

4XBulletin

גיליון מס' 25, מרץ 2022



מכונת האניגמה האגדית

מה בגיליון:

חדשות חובבי רדיו מהארץ והעולם.
מצברי ליתיום לחובבי הרדיו – חלק א'
תלמידים לומדים לשדר לחלל החיצון.
טכנולוגיית הרחפנים עם בקרת רדיו.
ה-Winlink לקשר חירום באוקראינה.
אלן טיורינג, מפצח סודות הנאצים.

תוכן העניינים

- 3 -	דבר העורך 1/3/2022
- 5 -	מכתבים למערכת
- 7 -	הקשר במלחמת אוקראינה 2022
- 8 -	משימת רקיע
- 11 -	כל מה שרצית לדעת על הרחפן
- 16 -	מאזני תאי ליתיום להפעלה ניידת
- 22 -	האניגמה של אלן טיורינג

משתתפים בגיליון זה:

פרופ' עלי לוין	
דניאל רוזן	4X1SK
צביקה סגל	4Z1ZV
אינגר משה	4Z1PF

בברכת 73, וקריאה נעימה! נפתלי בלבן-אברהם 4Z1RM, מו"ל ועורך הגיליון.
יעוץ מקצועי: אבנר דרורי 4X1GE, דורון טל 4X4XM, תודה לעדו רוזמן 4X6UB
על עזרתו המקצועית.

לקריאת גיליון זה וגם את קודמיו ניתן להיכנס לאתר: <https://4xbulletin.org/>
כתובת המערכת לתגובות, בקשות ומשלוח מאמרים: 4xbulletin@gmail.com
עיתון זה נכתב ונערך בהתנדבות עבור חובבי רדיו שלא למטרות רווח, יש אפשרות לפרסם
קטעים ממנו במקומות אחרים וזאת בתיאום עם המערכת. מסת"ב 978-965-765-705-8 ISBN
כתובת המערכת: "הוצאת אחוזה-חיפה", ת.ד. 3773, חיפה 3103701 פקס: 15348256064
הערה: המאמרים המופיעים בגיליון זה הם באחריות הכותבים בלבד.



דבר העורך 1/3/2022

מאת: נפתלי בלבן-אברהם, 4Z1RM

מה קורה? הרבה מאוד!

הקורונה נמצאת בדעיכה, והמלחמה באוקראינה בהסלמה. אם נשווה את המגפות שפגעו בעולם מבחינה היסטורית למלחמות שהתרחשו בו, הרי אלה וגם אלה הינם מכות שנחתו על בני האדם, וממשיכים להכות בהם גם כיום. בקורונה טיפלו די במהירות, המציאו חיסונים ותרופות אשר הפחיתו את התחלואה ואת מספר הקורבנות, אך באשר למלחמות – אין חיסון בפניהן, והן פורצות בגלל האגו של המנהיגים, שנזכרים לפתע פתאום ששטחים מסוימים שייכים להם, כי הסבא רבא שלהם רעה בהם כבשים לפני זמן רב...

אנחנו חובבי הרדיו, פיתחנו תחביב נהדר, אשר כולו מושתת על ידידות בין אדם לחברו, אף מעבר לים, וכן פיתחנו שיטות שידור המסייעות להציל בני אדם הנתונים במצוקה, שלא נצטרך...

ומה באמתחתנו החודש?

* בבתי ספר תיכוניים שונים בארץ תלמידים לומדים כיצד לבנות לוויינים, ועוקבים אחרי אותות המשודרים מהחלל. באחד מבתי הספר בהרצלייה נערך מבצע של הדרכת תלמידים כיצד לשדר מישראל לחללית שתישלח החודש, ובה האסטרונוט הישראלי השני. פרטים על כך בכתבתו של משה אינגר 4Z1PF.

* מי מאתנו לא נתקל בבעיות בשימוש במצברים? ובכן, במאה ה-21 המציאו מצברים משוכללים שלא היו כמותם בעבר, המאפשרים לבנות מכונות חשמליות ואפילו כלי טייס. חברנו דניאל רוזן 4X1SK מציג בפנינו את חלקו הראשון של מאמר העוסק בשימושים של מצברי הליתיום עבור חובבי הרדיו.

מה מתרחש ב-IARC אגודת חובבי הרדיו?

חברי האגודה קבלו שתי הודעות חשובות:

א, הבחירות לוועד האגודה תתקיימנה בעוד כחודשיים, וכמה מחברי הוועד המכהנים, כולל היו"ר, לא ימשיכו בתפקידם בוועד הבא. מצורפת המלצה לחברים להתארגן, וכל מי שחפץ להתנדב לוועד, שיעשה זאת בהקדם. מאחר והידיעה הנ"ל התפרסמה בכל אמצעי התקשורת האלקטרונית, החלו להגיע גם משובים. נודע לי שמתארגנת קבוצה חדשה לוועד. מאחר ומדובר בידעה טרייה ואין לי פרטים רבים, מי שמעוניין במידע נוסף ו/או להצטרף לקבוצה, יפנה

בבקשה במייל: 4xbulletin@gmail.com.

ב. התקבלה גם הודעתם של יורם רוטבך 4Z1YR ונמרוד שוורץ 4X1BG על סיום פעילותם בתור צוות הממסרים של האגודה. כולנו מודים להם עבור עבודתם המצוינת ועל-כך שהצמידו את חובבי הרדיו בישראל לצמרת העולמית של התקשורת האלחוטית הדיגיטלית. כדאי לציין שהחל מ-1974 קיימים בישראל ממסרים, ותמיד היו חובבים מוכשרים שפעלו בהתקנה ובטיפול בממסרים הללו. אי לכך, נקווה שיימצאו מתנדבים נוספים אשר יתחזקו את הממסרים הקיימים. אוכל רק להוסיף שהעיסוק בטכנולוגיית הממסרים הינו מעניין, מאתגר ומלמד הרבה מאוד.

הזמנה לפתיחת אתר "תחנת שרה" בקיבוץ גבת

טקס הפתיחה יתקיים ביום ראשון 6/3/2022. הבאים יפגשו לקפה ומאפה ב"מוזיאון" בגבת לקראת שעה 12:00, ולאחר פתיחה קצרה, יערך סיור ב"תחנת-שרה" ושם יוצג סיפור על המקום וכן על שיפוץ ושחזור האתר. משתתפים באירוע:

המועצה לשימור אתרים, עמותת מורשת חיל הקשר, והמועצה האזורית עמק יזרעאל. מידע נוסף:

'תחנת שרה' – הייתה תחנת שידור סודית אשר שידרה הודעות מראשי היישוב בארץ ישראל לאנשי המחלקה המדינית של הסוכנות היהודית בלונדון ופעלה בשנים 1939 - 1945. במאי 1939, לאחר שהבריטים פרסמו את 'הספר הלבן' שהגביל את העלייה היהודית לארץ, החלה תקופת 'המאבק' לסכל את המדיניות הבריטית. התחנה שידרה בהספק גבוה באותות מורס מוצפנים וזאת בכדי לעקוף את הצנזורה הבריטית. התחנה שנבנתה בקיבוץ גבת בעמק ישראל, הייתה מוסווית, ולא התגלתה בחיפושים שהבריטים ערכו.

לאחרונה שוקם אתר התחנה במוזיאון גבת.

הסיפור המלא של התחנה מופיע במאמרו של דניאל רוזן 4X1SK באתר:

https://www.amutakesher.org.il/_Uploads/dbsAttachedFiles/sara1.03.pdf

הודעה על מבחנים לקבלת רישיון אלחוטאי חובב:

משרד התקשורת יקיים בחינות לחובבי רדיו (לכל הדרגות) ביום רביעי 23/3/2022 בשעה 17:00 במרכז למדעים הרצלייה, שד' שבעת הכוכבים 2, הרצלייה. למי שמעוניין להירשם לבחינות, יש לפנות עד ה-20/3 בקישור:

https://www.gov.il/he/departments/publications/Call_for_bids/23012019

נתפלל לשלום עולמי, השאלה למי? הלוואי שבגיליון הבא נוכל להביא חדשות טובות יותר! בינתיים, פורים שמח! שלכם, העורך.



מכתבים למערכת 1/3/2022

נפתלי יקר,

מאז המעבר שלי לדיור מוגן לפני שנתיים, אירוע בו-זמני עם תחילת התחדשות עיתון החובבים תחת יוזמתך המבורכת, מתכונן אני לכתוב לך. זאת כאשר סמכות חצי-מקצועית צנועה מסתרת בעברי כאחד משלושת המייסדים של העיתון המקצועי הראשון בישראל לנושא, ה"רדיו ואלקטרוניקה" ובו מדור לחובבים בעריכתו של חברי הטוב עמי X4DK4. חלק מהמבוגרים בינינו יזכרו את העיתון אני מניח. כסגן עורך ראשי לשעבר של התקופון אני חייב להביע את פליאתי מאיכות המתכונת החדשה של "הגל" על כל היבטיה: התוכן המעניין, העריכה, הגרפיקה המעולה, מעידים על גישה מקצועית שלא הייתה בידינו כאשר הוצאנו את החוברת הראשונה בנובמבר 1957. אינני יודע אם תולדות העיתון יעניינו את הקוראים שאולי עיפו מהנוסטלגיה המופיעה לעתים על דפי "הגל". אוכל לכתוב על כך אם אתה חושב שיש ביקוש לכך.

כמה מילים על עצמי. כרבים בינינו התחלתי לבנות מקלטים בגיל 14 זמן לא רב אחרי מלחמת העולם השנייה. המקלט השלישי שבניתי כבר קלט גלים קצרים. הדרך לחובבות הייתה טבעית והפכתי למאזין HA104RS באגודת החובבים ההונגרית. עיסוקי יומם ולילה בלימודי רדיו הניב פירות עם עלייתי ארצה כנער בודד ב-1949. בגיל 18 התייצבתי באולפני הרדיו בירושלים וביקשתי עבודה. בעייתי אז הייתה שהמראה שלי הזכיר ילד בן כ-14 לכל היותר, ומהנדסי האולפנים הנחמדים הר-אש וסגל חייכו בראותם ילד, אך בחנו אותי. החיוך נעלם ובמקום הודיעו לי על תחילת עבודה בתחנת שידור "קול ירושלים" בבית וגן. אחרי כמה שנות עבודה בדואר (שהקדים את בוק בהפעלת תחנות שידור) ועבודה במקצוע בצה"ל, התחלתי לעבוד כמורה בבי"ס אורט. אחרי 10 שנות הוראה באורט עבדתי במחלקה לפיסיקה של האוניברסיטה העברית, שם נתבקשתי להשתתף בייסוד מכללה להנדסה בקמפוס גבעת רם. כך חזרתי משך כשנתיים להוראה, אך הגעגועים לעבודה תכנונית-ייצורית הובילו אותי לתעשייה האווירית בה עבדתי 15 שנים. כסיום הקריירה המקצועית שלי עבדתי באלקטרוניקה רפואית תחילה כשכיר ולאחר מכן כעצמאי. משך כל התקופה פעלתי גם כחובב בהפסקות קצרות וארוכות יותר וכעת, לאחר "שתיקה" של כ-שלושים שנים אני מקווה לחדש פעילות. ברכת 73 והמשך הצלחה: מימי (מלכיאל) יונש 2-02-2022. 4X4FL

נפתלי שלום

קראתי בעניין את הגיליון. כבוד גדול עבורי להיות מונח ליד הכתבות על פרופ' אולנדורף. אוסיף בדחילו ורחימו כי במסגרת לימודי בטכניון השתתפתי בקורס אלקטרודינמיקה למתקדמים

