



הפקולטה להנדסה ומדעי המחשב  
החוג להנדסת חשמל ואלקטרוניקה

## פרויקט גמר באלקטרוניקה

שעון שבת חכם

## Smart Shabbat Clock

מגישים: ברק אשואל ודוד אורליין  
מנחה: לירון בחכמה  
שבט תשפ"א  
ירושלים

## **תוכן עניינים**

3 .....	רשימת איורים.....
4 .....	רשימת טבלאות .....
5 .....	תקציר .....
7 .....	1. מבוא .....
9 .....	2. רקע תיאורטי וסקירת ספרות.....
13 .....	3. פיתוח ושיטות .....
31 .....	5. תוצאות.....
34 .....	6. מסקנות וסיכום .....
36 .....	נספח א .....
37 .....	נספח ב .....
38 .....	נספח ג .....
40 .....	נספח ד .....
41 .....	מקורות .....

## רשימת איורים

9 .....	איור 2.1: שעון שבת מכני.....
9 .....	איור 2.2: ZMAN Switch .....
10 .....	איור 2.3: שעון שבת עם אפליקציה – Av-Gad .....
13 .....	איור 3.1: דיאגרמת בלוקים של מערכת "שעון שבת חכם".....
14 .....	איור 3.2: שרטוט מערכת "שעון שבת חכם".....
17 .....	איור 3.3: דוגמא לרצף תקשורת ב-C <sup>2</sup> I .....
17 .....	איור 3.4: השוואת חיבור LCD עם (מיין) ובל (משמאל) בהתאם C <sup>2</sup> I .....
17 .....	איור 3.5: חיבור UART בין שני התקנים .....
19 .....	איור 3.4: מפתח פינים – ESP32-C3 DevKit .....
20 .....	איור 3.4: מודול HC-12 .....
21 .....	איור 3.5: תצורת פינים של DS3231 .....
21 .....	איור 3.6: מודול RTC .....
22 .....	איור 3.7: תצוגת LCD עם ממשך C <sup>2</sup> I .....
23 .....	איור 3.8: מסר מצב מזק לミיטוג עומס AC .....
24 .....	איור 3.9: ממיר AC-DC 5V .....
28 .....	איור 3.13: תרשימים בלוקים – ארכיטקטורת התוכנה של מערכת "שעון שבת חכם" .....
32 .....	איור 4.2: MON 15:49 OFF :4.2 .....
32 .....	איור 4.3: MON 15:50 ON :4.3 .....
32 .....	איור 4.4: MON 15:51 OFF :4.4 .....
32 .....	איור 4.5: MON 15:52 ON :4.5 .....
33 .....	איור 4.6: MON 15:53 OFF :4.6 .....
33 .....	איור 4.7: סרטיון הדגמה לצורך המבנה פועלות המערכת .....
40 .....	איור ד.1: חייזט יחידת הבקרה והפריפריאלים .....
40 .....	איור ד.2: חייזט המיתוג לעומס באמצעות SSR .....

## רשימת טבלאות

15 .....	טבלה 3.1: רשותות מתח ואוותות מרכזיות
16 .....	טבלה 3.2: ESP32-C3 פינים בשימוש
16 .....	טבלה 3.3: חיבורים חיצוניים
39 .....	טבלה נספח ג': תרחישי קצרה

## תקציר

ההתפתחות המואצת של מערכות אוטומציה ובקרה חכמות יצרה פתרונות מתקדמים לניהול צרכני חשמל, אולם עבר ציבור שומר השבת קיימים אתגרים "חודדים" הנובעים מה צורך בעמידה בכללי ההלכה לצד נוחות שימוש ודיוק תפעולי. שעוני שבת מכניים וdigיטליים מסווגים מספקים מענה בסיסי בלבד, אך בפתרונות הנפוצים קיימות מגבלות של דיוק, גמישות תכניתית, היעדר תקשורת בין התקנים ויכולת מוגבלת לניהול מרכזי. מטרת פרויקט זה היא פיתוח מערכת "שעון שבת חכם" המהווה יחידת ניהול מרכזי מתוזמן, מדויק ואמין של צרכני חשמל, תוך התאמה לדרישות ההלכתיות.

המערכת שפותחה כוללת יחידת בקרה מרכזיית לניהולلوح זמינים שבועי ברחוקzeitig דקה. המערכת משלבת מגנון שמירת זמן, משקל משתמש לניהול והגדרת לחות הזמינים מרוחק, ותצוגה מקומית לחוויה מצב. בנוסף, שולבה תקשורת אלחוטית לצורך שליטה וונכון עם יחידות קצה מרוחקות. מיתוג העומס מתבצע באופן שקט ואמין לאורך זמן.

במהלך בדיקות המערכת הוגדרה עמידה מדויקת בלוח הזמינים שהוגדר, תוך ביצוע פעולות הפעלה וכיובי בדיקות עוקבות בהתאם לתכנון. המערכת הוכיחה יכולות בתראיש שימוש רגילים, שמירה על נתוני התזמון גם לאחר הפסקות חשמל, ויכולת מעבר מבוקר בין מצב חול ושבת. בנוסף, נמצא כי התקשרות האלחוטית בין יחידת הבקרה ליחידות הקצה פועלת באופן אמין ועקב.

הפרויקט מציג תרומה טכנולוגית ויישומית משמעותית בכך שהוא מדגים מעבר משעון שבת מכני לפתרון חדש חכמה עם בקרה מרכזיית, גמישות תכניתית גבוהה ודיוק זמן משופר. מעבר לשימושו עבור שומר שבת, המערכת מתאימה גם ליישומים מודדיים וציבוריים הדורשים ניהול מתוזמן של צרכני חשמל. בכך, העבודה מניחה תשתיית לפיתוח מערכות אוטומציה חכמות, אמינות וונגישות, המשלבות שיקולים הנדסיים, תפעוליים ותרבותיים-הלכתיים.

## Abstract

The rapid advancement of smart automation and control systems has enabled sophisticated solutions for managing electrical loads. However, Sabbath-observant users face unique challenges arising from the need to comply with halachic constraints while maintaining operational convenience and timing accuracy. Traditional mechanical and digital Shabbat timers provide only a basic solution, yet common implementations exhibit limitations in accuracy, programming flexibility, inter-device communication, and centralized management. The goal of this project is to develop a "Smart Shabbat Clock" system that serves as a central control unit for scheduled, accurate, and reliable management of electrical loads, in accordance with halachic requirements.

The developed system includes a central control unit for managing a weekly schedule with one-minute resolution. It integrates timekeeping, a user interface for remote schedule configuration and management, and a local display for status indication. In addition, wireless communication was incorporated to enable control and synchronization with remote end-units. Load switching is performed quietly and reliably over time.

During system testing, accurate adherence to the configured schedule was demonstrated, including consecutive-minute ON/OFF operations according to the plan. The system showed stability under normal operating scenarios, retention of scheduling data after power outages, and a controlled transition between weekday and Shabbat modes. Additionally, the wireless communication between the central control unit and the end-units was found to operate consistently and reliably.

This project provides a significant technological and practical contribution by demonstrating a shift from a mechanical Shabbat timer to a centrally managed smart networked solution with improved programming flexibility and enhanced timing accuracy. Beyond Sabbath-oriented use, the system is also suitable for institutional and public applications requiring scheduled management of electrical loads. In this way, the work lays a foundation for developing smart, reliable, and accessible automation systems that integrate engineering and operational considerations with cultural and halachic constraints.

# 1. מבוא

ההתקדמות הטכנולוגית בעשורים האחרונים, ובפרט ההתקדמות בתחום מערכות הבקרה החכמה והאוטומציה הביתית, חוללה שינוי משמעותי שבו בני אדם מנהלים את סביבת המניה שלהם. מערכות מתקדמות מאפשרות שליטה, תזמון וautomotive באופן שבו צרכני שימוש מגוונים, תוך שימוש בברכרים מתקדמים, תקשורת אלחוטית ותוכנה מבוססת רשת. מערכות אלו תורמות לנוחות, לחיסכון באנרגיה ולניהול יעל יותר של משאבי החשמל. עם זאת, על אף ההתקדמות הטכנולוגית והשפעה הקיימת בשוק, קיימים קהלים ייחודיים שעוברים פתרונות אלה אינם מספקים מענה מלא, הן מבחינה תפקודית והן מבחינה תרבותית-הילכתית. אחד הקהלים המרכזיים הללו הוא ציבור שומרי השבת והחג.

משמעות שבת מציבה אתגר ייחודי בתחום האוטומציה הביתית. מחד גיסא, קיימן צורך ממשי בשליטה ובתפעול של מערכות חשמליות כגון תאורה, חימום ומיכנירים ביתיים, על מנת לאפשר שגרת חיים נוחה ובטוחה במהלך השבת. מאידך גיסא, כל פתרון טכנולוגי חייב לפעול בהתאם לכללי ההלכה, ללא התערבות אונושית בזמן השבת ולא יצירת מצבים העולים להוביל לחילול שבת בשוגג. מסיבה זו התפתחו לאורק השנים פתרונות ייעודיים, ובראשם שעוני שבת מכניים ודיגיטליים, אשר נעשו לאפשר תזמון אוטומטי של מערכות חשמל.

על אף תרומתם, פתרונות מסווגים אלו לוקים במוגבלות מהותית. שעוני שבת מכניים מוגבלים בzychoziyut תזמון גסה, לרובם במרוחקים של כ-15 דקות, ואינם מאפשרים קביעת לוח זמנים מדויק ומדויק. בנוסף, הם מוגבלים על רכיבים מכניים החשופים לשחיקה ולתקלות, ומהיבים כיוון פיזי ידני ללא אפשרות לתפעול מרוחק. כמו כן, פועלתם מתבססת על לוח זמנים יומי קבוע החוזר על עצמו, ללא אפשרות להבחנה בין ימות השבוע או להתאמאה לתרחישים משתנים. גם שעוני שבת דיגיטליים מוגבלים יותר, אף שהם מציעים שיפור מסוים בדיק ובנוחות ביחס לשעונים מכניים, לרובם יכולות עצמאיות ואינם מאפשרים בקרה מרכזית, תקשורת בין התקנים או ניהול מערכת של כל צרכני החשמל בבית. במרבית הדגים, התזמון מוגבל למרוחץ זמן קבועים, דבר שאינו מאפשר קביעת זמני הפעלה וכיבי מדויקים או גמישות מלאה בהתאם לוח הזמנים. בנוסף, מספר האירועים שנינן להגדיר מוגבל יחסית, ולעתים לוח הזמנים מוגבל על מחזור יומי של 24 שעות בלבד, ללא הבחנה בין ימות השבוע. شيئا' הגדרות מחייבות גישה פיזית להתקן וביצוע כיוון ידני מקומי, ללא אפשרות לניהול או עדכון מרוחק. כתוצאה לכך, המשמש נדרש לתוכנת כל התקן בנפרד ובאופן ידני, פועלה המגבירה את הסיכון לטיעויות, פוגעת בנוחות השימוש ו מגילה את יכולת הנהלה תרחישים מורכבים ודינמיים במערכת החשמל הביתית.

בעשור האחרון חלה חידרה של פתרונות אוטומציה כלליים לשוק הפרט, לרבות שעוניים ומפסקים חכמים ומערכות שליטה מרוחק, המציעים יכולות מתקדמות כגון תזמון דינמי וניהול נוח באמצעות משקע גרפתי. עם זאת, מערכות אלו אינן מתוכנות מლכתחילה מתוך ראייה הלכתית, ולעתים נשענות על תשתיות תקשורת, שירותים חיצוניים או מעורבות משתמש לצורך פעולה, תצורה ועדרון. תלוות זו אינה מתיישבת במלואה עם הצורך בפעולה אוטונומית ומוביקת במהלך השבת, ומדגישה את הפער הקים בין פתרונות אוטומציה כלליים לבין הדרישות הייחודיות של ציבור שומרי השבת, פער שהפרויקט הנוכחי מבקש לצמצם באמצעות פתרון ייעודי, גם אם אינו מבטל לחłówין את כל מקורות התלות החיצוניים.

על רקע זה, מטרת העבודה היא להציג פתרון טכנולוגי מתקדם לשימוש בשעון שבת, המבוסס על מעבר משעון שבת מכני מסורתי למערכת "שעון שבת חכם". במסגרת הפרויקט פותחה מערכת המאפשרת שליטה מוביקת בצריכני החשמל במהלך השבת באמצעות יחידת בקרה מרכזית אחת, המנהלת לוח זמנים אחד ומסונכרן לכל יחידות הקצה במערכת. מטרת הפרויקט הוגדרה כהתגברות על המוגבלות הקיימת במקרים אחרים המציגים כוון בשוק, ובפרט היעדר בקרה מרכזית, חוסר תקשורת בין התקנים וגמישות תכוניות מוגבלת. לשם כך, המערכת תוכננה כך שתאפשר תקשורת בין יחידות וניהול כולל של צרכני החשמל, במקרה תפעול מבודד ונפרד של כל התקן. בנוסף, המערכת תומכת במספר גדול של אירועים שבועיים ומצויה גמישות תכוניות גבוהה, ללא אילוצים קשיים על מבנה לוח הזמנים. לצורך הבחתת דיווק ואמינות, שולב במערכת מנגןן זמן אמת מדויק הפעול בzychoziyut של דקה, המאפשר תזמון מדויק של פעולות הפעלה והכיבוי ומצמצם את הצורך בכיוון ידני חזזר. כמו כן, המערכת מאפשרת תפעול מרוחק באמצעות משקע משתמש נוח, ללא צורך בגישה פיזית ליחידת השעון, תוך שימוש בזיכרון על פועלה אוטונומית מלאה במהלך השבת.

