

**עבודת גמר 5 יח"ל**

**נושא העבודה :** פלטפורמת BitTorrent מורחבת

**שם תלמיד :** אלון לוי

**ת.ז תלמיד :** 214814683

**שם בית ספר ועיר :** קריית החינוך ע"ש עמוס דה-שליט, רחובות

**שם המנחה :** ערן בינט

**מועד הגשה :** 20/12/2022

תוכן עניינים

[1. מבוא 3](#_Toc121815660)

[2. תיאוריה 4](#_Toc121815661)

[3. תוצר סופי 10](#_Toc121815662)

[4. תהליך כתיבת הפרויקט 20](#_Toc121815663)

[5. מרכיבי פתרון 20](#_Toc121815664)

[6. תסריטי בדיקה 21](#_Toc121815665)

[7. רפלקציה 22](#_Toc121815666)

[8. הוראות התקנה ותפעול 22](#_Toc121815667)

[9. ביבליוגרפיה 23](#_Toc121815668)

[10. נספחים 23](#_Toc121815669)

1. מבוא
   1. נושא העבודה

הפרויקט הינו תשתית רשתית P2P ידידותית למשתמש להעלאת והורדת קבצי תוכן, המושתתת על הפרוטוקול .BitTorrent התשתית תאפשר הורדה מקבילית של קובץ תוכן או מספר קבצי תוכן על פי החלקים המרכיבים אותם, בעזרת המידע שיושג מה-torrent שיטען למערכת, ותוך טיפול מלא בשגיאות אפשריות. כחלק מהפרויקט מיושם ממשק משתמש גרפי (GUI) ידידותי המציג את ההתקדמות של כל אחד מה-torrents המורדים בכל עת, ובנוסף מאפשר העלאה של קבצים אותם מעוניין המשתמש להעלות.

בנוסף, מיושם ממשק גרפי בצד ה-Admin, כחלק ממשק זה, יכול ה-Admin לראות את כמות הפניות לשרת הניהול בכל עת, לעבור על ה-database המציג את מצב המשתמשים המשתפים בקבוצות שונות ברשת הפנימית, לראות את המשתמשים החסומים וגם לראות את ה-log המציג את הפעולות העיקריות שעשה, כדוגמת חסימת משתמשים.

במסגרת התשתית המוצעת, תתאפשר הורדה של חלקי קובץ המטרה מהרשת החיצונית תוך יישום של הפרוטוקול BitTorrent, או מהרשת הפנימית תוך יישום מורחב של הפרוטוקול. במידה וחסר piece (חלק) אחד או יותר של קובץ המטרה בזמן ההורדה ברשת הפנימית, תתבצע פנייה לרשת החיצונית למציאת החלקים הרצויים תוך הסתייעות בתכנים הקיימים ב-BitTorrent, ובכך הסבירות להשגת קובץ המטרה תגדל.

* 1. מטרות מרכזיות

המטרות היישומיות של הפרויקט הן:

* יצירת תשתית עמיתים פרטית לשיתוף מידע
* מתן אפשרות להורדה מקבילית של חלקי קובץ ממספר עמיתים על מנת לנצל את מלוא רוחב הפס, ועל ידי כך - להשיג מהירות רבה יותר וניצול מקסימלי של התקשורת המקבילית.
* מתן כלי ניתוח ניהולי, ובכלל אלו סטטיסטיקות איכותיות ומדויקות לשרת הניהול (Tracker), העוקבות אחר כמות ההודעות שהשרת מקבל ממשתמשים בכל זמן קצוב, וגם סטטיסטיקות העוקבות אחר המשתמשים הנמצאים בכל קבוצה (Swarm), כחלק ממעקב זה יתאפשר לדעת האם משתמש שיתף חלקים או לא בפרק זמן מסוים, ל-admin תינתן גישה מלאה לכלים אלו ודרכו יוצגו גרפים העוקבים אחר המתרחש, ותתבצע מחיקה אוטומטית של משתמשים אשר לא שיתפו בקבוצה מסוימת.
* התאמת פתרון מיטבי לדרישות דינמיות של המשתמש, כולל טיפול בשגיאות תקשורת, וניצול מלא של תקשורת מקבילית במערכת, על מנת שתתאפשר הורדת חלקים והעלאתם ללא השהייה.

המטרות האישיות של העבודה הן:

* למידת פרוטוקול BitTorrent לכל רוחבו על מנת שאוכל ליישם את רוב הדברים הכתובים בו וגם להוסיף תכונות חדשות משלי באופן שלא יתנגשו עם המפרט הקיים.
* הרחבת הידע הנרכש בכיתה י"א בתחום תקשורת.
* מיצוי מלא של היכולות שלי כתלמיד במגמת סייבר, כך שהתשתית תעבוד מול תרחישים שאינם אידיאליים ובלתי צפויים.
* עמידה בלוח הזמנים כפי שנקבע עם המנחה.
* הרחבת הידע בכלים, בספריות ובשפות התכנות שנלמדו ולמידתם של אלו שלא נלמדו, באמצעות למידה עצמית.
  1. רציונל

המוטיבציה שלי לפיתוח הרעיון הינה ההבנה שיש צורך בשדרוג הפרוטוקול BitTorrent על ידי הוספה של תכונות חדשות שיקלו על המשתמש להשיג את הקובץ אותו הוא דורש באופן פשוט ונוח. הבנתי גם שיש צורך גדול במיוחד במערכת שתאגד את כל השחקנים וההגדרות בפרוטוקול BitTorrent תחת תשתית אחת, ובנוסף תגדיר משתמש חדש מסוג מנהל (admin). תשתית כזו לא קיימת כיום, ופתרון זה ימצה את המיטב של כל אחד מההיבטים המוגדרים בפרוטוקול.

מטרה נוספת שלי היא שיפורו של שרת הניהול, המוגדר בפרוטוקול BitTorrent כך שיוכל לטפל בעצמו בשגיאות וגם יעביר תכונות מעקב ודיווח (שהוגדרו כשלו) למשתמש מסוג admin, על מנת להוריד מן העומס על שרת זה ולאפשר פעילות שרת רציפה.

בנוסף, רציתי לממש את הנלמד בכיתה י"א בנושא התקשורת ולהרחיב את הידע שלי ב-python, C++, ו- SQL.

* 1. קישור לחומר הנלמד

העבודה מתקשרת לחומר הנלמד במספר תחומים שונים.