שהנחה הפרופסור בשנת 1979 לתואר שני ושלישי. אני אומר "הנחה" כי בקורס השתתפו שלושה או ארבעה סטודנטים אמיצים שלא פחדו להיכשל מן העומק המתמטי. היינו באים באיזשהו יום אחר הצהריים לטכניון (דגש על ה"ט"), יושבים בחדר של פרנץ, שותים תה ומדברים על מכניקה יחסותית, גלים זוחלים, חץ הזמן, מכונות הזמן, מעליות עם אנשים פלאיים ותאומים שנוסעים לחלל וכיוצא בזה Gedanken Experiments שפרנץ למד באופן אישי מאלברט איינשטיין. הוא היה סטאג'ר שלו וסיפר עליו כל מיני מעשיות הזויות. דרך אגב, אלברט גם השפיע עליו כנראה מאד בעניין היחס הראוי למיעוטים בארץ ישראל ולמה כדאי להתחלק איתם ולא למות איתם. בסוף ה"קורס" הזה נראה כמובן מגוחך שהחבר שלנו ייתן בחינה (ממילא אף אחד לא היה עובר), אז כל אחד מאיתנו הגיש לו עבודה וקיבל 95. ציון 100 הוא לא אהב לתת ואפילו לא קיווינו לקבל. אני הגשתי עבודה על הג'ורטרון – מין מכונה קוונטית דומה ללייזר שפולטת גלי מילימטרים בהספק עצום. הדפסתי את העבודה במכונת כתיבה הרמס בייבי שקיבלתי מתנה לבר מצווה שלי ושימשה אותי להגשת עבודות בטכניון עד 1981. אז כבר הגיע "מעבד תמלילים" לישראל ואפשר היה להגיש עבודות מודפסות. לצערי, אין סיכוי שאמצא אותה היום. לא ידעתי אז שהוא לימד בבסמ"ת אבל בהחלט התאים לו - לא להסתגר במגדל השן אלא להתגייס לקידום הנוער. בהחלט יוצא דופן לעומת כל מיני פרופסורים אחרים בטכניון שהיינו רואים אותם שעה בשבוע ומיד רצים חזרה לרפא"ל או לסטארטאפים שלהם. זיכרונות מאיש יקר. בברכה עלי

פרופ' עלי לוי 01-02-2022

שלום נפתלי

כול הכבוד ויישר כוח על החוברת היפה והעשירה. נהניתי לקרוא את המאמר על פרופסור אולנדרוף שהיה גם מורה שלי בטכניון. הייתה לו שיטה ייחודית של הצגת ההרצאה על הלוח, הייתה לו קופסת גירים צבעוניים, שתמיד החזיק בידו הימנית, ושהיה משתמש בהם בשלבים השונים של פיתוח נוסחאות, הוא היה פותח בצבע אחד, מוחק-כותב-מוחק-כותב ומשנה את הצבעים, של הגיר, ובסופה של ההרצאה נשאר על הלוח, מה שכתב בתחילת ההרצאה, כשהפתרון צמוד אליו באותו הצבע. הוא היה בעל נימוסים אירופיים והיה לוחץ את ידו של כול מי שפגש, בין מי שהכיר ובין מי שפנה אליו, ואני זוכר עד היום כיצד הוא היה מעביר את קופסת הגירים, מיד ימין ליד שמאל, כדי ללחוץ את היד. תוך כדי עיון בחוברת כמובן שאני גם מוצא שגיאות כתיב, דבר שקורה אצל כולם ואני לא יוצא מהכלל, שהגהה קודמת הייתה מסננת אותם ואני ממליץ על הביצוע. אני כבר מחכה לחוברת הבאה.

73 ולהתראות, אבנר דרורי 2-02-2022. 4X1GE



הקשר במלחמת אוקראינה 2022

מאת נפתלי בלבן-אברהנד 4Z1RM

כל העולם עוקב בדאגה אחרי המלחמה בין רוסיה ואוקראינה, מה יכולים לעשות חובבי הרדיו במקרה זה? לא הרבה. אגודת חובבי הרדיו בפולין ייסדה תקשורת נתונים (דוא"ל) בשיטת Winlink וזאת אם כי בינתיים נאסרה פעילות של חובבי רדיו. יש בינינו חובבי רדיו רבים שעלו מאזורי בריה"מ לשעבר ואולי הם ימצאו עניין במידע זה.

Ukraine: Poland's radio amateurs provide WinLink email links.

Members of Poland's national Amateur Radio society PZK (Polski Związek Krótkofalowców) are providing WinLink email communications links in the 1.8, 3.5 and 14 MHz bands

A post on the Polish Amateur Radio Union Facebook page reads:

Dear HAM operators, in the face of the latest threats in our region and a possibility of an incoming wave of refugees, with over 2 mln already living in Poland, we would like to remind you that we are at your disposal.

If you are a licensed amateur radio operator, you can send information by e-mail to your relatives in Poland or Emergency Services with via the Winlink system, which works on HF bands, independently of access to the local ICT infrastructure
<https://winlink.org/WinlinkExpress>.

We advise you to download the software, install it and check its operation.

Polish WinLink nodes are QRV on 160,80,20m

SR5WLK dial frequency 3595,5 kHz USB

SR3WLK dial frequency 14111 kHz USB

SP3IEW dial frequency 1865 kHz USB

If we receive information about the cut-off of the Internet in the region in danger, we will be QRV daily as SP0MASR @ 18-20 UTC on the frequencies 3770 kHz +/- QRM, 7110 kHz +/- QRM. In such a situation, please communicate in Polish or English.

We are here to serve you.

Source: PZK Facebook page

ראו גם מאמר מפורט על ה-Winlink מאת יורם רוטבך 4Z1YR
<https://4xbulletin.org/> : בגיליון פברואר 2022 של הבולטין



משימת רקיע

אינגר משה 4Z1PF

איתן מאיר סטיבה הוא איש עסקים ונדבן ישראלי, טייס קרב לשעבר. סטיבה צפוי להיות הישראלי השני בחלל, כאשר ימריא בסוף חודש מרץ 2022 בחללית הדרגון 2 יחד עם עוד שלושה תיירי חלל לטיסת חלל פרטית.

ב- 16 בנובמבר 2020, במהלך טקס מיוחד בבית הנשיא, הודיע מנכ"ל קרן רמון כי סטיבה יהיה הישראלי השני שיטוס לחלל. סטיבה יהיה תייר חלל שישלם מכספו עבור הכרטיס, אך הסכים להפוך את הטיסה לפרויקט לאומי ויבצע מספר ניסויים מדעיים מטעם גופים ישראלים. סטיבה צפוי להמריא בסוף חודש מרץ 2022 בחללית הדרגון 2 של חברת SpaceX לטיסה בת עשרה ימים כמומחה משימה יחד עם עוד שלושה תיירי חלל (מפקד, טייס ומומחה משימה נוסף) כחלק מטיסת Axiom Mission 1 אל תחנת החלל הבינלאומית.

קרן רמון ומרכז למדעים בהרצלייה נרתמו לפרויקט שמטרתו לקרב את הנוער לתחום המדעים והחלל. "משימת רקיע" עליה הכריזו מכילה אתר אינטרנט שמעודכן לעיתים קרובות ובו מידע רב על התקדמות המבצע. באתר ישנם מערכי שיעור רבים המתאימים לשכבות אוכלוסיה שונות.

כאשר סטיבה ישהה בתחנת החלל הבינלאומית, הוא יערוך ניסויים כמו גידול חומס בחלל ועוד. בתחנת החלל יופעל ציוד רדיו חובבים כך שמי ששוהה בתחנה ובידו רישיון אלחוטאי חובב יוכל לעשות בה שימוש. סטיבה עבר את מבחני משרד התקשורת ונושא רישיון דרגה ג' עם אות הקריאה 4Z9SPC. במסגרת "משימת רקיע" מתוכננת הפעלת התחנה, וכן שיחה עם תלמידים מתחנת הקרקע שבהרצלייה.

קירוב הנוער לנושאי המדע השונים היה מלווה במספר צעדים:

1. פרסום קול קורא לבתי הספר, למורים ולתלמידים להצטרף למשימה. נרשמו כ-40 בתי ספר ובסביבות 1000 תלמידים.
2. ב-21/12/2021 העברתי הרצאת הכנה למורים שמטרתה חשיפה לתקשורות שנעשו בעבר עם תחנת החלל ממצפה הכוכבים בגבעתיים וממרכז למדעים בהרצלייה. כמו כן הועברו יסודות הנושאים בתחום התקשורת בדגש על היכולות של חובבי הרדיו בנושאים האלה.
3. ב-11/1/2022 העברתי הרצאה ראשונה לתלמידים בה הוצגו עקרונות ומושגים בסיסיים של תקשורת לווינים.
4. ב-24/1/2022 נתתי הרצאת המשך בנושאים פיזיקאליים שבתחום הגלים עם דגש על גלים אלקטרו-מגנטיים.

5. ב-14/2/2022 קיימנו יום הפנינג במרכז למדעים בהרצלייה. הגיעו כ-200 תלמידים ומורים. בגלל מספר התלמידים הרב חולק האירוע לשניים. קבוצת תלמידים ראשונה הוזמנה לשעות הבוקר וקבוצה שנייה לשעות הצהריים. את היום התחלתי בהרצאה שנושאה תקשורת לוויינים ואנטנות לוויינים. בהמשך חולקו התלמידים לקבוצות. בחדרי המוסד הותקנו עמדות בהן הציגו חובבי הרדיו מיכולותיהם. הנושאים שהוצגו היו הסבר ותקשורת בזמן אמת עם הלוויין הגיאוסטציונרי, הסבר ותקשורת בתחום הת"ג, שידור וקליטת מורס, אופניים כבסיס לתחנה ניידת, ותחנה ניידת מרכב מאובזר במכשירי ת"ג תג"מ ותא"ג.

מספר לא מבוטל של חובבים התנדבו ליום מהנה זה, איני מציין את שמם מחשש שאדלג על מי מהם שלא בכוונה תחילה. לכן ברצוני להודות מעל דפים אלו לכלל הקבוצה מהמרכז למדעים בהרצלייה שהייתה פעילה, וכן לחובבים שישבו בבית ושיתפו פעולה בתקשורת עם התחנות שבמרכז.

מספר תגובות ממורים שהשתתפו באירוע זה עם תלמידיהם:

- שרון ומתנדבי קהילת חובבי הרדיו, היה פשוט נפלא. התלמידים למדו, הסתקרנו, שמחו שיש כריכים וסיכות [= תודה על הארגון, היה יפה ואיכותי ותודה על ההזדמנות לקחת משהו קטן ברגע היסטורי.
 - יפה מאוד הרווחתם כל הכבוד !! !
 - א ל י פ ו ת - של יום מדוגם מעניין שילוב התלמידים בשידורים הוסיף המון הנאה ועניין תודה רבה רבה לכולכם, שרון
 - תודה רבה לשרון האלופה על היום הגדוש והמרתק, וגם על הכיבוד הנהדר.
 - תודה רבה על הכל ולכל האנשים שקיבלו אותנו
 - ההרצאה והפעילויות היו מעניינות מאוד
 - תודה רבה על יום מעניין ומאורגן למופת!
- (שרון המוזכרת בפוסטים היא שרון משאל מנהלת תחום לוויינים וחלל ממרכז המדעים בהרצליה)

מספר קישורים להרחבה:

1. הרצאת מבוא למורים <https://youtu.be/G9OIk3qsj38>
2. הרצאה ראשונה לתלמידים <https://youtu.be/IkdOxgo3x3o>
3. הרצאה שנייה לתלמידים <https://youtu.be/-NEs5jpK2kI>
4. סרטון מההפנינג <https://www.youtube.com/watch?v=F1smx-YBcGI>
5. איתן סטיבה מברך את חובבי הרדיו והנוער <https://youtu.be/pjuliaK9BRk>





כל מה שרצית לדעת על הרחפן

העזי, שאל וסיכם – צביקה סגל 4Z1ZV

מהו רחפן ?

המושג רחפן מתייחס לכלי טייס קטן נשלט מרחוק. קיימים כמה סוגים של רחפנים הנבדלים בעיקר במשקל בהמראה, סוג המטע"ד (מטען יעודי), טווח טיסה, עמידות, יציבות, מהירות ועוד.

שימושי הרחפן

בתלות במטע"ד משמשים הרחפנים בין היתר לצילומי אוויר, מיפוי ומידול שטחים, בחקלאות, בדיקות תקינות לגשרים, תרנים, טורבינות, משלוחי מטענים, חיפוש והצלה, שימושים צבאיים, ולא עלינו לטרור ועוד.

בעבר שימוש ברחפן היה נחלתם של "עשירים" בלבד בשל עלותו. זכורה לי בניתוח מבצע שלום הגליל בשנות ה-80 שחלומם של המח"טים היה לקבל כלי טיס כזה כאמצעי תצפית טקטי מעבר לאופק, ואחד המשתתפים בצוות המומחים דבר על כך שבקרוב ניתן יהיה לקבל רחפנים בעלות של פחות מ-100,000 דולר.

כיום הרחפנים הפשוטים זמינים בעלות של מאות שקלים וכל נער שוחר מדע יכול לרכוש ולהרכיב רחפן מאוסף רכיבים שניתן לרכוש "בעלי הזריז" תוך שימוש בתוכנות פתוחות שיש להם יכולות שליטה מרשימות.

המאמר מתמקד ברחפנים זעירים מסוג רב להב (מתחת ל-1.5 ק"ג), בעיקר ברחפני החברה הסינית DJI השולטת מזה שנים באופן כמעט בלעדי בשוק הרחפנים הקטנים ומתמחה בעיקר באפליקציית צלום מרחפן.