עם זאת, למערכת שפותחה קיימת תרומה רחבה יותר והוא עשויית לתת מענה גם לצרכים נוספים ב הציבור הכללי, מעבר להקשר הייעודי של שמירת שבת. היכולת הנהלה לוח זמנים מדויק ומרכזי עבור מספר רב של צרכני החשמל

הופכת את המערכת לRaltonetית במיוחד עבור מוסדות וארגוני הזקוקים לבקרה אמינה, עקבית ונוחה על תשתיות החשמל שלהם. במוסדות חינוך, לדוגמה, ניתן ליישם את המערכת לשיליטה מרכזית על תאורה, מיזוג וציוויל שמאלי בכיתות ובמרחבים מסווגים, תוך הגדרה מדוקית של זמני הדלקה וכיבוי בהתאם לשעות הפעילות, ימי לימודים וחופשות. ניהול זה מתבצע מרוחק ואינו מצריך הגעה פיזית של איש פעולה לצורך שינוי ההגדרות, ואף אפשר מתן הרשות גישה למספר גורמים מסוימים, כגון הנהלת המוסד או צוות אחזקה, בהתאם לצורכי הארגון.

באופן דומה, ניתן ליישם את המערכת בmgrשי ספורט, אולמות ואזרחי ציבור, שבהם נדרשת שליטה מpreciseת ומדוקית על מערכות תאורה וצרכני חשמל נוספים, בהתאם לוחות זמינים של פעילות. בקרה מרכזית ופעולת מרוחק מאפשרים תיאום בין אזרחים שונים במתיקן, הפעלה וכיבוי מסודרים של מערכות חשמל ללא תלות בהתקשרות ידנית שוטפת, ומצומם משמעותי של טעויות אנוש. בכך, המערכת מציעה פתרון תקין,יעיל ואמיש, המפחית עומס תפעולי, משפר את אמינות המערכת וטורם לניהול מיטבי של תשתיות חשמל בסביבות ציבוריות ומוסדיות.

לסיכום, פרויקט זה מציג מעבר מתפיסה מסורתית של שעון שבת מכני לפתרון חכם ומודרני, המשלב בקרה מרכזית, דיקוק בזמן, גמישות תכנונית ופתרונות גבואה למשתמש. בכך הוא תורם לפיתוח פתרון טכנולוגי מתקדם בעל ערך יישומי וחברתי, ומניח תשתית להרחבות עתידיות ולישומים נוספים בתחום הבקרה והאוטומציה הביתית.

## 2. רקע תיאורטי וסקירת ספרות

### 2.1 מוצריים קיימים בשוק

#### 2.1.1 שעוני שבת מכניים מסורתיים



איור 2.1: שעון שבת מכני [1]

בתחום זה של שליטה וזמן של מכשירי חשמל לבית קיימים מגוון מוצרים, אם כי לא כולם מותאמים ספציפית לשימוש בשבת. שעוני שבת מכניים מסורתיים (איור 2.1) מהווים את הפתרון הנפוץ ביותר לשימוש טימר חשמלי פשוט המתחבר בין שבת מכני הוא למשה טימר חשמלי פשוט המתחבר בין המכשיר לשקע החשמל, ובו דיסק עם זיזים או פינים המכונים להפעלה וכיבי בזמןים מסוימים לאורך היממה (24 שעות). המשטמש קובע את הזמן על ידי הזנת הפינים למכבב "דולק" או "כבו" בשעות הרצויות, והשען מפעיל או מפסיק את הזרם בהתאם. פתרון זה אמין וдол, ומשמש בבתיים רבים לשבת בתאורה או במכשירים חשמליים דוגמת פلاتת חימום לשבת באופן אוטומטי. עם זאת, הטימרים המכניים מוגבלים בבדיקה שלהם (בד"כ מרוחח תכונות של 15 או 30 דקות) ובגמישות – הם חוזרים על אותן לוח זמנים מדי יום ודורשים כוונון יידי חדש כאשר זמן כניסה/יציאה השבת משתנים בין עונות השנה.

#### 2.1.2 שעוני שבת דיגיטליים ייעודיים לשומר שבת

בשנים האחרונות פותחו ונמכרים בשוק מגוון שעוני שבת דיגיטליים המיועדים לשימוש בקרבת שומר שבת, במטרה לשלב נוחות טכנולוגית עם שמריה על כללי ההלכה. שעונים אלו מוחווים התפתחות מודרנית של שעוני השבת המכניים הוותיקים, ומציעים דיקון תזמון גובה יותר, משקל תכונות נוחים, ולעתים גם אינטגרציה עם יישומים סולוריים או מערכות בית חכם.

##### ZMAN Switch



איור 2.2: ZMAN Switch [2]

ZMAN Switch הוא שעון שבת דיגיטלי חכם שפותח במירוץ עבור צרכי שמירת שבת וחג (איור 2.2). בניגוד לטימרים סטנדרטיים שבהם משתמש נדרש ליצור זמני הפעלה ידנית מדי שבוע, השעון של חברת ZMAN Technologies כולל מיקרו-מחשבון לוח שנה עברי מובנה עד שנת 2050 [2]. המכשיר מגיע עם כל זמני כניסה ויציאה השבות והחגים (זמן הדלקת נרות וצאת הכוכבים) לכל מיקום גאוגרפי ב滁ון אמריקה, ובוצע התאמות אוטומטיות לשעון קיץ ולוח השנה העברי. בעת ההתקנה הראשונית מבוצעת הגדרה חד-פעמית של מיקום המשתמש והעדפותיו – למשל, האם לכבות לפני זמן "צאת שבת רגיל" או להמתין 72 דקות (שיטת רבונו там) לאחר השקיעה [2]. לאחר מכן, השעון מתזמן אוטומטית את זמני הדלקה והכיבוי בכל שבת, ללא צורך בכיוון שעוני שעון. מבטיח המכשיר תוארה מתזמנת ומדויקת לאורך כל השבת, ומונע טעויות אנוש כגון שכחה או כיוון לא נכון של השעון. מעבר לנוחות, יתרון חשוב הוא הימנעות מטעויות אנוש: בשימוש בטימר רגיל, המשתמש עשוי לשכוח לכוון מחדש או לשבש את הזמן, ואילו כאן מובטח שהאור יהיה במצב הרצוי

לאורך השבת יכולה לאו התעוררויות נוספת. בנוסף, לモץ זה קיימן מנגנון נעליה "יעודי למצב שבת, המונע שימוש במכשיר האור במהלך השבת ("Shabbos-proof deactivation")<sup>[2]</sup>. במקרה חירום רפואי ניתן להפעיל מנגנון עקיפה להשבת השיליטה הידנית. מערכת זו מספקת פתרון אוטומטי ומדויק, המאפשר את הצורך בהתקשרות שבועית עם טיימרים.

### שעון שבת דיגיטלי של חברת Av-Gad:



איור 2.3: שעון שבת עם אפליקציה – Av-Gad [3]

חברת Av-Gad הישראלית ייצרה טיימר שבת המתחבר לארון החשמל, המכונה "שעון שבת עם אפליקציה", (אייר 2.3) המבוסס על מסגר דיגיטלי מתוצרת Finder. בmoץ זה, תהליך התוכנות מתבצע באמצעות סמארטפון בתקשורת NFC: המשמש מקרוב את הטלפון למכשיר ו מעביר את תוכניות הפעולה. השעון מאפשר הגדרת עד 48 תוכניות הפעלה יומיות או שבועיות, ומצויד במסך LCD גראפי לחיפוי<sup>[3]</sup>. בנוסף, הוא כולל שינוי אוטומטי של זמנים בין שעון קיץ וחורף. עם זאת, קיימות מגבלות: מרוחוק התוכנות הקטן ביותר הוא 30 דקות<sup>[3]</sup>, מה שעלול להיות גם מדי עבור ישומים הדורשים דיקון גבוהה.

## 2.2 מגבלות המוצרים הקיימים

לאחר ניתוח המוצרים הקיימים בשוק, ניתן לאזחות מספר מגבלות מהותיות המשותפות לרבים מהם – מגבלות שהפרויקט הנוכחי נועד לתת להן מענה ישיר.

- היעדר תקשורת בין מכשירים ויחידת בקרה מרכזית:** מרבית שעוני השבת והמתגים הקיימים פועלים כיחידות עצמאיות, ללא יכולת תקשורת או סync'ון ביניהן. כל טימר מכני או דיגיטלי שלוט בדרך כלל על מעגל חשמלי יחיד בלבד, ללא אינטראקציה עם טימרים אחרים במערכת. מצב זה מוביל לכך שככל התקן מתוכנת ומופעל באופן נפרד, ללא סync'ון עם התקנים אחרים ולא אפשרות לניהול כולל של פעולות הבית. בהיעדר ייחידת בקרה מרכזית המחזקיה לחץ זמן אחד, לא ניתן להנלן תרחישים חכמים או לתאם פעולות בין מספר יחידות קצה באופן עקבי. מצב זה מקשה על ניהול משולב של מערכות הבית. מוגבל זו מוגישה את הצורך ביחידת בקרה מרכזית אחת – מעין "שעון ביתי חכם" – המאפשרת ניהול מרכז של לחץ הזמן, sync'ון בזמן אמת ופיקוח כולל על רכיבי הקצה.
- חו索 גמישות תכוניות והגבלות במספר וארגון האירועים:** פתרונות קיימים רבים מוגבלים את המשימוש במספר תכוניות הפעלה ובאופן הגדרתן וארגוני. מערכות בסיסיות מאפשרות תכונות מצומצם או מבוססות תכניות קבועות מראש, דבר המקשה על התאמה למצבים חריגים או דינמיים. טימרים דיגיטליים מתקדמים יותר, כדוגמת מוצרי Gad-Av, מציעים עד 48 אירועים שבועיים אפשריים[3], אך גם הם פועלים לפי תכניות קבועות (למשל חלופה יומית או שבועית קבועה). כתוצאה לכך, הם אינם מאפשרים יצירת תרחישים מורכבים או מותניים – כגון דילוג אוטומטי על תוכנית מסוימת במרקחה של חג באמצעות השבע. בנוסף, שינוי תדייר בלוחות הזמן דורש כניסה למשק התכונות בכל פעם מחדש, ופוגע בנוחות וביעילות הפעול.
- דיקן מוגבל בתזמן ולוחות זמנים לא-динמיים:** רבים מהטימרים הביתיים אינם מאפשרים קביעת זמני הפעלה מדויקים ברזולוציה של דקה. בשעונים מכניים, למשל, רזולוציית התכנון היא של 15–30 דקות בלבד. גם טימרים דיגיטליים, כגון טימר NFC של ZMAN Switch, מציעים מרוחק תכונות מינימלי של 30 דקות[3], ואינם מתעדכנים אוטומטית בהתאם לעונת השנה. שינוי השकיעה והזריחה מחיבבים את המשימוש לכון חדש את הטימר כמעט מדי שבוע, תהילך יידי המעוד לטעויות ולשכחה. אף שחלק מהחברות, כדוגמת NCF, שילבוローוח שנה עברית מובנה לצורך sync'ון אוטומטי[2], רוב הפתרונות הקיימים אינם כוללים פונקציונליות זו. בנוסף, טימרים رجالים אינם מתחשבים במעבר בין שעון קיץ וחורף או בערבי חג החלים באמצעות השבע. כתוצאה לכך, חוות הדינמיות והדיקן עלול לגרום למצבים לא רצויים – כגון כיבוי מוקדם מדי או השארת אור דולק לשעות ארוכות ללא צורך.
- תלות בממשק חיצוני וחוסר נגישות מקומית:** במקרים מסוימים, כמו במקרה של Gad-Av, נדרש הצמדת סמארטפון למכשיר תקשורת NFC בכל שינוי תצורה או עדכון תוכנית. גישה זו מוגבלת את הגמישות בתזמן ומהיבת נוכחות פיזית של המשתמש בסמוך לשעון השבת. מצב זה מגדיל את הצורך במערכות בעלות ממושך מקומי עצמאי ויכולת פעולה רציפה, שאינן תלויות בהתקן חיצוני לצורך תפקודו התקין.
- לסיום, מן הסקירה עולה כי פתרונות מסוימים למתיוג ותזמן קיימים בשוק, אר רביהם פועלים כיחידה בודדת, בעלי גמישות תכונית מוגבלת, ולעתים אינם תומכים בלוחות זמנים דינמיים או בממשק מקומי נגיש. בהתאם לכך, הפרויקט הנוכחי מציג ייחידת בקרה מרכזית מבוססת ESP32 המאפשרת הגדרת לחץ זמן שבועי, תצוגה וממשק Web מקומי, וכן העברת פקודות ליחידות קצה בתקשורת RF. שילוב זה nodus לספק ניהול מרכז, דיקן תזמן ונוחות תפעולית – בפרט עבור תרחישים שימוש של שגרה/شبת המוגדרים מראש.

## 2.3 מטרות ויעדי הפרויקט

הניתוח שפותח למטרת הפתרונות הקיימים בתחום תזמון ובקרה לצרכי חשמל לשבת מצבי על היעדר פתרון מרכז המספק מענה כולל לדרישות התפקודיות וההLECתיות בלבד. הפתרונות הקיימים, על אף התקדמותם, מאופיינים במוגבלות כגון היעדר תקשורת בין התקנים, דיקט תזמון מוגבל, צורך בכונן ידני תקופתי, וממשקים שאינם מותאמים בצורה מספקת למשתמש שומר שבת.