* ראשית, הנושא אותו בחרתי הוא ה-highlight של החומר הנלמד בכיתה י"א. הפרויקט נועד לממש את כל הרעיונות אותן למדנו, כאשר נעשית עבודה משמעותית עם sockets בפרוטוקולי UDP, TCP וגם HTTP. בנוסף, ימומשו גם ספריות שנלמדו בכיתה י"א כחלק מהרחבת הפרוטוקול, ובניהן matplotlib לתצוגה גרפית, SQLite למסד הנתונים ועוד.
* שנית, המערכת תוכל לאתר התקפות שונות, אשר נלמדו במסגרת כיתה יא' ולטפל בהן, לדוגמה: משתמש מציף רכיבים במערכת בהודעות שלא כצורך, או מנסה להעלות קובץ שגוי. בפרויקט יעשה גם שימוש מסיבי ב-threads כחלק מהחומר הנלמד בתחום מערכת ההפעלה, כדי לאפשר מקביליות, כמוזכר.
* תחום נוסף בפרויקט הוא תחום הגרפיקה. בפרויקט איישם את הגרפיקה באמצעות הספרייה PyQt, ספרייה אותה למדנו בכיתה י"א, ביישום הגרפיקה תידרש הבנה מעמיקה של הספרייה מעבר לנלמד, כך שאמצה את המוצע בה באופן שיכסה את כל התחומים שהוגדרו בה, וביניהם סטטיסטיקות שרת הניהול אשר יוצגו בצורה גרפית אצל ה-admin, תצוגת מצב הורדת הקובץ, וכו'.

1. תיאוריה
   1. תיאוריה

הפרויקט עוסק ברובו בתחום התקשורת, כחלק מהמערכת ייושמו:

1. קובץ .torrent - קובץ מסוג Metadata, קובץ זה מספק את האינפורמציה הדרושה להורדת קובץ המטרה השלם, את קובץ זה משיג המשתמש משרתי מידע הנמצאים באינטרנט. המערכת חייבת לתמוך בקובץ זה על מנת שתתאפשר הורדת קובץ התוכן בידי משתמש המערכת, שכן קובץ זה מספק את המידע הנחוץ להורדה, בתוכו:

* כתובות שרתי הניהול (trackers) וסוגם (UDP/HTTP/WebTorrent) בנוסף ל-PORTS שלהם.
* גודל קובץ / קבצי התוכן, ושמם
* שם תיקיית הקובץ / קבצי התוכן
* גודל piece, לא כולל ה-piece האחרון
* רשימת ה-hashes של ה-pieces לצורך וידואם לאחר הורדה

מבנה הקובץ .torrent:

* Announce — the URL of the tracker
* Info — this maps to a dictionary whose keys are dependent on whether one or more files are being shared:
  + Files — a list of dictionaries each corresponding to a file (only when multiple files are being shared). Each dictionary has the following keys:
    - length—size of the file in bytes.
    - path—a list of strings corresponding to subdirectory names, the last of which is the actual file name
  + length — size of the file in bytes (only when one file is being shared though)
  + name — suggested filename where the file is to be saved (if one file)/suggested directory name where the files are to be saved (if multiple files)
  + piece length — number of bytes per piece. This is commonly 28KiB = 256 KiB = 262,144 B.
  + pieces — a hash list, i.e., a concatenation of each piece's SHA-1 hash. As SHA-1 returns a 160-bit hash, pieces will be a string whose length is a multiple of 20 bytes. If the torrent contains multiple files, the pieces are formed by concatenating the files in the order they appear in the filesdictionary (i.e., all pieces in the torrent are the full piece length except for the last piece, which may be shorter).

מאת: <https://en.wikipedia.org/wiki/Torrent_file>

1. קבצי תוכן – קובץ המטרה אותו המשתמש רוצה להשיג. כל קובץ תוכן בנוי מ-**pieces** בעלי גודל קבוע כמצוין בקובץ .torrent, פרט ל-piece האחרון שגודלו אינו קבוע. כל piece בנוי מ-**blocks**, על מנת להשיג את הקובץ המיוחל, העמית יבקש מהעמיתים השונים blocks עד שיהיו ברשותו מספיק blocks ל-piece, הוא עושה זאת עבור כל חלק וחלק עד שנבנה קובץ התוכן השלם.
2. עמית (Peer) – עמית הוא חלק מ-swarm (קבוצה), עמית יכול להיות במספר קבוצות בו זמנית, זאת בהתאם למספר שרתי הניהול (Trackers) אליהם פנה. כל עמית משתף חלקי קובץ עם עמית אחר, ובכך יכול להרכיב קובץ תוכן שלם. עמית משתף pieces וגם משיג אותם מהעמיתים האחרים בקבוצה או בקבוצות בהן נמצא, בהתאם ל-pieces אותם צריך. במידה ועמית סיים להוריד piece, הוא יעדכן את כל המשתמשים ב-swarm שברשותו piece חדש, כך שכל העמיתים ידעו על מצבו, כך כל שאר העמיתים יודעים על מצב העמיתים האחרים בכל עת.
3. שרת ניהול (Tracker) – שרת אשר מנהל קבוצות עמיתים שונות בהתאם לקבצי ה-.torrent שנמצאים לרשותו. שרת הניהול כמוגדר בפרוטוקול BitTorrent יכול לקבל קבצי .torrent ממשתמשים ובזאת ליצור קבוצות עמיתים חדשות.

שרת הניהול יקבל את קבצי ה-.torrent ממשתמשים ויעדכן את מסד הנתונים על ידי יצירה של table חדש כאשר שמו יהיה ה-SHA1 hash של ה-info section של קובץ ה-.torrent שהתקבל מהמשתמש, כך שכאשר שרת הניהול ירצה להוסיף משתמש חדש ל-swarm יבדוק האם קיים table בשם ה-info hash שקיבל מהמשתמש. כאשר משתמש מתחבר לשרת הניהול ומבצע את תהליך בירור העמיתים (המחוברים ל-swarm) לגבי קובץ התוכן אותו המשתמש מעוניין להוריד, שרת הניהול יוסיף את המשתמש ל-swarm, כלומר ייצור רשומה חדשה שלו ב-table המתאים במסד הנתונים, לאחר זמן מה, כאשר יזהה שרת הניהול שהמשתמש איננו משתף יותר pieces, ימחק את הרשומה שלו ממסד הנתונים, תנאי נוסף למחיקת רשומת משתמש מ-table הוא עדכון מצד המשתמש בכך שסיים להוריד את קובץ המטרה.

שרת הניהול יודע מי מחובר לקבוצה, והוא מנטר את המתרחש בכל ה-swarms עליהם אמון.

1. Swarm – קבוצה אשר נוצרת על ידי שרת הניהול, התנאים להיווצרותה של קבוצה זו הם העלאה של קובץ בידי משתמש המערכת לשרת הניהול או היוועדות של שרת הניהול בכך שמשתמש מערכת סיים להוריד קובץ גלובלי אשר ניתן על ידו (בסיום הורדה של קובץ גלובלי משרת הניהול המשתמש יעדכן את שרת הניהול כשסיים להוריד קובץ זה).

swarm נוצר במסד הנתונים המשותף לשרת הניהול ול-admin כטבלה במסד, הרשומות בטבלה זו הם ה-IP והשעה בה נוספה הרשומה של כל עמית הנמצא ב-swarm זה. הקבוצה בנויה מהעמיתים שבה כך שנוצרת טופולוגית full mesh (כל העמיתים יודעים על מצב כל העמיתים האחרים בכל עת).

שרת ניהול יכול לנהל מספר swarms, כאשר כל swarm הוא table במסד הנתונים של שרת הניהול, וישנה הגבלה על מספר ה-swarms אותם שרת הניהול יכול לנהל, כלומר הגבלה על מספר ה-tables במסד הנתונים כדי לשמור על יציבותו.