כחובבי רדיו נתעניין בין היתר על האפשרות להשתמש ברחפן לצרכנו וכמובן נבין את מערכת הרדיו שלו.

איך טס הרחפן ?



לרחפן הקלאסי מסוג רב להב יש בין 3 ל-6 מנועים המניעים פרופלורים. ההפרש במהירות הפרופלורים יוצר חוסר איזון בכוח העילוי של כל פרופלור וכפועל יוצא נוצרת הטיה של הרחפן ונוצר ווקטור המורכב מכוח עילוי המחזיק/מעלה/מוריד את הרחפן בציר האנכי, וכוח ניצב בכיוון ההטיה של הרחפן הגורם לו להתקדם בכיוון ההטיה.

ליצירת סבוב של הרחפן, נשים לב כי חלק מהפרופלורים מסתובבים בכיוונים שונים, והפרש המהירות שלהם גורם לסבוב הרחפן סביב מרכזו.

טכנולוגיות

הרחפן "הביתי הקלאסי" הוא סוג של חצובה מרחפת הנושאת מצלמה איכותית המאפשרת להביא את המצלמה כמעט לכל מקום וזווית אפשריים, דברים שבעבר דרשו סוגים של פלטפורמות מנופים אורכי זרוע מתכווננת, שימוש במסוקים או במטוסים עם מערכות ייצוב אינרציאליות מתקדמות.

כיום הרחפן כולל את מגוון הטכנולוגיות, ברובן הגיעו משוק הסלולאר והרכב החשמלי, ועובדה זו מאפשרת אינטגרציה של טכנולוגיות במחיר שווה לכל נפש.

אז מה היה לנו: מנועים זעירים רבי עצמה, נטולי מברשות בזכות טכנולוגית מגנטים רבי עצמה, דרייברים ומערכות בקרה, מקורות

אנרגיה - סוללות לרוב מסוג LIPO קלות משקל עתירות קיבול וזרם אדיר יחסית לגודל, מעבדים חזקים, מקלטי GPS מדויקים, סנסורים למדידת מרחק וגובה למניעת התנגשות, מערכות אינרציאליות הכוללות ג'ירו ומדי תאוצה, מצלמות איכותיות, גימבל מדויק המשמש לייצוב המצלמה, מערכות רדיו לשליטה, בקרה, טלמטריה, העברת ווידאו ועוד. כל זה בתוך מארז קשיח, לרוב מתקפל במשקל נמוך מ-1 ק"ג ובדגמים מסוימים פחות מ-250 גרם.

ביצועים

לרוב הרחפנים הזעירים יש זמן שהיה ריאלי של 15 עד 30 דקות מאחר ולא רצוי להנחית את הרחפן של "אדי חשמל" בסוללה, מהירות טיסה בין 30 עד 70 קמ"ש, משקל בהמראה בין 250 גרם עד 1.5 ק"ג, מצלמות מעולות עם סנסורים בחלקם כ-1 אינץ' עתירי פיקסלים עם יכולות מעבר ל-4K, יכולת פנומנאלית לייצב את המצלמה גם ברוחות של 50 קמ"ש, יכולות ניווט מדויקות, חזרה אוטונומית למקום ההמראה, סנסורים להגנה, מצבי צלום חכמים ועוד ועוד.

שימושים עבור חובבי הרדיו

אני מניח שהשימוש הראשון שקופץ בראש, הוא הרמת אנטנה וורטיקאלית ל-160 מטר.. תיאורטית זה אפשרי, אך רוב הרחפנים מוגבלים לזמני טיסה ריאליים של 20-30 דקות ויש מצב שהקרינה מהאנטנה גם תשבש את מערכות הרחפן.



בשימוש מושכל, ניתן להשתמש בחוט דייג קל משקל לצורך מתיחת דיפולים בין בניינים ו/או לעגן גלגלת שתשמש להרמת האנטנה על תרנים, עמודים או עצים שהגישה אליהם קשה. זה דורש מיומנות הטסה ושחרור החוט באופן מבוקר על מנת למנוע הסתבכות שלו בפרופלורים ואבדן הרחפן.

לינק לסרטון שקבלתי - https://youtu.be/k_kzTwGRrhc

ביישומים כאלו עדיף להשתמש ברחפנים מדור הפנטום שהם גדולים יותר עם רגליות גבוהות, כושר נשיאת משקל וניתן למצוא כאלו ביד 2 בעלות נמוכה.

נתקלתי בדיוג המשתמש ברחפן באופן דומה להשליך פיתיונות במרחק של 200-300 מטר מהחוף שם ריכוז הדגים גדול בהרבה. התבקשתי על ידי ידידנו אודי 4X6ZM לצלם את האנטנה שלו על תורן של 18 מטר אשר חוותה לאורך השנים אירועים טראומטיים. בעזרת הרחפן והמצלמה האיכותית ניתן היה לראות בברור את נקודות הכשל, כך שאודי יכול היה להצטייד בנדרש לפני פירוק האנטנה שנעשה בתבונה רבה על ידי אלכסי הכל יכול, ואשר לימים גם פינק אותנו בתקרובת מזון בהפעלה המיוחדת במכתש הקטן.



בסיוור מוקדם שערכנו לאחרונה באזור מכתש רמון, הרחפן נתן לנו תמונה אווירית של השטח העומד לרשותנו, וכמובן משמש אותנו להנציה את האירועים וההפעלות.



אני דרך קבע מעלה את הסרטונים בקבוצות עולמיות לרבות שדורי DATV בלווין הקטארי, והחובבים בעולם מתרשמים שמדינת ישראל מובילה בתחום הפעלות שדה.

ערוצי הרדיו ברחפן

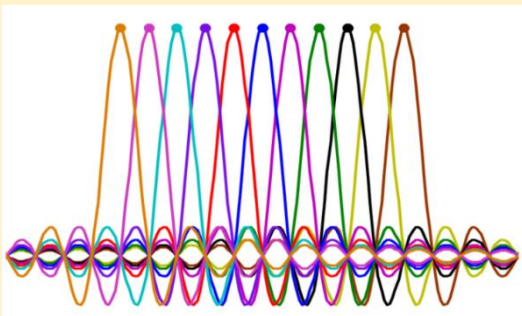
לצורך הטסת הרחפן נדרש כמובן שלט וערוץ רדיו הכולל Uplink לצורך שליטה ברחפן – בעיקר המראה, נחיתה, ניווט ושליטה במצלמה, ערוץ או ערוצי Downlink לצורך הורדת טלמטריה כמו מצב הסוללה, טמפרטורה נתוני מיקום, מהירות וכו' וכמובן ערוץ וידאו. הפרמטרים החשובים הם כמובן טווח נאות, אמינות וחסיונות להפרעות והשהיה מינימאלית – Latency, לתצוגת הווידיאו והשליטה ברחפן, על מנת לאפשר נהוג אפקטיבי של הרחפן לרבות התחמקות ממכשולים.

ברחפנים הזולים מחליף הטלפון הסלולארי את השלט, מתממשק לרחפן בעזרת ערוצי ה-WIFI. היתרון הוא כמובן בחיסכון בשלט והוזלה של הרחפן בזכות שימוש ברכיבי תקשורת זמינים. החיסרון הוא בהעדר "סטטיקים" נוחים לשליטה ברחפן ומגבלות טווח ואמינות התקשורת בעיקר בשל הסביבה רווית הפרעות בתחום ה-WIFI 2.4 גיגה הרץ המותר לשימוש בארץ.

הרחפנים של DJI הנשלטים על ידי שלט רחוק יעודי, בחלקם משתמשים בטכנולוגיית תקשורת ייחודית של DJI הנקראת OCUSYNC. הטכנולוגיה הזאת היא תוצאה של כמה שינויים טכנולוגיים מטכנולוגיה קודמת שהתבססה על רכבי חומרה מסוג FPGA אשר גם תרמו לעלות המוצר וגם לא אפשרו שדרוגי תוכנה משמעותיים.

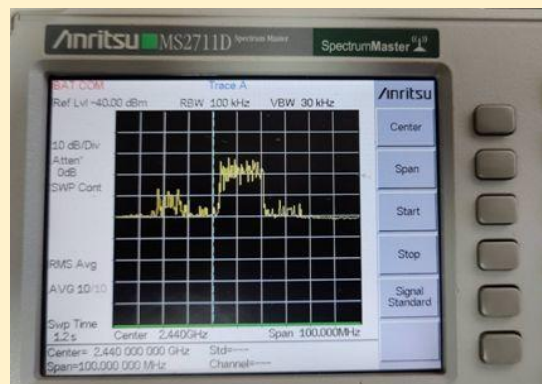
כיום טכנולוגיית ה-OCUSYNC (שכבר עברה גרסאות 1,2,3) מתבססת על רכיבי WIFI מתוכנתים, טכנולוגיית SDR כאשר רוב העיבוד נעשה בתוכנה, ומאפשר גם הוזלה משמעותית וגם יכולת שדרוג.

בבסיס המערכת עושה שימוש בתחום ה-WIFI, 2.4 ו-5.8 גיגה הרץ. האחרון אסור בשימוש בישראל, ואישור השימוש שניתן על משרד התקשורת מתבסס של תהליך רישום וזיהוי מקום ההטסה, והמערכת באופן אוטומטי מגבילה את תחום התדר והספקי השידור השונים בין ארה"ב (1 וואט) לאירופה וישראל (0.1 וואט).



טכנולוגיית השידור היא (Orthogonal OFDMA Frequency Division Multiple Access). טכנולוגיה בבסיסה דומה לטכנולוגיית ה-WIFI אשר במקום לשדר את המידע הספרתי על גל נושא יחיד בקצב מהיר, פורסת את המידע על מאות תדרים, כל אחד בקצב איטי, מה שמאפשר התמודדות טובה יותר עם הפרעות מסוג החזרות – Multipath. המושג Orthogonal מתייחס לפריסה צפופה

בספקטרום של גלי הנושא באופן שלא ידרוש מרווחי בטחון לסינון וזאת על ידי בחירה נכונה של קצב המידע כך שכל גל נושא נמצא בנקודות האפס (NULL) של גלי הנושא הסמוכים.



השגת אמינות, חסינות להפרעות וטווחים של מעל 10 ק"מ תוך שמירה על מגבלות ההספק נעשה על ידי סריקת תחום התדר, מיפוי הפרעות ובחירה דינמית של ערוץ השידור. בתלות במרחק, קצב השידור הספרתי משתנה בין 40 מגה ביט לשנייה וירד עד קרוב ל-1 בטווחים רחוקים או סביבה רווית הפרעות. בנוסף המערכת מיישמת "אריזה" נכונה של המידע וטכנולוגיית תיקון שגיאות אגרסיבית המאפשרת שחזור המידע גם כאשר חלק מהמידע משתבש, ובכך מושגים בצועים טובים בהרבה מ-WIFI תקני, תוך שימוש ברכיבי תקשורת מסחריים, זולים מבוססי SDR.

דוגמה לסרטון "סדקים" שצולם ע"י שימוש ברחפן בדרום הנגב ע"י המחבר :

https://youtu.be/3AyS_FPnI1M



מארזי תאי ליתיום להפעלה ניידת

דניאל רוזן, 4X1SK

מבוא

הפופולריות הגואה של הפעלת תחנות חובבי רדיו ניידות הביאה להגברת העניין במארזי תאי ליתיום, כמצבר קל במשקל, עתיר באנרגיה, ללא תופעת 'זיכרון', השומר על האנרגיה הטעונה בו במשך זמן ממושך כאשר איננו בשימוש (עיקר הפריקה היא זרם בבקר האלקטרוני הצמוד לתא). ליתיום היא הקלה (צפה במים) והקבית במתכות, ומאפשרת לייצר סוללות בצפיפות גבוהה של אנרגיה (פי ארבע ממצבר עופרת).

תאי ליתיום זמינים מקובלים מבוססים על תאי סוללות שניוניות המיועדות לטעינה ופריקה רבי-פעמית, המעבירות יונים של ליתיום מאלקטרודה שלילית לאלקטרודה חיובית. התאים זמינים במספר מארזים וטכנולוגיות, והשימוש הנרחב בהם הוריד את מחיריהם. בהשוואה למצברי עופרת, הם קלים יותר ולכל תא מתח גבוה יותר. בעת הזו, הטכנולוגיות המקובלות לתאי ליתיום כוללים את אלה:

- LiCoO_2 (Lithium Cobalt Oxide), המכונה LCO;
- LiNiCoO_2 (Lithium Nickel Cobalt Oxide), המכונה NCO;
- $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxides), המכונה NCA;
- LiMn_2O_4 (Lithium Manganese Oxide), המכונה LMO;
- $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide), המכונה NMC או NCM;
- LiPo (Lithium Polymer);
- LiFePO_4 (Lithium Iron Phosphate), המכונה LFP.

