

המרכז
האקדמי
לב



הפקולטה להנדסה ומדעי המחשב
החוג להנדסת חשמל ואלקטרוניקה

פרויקט גמר באלקטרוניקה

שעון שבת חכם

Smart Shabbat Clock

שבט תשפ"ו
ירושלים

מגישים: ברק אשואל ודוד אורליאן
מנחה: לירון בחכמה

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- I^2C
17	איור 3.4: השוואת חיבור LCD עם (מימין) ובלי (משמאל) מתאם I^2C
17	איור 3.5: חיבור UART בין שני התקנים.....
19	איור 3.4: מפת 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 ממשק I^2C
23	איור 3.8: ממסר מצב מוצק למיתוג עומס AC.....
24	איור 3.9: ממיר AC-DC 5V.....
28	איור 3.13: תרשים בלוקים – ארכיטקטורת התוכנה של מערכת "שעון שבת חכם".....
32	איור 4.2: MON 15:49 OFF.....
32	איור 4.3: MON 15:50 ON.....
32	איור 4.4: MON 15:51 OFF.....
32	איור 4.5: MON 15:52 ON.....
33	איור 4.6: MON 15:53 OFF.....
33	איור 4.7: סרטון הדגמה לצורך המחשת פעולת המערכת.....
40	איור ד.1: חיווט יחידת הבקרה והפריפריאלים.....
40	איור ד.2: חיווט המיתוג לעומס באמצעות SSR.....

רשימת טבלאות

15	טבלה 3.1: רשתות מתח ואותות מרכזיים
16	טבלה 3.2: ESP32-C3 פינים בשימוש
16	טבלה 3.3: חיבורים חיצוניים
39	טבלה נספח ג': תרחישי קצה

תקציר

ההתפתחות המואצת של מערכות אוטומציה ובקרה חכמות יצרה פתרונות מתקדמים לניהול צרכני חשמל, אולם עבור ציבור שומרי השבת קיימים אתגרים ייחודיים הנובעים מהצורך בעמידה בכללי ההלכה לצד נוחות שימוש ודיוק תפעולי. שעוני שבת מכניים ודיגיטליים מסורתיים מספקים מענה בסיסי בלבד, אך בפתרונות הנפוצים קיימות מגבלות של דיוק, גמישות תכנותית, היעדר תקשורת בין התקנים ויכולת מוגבלת לניהול מרכזי. מטרת פרויקט זה היא פיתוח מערכת "שעון שבת חכם" המהווה יחידת בקרה מרכזית לניהול מתוזמן, מדויק ואמין של צרכני חשמל, תוך התאמה לדרישות ההלכתיות.

המערכת שפותחה כוללת יחידת בקרה מרכזית לניהול לוח זמנים שבועי ברזולוציית דקה. המערכת משלבת מנגנון שמירת זמן, ממשק משתמש לניהול והגדרת לוחות הזמנים מרחוק, ותצוגה מקומית לחיווי מצב. בנוסף, שולבה תקשורת אלחוטית לצורך שליטה וסנכרון עם יחידות קצה מרוחקות. מיתוג העומס מתבצע באופן שקט ואמין לאורך זמן.

במהלך בדיקות המערכת הודגמה עמידה מדויקת בלוח הזמנים שהוגדר, תוך ביצוע פעולות הפעלה וכיבוי בדקות עוקבות בהתאם לתכנון. המערכת הוכיחה יציבות בתרחישי שימוש רגילים, שמירה על נתוני התזמון גם לאחר הפסקות חשמל, ויכולת מעבר מבוקר בין מצבי חול ושבט. בנוסף, נמצא כי התקשורת האלחוטית בין יחידת הבקרה ליחידות הקצה פועלת באופן אמין ועקבי.

הפרויקט מציג תרומה טכנולוגית ויישומית משמעותית בכך שהוא מדגים מעבר משעון שבת מכני לפתרון רשת חכמה עם בקרה מרכזית, גמישות תכנותית גבוהה ודיוק זמן משופר. מעבר לשימושו עבור שומרי שבת, המערכת מתאימה גם ליישומים מוסדיים וציבוריים הדורשים ניהול מתוזמן של צרכני חשמל. בכך, העבודה מניחה תשתית לפיתוח מערכות אוטומציה חכמות, אמינות ונגישות, 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 ההתפתחות בתחום מערכות הבקרה החכמה והאוטומציה הביתית, חוללה שינוי משמעותי באופן שבו בני אדם מנהלים את סביבת המחיה שלהם. מערכות מתקדמות מאפשרות שליטה, תזמון ואוטומציה של צרכני חשמל מגוונים, תוך שימוש בבקרים מתקדמים, תקשורת אלחוטית ותוכנה מבוססת רשת. מערכות אלו תורמות לנוחות, לחיסכון באנרגיה ולניהול יעיל יותר של משאבי החשמל. עם זאת, על אף ההתקדמות הטכנולוגית והשפע הקיים בשוק, קיימים קהלים ייחודיים שעבורם פתרונות אלה אינם מספקים מענה מלא, הן מבחינה תפקודית והן מבחינה תרבותית-הלכתית. אחד הקהלים המרכזיים הללו הוא ציבור שומרי השבת והחג.