1. Database – מסד נתונים משותף בין שרת הניהול ל-admin, הנמצא במערכת בה נמצא שרת הניהול. במסד נתונים זה מתבצע עדכון של כל המתרחש ב-swarms עליהם אחראי שרת הניהול, במסד נתונים זה נשמר המידע על כל המשתמשים הנמצאים ב-swarm בכל רגע, כך שלדוגמה במידה ומשתמש יפנה לשרת הניהול על מנת להצטרף ל-swarm מסוים, ישיג שרת הניהול את כל הרשומות של המשתמשים הנמצאים ב-swarm הנדרש, ישלח לו את ה-IP וה-PORT של משתמשים אלה, ויוסיף רשומה של המשתמש למסד הנתונים כעמית נוסף הנמצא ב-swarm.

כחלק מערכי רשומה במסד נתונים זה, נכללים ה-IP וה-PORT של העמית, והזמן בו נוספה הרשומה (לצורך ניטור והסרה במידה ולא שיתף).

1. Local info server (שרת מידע פנימי) – שרת הנמצא ברשת הפנימית, באמצעות שרת זה, משיג המשתמש את קובץ ה-.torrent אותו דורש, לשרת מידע זה מלאי של קבצי .torrent שונים שאותם מספק למשתמש בהתאם לדרישתו.

לאחר שיחפש המשתמש בממשק המשתמש שם קובץ תוכן, יבדוק שרת זה האם קיים קובץ .torrent תואם, במידה וכן, ישלח אותו אליו, והמערכת תזהה את הקובץ שהתקבל ותטען אותו אוטומטית אליה, במידה ולא, ייעשה שימוש ב-x API1337 לצורך מציאת הקובץ מהרשת החיצונית והשגתו. \***לא בטוח שייושם**

1. ממשק משתמש – GUI של יישום הלקוח בפרוטוקול הפרויקט, ממשק המשתמש הוא הדרך שבה מיישם הפרויקט את הלקוח כפי שהוגדר בפרוטוקול.
2. מנהל (admin) - הגדרה חדשה כחלק מהפרויקט שכן הפרוטוקול BitTorrent לא מגדיר אותו, עם יכולות ניהול שונות המאפשרות לו לעקוב אחר המתרחש ב-swarms אותם מנהל שרת הניהול ולחסום עמיתים מ-swarms השונים בהתאם.

לרשות ה-admin גם תצוגה גרפית של כמות הפניות לשרת הניהול בכל זמן קצוב, באמצעות שימוש בכלי זה, יזהה ה-admin את המשתמשים אשר מבצעים שליחה מופרזת של הודעות לשרת הניהול, ויחסום אותם מהתקשרות נוספת עם שרת הניהול.

* 1. מוצרים קיימים

כיום בשוק ישנו חוסר של מערכות המיישמות את כל המוגדר בפרוטוקול BitTorrent (משתמש, שרת ניהול (Tracker)) בתשתית אחת, אלא רק מערכות מפוצלות, וביניהן:

**qBitTorrent** הוא ממשק לקוח של הפרוטוקול BitTorrent שמאפשר הורדה של קבצים. הממשק מקבל קובץ torrent, שולף ממנו את המידע הנדרש (trackers, files, pieces) ומתחיל בהורדה. התוכנה מאפשרת להוריד את הקבצים בצורה מקבילית, מטפלת בשגיאות תוך הורדת הקבצים באמצעות האלגוריתם "rarest piece" שמוריד מה-piece הנדיר, זה שבבעלות הכי פחות מהעמיתים בקבוצה לנפוץ, שבבעלות מספר העמיתים הרב ביותר.

התוכנה מאפשרת למשתמש להגביל את רוחב הפס שיהיה בשימוש על ידה, וגם תומכת ב-plugins לדוגמת מנוע חיפוש של שרתים המחזיקים קבצי .torrent, וזהו הערך המוסף שלה כאשר BitTorrent כפרוטוקול כשלעצמו אינו תומך במנוע חיפוש. ממשק זה מיישם בצורה מלאה את הפרוטוקול מנקודות המבט של המשתמש והעמית בלבד, ללא יישום של שרת ניהול. כמובן, בממשק אין יישום של admin שכן זה ממשק של משתמש BitTorrent בודד.

**thepiratebay** הוא שרת הניהול (Tracker) המוכר והשמיש ביותר היום, עם 5,100,000 (!) עמיתים מחוברים בו זמנית, וניהול swarms של כ-630 אלף torrents שונים. השירות אינו קוד פתוח אך כולל סטטיסטיקות כמו רוב שרתי הניהול. ישנם שרתי ניהול (Trackers) רבים ומגוונים בשוק, כאשר רובם מיושמים בשכבות 4 ו-7 במודל ה-OSI, שרת ניהול זה מיושם בשכבה 7, תוך שימוש בפרוטוקול HTTP.

מערכות שיתוף קבצים נוספות קיימות, ובניהן המערכת **eDonkey**. לקוחות של מערכת זו נמצאים היום בשימוש קטן בהרבה מאשר אלו של BitTorrent, זאת משום שמהירות המערכת בהשוואה למערכת BitTorrent היא איטית, ולמרות זאת, במערכת שיתוף קבצים זו קיים מנוע חיפוש מובנה, אשר לא קיים ב-BitTorrent, ייחוד זה מושך משתמשים להשתמש בממשקי משתמש של מערכת שיתוף קבצים זו על פני שימוש בממשקי משתמש מושתתי BitTorrent.

המערכת שלי ייחודית במספר מובנים:

במרבית המוצרים הקיימים בשוק, כדוגמת BitTorrent, חסר מרכיב ה-admin ולכן כל דרישות הניהול נופלות על שרת הניהול (Tracker), כולל האחריות לחסום משתמשים, לעקוב אחר מצב ההורדה וההעלאה של pieces אצל כל אחד מן המשתמשים, לאור נסיבות אלה, איישם בפרוטוקול שלי גם admin, כחלק מהמערכת הסגורה, ברשת הפנימית, ואאפשר:

* לחסום משתמשים ספציפיים, בצורה ידנית.
* לנטר את מצבם של כל אחד מן העמיתים ב-swarm המשותף באמצעות תיעוד הזמן בו הם פנו לשרת הניהול, אלגוריתם לחסימת משתמשים אצל ה-admin ישתמש בנתונים אלו ו"יעיף" את המשתמשים אשר לא משתפים pieces מה-swarm בהם נמצאים.

בנוסף, אין כיום מערכת כמו זו המוצעת, שכוללת את כל הפונקציונליות של פרוטוקול BitTorrent מהעמית לשרת הניהול. אומנם קיימות מערכות שיתוף קבצים אחרות שכן מיישמות את התשתית, eDonkey היא אחת מהן, או מערכת שמרחיבה את הפרוטוקול BitTorrent לדוגמת הוספת admin לפרוטוקול, אך מעטות מאוד המערכות הכוללות ממשק משתמש ושרת ניהול, וגם הן חסרות את כל הנלווה להם, כמפורט בפרויקט זה.