אחד התאים המקובלים בטכנולוגיות אלה הוא תא 18650 – תא סגור באופן הרמטי בקוטר 18.6 מ"מ ובאורך 65 מ"מ. מתח התא תלוי בטכנולוגיה המותקנת בו (מתחים נקובים מקובלים הם 2.3, 3.2, 3.6, 3.7 או 3.8 וולט). יצרנים שונים, המייצרים את התאים בטכנולוגיות שונות, טוענים לקיבולת תא הנעה בין 2.6 עד 4.4 אמפר-שעה.

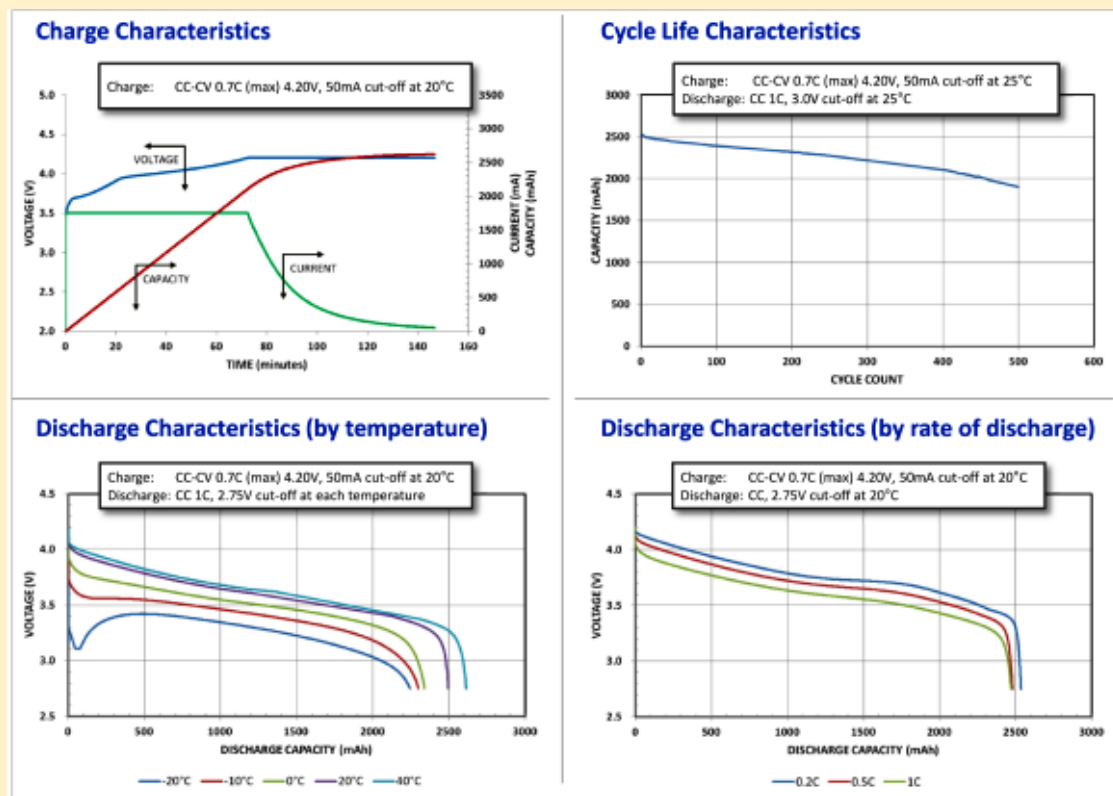


תא ליתיום 18650
בטכנולוגית NCA
תוצרת Samsung SD

טעינת תאי ליתיום נעשית בדרך כלל בשני שלבים: השלב הראשון הוא טעינה בזרם קבוע (CC – Continuous Current), ובשלב זה המטען פועל כמקור זרם (זרם מקובל הוא $0.5 \times C$ עד $1 \times C$, כאשר C היא קיבולת התא באמפר-שעה)¹; כאשר המצבר נטען ומגיע למתח ההדקים המירבי, הטעינה עוברת לשלב השני, בו המטען פועל כמקור מתח (CV – Continuous Voltage).

בפריקת תא ליתיום, המתח בהדקי התא תלוי בזרם העומס ובטמפרטורת הסביבה. מתח ההדקים יורד ככל שהתא נפרק. יש סוגי תאים בהם מתח ההדקים יחסי לקיבולת הנוותרת בתא, אך הדבר לא נכון לכל טכנולוגיות התאים. לדוגמה – בטכנולוגיה LFP (LiFePO₄), מתח איננו אינדיקציה לרמת הטעינה (SOC – State of Charge) או לעומק הפריקה (DOD – Depth of Discharge).

קיבולת התא תלויה בכמות המחזוריים שהתא עבר – תא ליתיום מוגבל בכמות מחזורי טעינה ופריקה, בהתאם לטכנולוגיה בה הוא נבנה (בדרך כלל – בין 500 ל-1,000 מחזוריים).



התנהגות תא UR18650ZY תוצרת Panasonic (בטכנולוגיית NCA)
 זרם 0.YC פירושו 0.Y×C, כאשר C הוא קיבולת התא באמפר-שעה
 מקור: Panasonic, 2012

¹ יש הנוהגים לטעון את התא בזרם נמוך ($0.1 \times C$) כדי לצמצם חשש להתחממות ולשמור על אורך חייו של התא. כך לדוגמה: תא בקיבולת 2.6 אמפר שעה ייטען בזרם של 0.26 אמפר.

הפעלה בטוחה של תאי ליתיום מחייבת הקפדה על טעינה בזרם שאינו עולה על המותר, מעבר נכון לטעינה במתח קבוע והפסקת הטעינה כאשר המצבר טעון. אין סיכון בטעינה חלקית של התא.

טעינה של תא פרוק לחלוטין איננה בטוחה, ולכן אסור לפרוק את התא למתח הדקים נמוך מרמה מוגדרת.

כדי לפקח על ההפעלה הבטוחה של תא מצמידים לו מעגל בקרה אלקטרוני (לכל תא, או לכל מארז תאים), המכונה BMS (Battery Management System). מעגל בקרה זה חייב להתאים לטכנולוגיה של מארז התאים ולאופן השימוש בו. בקרים מבוססים בדרך כלל על מדידות מתח, ותפקידם להגן על התאים מפני טעינת יתר, פריקת יתר וזרם יתר.

מסיבות בטיחות, מספר רב של רשויות תעופה אוסרות על הטסת תאי ליתיום (אם כי בדרך כלל מתירים לשאת תאי ליתיום עד קיבולת מסוימת במטען יד), ובהרבה מדינות לא ניתן לשלוח תאי ליתיום באמצעות הדואר.² לפיכך מומלץ לרכוש תאים אלה בארץ. מספר לא מבוטל של גופים מרכיבים בארץ מארזי תאי ליתיום, והמחירים יורדים בהתמדה. בעת הרכישה חשוב לדעת מהי הטכנולוגיה של התאים, ולוודא כי מעגל הבקרה מתאים לטכנולוגיה זו ומותאם לזרם הצריכה המירבי המתוכנן.

מארזי תאי ליתיום לשימוש חובבי רדיו

חובבי רדיו משתמשים בדרך כלל בציוד המיועד לפעול במתח של 13.8 וולט (דהיינו: מתח בין 11 ל-16 וולט). לצורך יצירת מקור מתח מתאים מרכיבים מארז תאים, הכולל בדרך כלל מספר טורי תאים המחוברים במקביל, בכל טור שלושה או ארבעה תאים המחוברים בטור (תצורות המכונות 3S או 4S).³ רצוי כי התאים במארז יופרדו פיזית האחד מהשני (באמצעות תבנית פלסטית מתאימה), כדי לצמצם סיכון של 'בריחה טרמית' (Thermal Runaway). לתאים מחובר בקר BMS, והתאים והבקר ארוזים יחד.

כך למשל: המארז בתמונה כולל ארבעה טורים המחוברים במקביל, בכל טור ארבעה תאים, כאשר כל תא הוא בקיבולת 2.6 אמפר-שעה, המתח הנקוב של המארז הוא 14.8 וולט, והקיבולת היא 10.4 אמפר-שעה.

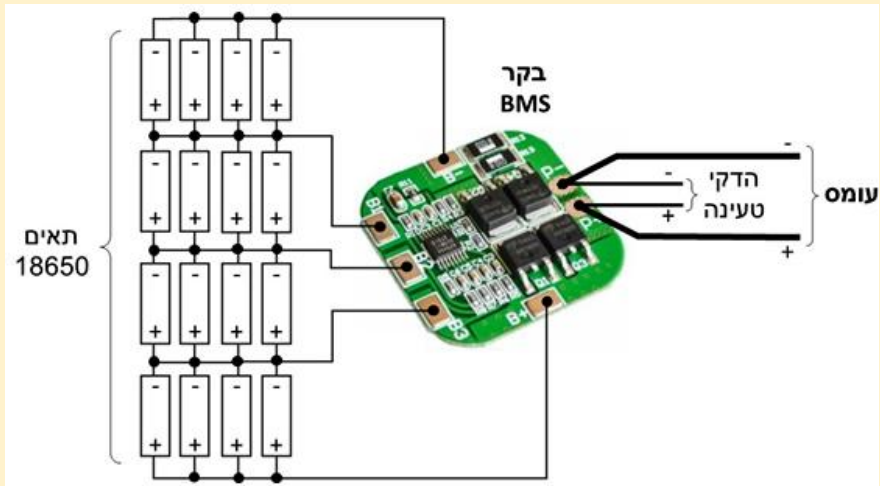


מארז תאי ליתיום 4S למתח 14.8 וולט (ארבעה תאים בטור, ארבעה טורים), עם תאי NCA תוצרת Panasonic, בקיבולת 10.4 אמפר-שעה
צילום: המחבר

² ראו: Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, United Nations, 2015, סעיף 38.3.

³ יש לוודא שמתח מארז התאים שבשימוש לא עולה על המותר, שכן מארז של 4 תאי ליתיום NCA מגיע למתח שיאי של 16.8 וולט, בעוד ציוד חובבים מוגבל למתח הזנה עד 15 או 16 וולט. ניתן להשתמש במייצב מתח ייעודי. חיבור דיודה (או שתי דיודות) בטור למארז התאים אף היא דרך מעשית להפלת מתח.

המעגל החשמלי של המארז הטיפוסי שתואר לעיל נראה כך:



מארז תאי ליתיום 4S למתח 14.8 וולט (ארבעה תאים בטור, ארבעה טורים), בקיבולת 10.4 אמפר-שעה במארז זה מותקנים הדקים נפרדים לטעינה ולחיבור העומס, המחוברים במקביל

נושא	פרמטר	ערך
מתח	מתח טעינה	16.8 וולט (CV)
זרם	צריכת זרם	פחות מ-50 מיקרו-אמפר
	זרם טעינה מירבי	10 אמפר
	זרם פריקה מירבי	10 אמפר
הגנה מפני טעינת יתר	מתח זיהוי מצב טעינת יתר	4.25 ± 0.025 וולט
	זמן השהייה בזיהוי מצב טעינת יתר	0.5 עד 1.5 שנייה
	מתח שחרור מצב טעינת יתר	4.15 ± 0.05 וולט
	מתח זיהוי מצב פריקת יתר	2.70 ± 0.08 וולט
הגנה מפני פריקת יתר	זמן השהייה בזיהוי מצב פריקת יתר	50 עד 150 מילישנייה
	מתח שחרור מצב פריקת יתר	4.15 ± 0.05 וולט
	מתח זיהוי מצב זרם יתר	0.20 ± 0.015 וולט
הגנה מפני זרם יתר	זרם זיהוי מצב זרם יתר	25 ± 5 אמפר
	זמן השהייה בזיהוי מצב זרם יתר	5 עד 15 מילישנייה
	שחרור מצב זרם יתר	ניתוק העומס
הגנה מפני קצר	זיהוי מצב קצר	קצר בהדקי העומס
	זמן השהייה בזיהוי מצב קצר	100 עד 600 מיקרו-שנייה
	שחרור מצב קצר	ניתוק הקצר
התנגדות	התנגדות מעגלי ההגנה	פחות מ-30 מיליאום
טמפרטורה	הפעלה	-40 עד +85 מעלות צלזיוס
	אחסנה	-40 עד +125 מעלות צלזיוס

מפרט אופייני של בקר BMS למארז סוללות ליתיום 4S

חובבי רדיו נוהגים להשתמש בלוחות תאים סולריים לשם טעינת מארזי תאי ליתיום בשדה. המתח והזרם של מארזים אלה אינם יציבים, ולכן אין לחברם ישירות למארז תאי הליתיום, אלא לחברם למארז הליתיום באמצעות בקר מתאים, בו כווננו הפרמטרים המתאימים לתאי הליתיום ולמארז הספציפי.