על בסיס פערים אלו, מטרת הפרויקט המרכזית הוגדרה כדלקמן:

**פיתוח מערכת "שעון שבת חכם" שתאפשר שליטה מבוקרת לצרכי חשמל לשבת, בעלת גמישות תכניתית גבוהה, תזמון מדויק ותקשורת בין יחידות – תוך שמירה על התאמה מלאה להלכה.**

לשםימוש המטרת המרכזית, הוגדרו יעדי הפיתוח הבאים, המהווים את מסגרת העבודה של הפרויקט ומכוונים למתן מענה שיטתי למוגבלות שנסקרו:

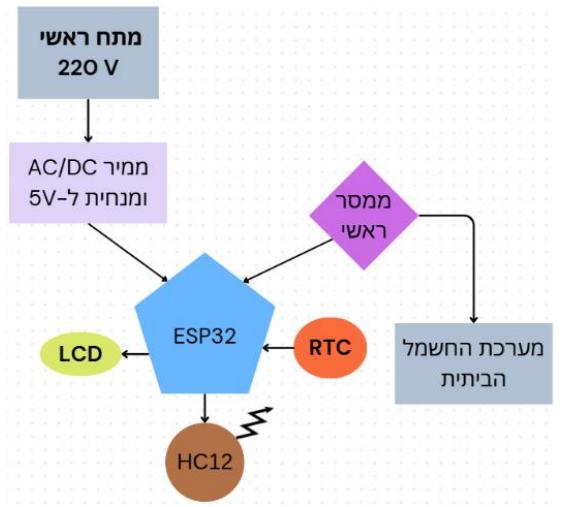
- **בקרה מרכזית ותקשורת בין יחידות:** יצירת ארכיטקטורה שבה יחידת בקרה מרכזית מתקשרת ומסynchronizes יחידות קצה מרוחקות, ובכך מפעילה ניהול מערכת כולל במקום פתרונות עצמאיים.
- **gamishot Tkanotit Rchba:** תמייהה במספר גדול של אירועים שבועיים, עם רזרולציית זמן גבוהה וגמישות מלאה בתבניות התזמון, ללא אילוצים קשיים.
- **תזמון מדויק המבוסס זמן-אמת:** שימוש במנגנון שמירת זמן אמת המאפשר תזמון מדויק ברזרולציה דקה, מפחית את הצורך בכונן ידני, ומקל על עדכון לוחות זמינים לאורך השנה.
- **התאמה הלכתית מלאה:** יצירת מצב פעולה ייעודי המבטיח שהמערכת تعمل באופן אוטונומי ובلتוי תלויה במערכות המשמש במהלך השבת, בהתאם לעקרונות ההלכתיים המקובלים.
- **גישה וחוויות משתמש משופרת:** פיתוח ממשק תכנון וניהול נוח ואינטואיטיבי, המאפשר פעולה מרוחק ללא צורך באמצעות תכנות ייעודים או גישה פיזית קבועה למכשיר.

יעדים אלה מגדירים את הדרישות הפונקציונליות המרכזיות של שעון שבת, ויהוו בסיס להערכת עמידת הפרויקט במטרותיו בפרק הדין והמסקנות.

### 3. פיתוח ושיטות

פרק זה מפרט את תהליך התכנון ההנדסי ואת שיטות המימוש שנבחרו עבור מערכת "שעון שבת חכם". השעון תוכנן כיחידת בקרה מרכזית היוכלה לתקשר עם יחידות קצה חכמות (כגון מנג ששבת חכם). התכנון ההנדסי בוצע מתוך מחויבות לעמוד בכל אחד מייעדי הפיתוח שהוגדרו בפרק "רקע תיאורטי ווקירת ספרות", סעיף 3 (מטרות ויעדי הפרויקט). מטרתו של פרק זה היא להציג את הפתרונות המבניים והטכנולוגיים שנבחרו, החל מארכיטקטורת המערכת ועד מימוש מוצבי הפעולה הייעודיים.

#### 3.1 דיאגרמת בלוקים

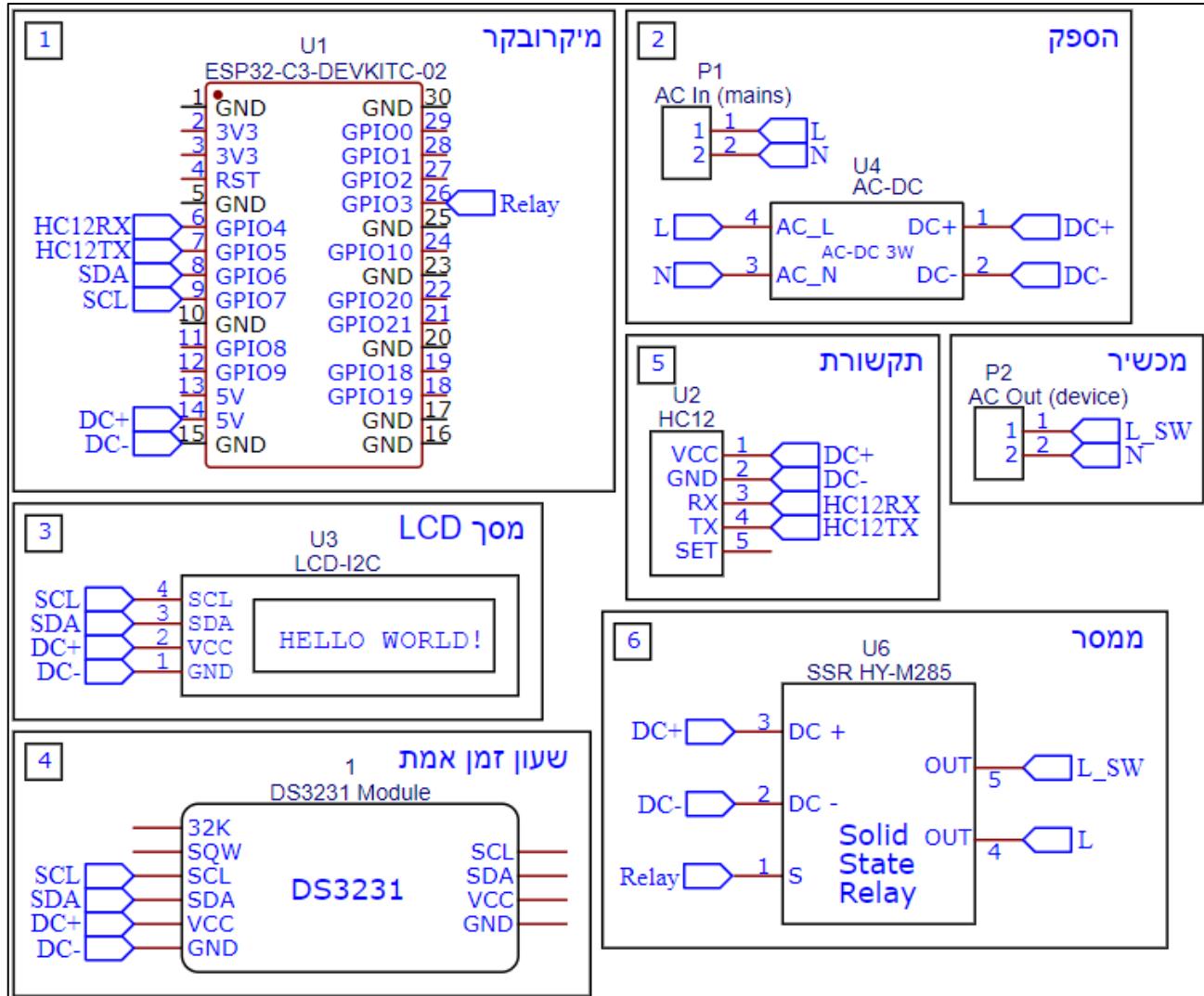


איור 3.1: דיאגרמת בלוקים של מערכת "שעון שבת חכם"

### 3.2 שרטוט מערכת "שעון שבת חכם"

איור 3.2 מציג את חיבוריו החומרה של מערכת "שעון שבת חכם" ברמת רכיבים. לצורך קריית השרטוט חולק לשישה בלוקים: בקר (1), ספק (2), תצוגת LCD (3), שעון זמן (4), מודול תקשורת HC-12 (5), מודול SSR (6) וRTC, LCD ו-LCD (7). האותות המרכזיות במערכת הם קווי  $\text{I}^2\text{C}$  (5), מושתפים LCD (6) והתקשורת בין מודול תקשורת HC-12 (5) לモודול SSR (6). מושתף התקשורת בין מודול SSR (6) לモודול RTC, LCD ו-LCD (7) הוא מושתף I<sup>2</sup>C (5).

בנוסף, חיבורו להספק כוללים כניסה מתח רשת (N/L), מסילת DC להזנת רכיבי הבקרה, יציאה פазה מנותגת (L\_SW) להזנת הרצן.



איור 3.2: שרטוט מערכת "שעון שבת חכם"

### 3.3 תיאור חשמלי ומיפוי חיבורים

לאחר הצגת השירות, מובא כאן תיאור חשמלי משלים המפרט את החיבורים בפועל: מהין מתקובל כל מתח וכל אות, لأنם מתחברים, ומה תפקידם במערכת. פירוט זה נועד לאפשר מעבר חד בין השירות לבין ההייוט והמיושם בפועל.

#### 3.3.1 רשתות מתח ואותות מרכיבים

טבלה 3.1 מציגה את רשתות המתח והאותות העיקריים במערכת. לכל רשת מצוינים סוג הרשת (מתוח ורשת טהלה DC, או רשת תקשורת/בקירה), מקור הזרנה/האות והרכיבים אליו הם התחוברים. ריכוז זה מאפשר להבין את מסלולי הזרנה, את קווי התקשרות ( $I^2C$  ו- $UART$ ), ואת מסלול מיתוג הפעזה לעומם באמצעות SSR.

הערות	CRCנים	מקור	רמת מתח / סוג	Net / Signal
פaza נכנסת למערכת	AC-DC (AC_L), SSR (AC IN)	Mains (P1-1)	(פaza) 230VAC	L
afil משותף (לא ממוגן)	AC-DC (AC_N), Device (P2-2)	Mains (P1-2)	(afil) 230VAC	N
מסילת הזרנה	ESP32-C3 (5V), LCD-I2C (VCC), DS3231 Module (VCC), HC-12 (VCC), SSR (DC+)	AC-DC (DC+)	+5VDC (ופק)	DC+
אדמה משותפת	ESP32-C3 (GND), LCD-I2C (GND), DS3231 Module (GND), HC-12 (GND), SSR (DC-)	AC-DC (DC-)	0V (GND)	DC-
פaza לעומם SSR לאחר מיתוג	Device (P2-1)	SSR (AC OUT)	230VAC (קי לזרקן)	L_SW
LCD Bus I <sup>2</sup> C משותף	LCD-I2C (SDA), DS3231 Module (SDA)	ESP32-C3 (GPIO8)	I2C (TTL 0/3.3V)	SDA
LCD Bus I <sup>2</sup> C משותף	LCD-I2C (SCL), DS3231 Module (SCL)	ESP32-C3 (GPIO9)	I2C (TTL 0/3.3V)	SCL
TX→RX	ESP32-C3 (RX)	HC-12 (TX)	UART (TTL 0/3.3V)	HC12RX
TX→RX	HC-12 (RX)	ESP32-C3 (TX)	UART (TTL 0/3.3V)	HC12TX
אות בקרה למיתוג	SSR (CTRL)	ESP32-C3 (GPIO26)	Digital (0/3.3V)	RELAY

טבלה 3.1: רשתות מתח ואותות מרכיבים

### 3.3.2 מיפוי פיני הbakr (ESP32-C3) בשימוש

טבלה 3.2 מפרטת את פיני ה-GPIO בשימוש במערכת ואת תפקידם. הפירוט כולל את קווי ה-HC-12 המשותפים לתצוגת ה-LCD ולמודול ה-RTC, את קווי ה-UART למודול HC-12, ואת יציאת הבקרה לממסר ה-SSR. מיפוי זה מקשר באופן ישיר בין השרטוט לבין מימוש החומרה והתוכנה.

핀 במיקרו (שם / מספר)	Net	מחובר ל...	תפקיד	הערות
5V	DC+	AC-DC (DC+)	הזנת לוח	כניסת הזרנה ללוח הפעיטה
GND	DC-	AC-DC (DC-)	אדמה	אדמה משותפת לכל המערכת
GPIO8	SDA	LCD-I2C (SDA), DS3231 Module (SDA)	I <sup>2</sup> C – נתונים	Bus SDA (SDA)
GPIO9	SCL	LCD-I2C (SCL), DS3231 Module (SCL)	I <sup>2</sup> C – שעון	Bus SCL (SCL)
GPIO6	HC12RX	HC-12 (TX)	UART RX	TX→RX
GPIO7	HC12TX	HC-12 (RX)	UART TX	TX→RX
GPIO26	RELAY	SSR (CTRL)	יציאה דיגיטלית	בקרה על מיתוג SSR-ה

טבלה 3.2: פינים בשימוש ESP32-C3

### 3.3.3 חיבורים חיצוניים (מחברים)

במערכת קיימים שני מחברים חיצוניים: Mains להזנת המערכת ממתח הרשת, ו-device להזנת הרצף. במחבר Mains מתוקבים מוליכי הפאזה (L) והאפס (N) המשמשים להזנת ספק ה-AC-DC-A และ להנחת מיתוג העומס. במחבר Device מועבר האפס (N) ישירות לצרcker, בעוד שהפאזה לצרcker (SW\_L) מתknת לאחר מיתוג באמצעות ה-SSR. חלקה זו מאפשרת שליטה בעומס במתוג הפאזה, תוך שימוש בלבד על חיבור אפס רציף לצרcker.

