**המחלקה להנדסת תוכנה**

**פרויקט גמר – תשע"ח**

שיתוף מפתחות מבוסס הסתברות עבור IOT

Probability Based Keys Sharing for IOT

**מאת**

**שרה ספרין 312548779**

**רעות נגר**

**מנחה אקדמי: דר' גיא לשם אישור: תאריך:**

**רכז הפרויקטים: דר' אסף שפנייר אישור: תאריך:**

מערכות ניהול הפרויקט:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| # | מערכת | מיקום |
| 1 | מאגר קוד | <https://github.com/reutnagar/distributed-RSA-for-IoT> |
| 2 | יומן | https://trello.com/b/DkjV5sEx/a |
| 3 | סרטון | https://drive.google.com/file/d/1yG61mZb-n9U0TWnGObKPunGcjKk5-YSS/view |
|  |  |  |

# תוכן הענינים

[תוכן הענינים 3](#_Toc507593100)

[תקציר 4](#_Toc507593101)

[מילון מונחים 4](#_Toc507593102)

תיאור מסגרת הפרויקט 4

[מבוא 4](#_Toc507593103)

[אבטחת מידע 4](#_Toc507593104)

צופן RSA 5

צופן AES 5

מכשירי IoT 6

[תיאור הבעיה 7](#_Toc507593106)

[תיאור הפתרון 6](#_Toc507593107)

[פרוטוקול "לחיצת יד" חדש עבור רשת התקני IoT 6](#_Toc507593108)

[תיאור הכלים המשמשים לפתרון 8](#_Toc507593109)

[ארכיטקטורת המימוש 8](#_Toc507593110)

[אתחול 9](#_Toc507593111)

[תוכנית בדיקות 10](#_Toc507593112)

[בדיקות פונקציונליות 10](#_Toc507593113)

[בדיקות מערכת 10](#_Toc507593114)

[בדיקות תאימות 10](#_Toc507593115)

[בדיקות תחזוקה (Maintainability) 10](#_Toc507593116)

[מסקנות 10](#_Toc507593117)

[סקירת עבודות דומות בספרות והשוואה 11](#_Toc507593118)

[נספחים 12](#_Toc507593119)

[א. רשימת ספרות \ ביבליוגרפיה 12](#_Toc507593120)

[ב. תרשימים וטבלאות 13](#_Toc507593121)

[ג. תכנון הפרויקט 14](#_Toc507593122)

[ד. טבלת סיכונים 14](#_Toc507593123)

# תקציר

מסמך זה מתאר את פרויקט הגמר שלנו, ומתעסק במציאת פיתרון אבטחה למכשירים קטנים בעלי חיבור אלחוטי לרשת.

# מילון מונחים

* מכשיר IoT: מכשיר עם יכולות חישוב קטנות, בעל יכולת שידור אלחוטי
* צומת: מכשיר IoT שנמצא ברשת
* מאסטר/מנהיג: צומת שנבחר לתפקיד יצירת המפתחות והפצתם ברשת
* צופןRSA : מערכת הצפנה אסימטרית שמשתמשת במפתח ציבורי שגלוי לכולם ובמפתח פרטי, סודי.
* צופן AES: מערכת הצפנה סימטרית.

# תיאור מסגרת הפרויקט

הפרויקט שלנו הוא פרוטוקול אבטחה לרשתות קטנות של IoT . הוא ניתן לשימוש גם במערכות גדולות ע"י היררכיית מאסטרים. הפרוטוקול מורכב מ-5 שלבים שבסופם כל שני מכשירים (בהסתברות של 90%-80%) ברשת יכולים לדבר ביניהם ישירות באופן בטוח. המערכת עמידה בפני שינויים, כמו התווספות של מכשיר חדש לרשת ויציאה של מכשיר מהרשת.

בפרויקט השתמשנו ב-IoT מסוג raspberry pi ואת הקוד כתבנו בשפת פייתון. השתמשנו בספריות מתמטיות כמו numpy ו- scipy על מנת לפצח את הנוסחא המתמטית (שהיא בעיית NP קשה) של חישוב גודל הבריכה שעל המאסטר לייצר.

כמו כן השתמשנו בספריית pycrypto על מנת להצפין בRSA וב- AES.