בטיחות מארז תאי ליתיום

כולנו שמענו על פניות להחזרת מוצרים (Recall) עקב בעיות בטיחות בתאי ליתיום, מחשב נייד או טלפון סלולרי שהתפוצץ, שריפה עקב טעינת מצבר לאופניים או ג'ג'לים (קורקינט) חשמליים ועוד. האם תאי ליתיום מסוכנים?

תאי ליתיום הם תאים בטוחים עם סיכוי נמוך לתקלה, בתנאי שהם במצב תקין וללא פגיעה. כאשר יש בהם פגיעה, יש סיכון לשריפה או להתפוצצות. שימוש לא נכון, אחסנה לא נכונה או טעינה לא נכונה יכולים לפגוע בתאים.⁴

נזק לתא יכול להגרם בתהליך מידי או במשך זמן, כתוצאה מאירוע פיזי, חשיפה לטמפרטורה קיצונית וטעינה לא נכונה. פגיעה בתא יכולה להתבטא בדליפת גזים, בחלקם גזים רעילים וגזים נפיצים, ובתופעה של 'בריחה טרמית' שיכולה ליצור עשן, חום, שריפה והתפוצצות. בין הסיכונים:

- פגיעה פיזית (נפילה, מעיכה, חור במעטפת);
 - טמפרטורה גבוהה (מעל 55 מעלות צלזיוס) לזמן ממושך, אש פתוחה;
 - טעינה בטמפרטורות מתחת לאפס;
 - טעינה שלא לפי הוראות היצרן.
- למען הבטיחות, חשוב לנקוט בפעולות אלה:
- לוודא כי מארז התאים, המטען והציוד הנלווה סופקו בידי ספק אמין ומורשה, עברו בדיקות בטיחות ומתאימים לשימוש המיועד; אין לבצע שינויים במארז או בציוד;
 - לוודא כי האחסנה, השימוש, הטעינה והתחזוקה הם לפי הוראות היצרן; עדיף להטעין מארז תאי ליתיום כאשר הוא בנפרד, מנותק ממכשירים;
 - כאשר מחליפים רכיב כמו מטען או תא, חשוב לוודא שמחליפים ברכיב מתאים;
 - הטענת סוללה צריכה להיות בהשגחה, ובמרחק של כשני מטר מחומרים דליקים; רצוי שבאזור הטעינה יהיה גלאי עשן; יש לנתק את מארז הליתיום מהמטען מיד עם השלמת הטעינה; אין להטעין סוללות בטמפרטורת סביבה נמוכה מ-0 מעלות;⁵
 - יש לאחסן מארזי ליתיום במקום יבש וקריר;
 - יש למנוע פגיעה מכנית במארז תאי הליתיום, ולבדקו לעיתים מזומנות לאיתור סימני נזק פיזי, כמו מעיכה, נזילה, עליה בטמפרטורה או עשן; כשמתגלית בעיה כזו יש להפסיק מיד את השימוש במארז התאים, לאחסנו לשינוע במיכל חסין אש (כמו קופסת מתכת) עם חול (לדיכוי שריפה, אם תתפרץ), ולפנותו לפי ההנחיות המקומיות (מתקני איסוף לסוללות

⁴ להרחבת הידע בנושא בטיחות תאי ליתיום, ראו:

<https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/shib011819.pdf>

⁵ טעינה בטמפרטורה נמוכה גורמת לגידול 'שלוחות' ליתיום, הגורמות לקצר.

נמצאים בחנויות, בבתי ספר, במפעלים, במוסדות ציבור ובמוסדות פרטיים שונים); חשוב שהתאים יהיו פרוקים לפני פינויים (כדי לצמצם סכנת שריפה);⁶

- ניתן לקרר תא ליתיום שהתחמם באמצעות מים, אך אין לכבות תא בוער במים, מחשש לתגובה כימית בלתי רצויה; כאשר תא מתלקח עדיף לתת לו להישרף במקום לנסות לכבותו (בתנאי שהמקום מאוורר והאש לא יכולה להתפשט); כאשר יש הכרח לכבות את האש, יש להשתמש במטף (קצף, CO₂ או אבקה) או בחול; במקרה של שריפה בחלל סגור יש לפתוח חלונות כדי לאוורר ולפנות את הגזים הרעילים.

לקריאה נוספת

<https://batteryuniversity.com>

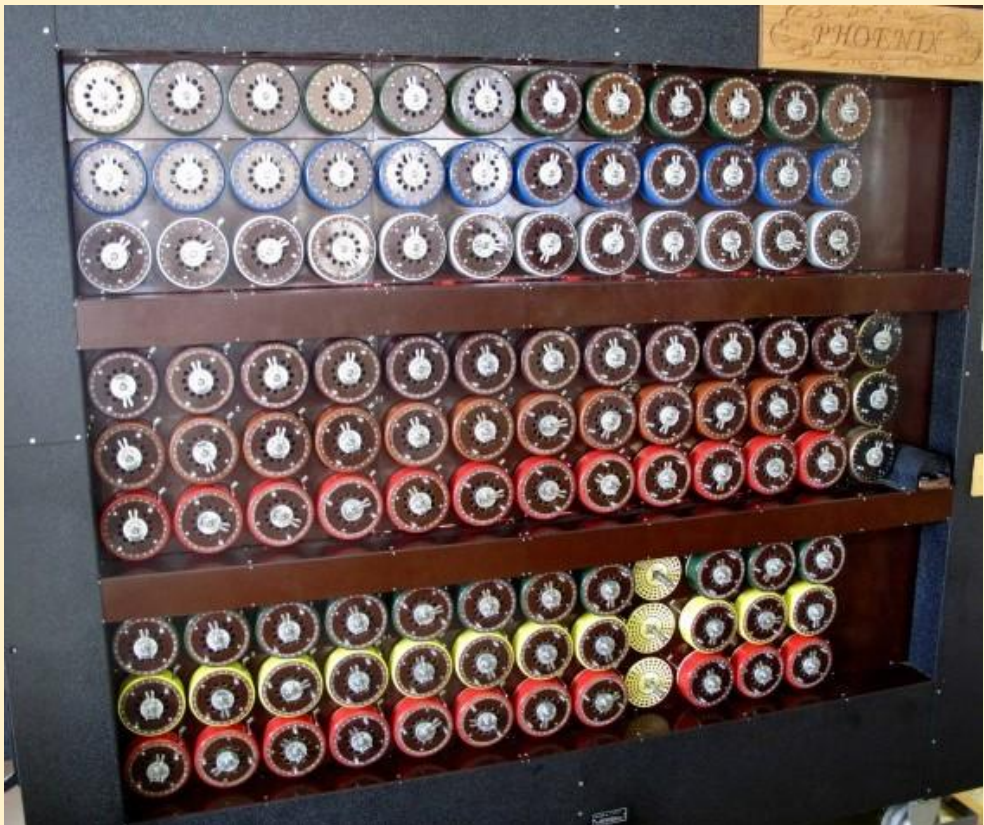
⁶ תאי ליתיום אינם רעילים כמו מצברי עופרת או מצברי ניקל-קדמיום, ובמספר מדינות מותר להטמין באתרי פסולת.



האניגמה של אלן טיורינג

פרופ' עלי לוין, מכללת אפקה להנדסה, תל אביב ElyL@afeka.ac.il

אלן טיורינג, מתמטיקאי ומדען מחשבים בריטי, הגיע להישגים נדירים בצד התיאורטי ובצד המעשי של תהליכי חישוב ממוכנים. הוא פיתח את מכונת טיורינג – מודל מופשט לאופן פעולתו של המחשב, ואת מבחן טיורינג הבודק האם למכונה כלשהי יש בינה מלאכותית שאינה מאפשרת להבחין בינה לבין אדם. טיורינג היה הדמות המרכזית בפיצוח מכונת ההצפנה הגרמנית "אניגמה" במלחמת העולם השנייה ובבניית מכונות לפענוח צפנים (מחשבי "בומב" ו"קולוסוס"). הוא נפטר בשנת 1954, בהיותו בן 42 בלבד, ככל הנראה בעקבות טיפול כימי שנכפה עליו לאחר שהורשע בהומוסקסואליות. בשנת 2009 התנצל ראש ממשלת בריטניה על היחס המחריד שנהגו בו, ובשנת 2013 העניקה לו המלכה אליזבת השנייה חנינה שלאחר המוות. ככל שעוברות השנים ונפתחים הגנזכים, ממשיכה דמותו האניגמאטית לעורר עניין רב, הן בקהילה המדעית והן בקרב הציבור הרחב.



אלן טיורינג Alan Mathison Turing נולד בלונדון ביום 23 ביוני 1912. אביו עבד בשירות המדינה בהודו. אימו הייתה בתו של המהנדס הראשי בחברת מסילות הרכבת של דרום הודו. ההורים שהו ממושכות בהודו אך אלן ואחיו ג'ון נשארו בלונדון עם זוג מטפלים או שגדלו בפנימייה. אלן טיורינג הצטיין במתמטיקה ומדע ומוריו ידעו להעריך את כישרונותיו. לטענת אימו, התעניין בספרות ובאותיות עוד בטרם למד לקרוא. הוא גם הפגין נטייה להמצאת מילים - "קווקלינג" (quockling) הייתה המילה שטבע לתיאור ההמולה שמשמיעים שחפים המתקוטטים על מזון, "גריסיקל" (greasicle) לתיאור "הבהוביו של נר ברוח פרצים", ו"סקוואדי" (squaddy) לתיאור דברים גוציים וריבועיים. בשנת 1930 נפטר ידידו הקרוב כריסטופר מורקן. אירוע זה השפיע מאד על אלן טיורינג ובעקבותיו הוא הפך לאתיאיסט מובהק.

בשנים 1931-1934 למד מתמטיקה בקינגס קולג' באוניברסיטת קיימברידג' ונמשך למחקר תיאורטי. בשנת 1936 פרסם את הרעיון של מכונת חישוב אוטומטית וניסה להגדיר את מושג האלגוריתם באופן מדויק ופשוט. בהמשך עבודתו אף ניסח עם אלונזו צ'רץ' את התיזה הטוענת כי מכונת טיורינג, השקולה לכל מחשב שהוא, מסוגלת לבצע כל חישוב או אלגוריתם אם הוא פתיר. בשנים 1936-1938 למד באוניברסיטת פרינסטון בארצות הברית, ובשנת 1938 השלים את הדוקטורט שלו. ג'ון פון ניומן הזמין אותו להצטרף למכון למחקר מתקדם בפרינסטון אך הוא העדיף לחזור לאנגליה מולדתו.

מספטמבר 1938 עבד טיורינג במשרה חלקית עבור בית הספר לקידוד והצפנה באנגליה והתייצב לעבודה במחלקת פענוח הצפנים של משרד החוץ בפארק בלצ'לי, מצפון מערב ללונדון ב-4 בספטמבר 1939. הצוות שאליו הצטרף טיורינג הופקד על אחת המשימות הסודיות ביותר במאמץ המלחמתי נגד גרמניה – פענוח הצופן הצבאי הגרמני. הגרמנים השתמשו במכונת הצפנה בשם "אניגמה" ובאמצעותה הפכו מברקים לרצפי סימנים, שרק מכונת אניגמה אחרת יכלה לתרגם בחזרה לטקסט בשפה רגילה. כדי לפענח את הצופן היה צורך לבנות מחשב שאליו יוזנו המברקים המוצפנים ויפוענחו בעזרת מחשבים מסובכים.

על בסיס התפיסה המתמטית של טיורינג, פיתחה המחלקה את המחשב האלקטרוני-ספרתי הראשון, שנקרא "כריסטופר". המחשב הענק, שהושלם והוכנס לפעילות בדצמבר 1943, סייע לבריטים לפענח חלק גדול מתשדורות האלחוט המוצפנות של הצבא הגרמני ולהפיק מהן מידע בעל חשיבות אסטרטגית עצומה. הידע שנצבר בפרויקט זה שימש בסיס לפיתוח טכנולוגיית המחשבים בבריטניה ובארצות הברית. במהלך המלחמה טיורינג היה ראש בקתה 8 – האגף שהיה אחראי על ביון האותות של הצי הגרמני. השתתפותו בקורס המפורסם של לודוויג ויטגנשטיין על יסודות המתמטיקה בשנת 1939 ובקיאואו הרבה בשפה המדוברת בודאי סייעו לו בפיצוח כתבי הסתר הגרמניים.