מחבר	טרמינל	רשות	לאן הולך פיזית	תפקיד
Mains (P1)	1	L	פאזה מהרשת	הזרנת המערכת
Mains (P1)	2	N	אפס מהרשת	הזרנת המערכת
Device (P2)	1	L_SW	פאזה לעומס (אחרי SSR)	הזרנת הרצף
Device (P2)	2	N	אפס לעומס	אפס לא מבוקר

טבלה 3.3: חיבורים חיצוניים

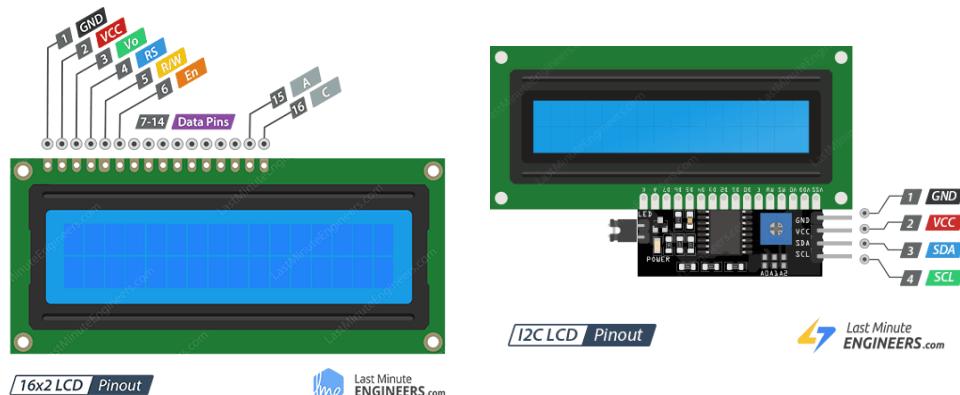
### 3.3.4 פרוטוקול תקשורת

#### 3.3.4.1 פרוטוקול C<sup>2</sup>

ממשק C<sup>2</sup> (Inter-Integrated Circuit) הוא ממשק תקשורת טורי דו-חוטי המשמש להעברת מידע בין התקנים דיגיטליים על גבי שני קוים משותפים בלבד: SDA (נתונים) ו-SCL (שעון). במשק זה יש בדרך כלל התקן אחד המשמש כ-Master ויזם את התקשרותו, והתקנים נוספים (Slaves) המזוהים לפי כתובתם. ה-*Master* מתייחס

תקשרות בתנאי התחלה (START), שולח את כתובתו ה-*slave* וכיוון הפעולה (קריאה/כתיבה), מעביר נתונים בבייטים אשר לאחר כל בייט מתקיים ACK לאישור קבלה, ובסיום מסים בתנאי סיום (STOP) (איור 3.3).

במערכת "שעון שבת חכם" ה-*C3*-C3 ESP32 משמש כ-*Master* ומפעיל את זוג קווי התקשרות המשותף של C<sup>2</sup>, המחבר במקביל למודול ה-*RTC* (DS3231) ולモודול LCD (LCD). מתקשר ישירות במשק C<sup>2</sup>, בעוד שמודול LCD-I2C כולל מודול שמרתגם את פקודות ה-C<sup>2</sup> להפעלה של בקר LCD במשק מיקבלי פנימי. בחירה זו מאפשרת לחבר גם RTC וגם תצוגה על אותם שני קוים, ובמקביל מצמצמת את חיבור התצוגה במספר גדול של קווי נתונים ובקשה לשני קוים בלבד (בנוסף להזנה) (איור 3.4), כך שהחומר פשוט יותר ונשמרים פנוי למשימות נוספות ולהרחבות עתידיות.



איור 3.4: השוואת חיבור LCD עם (מימין) ובלי (משמאלו) בהתאם ל-C<sup>2</sup> [4-5]

#### 3.3.4.2 פרוטוקול UART

ממשק UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) הוא ממשק תקשורת טורי אסינכראוני להעברת נתונים בין שני התקנים באמצעות שני קוים: TX (шиידור) ו-RX (קליטה), ובתוספת אדמה משותפת (GND). מאחר שאין קי שuron ייעודי, שני הצדדים חייבים להיות מוגדרים לאותו Baud Rate (bps) – כדי שהדגימה של הביטים תבוצע בתזמן נICON. הנתונים נשלחים במצבה הכלול ביט התחלה (Start), רצף ביטי נתונים (בדרך כלל 8), ולעתים ביט זוגיות (Parity), ולבסוף ביטי סיום (Stop).

איור 3.5: חיבור UART בין שני התקנים [6]

במערכת שעון השבת, ה-*C3*-C3 ESP32 מתקשר עם מודול HC-12 UART. מודול HC-12 מתאים ל-*UART אלחוטי*, כך שהמידע שנשלח מהAKER ב-*UART* משודר בקשר RF ומתקבל בצד השני כזרם שקו. בחירה זו מספקת ערך מעשי בפרויקט: תקשורת נקודתית פשוטה ליישום בין יחידת הקצה, ללא תלות בתשתיות Wi-Fi ביתית ולא צורך בפרוטוקול רשות מושכב, תוך שמירה על חיבור חומרה מינימלי של שני קווי אות בלבד.

## 3.4 רכיבים

### 3.4.1 ESP32-C3 – מיקרו-בקר חכם עם תקשורת Wi-Fi ו-BLUETOOTH

#### תיאור כללי:

ה-ESP32-C3 הוא מיקרו-בקר מתקדם מבית Espressif, המבוסס על ארכיטקטורת 32bit RISC-V ומשלב ליבה אחת (Single-Core). הרכיב כולל יחידות תקשורת אלחוטיות: Wi-Fi ו-BLUETOOTH. הוא מציע שילוב AMAZON בין ביצועים מספקים, צריכת הספק נמוכה יחסית, ופונקציונליות מלאה. ה-C3 כולל גם יכולות אבטחה מתקדמות חיומיות, כגון Flash Encryption ו-Secure Boot.

#### עקרון פעולה:

הברker פועל כיחידה עיבוד מרכזית. התוכנה מנצלת את הקישוריות האלחוטית המובנית לצורכי סנכרון בזמן אינטראנטי (NTP), והרצה שרת אינטרנט מקומי (web server) המאפשר גישה למשתמש (UI). הליבה היחידה מנהלת את לוגיקת לוח הזמן, את שמירת הנתונים בזיכרון לא-דינמי ואת התקשרות עם רכיבים חיצוניים באמצעות פרוטוקולים דוגמת UART (מודול HC-12) ו-I<sup>2</sup>C (LC-RTC וلتצוגה).

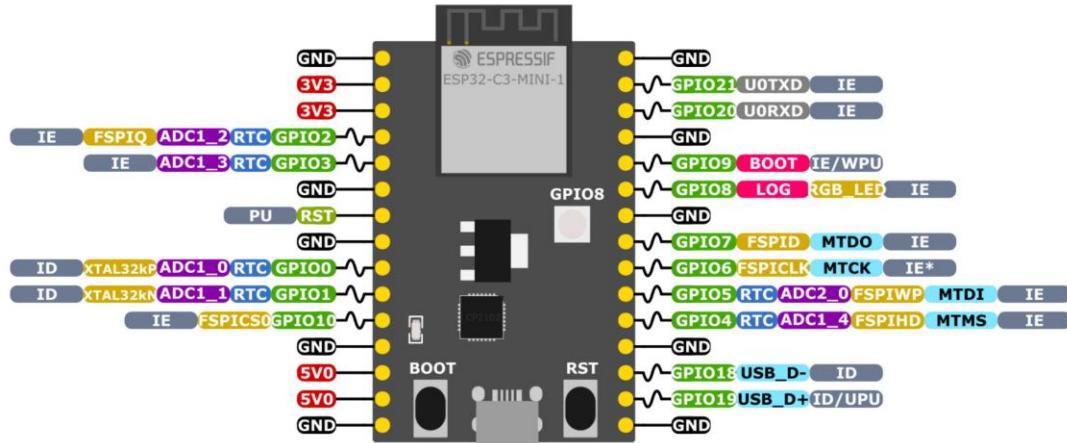
#### השימוש בפרויקט שלנו:

ה-ESP32-C3 משמש כיחידה הבקרה המרכזית. הוא אחראי על ניהול לוח הזמן להפעלה וכיבוי של הממסרים, תקשורת עם מודול RTC לשימירה על דיקז זמן, שליטה במסך LCD, ותיאום עם מודול HC-12 לזרור שליחת פקודות ובקורת מצב ייחודי קצה. בנוסף, ה-C3 משק אינטרנט לשילטה נוכחית של המשתמש.

#### תיאור פינים עיקריים (לפי גרסת DevKitM):

- **3.3V** – יציאת מתח 3.3V.
- **GND** – הארקה.
- **EN** – איפוא/הפעלה חדשה של הבקר.
- **GPIO0 – GPIO21** – פינים רב-שימושיים לקלט/פלט (כולל תמיכה ב-M-PWM, SPI, USART, I<sup>2</sup>C).
- **USB** – משק טעינה ותוכנות (דרך USB-to-UART).
- **5V** – כניסה מתח חיצונית (מומנו פנימית ל-3.3V).

# ESP32-C3-DevKitM-1



## ESP32-C3 Specs

32-bit RISC-V single-core @160MHz  
 Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n 2.4GHz  
 Bluetooth LE 5  
 400 KB SRAM (16 KB for cache)  
 384 KB ROM  
 22 GPIOs, 3x SPI, 2x UART, I2C,  
 I2S, RMT, LED PWM, USB Serial/JTAG,  
 GDMA, TWAI®, 12-bit ADC

**GPIOX**: PWM Capable Pin  
**GPIOX**: GPIO Input and Output  
**JTAG/USB**: JTAG for Debugging and USB  
**FLASH**: External Flash Memory (SPI)  
**ADCx\_CH**: Analog-to-Digital Converter  
**OTHER**: Other Related Functions  
**SERIAL**: Serial for Debug/Programming  
**STRAP**: Strapping Pin Functions

**RTC**: RTC Power Domain (VDD3P3\_RTC)  
**GND**: Ground  
**PWD**: Power Rails (3V3 and 5V)

**GPIO STATE:**  
**WPU:** USB Weak Pull-up  
**WPU:** Weak Pull-up (Internal)  
**WPD:** Weak Pull-down (Internal)  
**WPD:** Weak Pull-down (Internal)  
**PU:** Pull-up (External)  
**IE:** Input Enable (After Reset)  
**ID:** Input Disabled (After Reset)  
**OE:** Output Enable (After Reset)  
**OD:** Output Disabled (After Reset)

[7] איור 3.4: מפת פינים – ESP32-C3 DevKit

### 3.4.2 HC-12 – מודול תקשורת אלחוטית לטווח אורך

#### תיאור כללי:

ה-HC-12 הוא מודול תקשורת אלחוטית חזק ואמין העובד בתדר 433MHz. המודול מאפשר תקשורת דו-כיוונית בין שני מיקרו-ריבקרים באמצעות משק (Serial) UART. הוא מבוסס על שבב SI4463 של חברת Silicon Labs, ומיועד להעברת נתונים למרחקים של עד 1 ק"מ בקו ראייה, בהתאם לעוצמת השידור והאנטנה.

#### עקרון פעולה:

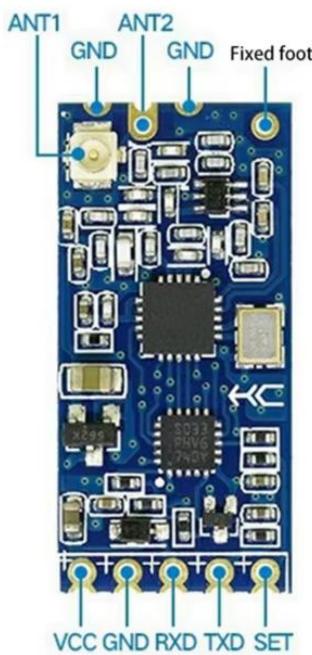
המודול מתקיך כמוין "cablシリיאלי אלחוטי" – כל מידע הנשלח דרך UART מצד אחד מתקבל אוטומטית במודול השני, ללא צורך בפרוטוקול תקשורת נוסף. ניתן להגדיר את המודול למגוון מצבים באמצעות פקודות AT, כגון מהירות שידור (Baud Rate), עוצמת שידור וערוץ עבודה (תדר).

#### השימוש בפרויקט שלנו:

מודול HC-12 מושם לתקשורת בין "שעון שבת חכם" לבין ייחדות הקצה. בקר השעון משתמש כיחידה בקרה מרכזית, ושולח באמצעות HC-12 פקודות ("shabbat" או "week") לברcker ייחדות הקצה, אשר מגיב בהתאם ומפעיל את מסרינו. באופן זה מתאפשר סyncron בין שני המכשירים גם ללא חיבור רשת אלחוטית מקומית.

#### תיאור פינים עיקריים:

- **VCC** – הזרנת מתח פעולה (3.2V-5V).
- **GND** – האركה.
- **TXD** – פלטシリיאלי (מחבר ל-RX של המיקרו-ברקר).
- **RXD** – קלטシリיאלי (מחבר ל-TX של המיקרו-ברקר).
- **SET** – כניסה לתוכנות באמצעות פקודות AT (כאר נמשך ל-LOW).



[8] HC-12: מודול 3.4 איור

### 3.4.3 מודול RTC מבואו (RTC IC) DS3231

#### תיאור כללי:

ה-DS3231 הוא רכיב שעון זמן אמת (RTC) מדויק ואמין, היכול מתנד פנימי מיצב טמפרטורה (TCXO) וחישן טמפרטורה לתיקון סטיות תדר. בפרויקט נעשה שימוש במודול RTC היכול את רכיב ה-DS3231 ייחד עם רכיבי עזר (כגון תושבת סוללה ורכיבי תמייה), ומאפשר שמירה על שעון ותאריך גם בזמן הפסקת מתח באמצעות סוללה גיבוי.

#### עקרון פעולה:

רכיב ה-DS3231 שומר על זמן אמת באופן עצמאי ומספק נתונים תאריך/שעה דרך דרכ ממשק I<sup>2</sup>C. בעת הפסקת מתח ראשי המודול עובר אוטומטית להזנה מסוללת הגיבוי וממשך לפעול ללא איבוד מידע. המיקרו-בקר קורא את נתונים הזמן מה-RTC לפי דרישת, ויכול לעדכן אותו בעת סכירת זמן.

#### השימוש בפרויקט שלנו:

מודול ה-RTC המבואו DS3231 משמש כמקור זמן יציב ללוח הזמנים של ה"שעון שבת חכם". הוא מאפשר שמירה על זמן מדויק גם לאחר הפסקות חשמל, ובכך מבטיח שתזמון פועלם הממשר יבצע בשעות שנקבעו. בנוסף, בתאול ה-RTC נקרא הזמן מה-RTC ומשמש כבסיס לשעון המערכת, ובמקרה שקיים קישוריות רשות מתבצע סyncron מול NTP והוא RTC מटעדן בהתאם.

#### תיאור פינים עיקריים:

- **VCC** – הזרת מתח פעולה (3.2V-5V).
- **GND** – הארקה.
- **SDA** – קו נתונים לתקשורת I<sup>2</sup>C.
- **SCL** – קו שעון לתקשורת I<sup>2</sup>C.