# מבוא

## אבטחת מידע

אבטחת מידע (באנגלית: Information Security) היא ענף העוסק בהגנה של מידע ומערכות מידע מפני כל גישה למידע שאינה ע"י גורמים מאושרים, לכך עליה לספק את שלושת הבאים: סודיות, שלמות וזמינות של המערכות והמידע בהן. אבטחת מידע היא תחום מתקדם מאוד בימינו. האפשרויות הרבות שעומדות לתוקפים של מערכות ממוחשבות להזיק בתחומים כמו פרטיות, פיננסים וביטחון מניעה את האנושות להגן ככל האפשר על מערכות אלו. מושקעים משאבים רבים בעיצוב המערכות, קידוד ותחזוקה שוטפת כדי לאתר פרצות אבטחה מוקדם ככל האפשר. עם התקדמות היכולות של התוקפים נדרשות לעתים פריצות דרך מצד קהילת המפתחים ולכן אבטחת מידע זהו תחום שמושקעים בו כסף ומשאבים רבים במיוחד על מנת לחקור ולגלות דרכי הגנה חדשות ויעילות יותר להתמודדות מול התוקפים[1].

כוח יישומי חשוב באבטחת המידע היא קריפטוגרפיה. זהו ענף במתמטיקה ומדעי המחשב העוסק במחקר ופיתוח שיטות אבטחת מידע ותקשורת נתונים, ומייצר שיטות למימוש בפועל של מושגי אבטחת המידע. הגנה זו מבוצעת על ידי הצפנת המידע בעזרת פונקציית הצפנה כלשהי, ושימוש במפתח (Key) שהוא רצף תווים סודי שאינו ידוע לתוקף.  הצופן   (Cipher) הוא כתב הסתר שמתקבל על ידי הפעלת פונקציית ההצפנה על טקסט הקלט. פונקציה הצפנה אדיאלית היא כזו שבהינתן הצופן- הפלט, לא ניתן להסיק ממנו מידע על הקלט.

RSA

RSA היא מערכת [הצפנת](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%A8%D7%99%D7%A4%D7%98%D7%95%D7%92%D7%A8%D7%A4%D7%99%D7%94) [מפתח ציבורי](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%9E%D7%A4%D7%AA%D7%97_%D7%A6%D7%99%D7%91%D7%95%D7%A8%D7%99) [דטרמיניסטית](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%90%D7%9C%D7%92%D7%95%D7%A8%D7%99%D7%AA%D7%9D_%D7%93%D7%98%D7%A8%D7%9E%D7%99%D7%A0%D7%99%D7%A1%D7%98%D7%99) מעשית הראשונה שהומצאה והיא עדיין בשימוש נרחב במערכות [אבטחת מידע](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%90%D7%91%D7%98%D7%97%D7%AA_%D7%9E%D7%99%D7%93%D7%A2) מודרניות , [תקשורת מחשבים](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%AA%D7%A7%D7%A9%D7%95%D7%A8%D7%AA_%D7%9E%D7%97%D7%A9%D7%91%D7%99%D7%9D) ו[מסחר אלקטרוני](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%9E%D7%A1%D7%97%D7%A8_%D7%90%D7%9C%D7%A7%D7%98%D7%A8%D7%95%D7%A0%D7%99). ב־RSA , כבכל מערכת מפתח ציבורי, מפתח ההצפנה אינו סודי והוא שונה ממפתח הפענוח שנשמר בסוד, על כן היא נקראת אסימטרי. האסימטריה ב־RSA נובעת מהקושי המעשי שב[פירוק לגורמים](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A4%D7%99%D7%A8%D7%95%D7%A7_%D7%9C%D7%92%D7%95%D7%A8%D7%9E%D7%99%D7%9D_%D7%A9%D7%9C_%D7%9E%D7%A1%D7%A4%D7%A8_%D7%A9%D7%9C%D7%9D) של מספר פריק שהוא כפולה של שני [ראשוניים](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%9E%D7%A1%D7%A4%D7%A8_%D7%A8%D7%90%D7%A9%D7%95%D7%A0%D7%99) גדולים, שהיא [בעיה פתוחה](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%91%D7%A2%D7%99%D7%94_%D7%A4%D7%AA%D7%95%D7%97%D7%94_%D7%91%D7%9E%D7%AA%D7%9E%D7%98%D7%99%D7%A7%D7%94) ב[תורת המספרים](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%AA%D7%95%D7%A8%D7%AA_%D7%94%D7%9E%D7%A1%D7%A4%D7%A8%D7%99%D7%9D).

השימוש: השולח משתמש במפתח ההצפנה הציבורי של הנמען כדי להצפין עבורו מסר כך שרק הנמען מסוגל לפענחו באמצעות המפתח הפרטי המתאים שברשותו.