במהלך עבודתו בפארק בלצ'לי גייס את ג'ואן קלארק, והיא עבדה שם כמתמטיקאית ומפענחת. בשנת 1941 הציע לה נישואין, אולם לאחר שהודעה בפניה שהוא הומוסקסואל, הנישואין בוטלו.

אחרי המלחמה טיורינג חקר רשתות עצבים מלאכותיות והפך לאחד מנושאי הדגל של הבינה המלאכותית. בשנת 1949 התמנה למנהל מעבדת החישובים באוניברסיטת מנצ'סטר ועסק בפיתוח תוכנה. במאמר שהתפרסם בשנת 1950 העלה את הרעיון של "מבחן טיורינג" (Turing Test) הבוחן האם ניתן להבחין בין מחשב לבין אדם. גישת טיורינג ביחס לרמת התכונה של מכונה שתוכל ללמד את עצמה, ליזום ולהסיק מסקנות והאפשרות שהמחשב יעלה על האדם, עוררו התנגדות רבה ועדיין נתונות לפולמוס ציבורי.

בתחילת שנות החמישים עסק במחקר חלוצי על מורפוגנזה – תהליך עיצוב צורת העובר. טיורינג סבר כיניתן להסביר לעתים את צורתם המורכבת של יצורים חיים באמצעות תהליכים כימיים פשוטים. במאמרו על "הבסיס הכימי של מורפוגנזה" הוצגה תיאוריה שפיתח על מערכת כימית, אשר יכולה להסביר את היווצרותם של פסים, כתמים וספיראלות בטבע, למשל על עורם של בעלי-חיים.

טיורינג מעולם לא הסתיר את עובדת היותו הומוסקסואל, אך בבריטניה של ראשית שנות ה-50 שררה אווירה הומופובית, במיוחד לאחר ששני הומוסקסואלים הואשמו בריגול וערקו לברית המועצות. בשנת 1952 הורשע טיורינג בהומוסקסואליות – התנהגות שהייתה עבירה פלילית בבריטניה של אותה עת. בגזר הדין ניתנה לו האפשרות לבחור בין עונש מאסר לבין טיפול הורמונאלי וטיורינג בחר באפשרות השנייה. הטיפול כלל זריקות הורמונים נשיים, על מנת לדכא את יצרו המיני. טיורינג שם קץ לחייו כעבור שנתיים. ב-7 ביוני 1954, ככל הנראה בשל תופעות הלוואי של ההורמונים. על-פי דו"ח המשטרה, טיורינג מת מהרעלת ציאניד, כשלצדו תפוח חצי-אכול, טבול בציאניד, ככל הנראה כמחווה לסרט "שלגיה ושבעת הגמדים" של וולט דיסני. אמו שרה לא קיבלה את הטענות בדבר ההתאבדות. הביוגרף אנדרו הודג'ס העלה את ההשערה שטיורינג דאג לכך שנסיבות המוות לא תהיינה חד-משמעיות, כדי לתת לאמו את האפשרות להכחיש שהתאבד.

בשנת 2009 פרסם ראש ממשלת בריטניה, גורדון בראון, הודעת התנצלות "בשם ממשלת בריטניה, וכל מי שבזכות עבודתו של אלן חי בחופש", על היחס אשר לו סכה טיורינג ממוסדות השלטון הבריטי. בהצהרה הכיר בראון כ"קורבן המפורסם ביותר של ההומופוביה בבריטניה". בשנת 2013 העניקה לו המלכה אליזבת עשניה חנינה מלאה.

פרס טיורינג, שהוא הפרס החשוב ביותר במדעי המחשב ונחשב כשקול לפרס נובל, מחולק מאז שנת 1966 על ידי אגודת ACM (Association or Computing Machinery). רשימת הזוכים כוללת חמישה מדענים ישראליים – מיכאל רבין, אמיר פנואלי, עדי שמיר, יהודה פרל ושפי גולדווסר.

בשנת 2014 הופק הסרט "משחק החיקוי" (Imitation Game) דרמה ביוגרפית בריטית המתעדת את חייו ופועלו של טיורינג ואת מותו הטראגי. הסרט בבימוי מורטן טילדום, ובכיכובם של בנדיקט קמברבאצ' וקירה נייטלי, זכה בפרס בחירת הקהל היוקרתי בפסטיבל הסרטים הבינלאומי בטורונטו.



אלן טיורינג 1912 - 1954

מכונת האניגמה

"אניגמה" (מיוונית - תעלומה, חידה) היא משפחה של מכונות להצפנה ולפענוח של טקסטים ששימשו את הכוחות הגרמנים והאיטלקים במלחמת העולם השנייה. בזכות התקשורת המוצפנת שאפשרה האניגמה, הצליח הצי הגרמני להטיל מצור אפקטיבי על בריטניה שמנע הובלת מזון ואמצעי לחימה.

בעלות הברית הצליחו לפצח את ההצפנה ובמשך רוב שנות המלחמה פענחו מספר גדול של הודעות מוצפנות. את המודיעין שנצבר מקריאת מסרי האניגמה, כינו בשם "אולטרה". שבירת הצופן הקנתה לצי הבריטי יתרון משמעותי במלחמה מול חיל הים הגרמני והיכולת זו, שהייתה יתרון אסטרטגי משמעותי, נשמרה בסוד במשך עשרות שנים.



מכונת אניגמה בסיסית עם שלושה רוטורים

את האניגמה המציא הגרמני ארתור שרביוס (Scherbius) בשנת 1918 כגרסה מכאנית-חשמלית לדסקית צופן שהייתה בשימוש במשך מאות שנים. בדומה למכשירי הצפנה קודמים, האניגמה התבססה על צופן החלפה עבור כל אחת מאותיות המסר שיש להצפין. החידוש היה בכך שהאניגמה הייתה אמצעי אוטומטי מהיר עם יכולת לשנות את מפתח ההצפנה לאחר כל אות, באמצעות מערכת של דסקיות מסתובבות ("רוטורים"). האפשרות לשנות את סדר הדסקיות ואת מצבן ההתחלתי הקשתה ביותר על פיצוח הצופן.

שרביוס ניסה לעניין גורמים רשמיים בגרמניה במכונה החדשה אבל בתחילה נדחה. הוא פנה לייצור מסחרי של המכונה, במסגרת חברת ההנדסה שלו "שרביוס את ריטר". גרסאות שונות של האניגמה נמכרו לחברות ולבנקים באירופה, בארצות הברית וביפן. כל גרסה פעלה בעזרת שיטת פענוח שונה במקצת אך רמת האבטחה של המוצרים המסחריים הייתה נמוכה למדי. למרות זאת, בסוף שנות ה-20 אימצו הצי והצבא הגרמניים את האניגמה. הם ערכו בה מספר שינויים שהקשו

על פענוח הצופן והגבירו את רמת האבטחה. לקראת מלחמת העולם השנייה הייתה האניגמה אמצעי ההצפנה העיקרי של הצי, הצבא, חיל האוויר, המפלגה הנאצית, הגסטאפו, משרד החוץ והביון של גרמניה הנאצית.

האניגמה שילבה מערכות חשמליות ומכאניות המנגנון המכאני הורכב ממקלדת המכילה את אותיות האלפבית ומאוסף של רוטורים המסודרים זה לצד זה על ציר אחד. הרוטורים הם הלב של מכונת האניגמה. כל רוטור הוא דסקית מגומי קשיח בקוטר 10 סנטימטר שבצדה האחד 26 פינים מפליז, לחוצים על ידי קפיצים ומסודרים במעגל. בצד השני של הרוטור היה מספר זהה של מגעים חשמליים. השימוש בקפיצים גרם לכך שכל אחד מהפינים לוחץ בכוח על המגע ברוטור הסמוך, וכך הובטח מגע חשמלי תקין.

בנוסף לכך קיים באניגמה מנגנון פסיעה שמסובב רוטור אחד או יותר בכל פעם שנלחץ מקש. המנגנון שונה בגרסאות השונות של המכונה, אולם במנגנון השכיח ביותר, פוסע הרוטור הימני פעם אחת לאחר כל הקשת מקש. הדבר גורר לעתים גם תזוזה של רוטורים סמוכים. התנועה המתמשכת של הרוטורים מייצרת התמרה שונה לאחר כל הקשת מקש. הרוטור האחרון צמוד ל"משקף" (רפלקטור) המחבר את המוצאים של הרוטור האחרון בזוגות, ומטה את הזרם חזרה דרך הרוטורים, בנתיב שונה. המשקף גורם לכך שפענוח הצופן מתאפשר באמצעות אותה המכונה בדיוק.

החלקים המכאניים יוצרים מעגל חשמלי ובפועל מבוצע הקידוד של כל אות באופן חשמלי. כאשר נלחץ אחד המקשים, המעגל נסגר; זרם חשמלי זורם דרך רכיבים שונים, ולבסוף מאיר אחת מ-26 הנורות, המורה על אות הפלט. פענוח ההודעות המוצפנות התבצע באמצעות הקלדתן במכונה זהה. מכיוון שמסלול הזרם הוא הפיך, הרי אם במערך רוטורים מסוים הקלדת האות A הצפינה אותה ל-D, אזי הקלדת האות D תיתן בחזרה את האות A וכך לגבי האותיות הבאות. לכן כל שנדרש לפענוח הוא המסר המוצפן ומכונה זהה (אותם הרוטורים ובאותו מצב ראשוני).

עזר נוסף היה לוח נורות מרוחק ששימש כאמצעי אבטחה. הלוח המרוחק אפשר לקרוא המורשה לראות את ההודעה המפוענחת מבלי שמפעיל המכונה יראה אותה. אביזר חשוב בדגמים מתקדמים של האניגמה היה "Schreibmax": מדפסת זעירה שיכלה להדפיס על סרט נייר קטן. המדפסת ייתרה את הצורך במפעיל נוסף, שתפקידו היה לקרוא את הנורות ולכתוב את האותיות. ה-"Schreibmax" מוקם מעל האניגמה וחובר ללוח הנורות. על מנת להתקין את המדפסת, היה צורך להסיר את כל הנורות. מלבד הנוחיות שבדבר, עלתה גם רמת האבטחה: קצין האותות לא היה צריך להיחשף להודעה המקורית. המדפסת עשויה הייתה להיות מותקנת בלשכתו של קברניט הצוללת, ותפקידו של קצין האותות היה לקבוע את המפתח ולהקליד את ההודעה המקודדת, מבלי שיראה את הטקסט המפוענח שהתקבל.

בשנת 1944 הכניס חיל האוויר הגרמני לוח תקעים נוסף שנקרא "אוהר" (שעון בגרמנית). השעון היה קופסה קטנה, שכללה מתג בעל 40 מצבים. לאחר חיבור התקעים, לפי דף מפתחות יומי, יכול היה המפעיל לשים את המתג באחד מ-40 המצבים. כל מצב גרם לצירוף שונה של חיווט התקעים.

האניגמה הייתה מיועדת מראש להעברת הודעות קצרות, עד מאות אותיות בלבד. עוצמתה הייתה בכך, שגם אם נפלו מכונות בידי האויב, כך שנודע לו חיווט הרוטורים והמשקף, היה קשה מאוד לפענח את ההודעה ללא ידיעת מצבה הראשוני של המכונה, מכיוון שהצבת הרוטורים וסידור לוח התקעים השתנו מדי יום, על פי ספרי צופן שהוכנו מראש.

על פי הערכות שונות יוצרו בגרמניה כ-100,000 מכונות אניגמה. לאחר המלחמה מכרו בעלות הברית מכונות אניגמה למספר מדינות אך פיצוח האניגמה והשפעתו על מלחמת העולם השנייה לא נחשף עד לשנות ה-70. מאז גדל משמעותית העניין במכונת האניגמה ומספר מכונות אף מוצגות לציבור במוזיאונים בארצות-הברית ובאירופה. במוזיאון המדע של מינכן מוצגות מכונות גרמניות צבאיות בנות שלושה וארבעה רוטורים. בנוסף מציג המוזיאון גרסאות אזוריות ישנות של המכונה. מכונה עובדת מוצגת במוזיאון ההצפנה הלאומי של ה-NSA בפורט מיד, שם יכולים מבקרים לנסות להצפין ולפענח הודעות. בנוסף יש דוגמאות המוצגות במוזיאון ההיסטוריה של המחשבים בארצות הברית, בפארק בלצ'לי באנגליה, באנדרטת המלחמה של אוסטרליה בקנברה ובמקומות אחרים בגרמניה, בארצות הברית, באנגליה ובאירופה. מספר מכונות נמצאות בבעלות פרטית ונמכרות לעתים במכירות פומביות במחיר העשוי לעלות על 20,000 דולר.