ניתן לייצג את ההבדלים בטבלה:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | הפרויקט שלי | qBitTorrent | thepiratebay | Edonkey |
| הורדה והעלאה מקבילית של קבצים לפי pieces | V | V |  | V |
| GUI ידידותי למשתמש ו/או לשרת הניהול | V | V | V | V |
| יישום שרת ניהול (Tracker) כולל סטטיסטיקות | V |  | V | V |
| טיפול בשגיאות תקשורת בצד המשתמש | V | V |  | V |
| תמיכה בסוגי שרתי הניהול השונים (UDP, HTTP, WebTorrent trackers) | UDP, HTTP ONLY | V |  | V |
| יישום admin ברשת הפנימית | V |  |  |  |
| הביצועים הטובים בשוק | V | V | V |  |
| יכולת הרחבה של המערכת על ידי ממשק חיצוני | V |  |  |  |
| מנוע חיפוש קבצי .torrent מובנה במערכת | V |  |  | V |
| אפשרות להשיג את רוב קבצי התוכן ברשת (בזכות המעמד של ממשק מוכר) |  | V |  |  |

1. תוצר סופי
   1. תיאור הפרויקט

המערכת היא יישום מלא של הפרוטוקול BitTorrent עם כל הנלווה לו, היא מציעה הרחבה של הפרוטוקול באמצעות הוספת admin והוספת הודעות חדשות שלא הוגדרו בפרוטוקול כמו עדכון מצד העמית לשרת הניהול כשסיים להוריד את קובץ התוכן אותו ביקש.

המערכת מאפשרת הורדה של קבצי תוכן לפי הפרוטוקול BitTorrent, ועובדת גם ב-LAN, וגם ברשת החיצונית.

המערכת מביאה למשתמש כלים מתקדמים ומציגה בפניו מידע מפורט על ההורדה על מנת לאפשר נוחות משתמש מקסימלית, ובצד ה-admin מציגה בפניו גרפים על המתרחש בשרת הניהול.

רכיבי המערכת העיקריים:

* Info Server local (שרת מידע פנימי) – שרת באמצעותו ניתן להשיג את קובץ ה-torrent.
* Tracker (שרת הניהול) – מנהל קבוצות תקשורת כאשר תפקידו העיקרי להוסיף באופן אוטומטי משתמשים חדשים לקבוצות שונות, שרת הניהול יודע על כל המתרחש באותה הקבוצה, מי הם המשתמשים באותה הקבוצה ולאילו משתמשים יש אילו pieces, ולרשותו גם סטטיסטיקות של כמות הפניות לאותו השרת בכל שניה. כל התהליכים בשרת זה הם **אוטומטיים**. נתונים אלו מהווים הרחבה לפרוטוקול הקיים ב-BitTorrent, שכן שרת ניהול כמוגדר בפרוטוקול המקורי אינו מודע למתרחש בתוך הקבוצה, אלא רק לגבי המשתמשים הפועלים בה. תפקיד נוסף של שרת זה הוא קבלת קבצי .torrent ממשתמשים לצורך יצירת swarms חדשים דרך שימוש במסד הנתונים המשותף בינו לבין ה-admin.
* עמית (Peer או משתמש) – באמצעותו מתבצעת תקשורת עם עמיתים אחרים, כאשר תפקידו העיקרי הוא לעזור לאחרים בהתאם ליכולתו להשיג קובץ וגם לקבל עזרה מאחרים להורדת קובץ המטרה.
* admin – ה-admin יודע על כל המתרחש בכל הקבוצות בשרת הניהול באמצעות המידע אותו מספק לו שרת הניהול דרך מסד הנתונים המשותף, לרשות ה-admin יכולות חסימת משתמשים ידנית, ותפקידו הוא לוודא שהכול בקבוצה הולך כשורה, אם עמית לא ישתף עם עמיתים אחרים בקבוצה בה נמצא את החלקים שברשותו, "יעיף" אותו מהקבוצה, באופן אוטומטי.

בנוסף, לרשותו גם כלי לחסימת משתמשים אוטומטית, במידה ויישלחו לשרת הניהול יותר מדי הודעות בידי משתמש יחסום את המשתמש מהתקשרות נוספת עם שרת הניהול, את הסטטיסטיקות המאפשרות לו לבצע את זה הוא יקבל משרת הניהול (מי פנה, כמה פניות ביצע).

לרשותו גם סטטיסטיקות גרפיות של כמות הפניות אצל שרת הניהול, ו-log המאפשר לראות מה עשה ה-admin.

המערכת מיישמת Client-Server, בין משתמש שמעוניין להשיג את קובץ המידע (.torrent) לבין שרת המידע החיצוני (או הפנימי) המספק לו את אותו הקובץ (HTTP Client-Server), בין משתמש שמעוניין להצטרף ל-swarm לבין שרת הניהול שמספק לו את המידע לגבי המשתמשים בקבוצה אליה מעוניין להצטרף (UDP Client-Server), וגם בין משתמש שרוצה להעלות קובץ מידע לשרת הניהול או בין עמיתים ברשת הפנימית המשתפים חלקי קבצי תוכן בתקשורת P2P מקבילית (TCP Clients-Servers).

לאחר שמשתמש יעלה את ה-GUI , הוא יכתוב בשורת החיפוש מה ברצונו להוריד, המערכת תאתר קובץ .torrent תואם מהרשת (הפנימית או החיצונית במידה ולא נמצא בפנימית) ותטען אותו, בנוסף, המערכת תבצע פניה לשרת המידע ברשת הפנימית ותשאל אותו לגבי קיום של קובץ כזה אצלו. המערכת תבחן את קבצי ה-.torrent שהושגו ותוציא מהם את רשימת ה-trackers, תפנה אל כולם באמצעות אלגוריתם להשגת כל העמיתים מכל הקבוצות, ותתחיל בהורדה מהעמיתים השונים בהתאם ליכולתם, תוך השוואת כל piece מהחלקים שמרכיבים את הקובץ ל-hash המתאים בקובץ .torrent שנטען.

שרת הניהול (Tracker) ישמור את המידע לגבי כל משתמש והשעה בו נוסף במסד הנתונים. ה-admin ימחק כל משתמש (חוץ מאת עצמו) אשר התחבר לשרת הניהול, כלומר יסיר אותו מן הקבוצה לאחר שיזהה שמשתמש זה לא משתף חלקים עם עמיתים אחרים ב-swarm המשותף, **שרת ניהול לעולם לא יסיר admin מקבוצה**.

המערכת מאפשרת מספר פעולות:

* הורדת קובץ ממספר עמיתים כאשר כל עמית אחראי על pieces הנמצאים ברשותו והמרכיבים קובץ מטרה, ולבסוף חיבור ה-pieces לקובץ השלם בגמר ההורדה.
* הורדה מה-piece הנדיר ביותר לאלו שפחות כדי לאפשר הורדה רציפה.
* הורדת מספר קבצים בצורה מקבילית.
* הצגת מצב ההורדה בצורה אינטואיטיבית. המשתמש יראה לאורך כל תהליך ההורדה את ה-trackers המחוברים, ה-peers הזמינים ואת מצב ההורדה.
* העלאת קבצי .torrent ישירות ל-tracker וחסימת משתמשים במידה ונשלח קובץ שאיננו תקין.