אלגוריתם RSA נחשב איטי יחסית ועל כן אינו מתאים להצפנה ישירה של מידע בכמות גדולה. לכן, RSA משמש לשיתוף והעברה של מפתח [סימטרי](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%A6%D7%A4%D7%A0%D7%94_%D7%A1%D7%99%D7%9E%D7%98%D7%A8%D7%99%D7%AA) סודי אשר בתורו משמש להצפנה מהירה של המידע עם אלגוריתם [סימטרי](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A6%D7%95%D7%A4%D7%9F_%D7%A1%D7%99%D7%9E%D7%98%D7%A8%D7%99) כמו [AE](https://he.wikipedia.org/wiki/AES)S.

גודל מפתח ההצפנה ב-RSA של 2048 ביט מקביל ברמת האבטחה לגודל מפתח של 128 ביט ב-AES. [2]

AES

AES (באנגלית: Advanced Encryption Standard) הוא [צופן בלוקים](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A6%D7%95%D7%A4%D7%9F_%D7%91%D7%9C%D7%95%D7%A7%D7%99%D7%9D) [סימטרי](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%A6%D7%A4%D7%A0%D7%94_%D7%A1%D7%99%D7%9E%D7%98%D7%A8%D7%99%D7%AA) שאומץ על ידי [המכון הלאומי לתקנים וטכנולוגיה](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%9E%D7%9B%D7%95%D7%9F_%D7%94%D7%9C%D7%90%D7%95%D7%9E%D7%99_%D7%9C%D7%AA%D7%A7%D7%A0%D7%99%D7%9D_%D7%95%D7%98%D7%9B%D7%A0%D7%95%D7%9C%D7%95%D7%92%D7%99%D7%94) (NIST) של [ארצות הברית](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%90%D7%A8%D7%A6%D7%95%D7%AA_%D7%94%D7%91%D7%A8%D7%99%D7%AA) [כתקן](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%AA%D7%A7%D7%9F) [הצפנה](https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%A6%D7%A4%D7%A0%D7%94) רשמי שהתקבל בעולם כולו, להצפנת נתונים מאסיבית. אלגוריתם AES נמצא בשימוש מעשי נרחב בכל העולם הן בתוכנה והן בחומרה וידוע כאלגוריתם בטוח. [3]

## מכשירי IoT

בעולם הטכנולוגי כיום קיימת מגמה מואצת להפוך כל מכשיר המכיל שבב אלקטרוני לבעל יכולת חיבור לרשת. כבר כיום ניתן לראות מכשירים מכל הסוגים שקיימת בהם אפשרות חיבור לאינטרנט. לדוגמה: מצלמות, מדפסות, שלטי מזגן ועוד. החזון לחבר כל מכשיר חשמלי לרשת נובע מן הרצון שמכשירים כאלו ישדרו למכשירים ומערכות סביבם את המידע שבידם, ויקבלו מידע מן הרשת לגבי אירועים ותרחישים שונים. הודעות אלו ישדרגו את יכולותיהם ופעילותם והם יוכלו להתנהג בצורה יותר "חכמה", להסיק מסקנות ולפעול אוטומטית על פיהם ללא התערבות אנושית. לדוגמה, כאשר השבב של מערכת החלונות המותקנת ב"בית חכם" קולט שידור ממערכת המיזוג על הפעלת המזגן, הוא יודע לסגור את החלונות המתאימים באופן אוטומטי כדי לייעל את פעולת המיזוג.

מגמה זאת נקראת:"אינטרנט של דברים" (IoT- Internet Of Things). זוהי רשת של חפצים פיזיים, או "דברים" המשובצים באלקטרוניקה, תוכנה וחיישנים המאפשרים תקשורת מתקדמת בין החפצים ויכולות איסוף והחלפת מידע. רשת זו צפויה להוביל לאוטומציה בתחומים רבים. כיום ישנה התפתחות נרחבת בתחום ה IoT, למשל "הבית החכם", שבו כל המכשירים מחוברים לרשת וניתן להפעיל אותם בשלט רחוק ולתאם בין פעולותיהם. תחום הIoT צפוי לגלגל מחזור של כ20 ביליון דולר בשנת 2020, על פי הודעת חברת 'סיסקו' העולמית, ומושקעים בו משאבים רבים לפיתוח מצד החברות בתחום החומרה והתוכנה.

לקראת השינוי הזה יידרש שיפור גם ברמות האבטחה המקובלות כיום בקרב מכשירים כאלו, שעצם חיבורם לרשת חושף אותם להתקפות חיצוניות והם עלולים להוות טרף קל לתוקף. בפרויקט זה נתמקד בחקירת פתרונות אבטחה, בפרט בשימוש בהצפנת RSA, עבור תחום ה"אינטרנט של הדברים" ויצירת פתרונות אבטחה ייעודיים עבורו המתחשבים בחוזקות והחולשות של המוצרים הקיימים בשוק[4].