דגמים שונים של האניגמה

פיצוח האניגמה

בכל שפה קיימת שכיחות יחסית של האותיות השונות. השכיחות ניתנת לחישוב על סמך טקסטים ידועים מסוגים שונים. למשל עבור השפה העברית ניתן למצוא (ויקיפדיה) טבלאות שכיחות מקטעי עיתונות ומדברי הכנסת כמודגם בטבלה. שבירת כתב סתר המבוסס על מפתח

אחד יכולה להיעשות אפוא בנקל על ידי ספירת השכיחויות של כל אות בגרסה המוצפנת והצמדת השכיחויות של הטקסט המוצפן אל טבלת השכיחויות של השפה הרלבנטית. דא עקא שהחלפה תדירה של המפתח (ובייחוד באניגמה שבה מוחלף המפתח בכל אות בודדת) מונעים למעשה את יכולת הפענוח.

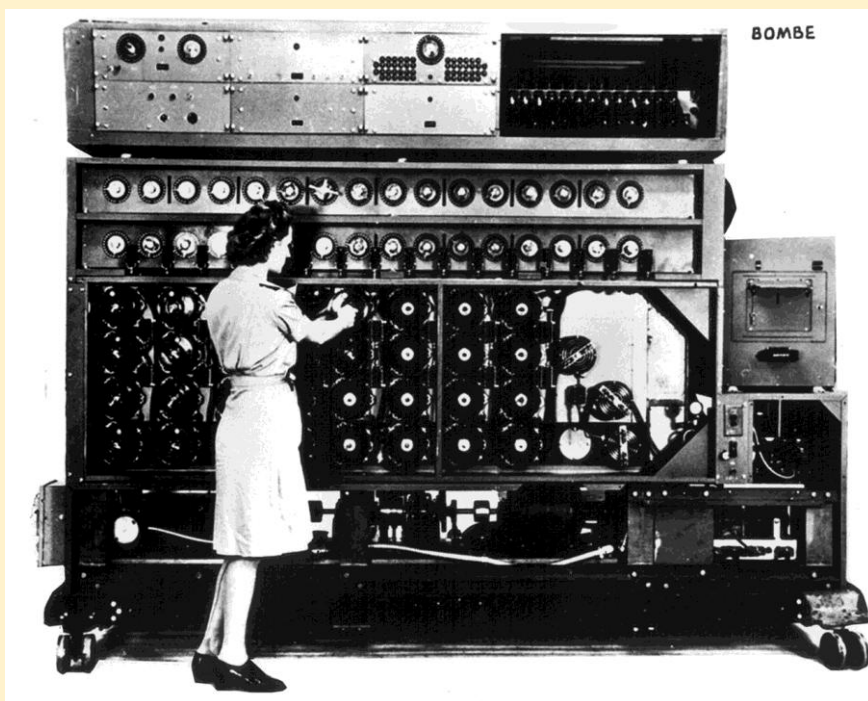
אות	שכיחות בקטעי עיתונות	שכיחות בדברי הכנסת
א	6.25%	4.83%
ב	5.22%	5.27%
ג	1.15%	1.43%
ד	3.16%	2.66%
ה	9.22%	8.78%
ו	10.27%	10.87%
ז	1.11%	0.85%
ח	2.52%	2.47%
ט	0.90%	1.32%
י	11.22%	11.78%
ך	0.48%	0.38%
כ	2.62%	2.27%
ל	6.74%	6.68%
ם	3.00%	3.01%
מ	4.72%	5.31%
ן	1.48%	1.27%
נ	3.89%	3.37%
ס	1.69%	1.73%
ע	3.04%	3.21%
ף	0.16%	0.23%
פ	1.50%	2.05%
ץ	0.11%	0.16%
צ	1.37%	1.34%
ק	1.85%	2.31%
ר	5.56%	5.83%
ש	5.00%	4.77%
ת	5.65%	5.68%

שכיחות האותיות בשפה העברית (קטעי חדשות ודברי הכנסת)

פיצוח האניגמה הצליח בזכות מספר אירועים משולבים זה בזה. יש להבדיל בין פיצוח האניגמה הרגילה, ששימשה את כוחות היבשה וחיל האוויר, אשר התרחש במועד מוקדם יותר, לבין פיצוח האניגמה של הצי, שהיה מורכב וקשה יותר.

תרומת המודיעין הצרפתי: בשנת 1931 הצליח השירות החשאי הצרפתי לגייס משתף פעולה מקרב עובדי מחלקת ההצפנה במיניסטריון ההגנה הגרמני בשם האנס תילו שמידט. שמידט העביר לידי הצרפתים מדריך הפעלה חלקי של האניגמה. עותקי מסמך זה הועברו לפולנים ולבריטים ועזרו לבריטים להגיע ליכולות פיצוח ראשוניות תוך זמן קצר.

תרומת המודיעין הפולני: מפצחי צפנים פולנים ובראשם הקריפטוגרף מריאן רייבסקי, ניסו לפצח את צופן המכונה. הם עשו זאת בעזרת גרסה מסחרית של המכונה שנתפסה על-ידם ובעזרת המסמכים העביר שמידט למודיעין הצרפתי. הם השתמשו במחשבים אלקטרו-מכאניים שכונו "בומב", בשל התקתוקים שהשמיעו, והצליחו למצוא פרצה במנגנון ההצפנה של האניגמה ולקרוא שדרים מוצפנים. ידע זה הועבר לבריטניה זמן קצר לפני פרוץ המלחמה. עם הפלישה הגרמנית לפולין (ספטמבר 1939) נמלטו חלק מאנשי צוות הפיצוח של האניגמה מפולין דרך רומניה לצרפת והעמידו עצמם לרשות המודיעין הצרפתי.



מחשב BOMBE מקורי

יחידת הפיצוח הבריטית בפארק בלצ'לי: עם תחילת המלחמה הוקמה בבריטניה יחידה גדולה לפיצוח צפנים. ביחידה, שמושבה היה בפארק בלצ'לי (Bletchley Park), צפונית-מערבית ללונדון, הועסקו מומחים רבים למתמטיקה ולבלשנות. אחד השותפים העיקריים לפיצוח צופן האניגמה היה אלן טיורינג. צוות בלצ'לי עסק במהלך המלחמה בפיצוח צופן האניגמה וצפנים נוספים של גרמניה ויפן. בין השאר הצליחו הבריטים לפצח את האניגמה של הצי, שהייתה מורכבת יותר מפני שמספר הרוטורים היה גדול יותר. כמו כן הם התמודדו בהצלחה עם מספר שינויים שעשו הגרמנים במכונות במהלך המלחמה. להאצת תהליך פיצוח הצופן השתמשו מפצחי הצפנים במחשבי "בומב" ובמחשבים מתקדמים יותר בשם "קולוסוס". ב-17 בינואר

1940 הצליחו הבריטים לפענח לראשונה תשדורת של אניגמה, אבל רק אחרי אפריל 1940 הגיעו ליכולת לקרוא שדרים תוך 24 שעות ממועד שידורם.



הכניסה לפארק בלצ'לי

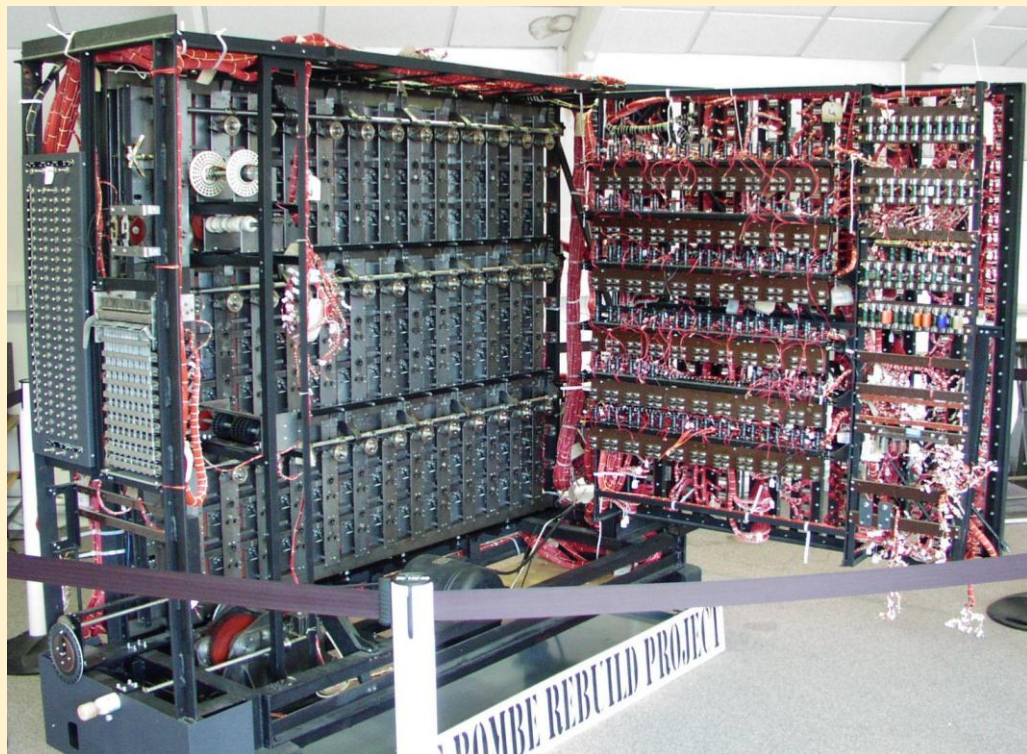
לכידת מסמכי U-33: ב-12 בפברואר 1940 הצליח הצי הבריטי להטביע את הצוללת U-33. הצוללת הגיעה לחופי סקוטלנד כדי להטמין מוקשים, התגלתה, נפגעה על ידי פצצות עומק, ניטשה וטובעה על ידי צוותה. בכיסוי של אחד המלחים נמצאו גלגלי הצופן של האניגמה ואלו עזרו לאנשי פארק בלצ'לי לכוון את מכשירי הפיצוץ.

לכידת ה"מינכן": בתחילת מאי 1941 לכדו הבריטים ספינת דיג גרמנית בשם "מינכן" ובה נמצאו הצפנים של חודש יוני 1941, אשר אפשרו את קריאת כל התשדורות של חודש יוני 1941.

לכידת מסמכי U-110: ב-9 במאי 1941 הצליח הצי הבריטי ללכוד את הצוללת הגרמנית U-110, כשעל סיפונה מכונת ההצפנה אניגמה והצפנים של חודש מאי. הישג זה, יחד עם המסמכים שנלכדו על ה"מינכן", הביא לכך שבסופו של דבר הצליחה בריטניה לפצח את צופן האניגמה של הצי. לנאצים לא נודע אז כי קוד האניגמה פוצח.

לכידת מסמכי U-559: בפברואר 1942 הוסיפו הגרמנים רוטור נוסף לאניגמה וכתוצאה מכך איבדו הבריטים את יכולת הפענוח של השדרים. ב-30 באוקטובר 1942, גילו הבריטים את הצוללת 559 מול חופי ארץ ישראל, אורבת לאניות ששטו בין נמל חיפה לנמל פורט סעיד. חמש

משחתות שהגיעו לאזור אילצו את הצוללת לעלות לגובה פני הים, צוות השתלטות נכנס לצוללת והצליח, לפני שקיעתה, לחלץ ממנה מסמכים שסייעו לבנות מפתחות חדשים לפיצוח תשדורות.



מחשב BOMBE משוחזר

האניגמה תוכננה להיות בטוחה אפילו אם החייוט יהיה ידוע למאזין. משתמשי האניגמה היו בטוחים שהאבטחה שסיפקה האניגמה היא מושלמת, בשל המספר הרב של האפשרויות. מבחינת הגרמנים, היה זה בלתי מתקבל על הדעת שאויב יוכל לנסות כל אפשרות בהתקפת כוח גס. גם אילו האויב היה מצליח לפענח הודעה בשיטה זו, הרי שהזמן הדרוש לפענוח היה הופך הודעה זו למיושנת ובעלת תועלת מועטה.

התקשורת הגרמנית פוצלה למספר רשתות שונות. כל רשת התאפיינה באתחול שונה של מכונות האניגמה. רשתות התקשורת הללו כונו בבלצ'לי "מפתחות" וניתנו להם כינויים כגון "אדום" ו"כריש". לכל יחידה שפעלה ברשת הייתה רשימה של אפשרויות אתחול עבור האניגמה לפרק זמן עתידי נתון. כדי שהודעה תוצפן ותפענח כשורה, נדרשו השולח והמקבל לאתחל את האניגמה שברשותם באופן זהה. בחירת הרוטורים וסדרם, נקודת ההתחלה וחיבורי לוח התקעים, חייבים היו להיות זהים.