המערכת תאפשר הפקת סטטיסטיקות בשרת ניהול (tracker) – תצוגה איכותית של מספר ההודעות והבקשות המתקבלות בכל שניה בצד ה-admin לפי מידע זה, אפשרות לראות את המשתמשים החסומים, וגם אפשרות לחסום באופן ידני משתמשים לפי הצורך דרך חלון הסטטיסטיקות.

כאשר לא ימצאו pieces במערך הצמתים הפנימי, תתבצע פנייה למשתמשים ברשת החיצונית שברשותם חלקים נדרשים של הקובץ ובכך יתאפשר להשיג את אותם ה-pieces, כמובן, תוך שימוש בפרוטוקול BitTorrent.

* 1. אלגוריתמים עיקריים

אלגוריתמים מרכזיים במערכת:

1. מציאת סטטוס של קובץ

זהו השלב הראשון בתהליך השגת קובץ תוכן בידי משתמש. אלגוריתם זה אחראי על פענוח קובץ ה-.torrent, את קובץ זה המשתמש ישיג באמצעות:

* פנייה לשרת מידע חיצוני או פנימי עם שם הקובץ אותו רוצה להוריד
* טעינה ידנית של הקובץ

כל קובץ .torrent כתוב בקידוד "bencode" כ-dictionary של ערכים שונים כמוגדר בפרוטוקול BitTorrent, כך שעל מנת לקשר בין הנתונים השונים בקובץ זה, יש צורך בידיעת הקידוד.

בעזרת ספרייה ב-python ששמה הוא bencode.py דבר זה נעשה פשוט הרבה יותר - ולמרות זאת, קובץ ה-.torrent חסר בתוכן, כך שיש צורך גם ביישום אלגוריתם.

במידה וקיים יותר מקובץ אחד עליו מורה, לא נתון גודל כל הקבצים ביחד, אלא רק באופן "length: {file name}", אופן זה מקשה על הקישור בין הקבצים ל-pieces, ולכן יש צורך באלגוריתם זה, כך ניתן יהיה לעבור על כל ה-pieces ולדעת אילו pieces לרשות המשתמש.

סדר פעולות האלגוריתם:

* פתיחת קובץ ה-.torrent כפי שנטען למערכת (השגתו מפורטת לעיל)
* פענוח הקובץ בעזרת הספרייה bencode.py, הוספה למבנה נתונים dictionary
* שמירת נתונים שונים שלא יכולים להימצא בקובץ במבני הנתונים המתאימים להם במחלקת המשתמש

1. מציאת עמיתים לצורך שיתוף חלקים, כולל לצורך השלמת חלקים מהרשת החיצונית

זהו השלב השני בתהליך השגת קובץ תוכן בידי משתמש. המערכת תפנה בצד המשתמש לשרת הניהול הפנימי ותשאל אותו האם קיימת קבוצה המשתפת את ה-torrent שהושג אצלו, במידה ושרת הניהול ימצא שכן, תברר עם כל העמיתים מה הם החלקים שברשותם, תשמור אותם במחלקת המשתמש ותתקדם לשלב ההתחברות אליהם אך במידה ולא, או יתברר בתהליך בירור שלא כל ה-pieces נמצאים ברשת הפנימית, תחל המערכת בפעולות הבאות, לצורך חיבור לעמיתים ברשת החיצונית:

* תשתמש בנתוני קובץ ה-.torrent שנטען לצורך השגתם של ה-trackers עליהם מורה
* תתחבר לכל tracker בהתאם לסוגו (HTTP, UDP) ותשלח בקשה לכל tracker בקובץ להשגת משתמשים משתפי הקובץ (משתמשי הקבוצה אצל ה-tracker)
* תקבל את רשימת העמיתים מכל ה-trackers, ותשמור אותם במחלקת המשתמש, תמשיך לשלב ההתחברות אליהם

1. מציאת העמית הרלוונטי להרכבת קובץ מטרה, וקישור בין עמיתים והחלקים שברשותם

זהו השלב השלישי בתהליך השגת קובץ תוכן בידי משתמש. האלגוריתם אחראי על הקישור בין העמיתים לבין החלקים שברשותם, סדר פעולותיו:

* האלגוריתם ישלח הודעות "handshake" לכל העמיתים שנמצאו באופן מקבילי
* יקבל הודעת "bitfield" מכל עמית, בהודעה זו כתוב אילו pieces בבעלותו של העמית
* יעדכן את רשימת ה-pieces הזמינים ובידי אילו עמיתים בקבוצות של הקובץ שנטען

1. אופן התקשרות עם עמיתים כולל טיפול בשגיאות

זהו חלק מהשלב הרביעי והאחרון בתהליך השגת קובץ תוכן בידי משתמש. אלגוריתם זה מגדיר את האופן בו תתבצע ההתחברות לעמיתים שונים בידי משתמש המערכת לצורך הורדת חלקים, לכמה משתמשים יתחבר במקביליות, לאילו ובאיזה אופן. לאחר הקישור בין העמיתים לחלקים שברשותם, יחל בסדר הפעולות הבאות:

* יעבור על כל ה-pieces השונים מהנדיר לנפוץ ביותר, בלולאה
* על כל איטרציה בלולאה זו:
  + יבדוק האם התגלו שגיאות באחד או יותר מההקצאות באיטרציות הקודמות, במידה וכן יבצע את השלב הבא עבור כל piece עבורו התגלתה שגיאה, לפני שיעבור ל-piece עבורו לא הוקצתה תקשורת
  + יפתח תקשורת עם עמית רנדומלי מרשימת העמיתים שמחזיקים את ה-piece ב-thread, ימשיך לעשות זאת עד שיהיו 5 תקשורת מקביליות עם עמיתים שונים שאחראים על השגת pieces שונים
* יחכה בלולאה פנימית למקום פנוי נוסף, ימשיך בפעולות אלה עד לסיום כל תהליכי התקשורת הפתוחים.

1. תקשורת בין עמיתים לצורך השגת חלקים

זהו חלק מהשלב הרביעי והאחרון בתהליך השגת קובץ תוכן בידי משתמש. באמצעות האלגוריתם מתבצעת התקשורת המורה על רצונות משתמש המערכת מהעמית אליו התחבר, כמוגדר בפרוטוקול BitTorrent, בנוסף להורדת piece מאותו עמית. ההתחברות והצהרת כוונות לעמית נראות כך:

* התחברות משתמש המערכת לעמית באמצעות לקוח TCP בעל port רנדומלי
* שליחת הודעת "Handshake" המורה על התחלת שיחה בין עמיתים
* קבלת הודעת "Handshake" מורחבת מהעמית המחובר, שמהווה אישור להתחלת שיחה
* שליחת הודעת "interested" המורה על רצון להוריד pieces, שולח הודעה זו פעם אחת בתחילת השיחה בשלב זה בלבד
* קבלת הודעת "unchoke" מהעמית המבטאת את כך שעמית זה זמין לשיתוף של pieces
* תחילת הורדה באמצעות שליחת הודעות "request" של כל block שמרכיב את ה-piece שהוקצה להורדה, לאחר שישיג משתמש המערכת את כל ה-blocks שמרכיבים את ה-piece, יבנה את ה-piece במידה וה-hash שלו תואם לזה שנמצא בקובץ .torrent, ישמור אותו אצלו ויסיים תקשורת

במידה ומשתמש יוצא מהמערכת, אין צורך שיתנתק מהקבוצה באופן מיוחד, ה-admin ימחק את המשתמש בצורה אוטומטית לאחר שיזהה כי הפסיק לשתף pieces עם עמיתים אחרים.