# תיאור הבעיה

בהבנה של הצורך הבסיסי באבטחה ראויה למידע המשתמש והכרה במגבלות המשאבים של מכשירים אלקטרוניים קטנים, ניתן להבחין במספר בעיות ביישום אבטחה במכשירי IoT:

* מכיון שמכשירי הIoT הינם מכשירים זולים וקטנים לרוב, ומאופיינים ביכולות עיבוד חלשות, ומשאבים נוספים דלים כמו: זיכרון, שידור וחישה, לכן להטמיע בהם יכולות אבטחה מתקדמות כמו שקיימות במערכות מחשבים גדולות זוהי משימה קשה וכמעט לא נתמכת מבחינת החומרה של ה IoT.
* מכיוון שהשימוש ב IoT הוא כמכשירים שיש להם בדרך כלל תפקיד עיקרי ייעודי והחיבור לרשת רק מוסיף להם יתרון, הם לא נתפסו עד היום בציבור כבעלי ענין עבור תוקפים. אך עם השימוש הגובר בהם מיום ליום נוצלו פרצות האבטחה שבמכשירים מסוג זה לתקיפת מערכות רגישות, כמו מצלמות אבטחה, מדפסות ועוד. לכן נדרש פיתרון שיספק אבטחה הולמת כנגד נסיונות פריצה אפשריים.
* פתרונות האבטחה שכן מיושמים כיום בתחום ה IoT הים ייעודיים עבור מכשיר מסוג מסוים, ומוטמעים על ידי היצרן. לא נלקחת בחשבון התאמה לשוק המוצרים הכולל של IoT, ולכן פתרונות אלו אינם מתאימים מבחינת תצורה, מגבלות משאבים וייעוד, עבור כל התחום.

על מנת לפתור את הבעיות הנ"ל נדרש פיתוח אבטחתי חדש שיענה על דרישות האבטחה הגבוהות בשוק, יחד עם המגבלות המאפיינות את מכשירי הIoT.

# תיאור הפתרון

הפתרון שאנו מציגות הוא שיתוף מפתחות בין ההתקנים ברשת באופן הסתברותי, הנעשה רק ע"י המכשירים ברשת. מפתחות אלו ישמשו להצפנת התקשורת בין המכשירים.

## פרוטוקול "לחיצת יד" חדש עבור רשת התקני IoT

על ידי מערכת חדשה לניהול מפתחות המבוססת על שיתוף מפתחות הסתברותי בין ההתקנים.

להל"ן הפרוטוקול:

1. צור קבוצה של התקני IoT  עם תקשורת ביניהם והגדר מנהיג לקבוצה (נדרש התקן בעל כח מסוים על מנת לייצר כמות מפתחות נדרשת).
2. המנהיג מייצר מאגר מפתחות. המנהיג צריך לקבוע מה יהיה גודל המאגר, P מתבסס על גודל הזיכרון הפיזי של המכשיר, ואת ההסתברות הנדרשת על ידי המערכת שנועדה להבטיח חפיפה (לפחות מפתח משותף אחד בין 2 התקני IoT ).

האלגוריתם למציאת גודל המאגר:

**M** - גודל הזיכרון הפיזי (לדוג' 32M).

**n** - מספר התקני ה-IoT ברשת.

**n’** - גודל ה'שכונה' של צומת ברשת האלחוטית. 'שכונה' זוהי קבוצת התקנים שיכולה להיות ביניהם תקשורת ישירה, כלומר שנמצאים בטווח השידור פיזי אחד של השני.

**Pc** - ההסתברות שיש לפחות שני התקני IoT בשכונה שלהם מפתח אחד משותף (לפחות) באופן ודאי.

**k** - גודל תת הקבוצה של מפתחות שיחזיק כל צומת ברשת. k מוגדר ע"י הגבול של M.

**p’** - ההסתברות שלכל שני צמתים בשכונה קיים מפתח משותף.

* חשב את c, כאשר c קבוע:

https://lh5.googleusercontent.com/oPNwTwULAVGT9zdLpXk5pTttHDa_sIZs_U-QyxZnAUCoftw336Uk6GT9pk_lrsfd-j5esOgIO6CXhcXyzGpM8aatGVezNo2ZrpgrN0tqWSpEh2pjTDc72C3IT_vH42S1395BISTb

* חשב את p: ההסתברות ששני צמתים מחוברים ישירות:



* חשב את d: הערך המצופה של הצומת:

https://lh5.googleusercontent.com/spCiRq3CDPin_W1-VfwLs7urZYRMAPEJaIDiduLsjHN7VTEAZ7CkXGX0MExFbsL74QZ74K5rt47J9hrtaYNc-pxNTmoy3QEAOk7lZw7cx12KbCZD3V0_gVaFDVwx6_qpx8CjWgo6

* חשב את p' :

d ניתן מהשלב הראשון ו- n' נתון, מספר הצמתים בשכונה של הצומת:



* בהתחשב בערך של p', השתמש במשוואה הבאה כדי לחלץ את הערך של P:



מ-p' , כעת נוכל לחשב את P ( גודל המאגר)[5].