איור 6: מודול RTC DS3231 [10]

איור 5: תצורת פינים של DS3231 [9]

### 3.4.4 LCD 16x2 עם ממשק $\text{I}^2\text{C}$

#### תיאור כללי:

ה-LCD בגודל 2x16 הוא תצוגה אלפאנומרייט סטנדרטית המבוססת על בקר HD44780 של חברת Hitachi. התצוגה כוללת שתי שורות, כל אחת בעלת 16 תוים, וכל TWO מרכיב מ-40 פיקסלים (5x8). באמצעות ממיר ממشك (expander) מדגם PCF8574, התצוגה מקבלת תקשורת דרך ממشك  $\text{I}^2\text{C}$  במקום שימוש ב-8 קווים נטוניים ישירים. ובכך מצמצמת משמעותית את מספר הפינים הדרושים מהמיקו-בקר.

#### עקרון פעולה:

בקר ה-HD44780 מנהל את כל פעולות התצוגה הפנימית: כתיבת תוים, שליטה בתאורה אחורית, היזמת סמן, והציגת טקסט בשתי השורות. המודול מקבל פקודות ונתונים מהמיקו-בקר דרך ממشك  $\text{I}^2\text{C}$  אשר מתורגם לאוטות לוגיים מתאימים עבור בקר-LCD. בדרך זו נדרש רק קו נתונים אחד (SDA) וקו שעון אחד (SCL), בנוסף למתחה והארקה.

#### השימוש בפרויקט שלנו:

תצוגת LCD משמשת להציג מידע בזמן אמיתי למשתמש – שעה, מצב שבת/שבוע, מצב רשות Wi-Fi ומצב הממסר. התצוגה מאפשרת חיבור ברור ונוח על מנת המערכת בכל רגע, ומהווה ממشك משתמש מרכזי לצד השליטה דרך הממשק האינטרנט.

#### תיאור פינים עיקריים:

- **VCC** – הזרנת מתח 5V.
- **GND** – הארקה.
- **SDA** – קו נתונים לתקשורת  $\text{I}^2\text{C}$  (מחבר ל-SDA של ESP32).
- **SCL** – קו שעון לתקשורת  $\text{I}^2\text{C}$  (מחבר ל-SCL של ESP32).



[11] תצוגת LCD עם ממشك  $\text{I}^2\text{C}$

### 3.4.5 – ממסר מצב מזקק למיתוג שקט ומהיר – Solid-State Relay (SSR)

#### תיאור כללי:

מסר מצב-מזקק (Solid-State Relay) הוא התקן אלקטרוני המאפשר מיתוג צרכני חשמל ללא חלקים מכניים. בנויגוד למסר אלקטרוני סגסוגת רגיל, שבו מגעים נסגרים ונפתחים פיזית, ב-SSR פועלות המיתוג מתבצעת באמצעות רכיבים מוליכים-למחצה כגון טריאק או טרנזיסטורים. היתרון המרכזי הוא פעולה שקטה לחלוין, מהירות מיתוג גבוהה מאוד, אורך חיים ארוך במילוד ואמינות גבוהה תחת עומס.

#### עקרון פעולה:

במסר מצב-מזקק (SSR) למתח AC, המיתוג מתבצע אלקטרוני. כאשר המיקרו-בקר שלוח אות DC, הוא מפעיל מבודד אופטי (Opto-Triac Driver), אשר בתווך מפעיל Triac בצד העומס וմביטה בצד גלוני מלא בין מעגל הבקרה (DC) לצד העומס (AC). ה-Triac משנה את מצב ההולכה שלו בצורה אלקטטרונית לחלוין ולא תנווה פיזית. במסרים אלו משולבת לרוב פונקציית Zero-Cross, המפעילה את ה-Triac רק כאשר גל ה-AC עבר בנקודות האפס. מנגן זו מפחית רעשאים אלקטرومגנטיים (EMI) ומצמצם עומסי התנועה. באופן זה, המערכת משיגת מיתוג שקט לחלוין, אמין, ובעל אורך חיים גבוה במילוד.

#### השימוש בפרויקט שלנו:

ה-SSR משמש למיתוג צרכן החשמל הנשלט על ידי המערכת, ומחליף את פועלות המסר המכני במקומות שבהם נדרש מיתוג שקט, מהיר ואמין לאורך זמן.

#### תיאור פינים עיקריים:

- **DC+DC** – כניסה למתח (בדרך כלל DC 3-32V).
- **CH1** – כניסה שליטה מצד המיקרו-בקר.
- **AC Load** – יציאה המתח המחוורת לצרכן החשמל (בדרך כלל נקודות L+N).



איור 3.8: ממסר מצב מזקק למיתוג עומס AC [12]

## 3.4.6 AC-DC Converter – ממיר מתח לרכיבי בקרה

### תיאור כללי:

הממיר ה-AC-DC משמש להמרת מתח הרשת (230V AC) למתח ישר נמוך (בדרך כלל DC 5V או 3.3V DC) המתאים להזנת המיקרו-בקר ושרכבי הבקרה במערכת. מדובר ברכיב קומפקטי ואמין הכלול מעגל יישור, סינון ויצוב מתח, ומאפשר חיבור ישיר למתח הרשת תוך שמירה על בידוד חשמלי מלא.

### עקרון פעולה:

הממיר מקבל את המתח החילופין מרשת החשמל, מיישר אותו באמצעות גשר דיודות, מסנן אותו ב濾רים וממיר אותו למתח ישר יציב באמצעות ממיר ממוגן פנימי (Switching Regulator). הממיר כולל בידוד גלוני בין כניסה הרטת החשמל, תער שמירה על בטיחות ובידוד מלא. כר נשמרת אספקת מתח יציבה לכל הרכיבים.

### השימוש בפרויקט שלנו:

הממיר משמש להזנת ESP32 וככל שאר רכבי הבקרה במתח DC 5V. הוא מאפשר חיבור ישיר של המערכת לרשת החשמל, תער שמירה על בטיחות ובידוד מלא. כר נשמרת אספקת מתח יציבה לכל הרכיבים.

### תיאור חיבורים עיקריים:

- **AC IN (L/N)** – כניסה מתח רשת AC 230V (פאזה ואפס).
- **(+) DC OUT** – יציאה מתח ישר DC 5V.
- **(-) DC OUT** – הארקט יציאה.



איור 9: ממיר 5V [13]

### 3.4.7 הצדקה בחירות רכיבי חומרה מרכזים

בחירות רכיבי החומרה לפרויקט "שעון שבת חכם" נעשתה מתוך איזון בין דרישות ליבת פונקציונליות – תזמון מדויק, קישוריות אמינה ויכולת ניהול משקל אינטראקטיבי – לבין שיקול אמינות, זמינות, עלות ופתרונות הרחבה ליחידות קצה נוספת. תוכנן המערכת נשען על ארכיטקטורה היררכית, שבה יחידת שעון מרכזית מבצעת את עיקר הלוגיקה והבקאה, ומולה פועלות יחידות קצה פשוטות יותר, הנשלטות מרוחק.

#### 1. מיקוד-בקרים: ESP32-C3

ארכיטקטורת המערכת מتبססת על הפרדה בין בקר מרכזי (יחידת השעון) לבין יחידות קצה מבוקرات, כך שעומם העיבוד, ניהול הזמן, התקשרות והרצת ממש משתמשים מרכזים ביחידה המרכזית.

##### ESP32-C3 – יחידת הבקרה המרכזית:

בשלב התכנון הראשוני נסקלה האפשרות למשתמש את יחידת השעון באמצעות בקר SoC Arduino (כגון ATmega328P), בשל פשוטותו ומספר קווי ה-I/O הזרים. עם זאת, במהלך התקדמות הפרויקט התברר כי נדרש משקל אינטראקטיבי לצורך ניהול נוח של לוח הזמנים ושל מצביו המערכת. דרישת זו הצריכה יכולות רשת מתקדמות, ובראשן תמייהה ב-Wi-Fi והרצת שרת Web מקומי.

לאור זאת, הוחלט לוותר על השימוש ב-SoC Arduino כבקר מרכזי ולעבור לשימוש ב-ESP32-C3. בקר זה מספק קישוריות Wi-Fi ו-Bluetooth מבנית, יכולות אבטחה מתקדמות (כגון Secure Boot), ומהירות עיבוד מספקת לניהול לוגיקת השעון והמשקל האינטראקטיבי. יתרונו העיקרי של ה-SoC Arduino – מספר רב של כניסות ויציאות – אינו מהוועה יתרון משמעותי בפרויקט זה, שכן דרישות ה-I/O של יחידת השעון מצומצמות יחסית. לפיכך, ה-ESP32-C3 סיפק איזון מיטבי בין יכולות רשת, קומפקטיות ופשוטות מימוש.

#### 2. תקשורת אלחוטית: מודול HC-12

לצורך תקשורת בין יחידת השעון המרכזית ליחידות הקצה נדרש פתרון אלחוטי אמין, פשוט ובלתי תלוי בתשתיות רשת ביתית.

##### HC-12 (433MHz RF)

נשללו מספר חלופות, ובהן Wi-Fi, Bluetooth Low Energy RF ויעודיים. מודול HC-12 נבחר בשל אמינותו, טווח פעולה ארוך (עד כ-1 ק"מ ב空 ראייה) וכשר חDIRה טוב דרך קירות, הנובע מתדר העבודה 433MHz. יתרון משמעותי נוסף הוא אופי הפעולה השקוף של המודול – תקשורת UART פשוטה – המאפשרת תוכנן יחידות קצה מבוססות מיקוד-בקרים פשוטים וזולים, תוך הפחיתה משמעותית של מרכיבות התוכנה לצד הפרירה. כמו כן, השימוש ב-HC-12 מאפשר למערכת לפעול ללא תלות בזמןות רשת Wi-Fi, דבר מהוועה דרישת קריטית עבור מערכת תזמון.

#### 3. תצוגה ומיתוג: LCD I<sup>2</sup>C

##### LCD 16x2 עם משקל I<sup>2</sup>C

התצוגה נבחרה על פני חיבור מקבילי ישיר. חיבור מקבילי היה דורש מספר רב של פינים GPIO, משבים מוגבל ויקר בבקר ESP32-C3. שימוש בממיר (PCF8574) I<sup>2</sup>C מאפשר חיסכון משמעותי במסאי ה-בקר, והסתפקות בשני קווים בלבד (SDA ו-SCL) לצורכי שליטה מלאה בתצוגה.

##### Solid-State Relay (SSR)

לצורך מיתוג העומסשולב ממסר מצב מוצק (SSR), בנוסף לממסרALKTRONMCNI סטנדרטי. שילוב זה נועד להדגמת ההבדלים בין טכנולוגיות מיתוג. בעוד שמסר מכני הוא פשוט פשוט וזול, ה-SSR מציג יתרונות של מיתוג שקט לחילוטין, זמן תגובה מהיר ואורך חיים גבוה במיוחד, עקב היעדר רכיבים מכניים נזעים.

#### 4. ספק כוח: ממיר AC-DC

רכיב ה-AC-DC נבחר לצורך אספקת מתח יציב לכל רכיבי המערכת – הבקר, מודול התקשרות, התצוגה והמסרים. מבחינה עקרונית, ניתן היה להזין את הבקר דרך שקע חשמל חיצוני, אולם פתרון זה היה מחייב קיום שקע ייעודי בתוך ארון החשמל או בקרבת יחידת השעון, דבר שאינו מצוי ברוב ההתקנות ואינו מעשי בהקשר זה. בנוסף, הבקר עצמו אינו מסוגל לספק זרם מספק להזנת כל הרכיבים המתחברים אליו. לפיכך, נדרש מקור מתח מרכזי שיספק הזרה יציבה ואמינה לכל המערכת. ממיר ה-AC-DC מאפשר המרת ישירה מתח רשת (230V AC) למתח נמוך (5V DC), תוך שמירה על בידוד חשמלי ובטיחות, ומאפשר הזרה משותפת לכל רכיבי הבקרה ללא תלות ביכולת ההספק של הבקר עצמו.

## 4.1 תוכנות שפותחו

במסגרת הפרויקט פותחה קושחת שעון שבת חכם (Smart Shabbat Clock) המבוססת על ESP32, וממשק ה-Web הנלווה לה.

### 4.1.1 קושחת שעון שבת חכם (Smart Shabbat Clock)

התכנה הראשית נכתבת בשפת C/C++ באמצעות סביבת Arduino IDE, וmbosst על בקר ESP32. היא אחראית על ניהול השעון, לוח הזמנים, התקשורת עם המציג, והציגו למשתמש.

- נעשה שימוש בספריות:
  - WiFi.h, WebServer.h, ArduinoOTA.h, Preferences.h, RTClib.h, LiquidCrystal\_I2C.h .time.h
- השעון מתחבר לרשת Wi-Fi הביתית, מסנכרן את השעה דרך NTP, ומעדכן את שעון ה-RTC (ריכיב DS3231).
- במערכת פועל שרת אינטראנט מקומי המאפשר שליטה במכשיר דרך דפדפן במחשב או בטלפון. ממשק השליטה (המוגדר בקובץ index\_page.h) מאפשר צפייה בשעה, מעבר בין מצב חול ל-'מצב שבת', שליטה במסגר המוקומי (מצבי ON / OFF / AUTO), והגדלת לוח זמנים שבועי להדלקה וכיובי אוטומטיים.
- המערכת שומרת את נתוני לוח הזמנים בזיכרון הלא-נדיף של ה-ESP32 (Preferences) כך שהם נשמרים גם לאחר כיבוי המתח.
- תמיינה מלאה ב-OTA מודול 12-HC בתקשורת טורית (Serial), באמצעות פקודות טקסט פשוטות כגון "shabbat" ו-"week".
- בנוסף, מוצגת על גבי תצוגת LCD (0x27) השעה, מצב הממסר והחיבור לרשת.