1. בניית קבצים לפי החלקים שאוחדו

זהו חלק מהשלב הרביעי והאחרון בתהליך השגת קובץ תוכן בידי משתמש. האלגוריתם מאפשר בנייה של קבצים לפי ה-pieces שהורדו במידה ומרכיבים קובץ שלם אחד לפחות, כאשר יפעל ברצף, זאת אומרת שכאשר קיימים לדוגמה החלקים A, B, D, הוא לא יתחיל בבניית הקובץ עד שחלק C יורד ויאוחד במלואו, ולאחר מכן יבנה את הקובץ במידה ואכן חלקים A, B, C, D מרכיבים **לפחות קובץ אחד**, אם לא, ימשיך ברצף עד שיהיה בבעלותו מספיק חלקים מאוחדים בשביל קובץ, הוא ימשיך ברצף זה עד שיורדו כל הקבצים הדרושים, זאת משום שהחלקים מסודרים בצורה של רצפי קבצים לפי הפרוטוקול BitTorrent, כסדר החלקים, כך גם סדר הקבצים.

1. התגברות על תקלות

זהו למעשה יישום של מספר אלגוריתמים, תפקיד כל האלגוריתמים הללו הוא להתמודד עם תקלות בתחומים השונים שבפרויקט.

**בתחום התקשורת בין עמיתים:** במידה ובוצע ניסיון תקשורת בין המשתמש לעמית אחר בקבוצה, והעמית מסרב לספק את התוכן הדרוש (Timeout או הודעת choke), לדוגמה ניסיון הורדת חלק מעמית כאשר העמית שולח הודעת choke שנועדה לשם חוסר רצון לשלוח pieces (בגלל כמות רבה של עמיתים שכבר מחוברים לעמית זה) לאחר הודעת interested, יבוא אלגוריתם זה לידי ביטוי, ויבצע את הדברים הבאים:

* יסגור את thread התקשורת הנ"ל
* יבדוק האם ניתן לפתוח thread חדש שינהל את הורדת ה-piece הדרוש, כלומר האם המכסה לכמות ה-threads האחראים על הורדת חלקים במקביליות מלאה, במידה וכן יחכה למקום פנוי
* יבצע בקשת piece נוספת מעמית אחר שהצהיר בהודעת ה-"Handshake" שבבעלותו ה-piece הנ"ל

במידה והעמית אליו מחובר משתמש המערכת איננו מגיב, תבוצע בקשה חוזרת של block (הודעת request) מהעמית, במידה וגם לאחר הודעה זו לא יתקבל התוכן הנדרש, יחל בסדר הפעולות המפורט לעיל.

במידה ולאחר הורדת חלק מעמית ה-hash של ה-piece המורד איננו תואם ל-hash שבקובץ ה-.torrent, תבוצע בקשה חוזרת של כל ה-piece מהעמית, ובמידה וגם לאחר בקשה זו תהיינה אי תאימות, יחל בסדר הפעולות המפורט לעיל.

1. זיהוי התנהגות לא נאותה ברשת

אלגוריתם זה יבוא לידי ביטוי בשרת הניהול וב-admin, תפקידו הוא למנוע ממשתמשים לנסות ולפגוע ביציבות המערכת.

**האלגוריתם בשרת הניהול**: בשרת הניהול האלגוריתם בא לידי ביטוי בתחום העלאת קבצי ה-.torrent אליו בידי משתמשים. כחלק מהפרויקט תתאפשר גם העלאת קבצי .torrent לשרת הניהול לצורך יצירת קבוצה חדשה. במידה והקובץ אשר הועלה לשרת הניהול פגום, ייחסם המשתמש באופן אוטומטי מכל התקשרות נוספת עם שרת הניהול הזה, זאת על מנת למנוע ממשתמשים להרוס את שרת הניהול, חשוב לציין שתהיה גם הגבלה על מספר הקבוצות עליהם אחראי שרת הניהול, כדי לשמור על יציבות שרת זה.

**האלגוריתם ב-admin:** כאשר משתמש "מציק" לשרת הניהול, כלומר שולח לו הודעות חוזרות ונשנות שלא כצורך, יזהה האלגוריתם בעזרת סטטיסטיקות שרת הניהול את הנעשה, ויחסום באופן אוטומטי את המשתמש מכל התקשרות נוספת עם שרת הניהול. ה-admin גם עוקב אחר הנעשה בקבוצות השונות עליהן אחראי שרת הניהול, כאשר בידו גישה למסד נתונים משותף בינו לבין שרת הניהול. באמצעות נתונים ממסד נתונים זה, יודע ה admin- על מצבם של כל העמיתים בקבוצה, במידה ועמית לא ישתף pieces עם עמיתים אחרים באחת או יותר מהקבוצות תוך זמן קצוב, כלומר "ישקר" לעמיתים השונים על ה-pieces שבבעלותו, ייחסם המשתמש מהקבוצה באופן אוטומטי בידי ה-admin.

* 1. דרישות ומגבלות מערכת

למערכת מספר דרישות ומגבלות.

בהיבט הדרישות:

* המערכת חייבת להיות מהירה, וחייב להיות ניצול מלא של רוחב הפס, הורדה מקבילית כל הזמן מכל העמיתים מהם אפשר להוריד
* מסד הנתונים המשותף בין ה-admin לשרת הניהול חייב להיות פעיל תמיד, זאת על מנת שיהיה ניתן לקבל תמונה רחבה ועדכנית של המתרחש בקבוצות, וגם לוודא ניצול אופטימלי של האלגוריתם לחסימת משתמשים מקבוצה על בסיס אופן העזרה שלהם למשתמשים אחרים אצל המנהל.
* המערכת חייבת לתמוך בהורדת חלקים מן הרשת החיצונית על מנת לאפשר הורדה מלאה של קובץ ובאופן רציף.
* תמיכה בכל סוגי קבצי התוכן
* טיפול משמעתי במשתמשים בידי ה-admin, כחלק מהרחבתו של הפרוטוקול BitTorrent.