בהינתן גודל המאגר, P, כמו שחושב באלגוריתם המוצג בשלב 3, המנהיג צריך לייצר מאגר של מפתחות בגודל P ,לכל מפתח במאגר יוסף מספר סידורי (index).

1. המנהיג שולח לכל חבר ברשת תת קבוצה שונה של מפתחות בצורה מוצפנת.
2. כל זוג צמתים ברשת מוצאים את המפתחות המשותפים להם.
3. כאשר צומת רוצה לתקשר עם צומת אחר התקשורת תהיה מוצפנת עם המפתח המשותף.

הפתרון שלנו מאפשר להימנע מניהול האבטחה באמצעים חיצוניים לרשת, ממומש כולו ע"י ההתקנים הנמצאים ברשת, ומספק אבטחה טובה מספיק עבור התקשורת בין המכשירים. הפתרון שלנו גמיש לשינויים בטופולוגית הרשת בכך שהתקן יכול להצטרף לרשת בכל זמן נתון והמנהיג ישלח לו תת קבוצה חדשה של וכן התקן שעוזב את הרשת לא חושף את כל מפתחות ההצפנה וניתן להשתמש בכל שאר המפתחות שלא נחשפו.

## תיאור הכלים המשמשים לפתרון

בפרויקט עבדנו עם מכשירי raspberry pi, מכשיר בעל קלט, פלט אלחוטיים ויכולת עיבוד קטנה על מנת לבדוק וליישם את האלגוריתם.

הכתיבה נעשתה בשפת Python , הספריות העיקריות שהשתמשנו בהם:

* **soket** בשביל תקשורת
* **pycryptodome** בשביל ההצפנות בRSA ובAES
* **threading** בשבילmulti-threading
* **math, numpy, scipy** בשביל פתירת הנוסחאות המתמטיות שנדרשו בשביל למצוא את גודל הבריכה שעל ה"מאסטר" לייצר.

## ארכיטקטורת המימוש

הארכיטקטורה והמימוש בתוכנה זו הינם מורכבים ביותר, כי אנו כותבות תוכנה זהה עבור שני צמתים בעלי תפקיד שונה לגמרי ברשת: "מאסטר" ו"לקוח", תוך שמירה על קיום מופע אחד בלבד של "מאסטר" ברשת.

"מצבי הרשת" מוגדרים לפי שלבי האלגוריתם:

1. **אתחול ומציאת מאסטר**: חיבור המכשירים הקיימים לרשת, וקביעת מאסטר.
2. **יצירת ושליחת מפתח פומבי ע"י ה"לקוח"**: ייצור מפתח פרטי וציבורי ע"י ה"לקוח", ושליחה למאסטר.
3. **יצירת מפתחות**: המאסטר יוצר בריכת מפתחות לפי האלגוריתם.
4. **חלוקת מפתחות מוצפנים**: המאסטר שולח תת קבוצה של מפתחות לצמתים ברשת, מוצפנים במפתח הפומבי אותו יצרו ושלחו לו.
5. **רשת בטוחה**: משלב זה הצמתים יכולים לתקשר ביניהם בצורה סימטרית, מאובטחת.

### אתחול ומציאת מאסטר

כל מכשיר שנכנס לרשת דבר ראשון שואל האם קיים מאסטר ברשת ומחכה פרק זמן לתשובה, במקרה ולא קיבל תשובה (פעמיים, במקרה וקרתה תקלה ברשת) מבצע פונקציית חישוב על מנת לבדוק האם הוא יכול להיות המאסטר. במידה וכן הוא מכריז על עצמו כמאסטר, ואם לא ממשיך בחיפוש.

* **לקוח**: אם קיבל הודעה ממכשיר "אני מאסטר"- יעבור למצב "לקוח", ויפסיק בחיפוש המאסטר. מעתה יאזין רק להודעות מהמאסטר, על מנת לקבל את המפתחות ושאר התהליך עד לסיום הקמת רשת מאובטחת.
* **מאסטר**: אם מכשיר מסוגל להיות מאסטר, ולא נמצא מאסטר ברשת (ע"י שליחת שתי הודעות מסוג "יש פה מאסטר?") הוא שולח הודעת ברודקס "אני המאסטר" ומגדיר את עצמו כמאסטר. הוא מגדיר את מצב הרשת כ:"אתחול", ומאזין להודעות. אם קיבל הודעת "האם קיים פה מאסטר?" הוא שולח הודעה פרטית לאותו מכשיר "אני המאסטר". לאחר מכן הוא קובע את מצב הרשת כ:"קביעת מאסטר".