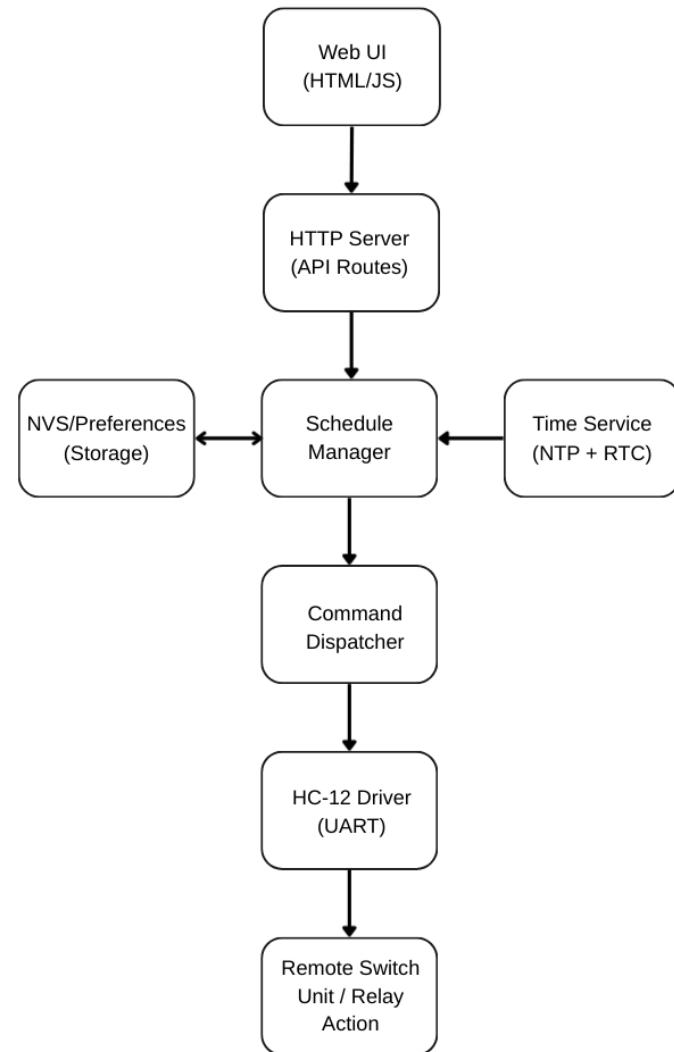
### 4.1.2 ממשק אינטרנט למשתמש (Web Interface)

ממשק השליטה (המוגדר בקובץ index\_page.h) נכתב ב-HTML, CSS ו-JavaScript, ומשולב שירות בזיכרון ESP32.

- הממשק מאפשר:
  - הצגת השעה בזמן אמיתי.
  - שליטה ידנית במצב המוקומי (ON / AUTO / OFF).
  - מעבר בין מצב חול ו-'מצב שבת'.
  - הוספה, שינוי וצפייה באירועי לוח הזמנים השבועי.
- התקשורת עם ESP32 נעשית ב프וטוקול HTTP דרך קריאות (fetch), אל נקודות קצרות כדוגמת /status/, /cmd/ ו-/schedule/.

#### 4.1.3 ארכיטקטורת תוכנה (תרשים בלוקים)

התוכנה מבנה מודולרי המפריד בין משתמש-ה-וֹב (קלט משתמש), לוגיקת התזמון (Schedule Manager), וכבת התקשרות ליחידת הקצה (HC-12). איור 3.13 מציג את זרימת המידע מהפקודות במשתמש ועד לביצוע פעולה מותג ביחידת הקצה, תוך שימוש בשירות זמן (NTP/RTC) ושמירת נתונים ב-NVS.



איור 3.13: תרשים בלוקים – ארכיטקטורת התוכנה של מערכת "שעון שבת חכם"

## 4.2 מבנה המערכת

### 4.2.1 ארכיטקטורת המערכת ותקשורת רשתית

הפרויקט מציע ארכיטקטורה רשתית המהווה מענה לצורך בקרה מרכזית ובתקשורת בין יחידות. בכך גם לטו"ם מרים נפרדים שעובדים בבדוד, המערכת בנויה סביב שערן מרכזי (mbus00 ו-ESP32), המהווה את יחידת השליטה הראשית, ויחידות קצה מרוחקות הפרוסות בבית. יחידות הקצה מקשורות ליחידה המרכזית באופן אלחוטי (באמצעות תקשורת RF), כך שמתאפשרת בקרה מרחוק.

- שליטה מרחוקת:** המשמש קובלע את לוח הזמן עם אחת בשערן המרכזי, והפקודות משודרות לכל היחידות הרלוונטיות בבית. לדוגמה, ניתן בליחצת כפתור להעביר בבת אחת את כל הבית למצב "שכט" – לחסום שני מצלב מתגים – וביצאת השבת להחזיר את הכל למצב רגיל.
- תקשורת דו-כיוונית:** התקשרות הדו-כווינית (הכוללת ACK או מנגןון ניטור) מאפשרת אימות שהפקודות בוצעו. במקרה של תקלה או חוסר תגובה של אחד המתגים, יחידת השערן יכולה להתריע.
- יכולת זו מייצגת צעד לכיוון "בית חכם כשר", שבו הרכיבים פועלים כמכול מתואם ולא בצורה ייחדנית.

### 4.2.2 מנגןון זמן מדויק וסנכרון זמן

כדי לעמוד ביעד של **דיקור רב בזמן**, המערכת משלבת מנגןוני שמיירת זמן מתקדמים:

- רזולוציית זמן גבוהה:** המערכת מציעה רזולוציית זמן ברמת הדקה, המאפשרת לקבוע אירועים בזמן מדויק (בניגוד למרוחקים של 15–30 דקות בטו"ם אנלוגיים).
- סנכרון אוטומטי:** הדיקור מושג בזכות סנכרון (Network Time Protocol) NTP ושימוש בשערן זמן אמת (RTC) מדויק. המערכת מטפלת אוטומטית בשינוי שעון קיז'ורף ובכל עדכון זמן, ובכך חוסכת את הצורך בכונון יומי שבועי.
- פוטנציאלי הרחבה:** בזכות הסנכרון הרשמי, קיימת אפשרות להרחבת עתידית שתשלב API של זמן הלכה (זריחה/שקיעה אוטומטיים), מה שմבטיח דיקור ובטיחון רב בזמן.

### 4.2.3 גמישות תכנונית וממשק משתמש יידידותי (Web-Based Interface)

הgamישות בתכנון לו"ז ניתנת למימוש באמצעות תוכנה מודולרית וממשק משתמש מתקדם:

- לוח זמנים>Dynamical:** המערכת מבוססת תוכנה המאפשרת רמה גבוהה מאוד של גמישות בהגדרת זמן הפעלה, עם אפשרות לתוכנת עשרות אירועים שונים לשבוע (במיוחד הנוכחי הוגדר למשל מקס'ימום 32 אירועים, אך עקרונית ניתן להרחיב זאת בITUDE). ניתן לקבוע תרחישים מגוונים ולוחות זמנים שונים לימים שונים או לחגים.
- ממשק משתמש:** המערכת מעניקה ממשק משתמש גרפי דרך הדפדפן (Web-based), המאפשר אנת ההגדרת והשימוש. ממשק זה מאפשר לערוך ולשמור תוכניות בклות רבה, ללא צורך בגישה פיזית להתקן או בחיבור מחשב מיוחד.
- נטור מרוחק:** המערכת מאפשרת ניטור מרוחק באמצעות Wi-Fi המקומי, המאפשר לראות במבט מהיר את כל זמן הפעלה המתוכננים לשבת הקרובה ולעדכנם.

### 4.2.4 מימוש התאמת הלכתית ומצב שבת אוטומטי

הפרויקט מיועד לעמוד ביעד של **התאמת מובנית למסגרת הלכתית** באמצעות שילוב מצב פעולה "יעוד".

- מצב שבת (Shabbat Mode):** בעת כניסה שבת, יחידת השערן שולחת לכל יחידות הקצה פקודות מעבר ל"מצב שבת". במקרה השבת החכם (המתואר במסמך נפרד) מצב זה כולל הפעלת מסמר עקי' במתג החכם שימושים את המנגנון ללא תלות במפסק הדינמי. מצב הממסרים נקבע ונגען כך שהמנגנון נשאר

במצב בו היה (דלק/כבי) לאורך השבת. גישה זו מමמת נזילה אלקטרונית של המפסק ובכך **מנעת חילול שבת בטיעות** (בדומה ל- ZMAN Switch [2]).

- **שליטה בזמןי מעבר:** המשמש יכול לבחור האם ומתי לעבור למצב שבת – המערכת יכולה לבצע זאת אוטומטית לפי הלוח, אך ישנה גם אפשרות למעבר יידי מוקדם באמצעות כפתור "יעוד", כאשר כל הפעולות מתבצעות תוך שמירה על גדרי ההלכה (לפני שבת או ע"י תזמון אוטומטי).

#### 4.2.5 פтиיחות והרחבה עתידית

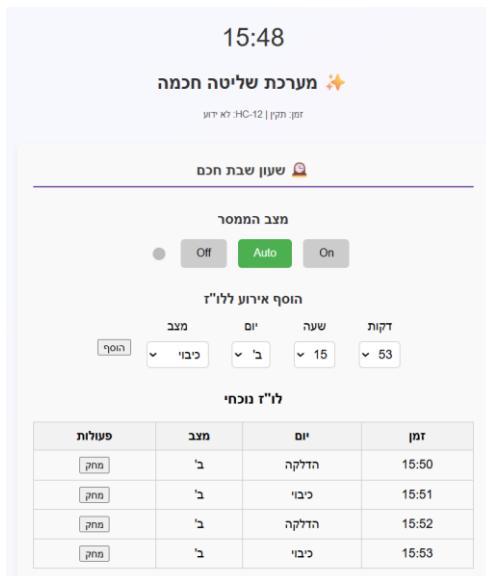
המערכת תוכננה להיות מודולרית ופתחה לשינויים:

- **קוד פתוח ו-ESP32:** הפרויקט מבוסס על **קוד פתוח** ולטפורמת **ESP32** הנפוצה, המאפשרת יכולת התרחבות והתאמה אישית גבוהה יותר מפתרון סגור.
- **מודולריות:** המבנה המודולרי מאפשר הרחבה של הfonקציונליות, כגון אינטגרציה עם מערכות בית חכם אחרות (**Home Assistant**), קבלת עדכוני זמינים ממוקורות חיצוניים, או הוספה התראות מבוססות מצב.

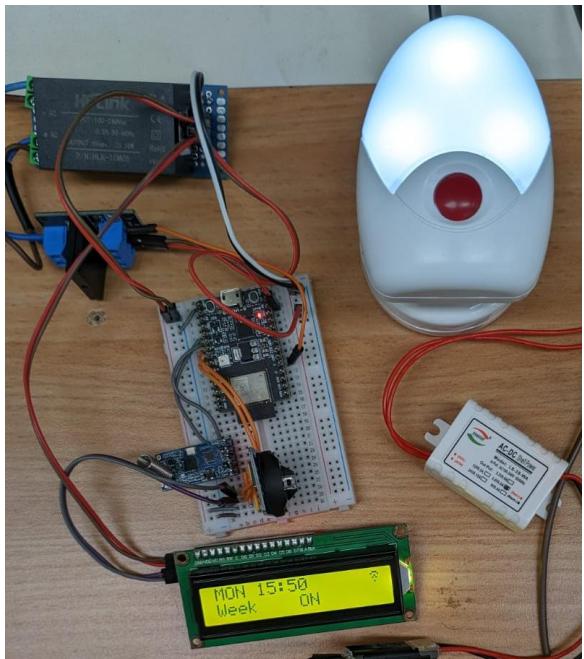
## 5. תוצאות

איור 4.1 מציג דוגמה ללוח זמנים שבועי שהוגדר במערכת. באירועים 4.6–4.2 מוצגת התנהגות המערכת בזמן אמת: ביצוע אירועי ON/OFF בזמנים עוקבות כפי שהוגדר בלו"ז, כאשר התצוגה מציגת את ים השבוע, השעה והפעולה שבוצעה. לצורך המבנה רציפה של פעולות המערכת בזמן אמת, נוסף סרטון הדוגמה (איור 4.7) הזמן באמצעות קוד QR או הקישור [11].

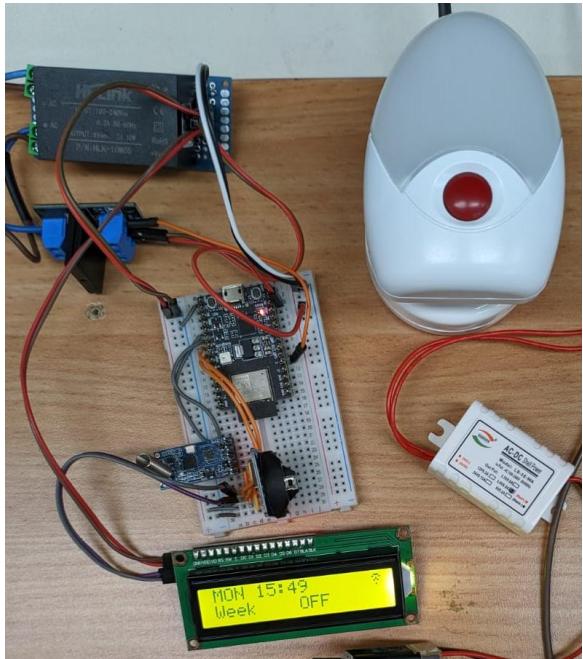
במהלך ניסוי תקשורת נמצא כי רצף פקודות מהיר במיוחד (מעבר מצבים בתדריות גבוהה) מפחית את אמינות הקליטה בקשר ה-RF. בהתאם לכך, מנגנון הפעולה הוגדר סיבוב הנחתה שימוש ריאלית: המשמש משנה מצב לעתים רוחקות (בחירה אחת, ולעתים תיקון קודתי), ולא מבצע חלופות מצב חוזרות בפרק זמן קצרים. על בסיס הנחיה זו, המערכת פועלה באופן יציב בתרחישי שימוש רגילים.