שמירת שבת מציבה אתגר ייחודי בתחום האוטומציה הביתית. מחד גיסא, קיים צורך ממשי בשליטה ובתזמון של מערכות חשמליות כגון תאורה, חימום ומכשירים ביתיים, על מנת לאפשר שגרת חיים נוחה ובטוחה במהלך השבת. מאידך גיסא, כל פתרון טכנולוגי חייב לפעול בהתאם לכללי ההלכה, ללא התערבות אנושית בזמן השבת וללא יצירת מצבים העלולים להוביל לחילול שבת בשוגג. מסיבה זו התפתחו לאורך השנים פתרונות ייעודיים, ובראשם שעוני שבת מכניים ודיגיטליים, אשר נועדו לאפשר תזמון אוטומטי של מערכות חשמל.

על אף תרומתם, פתרונות מסורתיים אלו לוקים במגבלות מהותיות. שעוני שבת מכניים מוגבלים ברזולוציית תזמון גסה, לרוב במרווחים של כ-15 דקות, ואינם מאפשרים קביעת לוח זמנים מדויק וגמיש. בנוסף, הם מבוססים על רכיבים מכניים החשופים לשחיקה ולתקלות, ומחייבים כיוון פיזי ידני ללא אפשרות לתפעול מרחוק. כמו כן, פעולתם מתבססת על לוח זמנים יומי קבוע החוזר על עצמו, ללא אפשרות להבחנה בין ימות השבוע או להתאמה לתרחישים משתנים. גם שעוני שבת דיגיטליים מתקדמים יותר, אף שהם מציעים שיפור מסוים בדיוק ובנוחות ביחס לשעונים מכניים, לרוב פועלים כיחידות עצמאיות ואינם מאפשרים בקרה מרכזית, תקשורת בין התקנים או ניהול מערכתי של כל צרכני החשמל בבית. במרבית הדגמים, התזמון מוגבל למרווחי זמן קבועים, דבר שאינו מאפשר קביעת זמני הפעלה וכיבוי מדויקים או גמישות מלאה בהתאמת לוח הזמנים. בנוסף, מספר האירועים שניתן להגדיר מוגבל יחסית, ולעיתים לוח הזמנים מבוסס על מחזור יומי של 24 שעות בלבד, ללא הבחנה בין ימות השבוע. שינוי הגדרות מחייב לרוב גישה פיזית להתקן וביצוע כיוון ידני מקומי, ללא אפשרות לניהול או עדכון מרחוק. כתוצאה מכך, המשתמש נדרש לתכנת כל התקן בנפרד ובאופן ידני, פעולה המגבירה את הסיכון לטעויות, פוגעת בנוחות השימוש ומגבילה את היכולת לנהל תרחישים מורכבים ודינמיים במערכת החשמל הביתית.

בעשור האחרון חלה חדירה של פתרונות אוטומציה כלליים לשוק הפרטי, לרבות שקעים ומפסקים חכמים ומערכות שליטה מרחוק, המציעים יכולות מתקדמות כגון תזמון דינמי וניהול נוח באמצעות ממשק משתמש גרפי. עם זאת, מערכות אלו אינן מתוכננות מלכתחילה מתוך ראייה הלכתית, ולעיתים נשענות על תשתיות תקשורת, שירותים חיצוניים או מעורבות משתמש לצורך תפעול, תצורה ועדכון. תלות זו אינה מתיישבת במלואה עם הצורך בפעולה אוטונומית ומבוקרת במהלך השבת, ומדגישה את הפער הקיים בין פתרונות אוטומציה כלליים לבין הדרישות הייחודיות של ציבור שומרי השבת, פער שהפרייקט הנוכחי מבקש לצמצם באמצעות פתרון ייעודי, גם אם אינו מבטל לחלוטין את כל מקורות התלות החיצוניים.