שליחת מפתח פומבי ע"י ה"לקוח"

כל מי שמוגדר כ"לקוח" מחשב מפתח RSA פרטי ופומבי, ושולח את המפתח הפומבי ל"מאסטר", על מנת שיוכל לשלוח לו את המפתחות מוצפנים.

יצירת מפתחות

ה"מאסטר" מחשב את כמות המפתחות שהוא נדרש לייצר וכן את מספר המפתחות שעליו לחלק לכל צומת עפ"י נתונים פיזיים כמו גודל זיכרון וכן עפ"י ידע מוערך מוקדם כמו מספר הצמתים ברשת, ב'שכונה' וכ"ו. עפ"י חישובים מתמטיים הוא מגיע לגודל הבריכה אותו עליו לייצר, ומייצר אותם.

כל מפתח שהמאסטר מייצר נכנס למערך ששמור אצלו.

חלוקת מפתחות

לאחר הייצור, המאסטר נדרש לחלק לכל מכשיר ברשת k מפתחות (k חושב בשלב הקודם) שהוגרלו מתוך הבריכה אותה יצר. כל מפתח שהוגרל נשלח ביחד עם האינדקס של אותו מפתח בריכה אצל המאסטר כאשר הוא מוצפן ע"י מפתח הRSA הפומבי שנשלח קודם לכן ע"י אותו מכשיר.

רשת בטוחה

כאר כל הצמתים ברשת מקבלים את המפתחות שלהם, הרשת מוכנה לתקשורת בין המכשירים בצורה סימטרית, ומאובטחת. כאשר מכשיר מעוניין לתקשר עם מכשיר אחר הוא שולח לו את האינדקסים של המפתחות שברשותו, המכשיר השני בודק חפיפה, ושולח את חזרה את אינדקס המפתח המשותף, דרכו הם יכולים לתקשר. המפתח המשותף הוא מפתח הAES לתקשורת ביניהם.

כל מכשיר חדש שנכנס לרשת , יקבל מהמאסטר קבוצה מוגרלת של מפתחות, וכך יוכל לתקשר עם מכשירים אחרים. מכשיר שמתנתק מהרשת לא מפריע לתקשורת בין הצמתים האחרים, וכן לא חושף את מפתח ההצפנה.

תיאור המערכת שמומשה

המערכת שלנו מורכבת מרשת קטנה של IoT שמחליטים על "מאסטר" באופן דינאמי.

המאסטר מחשב את גודל בריכת המפתחות שעליו לייצר, ומייצר אותם, מחשב את קבוצת תתי המפתחות שעליו לשלוח לכל מכשיר, ושולח ללקוחות כאשר הם מוצפנים במפתח RSA פומבי שנשלח ע"י ה"לקוחות" (כל אחד בנפרד).

ה"לקוחות" מייצרים מפתח RSA פומבי ופרטי, כאשר את הפומבי הם שולחים ל"מאסטר". הם מקבלים קבוצה של תתי מפתחות מוצפנים במפתח הפומבי ששלחו, ויודעים לפענח עפ"י המפתח הפרטי שיצרו.

כעת כל המכשירים (הן ה"מסטר" והן ה"לקוחות") יכולים לתקשר ביניהם באופן מוצפן, בצורה סימטרית, ע"י השוואת אינדקסי תתי המפתחות שקיבלו, ובחירת המפתח המשותף מתוך המאגר, ע"י צופן AES.

הקוד הורץ ע"י מכשירים מסוג rasbery pi.

# תוכנית בדיקות

בדיקות מקיפות של כל פונקציות המערכת ע"מ לוודא נכונות, מקרי קצה, מקרים חריגים וכו'.

## בדיקות פונקציונליות

* בדיקת הקמת רשת, בה כל הרכיבים מצליחים לתקשר אחד עם השני.
* בדיקה שברשת קיים מנהיג אחד לכולם.
* המנהיג מייצר בריכת מפתחות, בגודל הנדרש לפי האלגוריתם.
* העברת תת קבוצת המפתחות שמועברים באופן מוצפן עוברת בהצלחה.
* כל אחד מהצמתים ברשת מקבל תת קבוצה של מפתחות לפי האלגוריתם.
* כל שני צמתים ברשת חולקים לפחות מפתח אחד משותף, בהסתברות של 90%-80%
* תקשורת מוצפנת בין שני צמתים עוברת בהצלחה.