בהיבט המגבלות:

* ראשית, הפרוטוקול BitTorrent המורחב לא יעבוד ברשת החיצונית, זאת מכיוון ש-trackers ו-peers ברשת החיצונית משתמשים בפרוטוקול BitTorrent ללא ההרחבות אותן איישם, אך בתשתית יהיה ניתן גם להוריד קבצים מהרשת החיצונית ולא רק ב-LAN על ידי מעבר פשוט לפרוטוקול BitTorrent.
* בנוסף, ההגבלה העיקרית היא שבפרויקט שלי לא תהיה תמיכה בכל סוגי ה-trackers, בשל הכמות העצומה של trackers בעלי סוגים שונים, מגבלה זו מונעת מהמערכת לפנות ל-trackers מסוימים שכן לכל סוג tracker נוסח פנייה אחר, אך אתמוך בעיקריים שביניהם – UDP, HTTP, וה-tracker אותו איישם כחלק מהרשת הפנימית יהיה UDP.
* רק admin אחד יוכל להתחבר בכל עת לכל שרת ניהול, בשל כמות האפשרויות הקיימות

ב-admin, והאפשרות שיווצרו התנגשויות

* תמיכה במערכות הפעלה מסוג Windows 7, Windows 10 בלבד
* רצוי ש-admin יהיה פעיל תמיד ביחד עם שרת הניהול, כדי לאפשר שה-local torrents יהיו מעודכנים בכל עת בנוגע לעמיתים הנמצאים בקבוצה, ובכך למנוע פניה מיותרת אליהם בידי משתמש המערכת
  1. ממשקים למערכות חיצוניות

המערכת תהיה מושתתת על הפרוטוקול BitTorrent, פרוטוקול P2P לשיתוף קבצים, תפקיד הפרוטוקול הוא לסייע בהעברת קבצים בין עמיתים ברשת, גרסת הפרוטוקול: 1.0.

תיעשה התממשקות מלאה לפרוטוקול כאשר תהיה פנייה לרשת החיצונית, ברשת הפנימית ייעשה שימוש ברכיבים שהוגדרו על ידו, אך עם שינויים ותוספות.

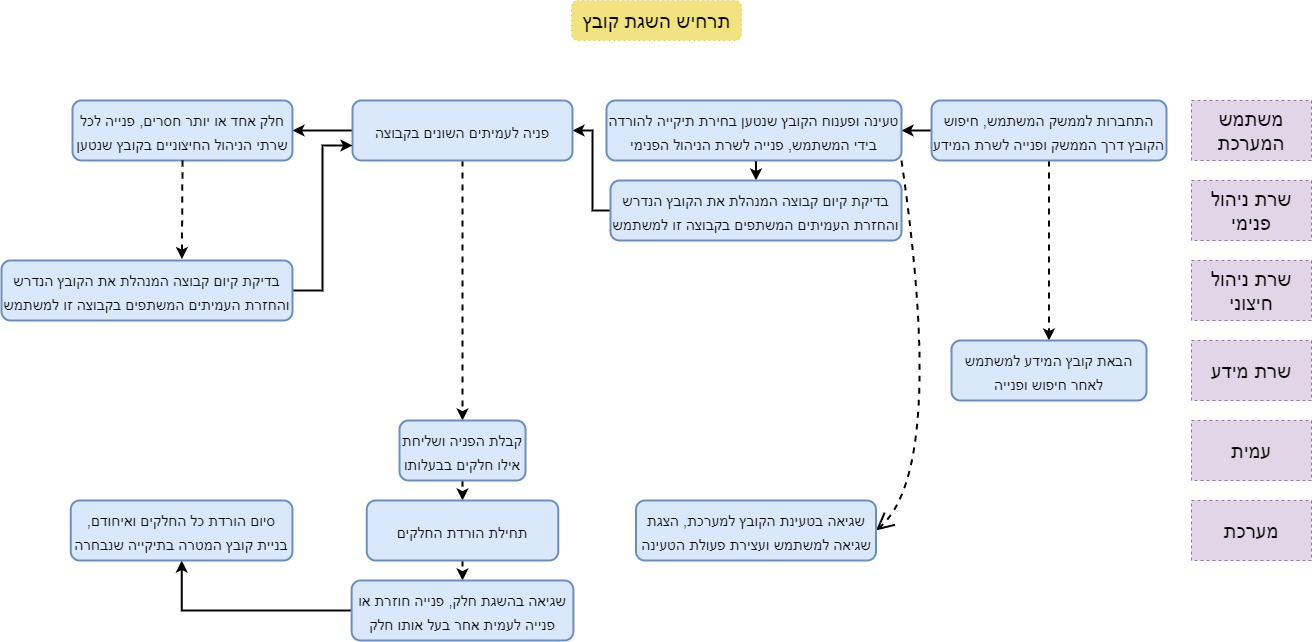
הגדרות הפרוטוקול בהם ייעשה שימוש:

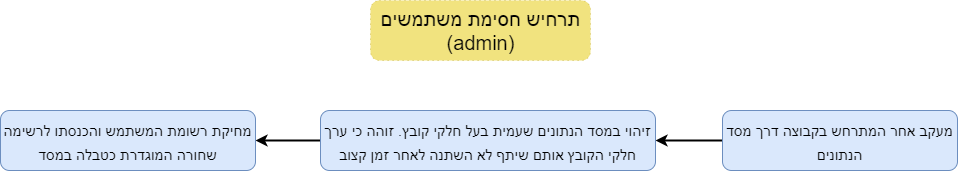
* Trackers
* Peers
* קובץ .torrent
* Peer wire protocol – אופן התקשורת בין עמיתים (אילו הודעות לשלוח, למי, מתי)
* Bencoding
* Rarest First piece downloading strategy – הורדת pieces מה-piece הנדיר, שבבעלות הכי פחות עמיתים, ל-piece הנפוץ, שבבעלות הכי הרבה עמיתים

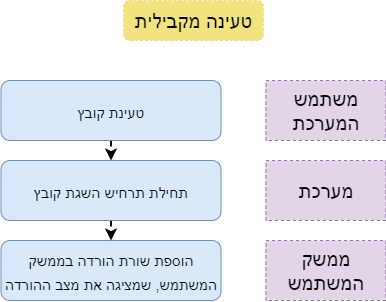
ייעשה גם שימוש ב-API של1337x לצורך חיפוש torrents כחלק מתכונת החיפוש בממשק המשתמש, במידה ולא נמצא קובץ ה-.torrent ברשת הפנימית (משרת המידע הפנימי).