נוהלי התפעול של מכונות האניגמה, אשר נחשבו כמעטפת אבטחה אולטימטיבית, טמנו בחובם גם את נקודות התורפה שאפשרו את שבירתם. בעת שהייתה האניגמה בשימוש, היה צורך ברשימה של מפתחות יומיים וכן במספר מסמכי עזר. ספרי הצופן של הצי הודפסו באדום ובדיו

נמס במים על גבי נייר ורוד, כך שהיו בני השמדה אם הייתה סכנה שייתפסו. בדרך כלל נותרו רוב המפתחות קבועים למשך יממה, אולם עבור כל הודעה נבחר מיקום רוטורים התחלתי שונה. המיקום ההתחלתי שודר יחד עם הטקסט המוצפן. שם השיטה היה "נוהל האינדיקאטור". מאחר שחלק מהאינדיקאטורים היו חלשים, הצליחו אנשי פארק בלצ'לי למצוא פרצות באניגמה.

אחד מנוהלי האינדיקאטור המוקדמים הורה למפעיל לאתחל את המערכת בתיאום עם רשימת התצורות שברשותו. הרשימה כללה מיקום התחלתי של הרוטורים. המפעיל היה מסובב את הרוטורים עד אשר היה מבחין בצירוף הדרוש. בנקודה זו היה עליו לבחור צירוף התחלתי שרירותי עבור ההודעה המסוימת. צירוף זה היה הופך ל"תצורת ההודעה". התוצאה הייתה אינדיקאטור מוצפן. לסיום היה המפעיל מסובב את הרוטורים כך שיתאימו לתצורת ההודעה שלו. בצד המקבל היה צורך בהיפוך הפעולה - על המפעיל היה לאתחל את המכונה לתצורה ההתחלתית ולהדפיס את שש האותיות הראשונות בהודעה ולאחר מכן היה מדפיס את הכתב המוצפן הנותר ומפענח את ההודעה.

חולשת השיטה נבעה ממספר גורמים: א. שימוש במספר סופי של תצורות התחלה גלובליות. ב. חזרה על האינדיקאטור פעמיים בתחילת התשדורת. חזרה זאת יצרה יחס מיוחד בין צמדי האותיות: הראשונה והרביעית, השנייה והחמישית, והשלישית והשישית. ג. שימוש מסיבי בספרי צופן על מנת לאתחל את תצורת הרוטורים, כאשר המפעילים לא תמיד הקפידו על נוהלי השימוש וכן נפילת חלק מספרי הצופן בידי בנות הברית. ד. תשדורות חוזרות על עצמן ושימוש שכיח במילים מסוימות כגון מילות ברכה בתחילת המברק, תיאורי מזג האוויר וציון סוגי האניות, כך שניתוח תדירויות ההופעה נעשה לא רק על אותיות כי אם גם על מילים וצירופי מילים.

למפעילי האניגמה בצי הגרמני ("קריסמרין") היו הליכים מורכבים ומקיפים בהרבה מאשר בוורמאכט ובלופטוואפה. הקריסמרין קבע שלפני הצפנה באניגמה, הייתה ההודעה מקודדת באמצעות ספר צפנים בשם Kurzsignalheft. הספר הכיל טבלאות שהמירו משפטים לקבוצות בנות ארבע אותיות. ביטויים ושמות מגוונים נרשמו בקבוצות כגון, נושאים לוגיסטיים, תדלוק ומפגש עם אוניות אספקה, מיקומים ורשימות קואורדינאטות, שמות נמלים, מדינות, כלי נשק, תנאי מזג אוויר, מיקומי אויב ואניות וכן טבלאות זמנים ותאריכים.

במכונות האניגמה היו 26 אותיות ולכן תווים אחרים הוחלפו בצירופים נדירים של אותיות. תו הרווח הורד כליל או הוחלף על ידי האות X. האות X שימשה במקור כסימן לעצירה או כנקודה ולכן עקפה את הרוטורים. ביחידות הצבא השונות היה שוני בין תווים מסוימים. הוורמאכט החליף פסיק בצירוף ZZ וסימן שאלה - במילה FRAGE או FRAQ. הקריגסמרין, בשונה מהוורמאכט, החליף פסיק ב-Y וסימן שאלה ב-UD. הצירוף CH, הקיים למשל במילה Acht (בגרמנית: שמונה) או במילה Richtung (בגרמנית: כיוון), הוחלף ב-Q (ולכן נכתב AQT וכן MYRIA). שניים, שלושה או ארבעה אפסים הוחלפו ב-CENTA, MILLE או MYRIA בהתאמה. הוורמאכט והלופטוואפה שידרו הודעות בסדרות של חמישה תווים. הקריגסמרין שידר סדרות של ארבע אותיות תוך שימוש בארבעת הרוטורים שבמכונה. שמות או מילים שהופיעו תדיר בהודעות שונו ככל האפשר. מילים כמו Minensuchboot (שולת מוקשים) עשויות היו להיכתב כ-MMMBOOT, MINBOOT, MINENSUCHBOOT או MMM354. כדי להקשות על ניסיון פיצוח אפשרי, נאסר לשלוח הודעה שבה יותר מ-250 תווים. הודעות

ארוכות פוצלו למספר חלקים, שלכל אחד היה מפתח משלו. שבירת האניגמה בפארק בלצ'לי הייתה אפוא צירוף של חישובי תמורות וצירופים במחשבים שהיו מן הראשונים בעולם, יחד עם הבנה לוגית ובלשנית מעמיקה של השפה הצבאית הגרמנית וניתוח השימושים (והשגיאות) של מפעילי האניגמה.

האניגמה בצה"ל

בתערוכת CAPTCHA שהוצגה במוזיאון המדע בירושלים בשנת 2013 נחשפה לראשונה בפומבי העובדה שמכונת ההצפנה המפורסמת "אניגמה" הגיעה לצה"ל ואפילו זכתה לגרסה עברית שהושאלה לתערוכה על ידי מרכז הצופן והביטחון של צה"ל (מצ"ב).

מתברר כי בסוף שנות ה-40 של המאה הקודמת נרכשו כ-30 מכונות אניגמה לצרכי מערכת הביטחון ונעשה מאמץ הנדסי "לגייר" את המכונה משיטה של 26 אותיות לטיניות לשיטה העברית של 22 אותיות האלף בית. המקלדת והנורות סומנו באותיות עבריות, אך ההוראות הצמודות למכסה נשארו על טהרת הגרמנית. ככל הידוע מדובר באניגמות שנלקחו שלל בידי הבריטים והועברו על ידם לישראל ולמושבות בריטיות נוספות כמו הודו. ניתן להניח שהבריטים היו מרוצים לו אימץ צה"ל שיטת הצפנה שהם ידעו לפענח.

בסופו של דבר הוחלט בצה"ל לא להשתמש במכונות אלו. על פי האגדה (או שלא הייתה זו רק אגדה) כנראה שהחלטה זו הונעה על ידי מתמטיקאי יהודי בכיר ששירת בפארק בלצ'לי במהלך המלחמה ועלה לישראל אחרי סיומה. לפי אחת הגרסאות הוא שמע מסטודנט שלו ששירת בצה"ל על ניסוי האניגמה ומצא דרך לרמוז לו, תוך שימוש במונח "סוס טרויאני", אך מבלי להפר את שבועת הסודיות שלו לבריטים, שצופן האניגמה פחות חסין ממה שניתן לחשוב.

סוף דבר – האניגמה של אלן טיורינג

אלן טיורינג - מתמטיקאי, מדען, גאון מחשבים ופילוסוף עבד רוב הזמן תחת מעטה כבד של סודיות. הוא פרסם מעט מאמרים ועיקר הישגיו הכבירים נעשו עבור בטחון האומה הבריטית. נאמר עליו כי לא נודעה תרומה גדולה יותר של אדם יחיד למאמץ המלחמתי של בנות הברית במלחמת העולם השנייה מאשר תרומתו של טיורינג וכי בזכותו קוצרה המלחמה בשנתיים ימים. בכל זאת, האומה הבריטית, הליברלית לכאורה, העמידה אותו למשפט על נטיותו החד-מינית והענישה אותו קשות באמצעות טיפול כימי (חסר תועלת). אלן טיורינג לא יכול היה לעמוד בנזקי העונש וסיים את חייו באכילת תפוח מורעל, אקט טרגי הלקוח מאגדת שלגיה ושבעת הגמדים.

טיורינג עסק בחישובים, במכונות חישוב ובמילים. הוא טען כי מכונות יכולות לפתור כל בעיה מתמטית שיש לה פתרון והאמין ביכולתן של מכונות גם "לחשוב" עד כי לא ניתן יהיה להבחין בינו לבין האדם. הוא השאיר את חידת מותו ללא תשובה חד משמעית ועברו כ-60 שנה עד שהממשלה והממלכה הבריטית ביקשו את סליחתו וחננו אותו באופן מלא. שבירת האניגמה בפארק בלצ'לי, המיוחסת במידה רבה לגאונותו של טיורינג, הייתה צירוף של חישובים מסובכים במכונות אוטומטיות עם רצף הברקות לוגיות של הבנה וניתוח השימושים האפשריים בשפה. אין ספק כי השכלתו הרחבה של טיורינג והיכרותו עם הפילוסופים הדגולים של השפה (ויטגנשטיין, ראסל, פראגה, גדל ואחרים) היו מרכיבים חשובים באישיותו וביכולותיו.

אלן טיורינג, הצפנה ואניגמה באתר ויקיפדיה.
דנה אשכנזי וצבי לוטקר, על חייו ומותו של אלן טיורינג, אתר "האייל הקורא".
ברוס נורמן, מלחמת הצפנים, הוצאת מערכות, 1978.
שרה לב, אלן טיורינג – חייו ותרומתו למדעי המחשב, היבטים בהוראת מדעי המחשב, דצמבר 1995.
סיימון סינג, סודות ההצפנה, הוצאת ידיעות אחרונות, 2003.
יו סבאג מונטיפיורי, אניגמה - סיפור הקרב על הצופן, הוצאת יבנה, 2003.
דיוויד לוויט, האיש שידע יותר מדי - אלן טיורינג והמצאת המחשב, הוצאת אריה ניר 2007.
אורה מורג, אניגמה - סוד הצופן הגורלי, הוצאת ידיעות אחרונות - ספרי חמד, 2007.
מיכאל בר-זהר, אניגמה, הוצאת מגל, 2009.
רון אהרונ, המהפכה הקופרניקאית של אלן טיורינג, אודיסיאה 14, ינואר 2012.
אנדרו הודג'ס, האניגמה, הוצאת דיונון 2015.

- Alan Turing, Enigma and Cryptanalysis at Wikipedia
- Hodges, Andrew, Alan Turing : the enigma, Burnett Books, 1983.
- Kahn, David, Seizing the Enigma: The Race to Break the German U-Boats Codes, 1939-1943, 1991.
- Yates, David M. Turing's Legacy: A history of computing at the National Physical Laboratory 1945–1995, 1997.
- Lewin, Ronald . Ultra Goes to War: The Secret Story. Classic Military History (Classic Penguin ed.), Hutchinson & Co, 2001.
- Agar, Jon, The government machine: a revolutionary history of the computer. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 2003.
- Large, Christine, Hijacking Enigma, 2003.
- Perera, Tom, The Story of the ENIGMA: History, Technology and Deciphering, 2nd Edition, Artifax Books, 2004.
- Copeland (ed.), B. Jack. Alan Turing's Automatic Computing Engine. Oxford University Press, 2005.
- Copeland, B. Jack. Colossus: The secrets of Bletchley Park's code-breaking computers. Oxford University Press, 2006.
- Levin, Janna, A Madman Dreams of Turing Machines. Knopf, 2006.
- Gannon, Paul, Colossus: Bletchley Park's Greatest Secret. Atlantic Books, 2007.
- Leavitt, David, The man who knew too much: Alan Turing and the invention of the computer. Phoenix 2007.
- Petzold, Charles, "The Annotated Turing: A Guided Tour through Alan Turing's Historic Paper on Computability and the Turing Machine". Wiley Publishing, 2008.
- Turing, Sara, Alan M. Turing, Centenary Edition, Cambridge University Press, 2012.
Cooper, S. Barry, van Leeuwen, Jan (eds), Alan Turing – His Work and Impact, Elsevier, 2013.