## בדיקות מערכת

* אינטגרציה בין כל אחד מהשלבים בתהליך הקמת רשת מאובטחת עוברת בהצלחה.
* הרשת יציבה והתקשורת מתבצעת ללא הפרעות.
* המערכת ממשיכה לתפקד לאחר הוספת צומת חדש לאחר הקמת הרשת והפצת המפתחות.
* הרשת ממשיכה לתפקד לאחר כיבוי של אחד הצמתים.

## בדיקות תאימות

* בדיקה שהתהליך עובד על מכשירי IoT בעלי חומרה/תוכנה שונה. כרגע בדקנו על מכשירי raspberry pi ו-pc (בעלות מערכות הפעלה שונות). לכאורה התהליך אמור לעבוד על כל התקן בעל python (ולא micro-python).

## בדיקות תחזוקה (Maintainability)

* האם ניתן לעדכן או לתקן את התכנה אחרי הוצאתה לאור.
* הקוד כתוב בצורה פשוטה, ברורה ומתועדת.

# מסקנות

במהלך הפרויקט אנו שמות דגש על מחשבה ותכנון לפני כל ביצוע בפועל. במיוחד לפני כתיבת הקוד, שם השקענו רבות בהגדרת מצבים ברשת, בצומת "לקוח" ובצומת ה"מאסטר". גילינו שהעלאת החלטות על הכתב וניסוחן מקלה על המימוש, מונעת בלבול ומאפשרת התמקדות בפתרון הבעיה.

לאחר התנסויות בכתיבת התוכנה נוכל להצביע על שתי בעיות עיקריות הקיימות כרגע במימוש שלנו:

* מבנה ההודעות. במהלך כתיבת הפרויקט הרגשנו צורך במבנה קבוע לצורת ההודעות שעוברות ברשת, שיאפשר להכניס ערכים דינאמיים, כמו שליחת מפתחות שונים, או הודעות מסוגים שונים. השתמשנו בספריית שמאפשרת לנו להעביר הודעות במבנה שהוגדר מראש.
* שינינו את ארכיטקטורת מציאת המאסטר. אופן החיפוש אחר המאסטר נעשה בצורה עקומה, שיכל לגרום לריבוי מאסטרים ברשת. כמו כן המצב של מאסטר זמני ומאסטר קבוע יכלה לגרום לשיבושים רבים במערכת, כמו ניתוק מהרשת בזמן ההחלפה, וכך ההחלפה לא עברה או לא עברה בשלמות....
* מבחינת מכשירים. ניסינו לעבוד עם כמה מכשירים, אך זה לא צלח. בהתחלה המגמה הייתה לנסות לעבוד עם מכשירים הכי זולים ופשוטים, אך מכיוון שהמכשירים האלו הכילו micro-python בלבד, לא הייתה אפשרות להתקין ספריות של הצפנה, כי המכשיר לא תמך. לאחר כמה ניסיונות כושלים, והמון עבודה, הוחלט לנסות לעבור למכשירים עם כוחות חישוב גדולים יותר, על מנת שתתאפשר הצפנה.

# סקירת עבודות דומות בספרות והשוואה

סקרנו מס' פתרונות אפשריים שהוצעו עבור אבטחה ב- IoT, אולם לכל אחד מן הפתרונות קיימים חסרונות:

* שימוש בענן

ישנו פתרון אבטחה להתקניIoT המסתמך על שימוש בענן על מנת להשיג את האבטחה הרצויה. כל התקן ברשת יתחבר לשירות בענן שיתמוך בניהול האבטחה של כל ההתקנים, ומולו יתבצעו פעולות האימות וההצפנה[6].

פתרון זה דורש ניהול של שירות בענן, וזו תקורה שדורשת משאבים נוספים, בנוסף, יהיה צורך בהגדרת ספקים אמינים לכזה שירות, ופתרון במקרה של התחזות. במחקר שלנו אנו מנסים להביא את השליטה באבטחה להיות בבלעדיות אצל רשת ההתקנים המקומית, ללא קישור לשירות חיצוני.

* שימוש בTPM:

פתרון זה מסתמך על מכשיר הTPM לביצוע פעולות קריפטוגרפיות ונתינת שירותי הצפנה למכשירים ברשת[7]. זה נראה אמנם רעיון ישים, אך החיסרון בו שדרוש מכשיר TPM כזה עבור כל רשת IoT, וזה גובה עלות נוספת. בפרויקט שלנו אנו מממשים פתרון אבטחה שמתבסס אך ורק על מכשירים הקיימים ברשת, ללא עלות נוספת.

