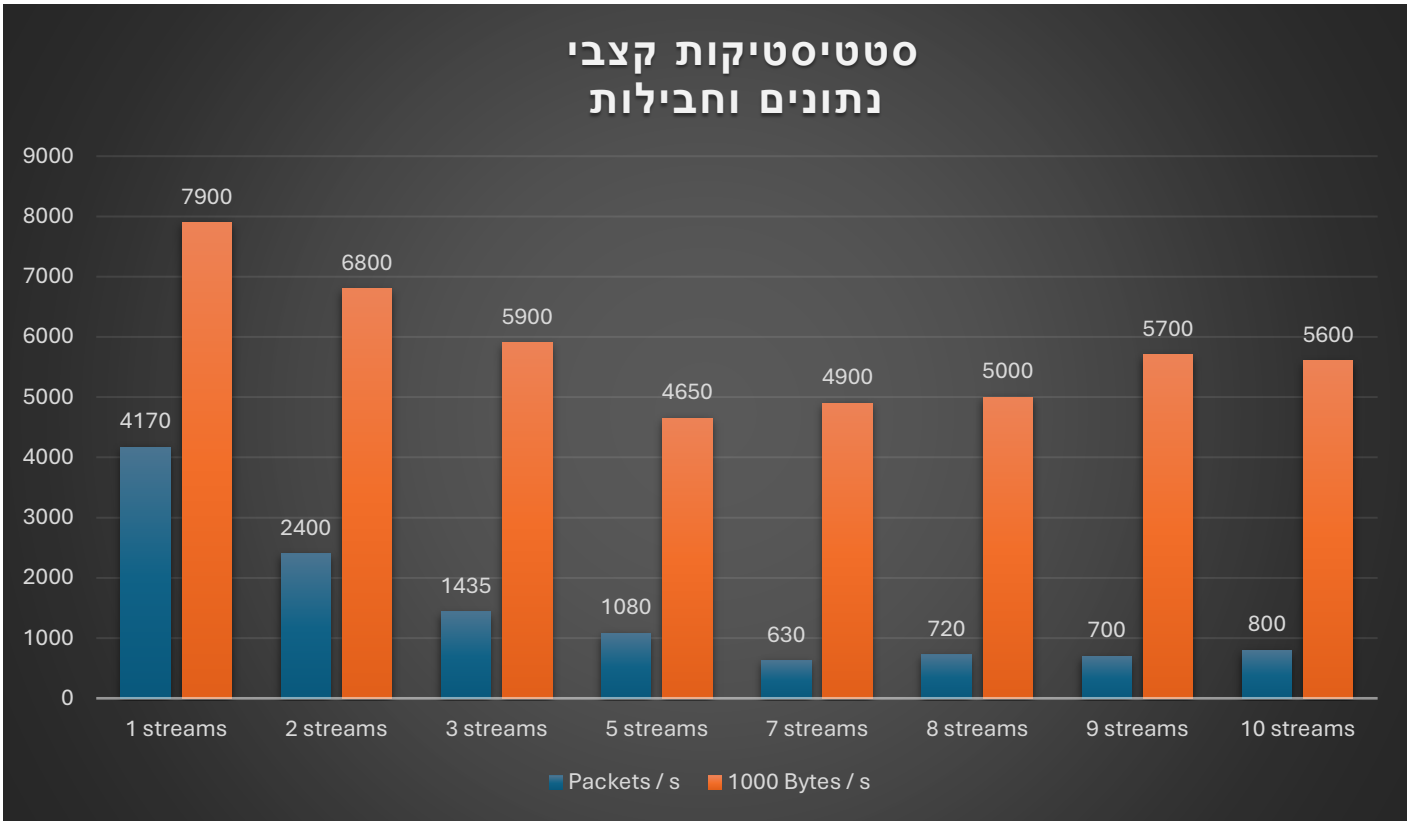
4	0.001087	127.0.0.1	127.0.0.1	UDP	77	51426 → 9999 Len=45
5	0.001223	127.0.0.1	127.0.0.1	UDP	3207	9999 → 51426 Len=3175

```
▸ Frame 3: 3207 bytes on wire (25656 bits), 3207 bytes captured (25656 bits) on interface \Device\NPF_Loopback, id 0
▸ Null/Loopback
▸ Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1, Dst: 127.0.0.1
▸ User Datagram Protocol, Src Port: 9999, Dst Port: 51426
▾ Data (3175 bytes)
    Data [truncated]: 0300000001000000050000000500000000000000000000007c76ebdbece64184352c215f02dfec93759c5c9fc12ee1a7
    [Length: 3175]
```

הערה: ניתן לראות שאכן כמות הפאקטות שנשלחה (ללא ACK'ים) זהה במספר הפאקטות בהקלטה ובמספר הפאקטות שהלקוח מדפיס.

הערה: כמובן שכל ההקלטה מצורפת לקבצי ההגשה.

לק"י



בהתאם להוראות המשימה, הגדרנו את מספר הזרמים המקסימלי בכל חבילה ל-7. לכן ניתן לראות שעד שלא עברנו את ה-7 זרמים לחבילה, ככל שמספר הזרימות יעלה כך בהתאם קצבי שליחת החבילות והבתים ירדו. זאת מכיוון שהגדלת מספר הזרמים בכל חבילה משמעותו הגדלת מספר הבתים בכל חבילה באופן ישיר וברור שיקח יותר זמן לשלוח אותה. חשוב לציין שמכיוון שהמערכת שלנו עובדת עם מנגנון s&w הדבר מקטין עוד יותר את הקצבים.
מרגע שעברנו את את ה-7 זרמים לחבילה, הקצבים יישארו אותו דבר מכיוון שהקצבים נמדדים כמובן ביחס זמן ומכיוון שבכל חבילה יש בדיוק 7 זרמים,, לכן לאורך זמן הקצב יהיה זהה. יש לציין שיכולים להיות שינויים קלים מכמה סיבות: מצב הרשת בעת הניסוי הספציפי וגודל הזרמים שנבחר באקראיות עבור על ניסוי בנפרד. לאור זאת, שינויים קלים בין הניסוים עבור יותר מ-7 זרמים הינם זניחים.

הערות:
א. קבצי pcap ותמונות נוספות של הרצת הפרוטוקול למדידת הזמנים נמצאים בgithub.
ב. לפרוייקט הצמדנו קובץ טסטים כנדרש.
ג. לפרוייקט הוספנו קובץ README מעודכן ומפורט.