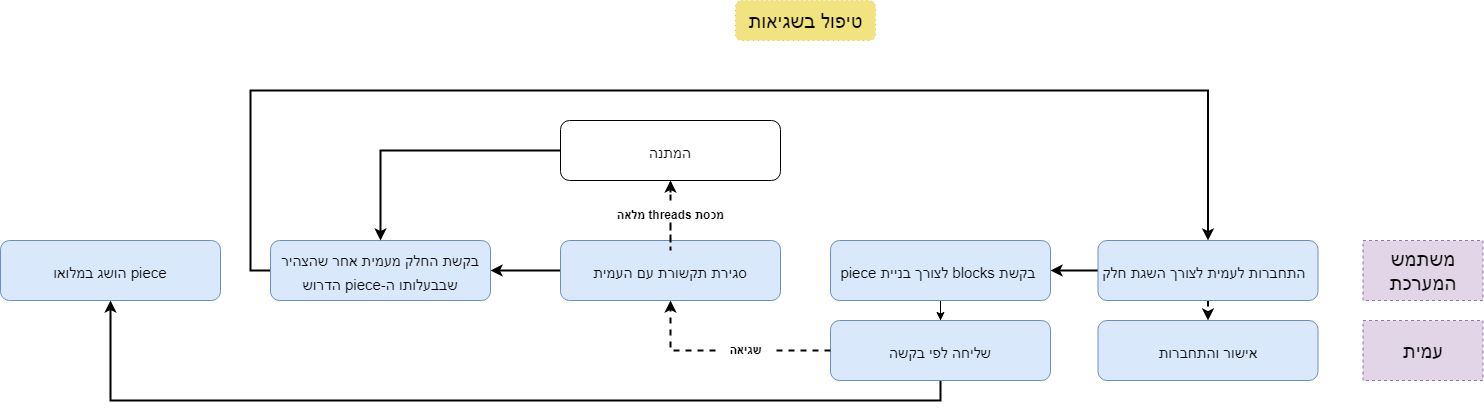
* 1. התייחסות לנושא אבטחה

בפרויקט מספר התייחסויות לנושא אבטחה:

* כניסה למערכת כ-admin תדרוש שם משתמש וסיסמה
* תיעדוף עבודה ברשת הפנימית – פנייה לרשת החיצונית רק במידה ולא נמצא torrent בשרת הניהול הפנימי, או לא כל ה-pieces נמצאים ב-swarm הפנימי
* תקשורת SSL בין מרכיבי הרשת הפנימיים
  1. ממשק משתמש
  2. תרחישים עיקריים







1. תהליך כתיבת הפרויקט
   1. תהליך הפרויקט
   2. אתגרים ואופציות שונות למימוש
2. מרכיבי פתרון
   1. תיחום הפרויקט

* תקשורת – שרת, לקוח ברמה 4 של מודל ה-OSI, וברמה 7 על מנת לבצע תקשורת בין משתמש לשרת הניהול ברמת האפליקציה
* מערכות הפעלה – שימוש נרחב ועיקרי ב-threads להשגתו ולשיתופו של המידע אצל המשתמש
* תצוגה – שימוש בספרייה PyQt לבניית ה-GUI של ה-client, וגם ב-pyqtgraph לתצוגה גרפית של admin
* אבטחה – שם משתמש וסיסמה אצל ה-admin, מסד הנתונים המשותף בינו לבין שרת הניהול בעל קוד אבטחה, SSL Sockets ברשת הפנימית
* מבנה נתונים – שימוש נרחב במערכים וב-Dictionaries כחלק מפענוח קובץ ה-.torrent, שמירת מידע על עמיתים והחלקים שברשותם אצל המשתמש, מעקב אחר ה-pieces שהורדו בצד המשתמש, ועדכון ובדיקת מידע בזמן קצוב מראש אצל שרת הניהול לגבי העמיתים המחוברים לקבוצה.
* שימוש במסד נתונים משותף בין ה-admin ושרת הניהול
* ארכיטקטורת קוד – שימוש רב במחלקות ובפונקציות, פיצול הקבצים למספר רב של קבצים על מנת לאפשר טיפול באספקטים שונים לדוגמת פיצוח ההודעה, תקשורת עם tracker, תקשורת עם עמית, העלאת קובץ .torrent ל-tracker וכו'.

1. תיעוד – תיעוד מלא של הקוד, כל פונקציה מקבלת הסבר מפורט לגבי המשתנים ומטרתם, במידה ונעשה יישום של אלגוריתם בדרך שונה, אך בחרתי בדרך אחרת מזו, אשאיר את האלגוריתם בקוד ב-region, לדוגמה יישום האלגוריתם קישור בין עמיתים והחלקים שברשותם באמצעות threads ויישום שונה בצורה אסינכרונית באמצעות הספרייה asyncio.
   1. סביבת העבודה (טכנולוגיה)

* שפות התכנות:

המערכת ברובה כתובה ב-Python: שרת, לקוח, admin, שרת ניהול, GUI

השימוש ב-threads ב-Python הוא נוח מאוד. בגלל השימוש המסיבי של threads בפרויקט בחרתי ב-Python על אף שהשפה יכולה לעיתים להיות איטית יחסית.

נעשה שימוש גם ב-SQL למסד הנתונים הפרטי של שרת הניהול (זה שלא משותף לו ול-admin).

* סביבת פיתוח:

PyCharm – לשפת python.

* 1. מבט טופולוגי
  2. מבנה נתונים
* המבנים העיקריים ותוכנם
  1. מסד נתונים
* סכמה כללית של הישויות והקשרים
  1. מבט מודולרי
  2. פירוט מודלים עיקריים

1. תסריטי בדיקה
   1. דגשים בבדיקה
   2. תסריטי בדיקה עיקריים
2. רפלקציה
   1. לוח זמנים מוערך לניהול הפרויקט:

|  |  |
| --- | --- |
| נובמבר-דצמבר | תחילת כתיבת פרוטוקול הפרויקט, כתיבה של כחצי מיישום פרוטוקול BitTorrent תוך תמיכה בכל התכונות שלו – השגת ה-peers מ-tracker, להתחבר כ-peer, לנתח קובץ .torrent, הורדת קבצים מ-peers אחרים, תמיכה בהעלאה, טיפול בשגיאות. |
| ינואר-פברואר | סיום כתיבת יישום פרוטוקול BitTorrent, תמיכה בהעלאה, הורדה, טיפול בשגיאות אפשריות, תחילת העבודה על שרת ניהול, קובץ מידע, פעולות בין משתמשים, תחילת העבודה על ממשק המשתמש. |
| מרץ-אפריל | סיום כתיבת פרוטוקול הפרויקט (למעט שרת ניהול), סיום העבודה על שרת הניהול\*, תחילת העבודה על ממשק ה-admin, המשך עבודה על ממשק המשתמש וטיפול בבאגים. |
| מאי- | סיום כתיבת ממשק המשתמש, סיום כתיבת ממשק ה-admin.  בדיקה סופית של הפרויקט עם כל האלמנטים שבו. |

* 1. אתגרים ותרומה אישית
  2. תובנות

1. הוראות התקנה ותפעול
   1. תצורה ודרישות קדם
   2. התקנה
2. ביבליוגרפיה

במהלך כתיבת הפרויקט הסתמכתי על מספר מקורות מידע:

<https://stackoverflow.com/>

<https://wiki.theory.org/BitTorrentSpecification>

<http://www.kristenwidman.com/blog/33/how-to-write-a-bittorrent-client-part-1/>

<http://www.kristenwidman.com/blog/71/how-to-write-a-bittorrent-client-part-2/>

<https://www.bittorrent.org/beps>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Torrent_file>

1. נספחים

הצעת פרויקט:

<https://docs.google.com/document/d/1txVlemm5O9JM0Otnn7YjrDLOZcpLtqPVfHg6P-BikRY/edit?usp=sharing>