* ארכיטקטורת IoT מאובטחת לערים חכמות המטפלת בפגיעויות במערכות IoT:

הארכיטקטורה כוללת רשתות שחורות ומערכת ניהול מרכזית (KMS) המספקות סודיות, שלמות, פרטיות והפצה מרכזית יעילה. המטרה הייתה לספק שירותי אבטחה הממתנים את הפגיעות של רשתות IoT בשכבות הקישור והרשת, במיוחד עבור נתונים קריטיים.

החסרונות של גישה זו כוללים היעדר פתרון פרטיות להגדרת מיקום המכשיר ואיתור ניתוב חדש עבור צמתים, מה שמוביל לאובדן נתונים.

* ארכיטקטורת SDN לפיתוח יישומי IoT:

ארכיטקטורת SDN אומצה על מנת לספק בסיס לפיתוח מערכת מאובטחת שמאפשרת למנהלי מערכות להציג את העולם באופן גלוי של איומים אפשריים להתקפות ברשת ה- IoT ולספק להם את הזכות לשלוט ברשת מפני האיומים.

עם זאת, אבטחה, מדרגיות ואמינות הן חלק מהחסרונות של רשתות SDN. ההפרדה בין מטוסי הבקרה והנתונים של ה- SDN גורמת לביצועים ירודים בעיבוד חבילות, אשר מובילה לבעיות משמעותיות, כגון עיכוב או אובדן של חבילות והתקפות DoS (DDoS).

* ארכיטקטורת אבטחה חדשה המבוססת על SDN עבור ה- IoT, הידועה גם בשם תחום ה- SDN באמצעות בקרי הגבול:

המחברים תיארו כיצד ניתן להשתמש ב- SDN כדי לחבר בין התקני IoT הטרוגניים, כיצד ניתן לשפר את האבטחה של כל דומיין, וכיצד ניתן לחלק את כללי האבטחה מבלי לפגוע בביטחון של כל תחום.

עם זאת, המחברים לא היו מסוגלים להתמודד עם האתגר של הבטחת תעבורה רצויה ולא רצויה והגנה על הארגון, אשר הם החסרונות העיקריים של שימוש בבקרי הגבול.

* פרוטוקול לניהול מפתחות בצורה קלה:

הפרוטוקול תלוי בהתאמות של רכיבי אבטחה שונים ב- IoT כדי להגדיר ערוצי תקשורת מאובטחים ומוגנים עבור IoT. במהלך העברת הנתונים לאורך הערוץ, הפרוטוקול מבטיח סודיות נתונים ואימות צומת מוגבל.

עם זאת, פרוטוקול האבטחה מוגבל, ואינו מפרט את ההתאמה הנדרשת בין תקורה לתקשורת לבין מספר צדדים שלישיים]8].

# נספחים

## רשימת ספרות \ ביבליוגרפיה

[1] “אבטחת מידע – ויקיפדיה.” [Online]. Available: https://he.wikipedia.org/wiki/אבטחת\_מידע. [Accessed: 19-Nov-2017].

[2] “RSA – ויקיפדיה.” [Online]. Available: https://he.wikipedia.org/wiki/RSA. [Accessed: 19-Nov-2017].

AES [3]

[4] “האינטרנט של הדברים – ויקיפדיה.” [Online]. Available: https://he.wikipedia.org/wiki/האינטרנט\_של\_הדברים. [Accessed: 19-Nov-2017].

[5] L. Eschenauer and V. D. Gligor, “A key-management scheme for distributed sensor networks,” *Proc. 9th ACM Conf. Comput. Commun. Secur.*, pp. 41–47, 2002.

[6] M. Tao, J. Zuo, Z. Liu, A. Castiglione, and F. Palmieri, “Multi-layer cloud architectural model and ontology-based security service framework for IoT-based smart homes,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 78, pp. 1040–1051, 2018.

[7] H. Hamadeh, S. Chaudhuri, and A. Tyagi, “Area, energy, and time assessment for a distributed TPM for distributed trust in IoT clusters,” *Integr. VLSI J.*, vol. 58, no. December 2016, pp. 267–273, 2017.

[8] F. A. Alaba, M. Othman, I. A. T. Hashem, and F. Alotaibi, “Internet of Things security: A survey,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 88, no. March, pp. 10–28, 2017.

## תרשימים וטבלאות

מראה רשת בעלת RSA מבוזר ב"בית חכם". בדוגמה זו המכשיר המנהיג הוא המדפסת. בידיו נמצאת רשימת המפתחות, אותה הוא יחלק לשאר המכשירים בבית באמצעות תקשורת אלחוטית.