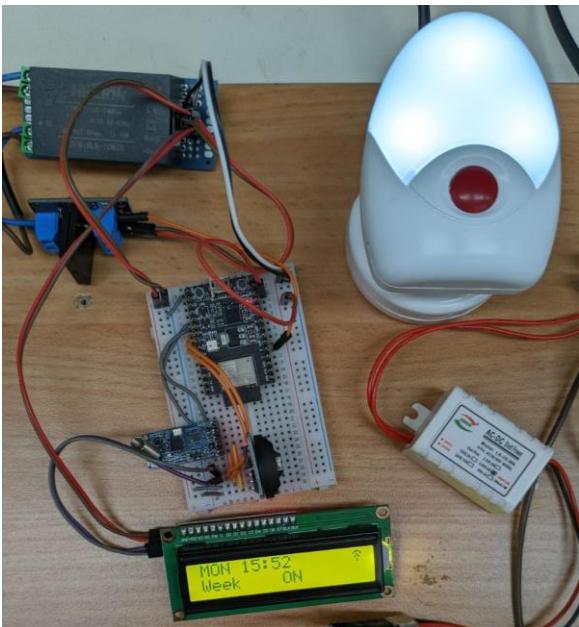
איור 4.1: דוגמה לו"ז



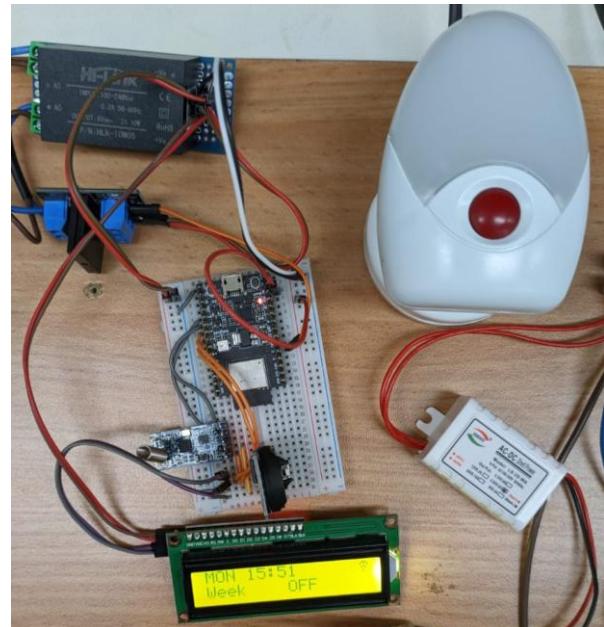
אייר 15:50 ON :4.3



אייר 15:49 OFF :4.2



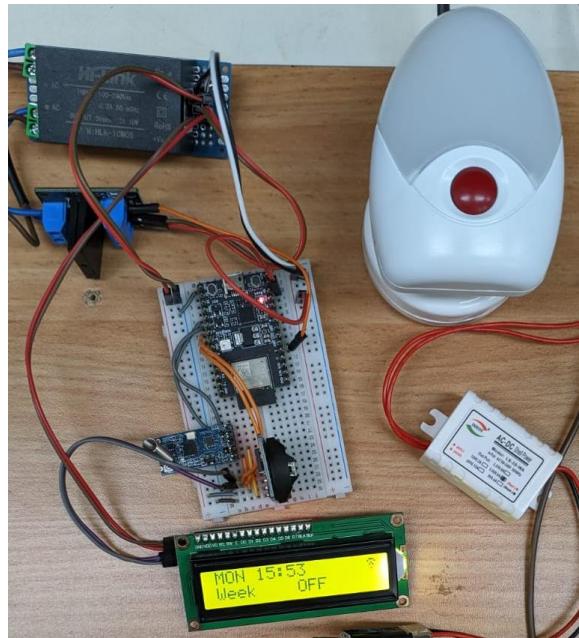
אייר 15:52 ON :4.5



אייר 15:51 OFF :4.4



איור 4.7: סרטון הדגמה לצורך המוחשת פעולה  
המערכת. ניתן לצפות בו באמצעות קוד QR-  
או באמצעות הקישור [14]



איור 4.6

## 6. מסקנות וסיכום

פרק זה מסכם ומעירך באופן ביקורתית את עבודות הפרויקט מראשית ועד סופה. הוא מנתח את רמת העמידה במטרות שנקבעו, מציע הסברים לתוצאות שהושגו ומציג כיווני פיתוח עתידיים.

### 6.1 עמידה במטרות הפרויקט והערכתה ביקורתית

מטרת הפרויקט הייתה פיתוח "יחידת שעון שבת חכם" הפעלתה כמרכז הבקרה של מערכת בית חכם לשומרי שבת. השעון משלב תזמון מדויק, ממשק אינטרנט ותקשורת אלחוטית עם יחידות קצה, ובכך מהווה לב המערכת החכמה וההילכתית.

במסגרת הבדיקות וההדגמות שbow (פרק 4), המערכת עמדה ביעדים המריצים שהוגדרו. במהלך הפעלה והבדיקות, המימוש נמצא יציב ופונקציוני בתרחישי שימוש רגילים, ומספק מענה מדויק ליעדי הפיתוח שהוגדרו בפרק "רקע תיאורטי וסקירת ספרות", סעיף 3 (מטרות ויעדי הפרויקט):

- בקרה מרכזית ותקשורת רשתית:** יעד זה מומש בהצלחה באמצעות פרוטוקול התקשורת האלחוטית RF בין יחידת השעון המרכזית למתגים המרוחקים (סעיף 5.1). יכולת זו מאפשרת סyncronization של כל המתגים מרוחק ובלחיצת כפתור אחת, ומבטלה את הצורך בתוכנות פיזי וمبرוד של כל מכשיר, ובכך ממלאת פערמשמעותי בשוק.
- גמישות תכניתית רחבה ונגישות:** יעד זה הושג בזכות פיתוח ממשק משתמש גרפי מבוסס Web (סעיף 5.3) המאפשר תכונות عشرות אירועים שבועיים. הממשק הידידותי מאפשר ניהול נוח ומרוחק של לוח הזמן, ובכך משפר משמעותית את חווית המשתמש בהשוואה לממשקים מכניים קיימים.
- תזמון מדויק המבוסס זמן-אמת:** הדיקן הנדרש מומש באמצעות שילוב NTP ורכיב RTC NTP (סעיף 5.2). שילוב זה מאפשר שמירה על זמן עדכני, ובמקרים של חוסר זמינות רשת – הסתמכות על RTC כגבי. בנוסף, המערכת תומכת בעדכון זמן בהתאם להגדרות שעון קיץ/חורף כפי שהוגדרו במימוש. לסיכום, פרויקט "שעון שבת חכם" הוכיח היכולות הטכנולוגיות מלאה והביא לייצור יחידת מרכזית מתקדמת, המשלבת חכמת בית חכם עם דיקון הלכתי. השעון מהווה בסיס למערכת משולבת רחבה יותר, הכוללת גם מתג שבת חכמים.

### 6.2 שיפורים אפשריים והרחבה עתידית

על אף הצלחת המימוש של המערכת, קיימים מספר לשיפור ולהרחבה אשר יכולים להעלות את רמת הפרויקט ולספק ערך נוסף:

#### 6.2.1 שיפורים במימוש הנוכחי (Immediate Improvements)

- שיפור תצוגה על גבי-LCD:** ניתן להרחב את המידע המוצג למשתמש על גבי מסך ה-LCD של יחידת השעון כדי לשפר את חווית השימוש המקומית ולהפחית תלות במכשיר ה-Web. מעבר לחווית הבסיס' הקיים, ניתן להציג פרטם פעולאים כגון האירוע הבא בלוייז (Next Event), כתובת ה-IP של השירות המקומי ומצב העבודה הנוכחי (Week/Shabbat/Override). מבחינת מימוש, ניתן להשתמש בגישה "מסך מתחלף" (Pages) במסך דו-שורות (2x16/2x20): המערכת תציג בכל רגע שני שורות ותעביר בין עמודי מידע בפרק זמן קבועים או לפי אירוע, כך שניתן להציג בפועל יותר מידע ללא שינוי חומרה.

- שיפור ממשק המשתמש (UX/UI):** ניתן לשפר את הממשק הקיים בכך שתפעול ועടכון לו"ז יהיו ברורים, ומהירים יותר, בעיקר סביר פעולה שכיחות. שיפורים אופייניים כוללים וידיצה לשדות זמן לפני שטירה, הודיעות חיוי Success/Error לאחר פעולה, הצגת מצב מערכת נכון באופן בולט, וכן כפתורי פעולה

מהירה (מעבר ל-Shabbat, חזרה ל-Week, ביטול Override). שיפורים אלו אינם מושנים את לוגיקת המערכת, אך מצמצמים טעויות תפעול ומשפרים את חווית המשתמש.

- **שיפור אמינותה בתרחישים פקודות רצופות (Rate Limiting / Queue):** במהלך הניסויים נמצא כי שלילה של רצף פקודות מהיר (כגון מעבר מצבים בתדרות גבוהה) מפחיתה את אמינות הקליטה בקשר ה-RF. לפיכך, ניתן להוסיף ויסות פקודות הכוללת תור פקודות (Queue) וקצב שידור מינימלי בין פקודות, ובמידת הצורך ניסוח חוזר (Retry) עם השהיה קצובה עד לקבלת ACK. מגננו זה אינו משנה את לוגיקת המצבים (Week/Shabbat/Override), אך מצמצם עומס תקשורת רגעי ומשפר עיקיות ביצוע.

### 6.2.2 הרחבות למערכות עתידיות (Future Scope)

- **אינטרגציה עם זמני הלכה אוטומטיים:** הרחבת הkowskiha לשילוב API לקבלת זמני שבת/זמנים (לפי מיקום ותאריך) מאפשרת זמן אירועים לא רק על בסיס שעה קבועה, אלא גם על בסיס כניסה/יציאת שבת דינמיים, ובכך להגבר את הדיקון ההלכתי ולהפחית צורך בכיוון יומי. לדוגמה, ניתן להשתמש במשקי REST של Hebcal לקלט זמני הדלקת נורות/הבדלה וזמנים נוספים (ב-JSON), כאשר מיקום מוגדר באמצעות tzid [15-17] latitude/longitude או geonameid או tzid [15-17].
- **הרחבת פרוטוקול התקשרות:** החלפת התקשרות RF גנריית בפרוטוקול בית חכם סטנדרטי עשויה לשפר את האבטחה והטוויה, ולאפשר אינטגרציה עם פלטפורמות בית חכם (למשל Home Assistant או Google Home). לצורך כך מומלץ לבדוק את שכבת התקשרות למשק אחיד (למשל sendCommand/receiveAck), כך שהחלפת ה-HC-12 תדרש שניי ברמת הדרייבר בלבד בעודו לוגיקת המצביעים והפקודות תישאר זהה.

## 6.3 תרומת הפרויקט

פרויקט "שעון שבת חכם" מציג תרומה כפולה:

1. **תרומה טכנולוגית:** המערכת מדגימה מיזוג מוצלח של רכיבי IoT (ZLL ו-ZMNs (ESP32)) למערכת בkartת רשתית ואיננה. היא מראה מודל ארכיטקטוני למימוש תקשורת חכמה בין יחידות קצה וניהול לוח זמינים מרכיב בסביבת קוד פתוח.
2. **תרומה ציבורית/הלכתית:** הפרויקט מראה פתרון ממוקד, בטוח ונגיש לאוטומציה ביתית עבור הציבור שומר השבת. המערכת מפשטת את התפעול, משפרת את דיוק הזמן, ומפחיתה משמעותית את הסיכון להפעלה לא רציה באמצעות מגנון נעליה אלקטטרונית בהתאם ללוגיקה שהוגדרה. בכך היא משפרת את איכות החיים ואת רמת הביטחון ההלכתי של המשתמשים.

## נוף א

### התנוגות המערכת בעת הפסקת חשמל וחזרת מתח

"שעון שבת חכם" תוכנן להتاושש מהפסקת חשמל ב;zורה בטוחה וצפויה. בזמן הפסקת חשמל הבקר נכבה, ולכן אין יכולת בקרה על יציאת הממסר המקומיית עד לחזרת המתח. כאשר החשמל חוזר, מtabci'eu את חול מחדר, ובשלב הראשוני של העלייה המערכת מכניסה את הממסר למצב בטוח (כבוי) כדי למנוע הדלקה לא מכונת של העומס לפני שהמערכת הספקה לטען מצבים ולהחיליט כיצד עליה לפעול.

לאחר שהמערכת עלתה, היא טעונה מהזיכרון האחרון את מצב העבודה האחרון שלה, ובראש ובראשוונה את מצב הפעול (ידני מול אוטומטי) ואת מצב הממסר האחרון שנשמר. מכיוון מתקבלת החלטה בהתאם לעקרון בסיסי: כאשר השעון אינו במצב אוטומטי, מטרת השחזור היא להחזיר את המצב האחרון שבחר המשמש. אך במצב ידני המערכת מছירה את מצב הממסר לערך האחרון שנשמר, גם אם בשלב זה הזמן עדין אינו תקין. במצב זה אין תלות בזמן, משום שהמסר אינו נשלט לפי לוח זמנים.

לעומת זאת, כאשר השעון נמצא במצב אוטומטי, השליטה בממסר תלויה בזמן. לכן נקבע כלל שונה: אם בזמן העלייה אין "זמן תקין", המערכת אינה משתמשת במצב הממסר האחרון שהיה לפני ה��בי, משום>Status זה עולה להיות לא רלוונטי בזמן האמתי (למשל, השעון כבב במצב דלוק כאשר בפועל לפי הלוי'ז בזמן הנוכח הוא אמר להיות כבוי). במקרה זה השעון נשאר במצב ברירת מחדל בטוח (כבוי) וממשיך בניסיונות לקבוע זמן תקין. רק כאשר נקבע זמן תקין, השעון מחשב את מצב הממסר הנדרש "עכשו" לפי הלוי'ז, ומישר את הממסר בהתאם.

גישה זו מאזנת בין שני צרכים מנוגדים: מצד אחד, שחזור מהיר של רצון המשמש במצב ידני. ומצד שני, מניעת החלטה שגוייה במצב אוטומטי כאשר אין בסיס זמן אמיתי.

## נוף ב

### לוגיקת זמן וקביעת זמן במערכת

הפעלת לוח זמנים מחייבת זמן מערכת תקין, ולכן השעון תוכנן עם מגנון קביעת זמן מדורג, הכול מוקור זמן ראשי, מוקור גיבוי, ואפשרות התקשורת ידנית. כאשר קיימת תקשורת לרשת, השעון משתמש בשרת NTP כמקור זמןRTC. לאחר קבלת זמן תקין מהרשת, השעון מעדכן את זמן המערכת ומסונכרן אליו גם את רכיב ה-RTC (DS3231), כך שבפעם הבאה גם ללא אינטרנט יהיה מוקור זמן מקומי אמיתי.

במצב שבו אין NTP זמין (למשל, בעית Wi-Fi או אינטרנט), השעון נשען על ה-RTC כמקור גיבוי. ה-RTC ממשיך לשמר זמן גם בהפסקת החשמל באמצעות סוללה גיבוי, וכך אפשר לשעון לחזור לפעולה עם זמן תקין מיד לאחר החזרת המתח, גם ללא רשת. כאשר לא ניתן לקבל זמן לא מ-NTP ולא מה-RTC, זמן המערכת מוגדר כאטcki, והמערכת מתנהגת בהתאם: במצב אוטומטי היא אינה מפעילה החלטות לפי לו"ז עד שיושג זמן תקין.

כדי לצמצם את פרק הזמן שבו המערכת נמצאת ללא זמן תקין, כאשר הזמן אינו תקין השעון מבצע ניסיונות סנכרון בתדירות גבוהה יותר, עד להצלחה. ברגע שהזמן הופך לתקין, ובמיוחד כאשר השעון נמצא במצב אוטומטי, מתבצע יישור מיידי של מצב המסר לפי לוח הזמנים, כדי לחזור להתנהגות התקינה ללא המתנה לחזור נוסף.

בנוסף, באמצעות Web קיימת אפשרות לקביעת זמן ידנית. אפשרות זו מוצגת למשתמש רק כאשר המערכת מזהה שהזמן אינו תקין, כך שהמשתמש יכול להציג את המערכת למצב תקין גם ללא רשת ולא RTC. לאחר קביעת ידנית, זמן המערכת מתעדכן, ואם רכיב RTC זמין הוא מסונכרן בהתאם, כך שהזמן ישמר גם בהפסקות חשמל עתידיות. פעולה זו מאפשרת חזרה מיידית להפעלה אוטומטית לפי לו"ז.

## נסוף ג

### תרחישי קצה ובדיקות מערכת

הטבלה בסופה זה מרכזת תרחישים בדיקה פונקציונליים שנבחרו במטרה לסתור נקודות קצה אופייניות של שעון שבת חכם הנשען על זמן מערכת ועל מצבו העבודה שונים (ידני מול אוטומטי). הדגש הוא על מצבים שבהם המערכת עלולה לקבל החלטה שגיה או לא צפיה, כגון הפסיקות חשמל, זמן לא תקין, ואובדן תקשורת, ועל האופן שבו המערכת אמרה לתאושש ולחזור להתנהגות תקינה. לכל תרחיש מוגדים תנאים התחלה, האירוע שנבחן והוצאה הצפיה, כך שניתן לאמת שהמימוש תואם את מדיניות התכnon שהוגדרה בפרויקט.

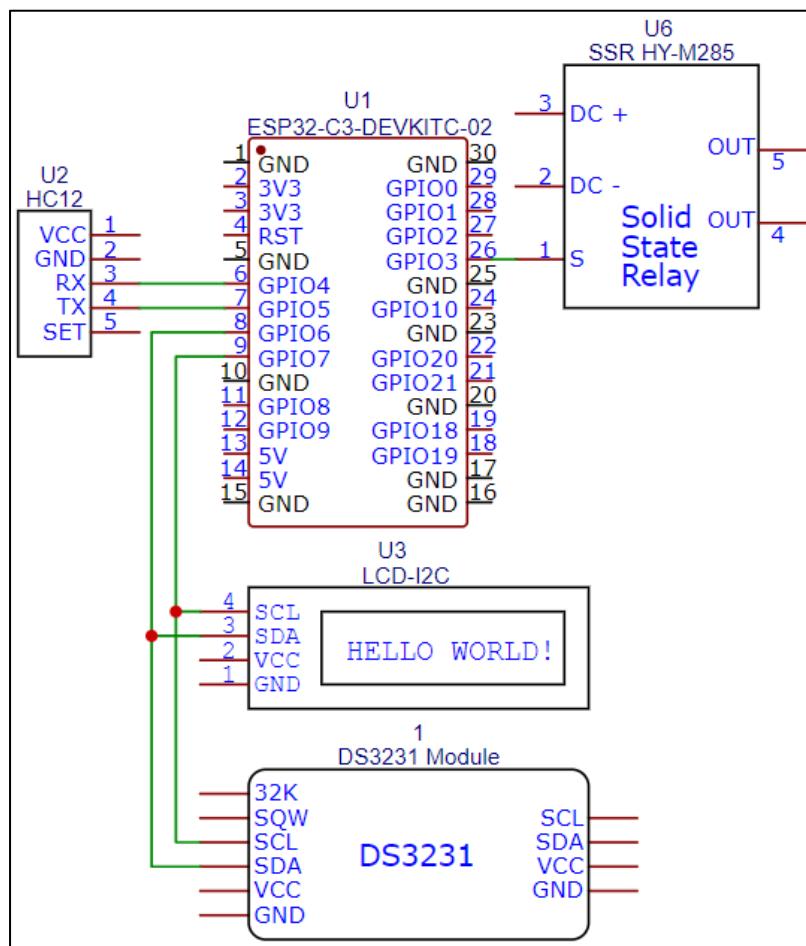
תנאי התחלה	אירוע/פעולה	תוצאה צפואה	הערה (למה זה חשוב)
מצב ידני, הממסר המקומי דלוק	הפסקת חשמל וחזרת מתח	המסר חוזר לibrator דלוק (שחזור מצב אחרון)	שמור רצון המשמש במצב ידני
מצב ידני, הממסר המקומי כבוי	הפסקת חשמל וחזרת מתח	המסר חוזר לibrator כבוי	עקביות ושחזור מצב מלא
מצב אוטומטי, זמן תקין, קיים לוח זמנים	הפסקת חשמל וחזרת מתח	המסר נקבע לפי לוח הזמנים בזמן העיליה (לא לפ"י "מה שהיה לפני הכיבוי")	התאוששות נכונה של לוגיקת לו"ז
מצב אוטומטי, אין זמן תקין (אין NTP ואין RTC)	חרזרת מתח	ברירות מחדל בטוחה: הממסר נשאר כבוי עד לקביעת זמן תקין	מניעת פגיעה שלא באסוס זמן
מצב אוטומטי, אין זמן תקין בתחילה; רשת חזרת לאחר מסגר דקוק	חרזרת תקשורת	ניסוונות סנכרון זמן בתדריות גבוהה עד הצלחה; לאחר זמן תקין מתבצע יישור מיידי לפי לוח הזמנים	קיים "חולון עיוורון"
מצב אוטומטי, זמן תקין; שינוי זמן NTP או RTC מתקון	AIRUUS_Syncron_ZTime	זמן המערכת מתעדכן והמערכת ממשיכה לפעול לפי הזמן החדש; מצב הממסר מתyiשר אם נדרש	התמודדות עם תנאים זמן ושםירת נכונות
מצב אוטומטי, לו"ז זמינים ריק/לא הוגדר	מעבר ל-AUTO או חזרת מתח	אין החלטות לו"ז; המערכת נשארת במצב ברירת המחדל שהוגדר (ובהתאם למединיות)	טיפול במצב "אין נתונים" ללא תקיעה
זמן לא תקין	המשתמש קבוע זמן ידנית במכשיר Web	זמן המערכת נקבע כתקין; אם יש RTC הוא מתעדכן; אם במצב אוטומטי — מבוצע יישור מיידי של הממסר לפי לוח הזמנים	אפשרת פעולה גם ללא רשת
מצב אוטומטי	המשתמש עובר לדינית דרך ה-Web	השליטה הופכת ידנית והממסר נשאר במצב לוי' לשימוש לו"ז	מניעת "מאבק" בין לו"ז לשימוש

מעבר חלק בין מצבים	המערכת מתyiישרת מיידית לפ' לוח הזמן	המשתמש עובר ל- AUTO דרך ה-Web אשר הזמן תקין	מצב יידי
אמינותה תפעול במערכת מבוצרת	המערכת מנסה לשדר ומזזה כשל (אין ACK); אינה מציגה פעולה כהצלחה מלאה	פקודת שבת/חול מהמכשיר	מצב אוטומטי, תקשורת למתח לא זמןינה
Robustness בתפעול אמיתי	אין איפוסים/תקיעות; זמן נשמר; תגובהות המכשיר תקינה	ריצה ממושכת (שעות/ימים)	עבודה רציפה לאורך זמן

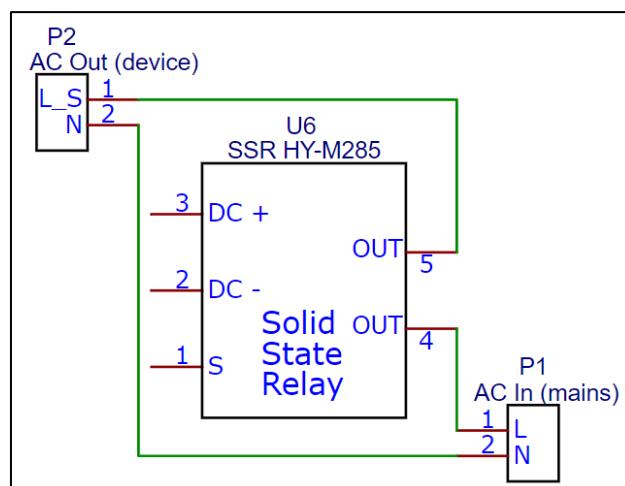
טבלה ג: תרחישי קצה

## נוף ד

### סכמת חיווט – השלמה לתרשים הבלוקים (פרק 3)



.(ESP32-C3, LCD-I<sup>2</sup>C, RTC DS3231, HC-12)



.(Air D.2: חיווט המיתוג לעומם באמצעות SSR 230V AC / יציאה לצרcn).

## מקורות

- [1] “אביטל אנרגיה חיבית,” שעון שבת מכני יומי, 08-Aug-2019. [Online]. Available: <https://avitalbs.com/product/ats181h-mechanical-time-switch/>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [2] “Zman switch,” *Judaica Plaza*. [Online]. Available: <https://judaicaplaaza.com/products/zte-zs>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [3] “אב-גד - מערכות מתח נמוך מתקדמות,” שעון שבת עם אפליקציה. [Online]. Available: <https://www.av-gad.co.il/product/%D7%A9%D7%A2%D7%95%D7%9F-%D7%A9%D7%91%D7%AA-%D7%A2%D7%9D-%D7%90%D7%A4%D7%9C%D7%99%D7%A7%D7%A6%D7%99%D7%94/>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [4] S. Prabhu, “Interfacing 16×2 character LCD module with Arduino,” *Last Minute Engineers*, 03-July-2018. .
- [5] A. Prabhu, “Interface an I2C LCD with arduino,” *Last Minute Engineers*, 08-Nov-2020. .
- [6] *Nordicsemi.com*. [Online]. Available: <https://academy.nordicsemi.com/courses/nrf-connect-sdk-fundamentals/lessons/lesson-4-serial-communication-uart/topic/uart-protocol/?version=v3.2.0-v3.0.0>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [7] “ESP32-C3-DevKitM-1 - ESP32-C3 - — ESP-IDF Programming Guide v5.2 documentation,” *Espressif.com*. [Online]. Available: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.2/esp32c3/hw-reference/esp32c3/user-guide-devkitm-1.html>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [8] “4X HC-12 433Mhz SI4463 Wireless Serial Port Module 1000M Replace Bluetooth HC12 - AliExpress 44,” *aliexpress*. [Online]. Available: <https://he.aliexpress.com/item/1005005101377869.html>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [9] General Description, “DS3231 Extremely Accurate IC-Integrated RTC/TCXO/Crystal,” *Analog.com*. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [10] *OcioDual real time clock RTC DS3231M I2C real time clock AT24C32 clock precision module real time memory module clock module DIY*. .
- [11] “LCD1602 Screen with Backlight LCD Display Module Board 2 x 16 Characters 1602 5v for Ar-duino Duemilanove Robot 1602A UNO R3 MEG - AliExpress 502,” *aliexpress*. [Online]. Available: <https://he.aliexpress.com/item/1005007531187322.html>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [12] “G3MB-202P 5V DC 1 Channel Solid-State Relay Board Module For Arduino High Level Fuse For Arduino SSR G3MB-202P - AliExpress 13,” *aliexpress*. [Online]. Available: <https://he.aliexpress.com/item/32838242762.html>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [13] “AC to DC Converter Step-down Power Supply Module AC110V 220V 230V To DC 3V 5V 9V 12V 15V 24V 3W Led Isolated Voltage Stabilized - AliExpress 13,” *aliexpress*. [Online].

Available: <https://he.aliexpress.com/item/1005005945688332.html>. [Accessed: 28-Jan-2026].

- [14] D. Orlan, “Smart shabbat clock – demo.” [Online]. Available: <https://youtube.com/shorts/kuyBU1jBy3k>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [15] mradwin, “Shabbat times REST API,” *Hebcal.com*. [Online]. Available: <https://www.hebcal.com/home/197/shabbat-times-rest-api>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [16] mradwin, “Zmanim (halachic times) API,” *Hebcal.com*. [Online]. Available: <https://www.hebcal.com/home/1663/zmanim-halachic-times-api>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [17] mradwin, “Specifying a location for Jewish calendar APIs,” *Hebcal.com*. [Online]. Available: <https://www.hebcal.com/home/4912/specifying-a-location-for-jewish-calendar-apis>. [Accessed: 28-Jan-2026].