על רקע זה, מטרת העבודה היא להציע פתרון טכנולוגי מתקדם לשימוש בשעון שבת, המבוסס על מעבר משעון שבת מכני מסורתי למערכת "שעון שבת חכם". במסגרת הפרויקט פותחה מערכת המאפשרת שליטה מבוקרת בצרכני החשמל במהלך השבת באמצעות יחידת בקרה מרכזית אחת, המנהלת לוח זמנים אחיד ומסונכרן לכלל יחידות הקצה במערכת. מטרת הפרויקט הוגדרה כהתגברות על המגבלות הקיימות במוצרים אחרים המצויים כיום בשוק, ובפרט היעדר בקרה מרכזית, חוסר תקשורת בין התקנים וגמישות תכנותית מוגבלת. לשם כך, המערכת תוכננה כך שתאפשר תקשורת בין יחידות וניהול כולל של צרכני החשמל, במקום תפעול מבודד ונפרד של כל התקן. בנוסף, המערכת תומכת במספר גדול של אירועים שבועיים ומציעה גמישות תכנותית גבוהה, ללא אילוצים קשיחים על מבנה לוח הזמנים. לצורך הבטחת דיוק ואמינות, שולב במערכת מנגנון זמן אמת מדויק הפועל ברזולוציה של דקה, המאפשר תזמון מדויק של פעולות ההפעלה והכיבוי ומצמצם את הצורך בכיוון ידני חוזר. כמו כן, המערכת מאפשרת תפעול מרחוק באמצעות ממשק משתמש נוח, ללא צורך בגישה פיזית ליחידת השעון, תוך שמירה על פעולה אוטונומית מלאה במהלך השבת.

עם זאת, למערכת שפותחה קיימת תרומה רחבה יותר והיא עשויה לתת מענה גם לצרכים נוספים בציבור הכללי, מעבר להקשר הייעודי של שמירת שבת. היכולת לנהל לוח זמנים מדויק ומרכזי עבור מספר רב של צרכני חשמל

הופכת את המערכת לרלוונטית במיוחד עבור מוסדות וארגונים הזקוקים לבקרה אמינה, עקבית ונוחה על תשתיות החשמל שלהם. במוסדות חינוך, לדוגמה, ניתן ליישם את המערכת לשליטה מרכזית על תאורה, מיזוג וציוד חשמלי בכיתות ובמרחבים משותפים, תוך הגדרה מדויקת של זמני הדלקה וכיבוי בהתאם לשעות הפעילות, ימי לימודים וחופשות. ניהול זה מתבצע מרחוק ואינו מצריך הגעה פיזית של איש תפעול לצורך שינוי ההגדרות, ואף מאפשר מתן הרשאות גישה למספר גורמים מוסמכים, כגון הנהלת המוסד או צוות אחזקה, בהתאם לצורכי הארגון.

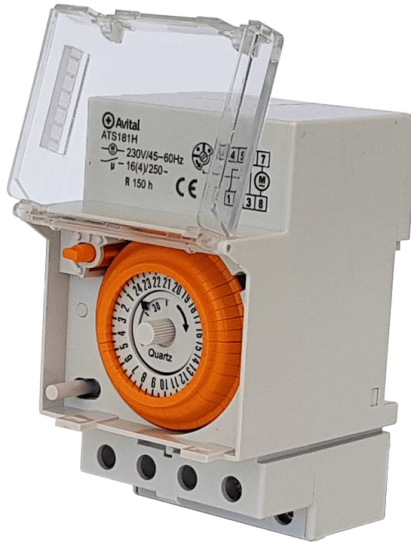
באופן דומה, ניתן ליישם את המערכת במגרשי ספורט, אולמות ואזורי ציבור, שבהם נדרשת שליטה מבוקרת ומדויקת על מערכות תאורה וצרכני חשמל נוספים, בהתאם ללוחות זמנים משתנים של פעילות. בקרה מרכזית ותפעול מרחוק מאפשרים תיאום בין אזורים שונים במתקן, הפעלה וכיבוי מסודרים של מערכות חשמל ללא תלות בהתערבות ידנית שוטפת, וצמצום משמעותי של טעויות אנוש. בכך, המערכת מציעה פתרון תפעולי יעיל וגמיש, המפחית עומס תפעולי, משפר את אמינות המערכת ותורם 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, דיוק תזמון, גמישות תכנותית ונגישות גבוהה למשתמש. בכך הוא תורם לפיתוח פתרון טכנולוגי מתקדם בעל ערך יישומי וחברתי, ומניח תשתית להרחבות עתידיות וליישומים נוספים בתחום הבקרה והאוטומציה הביתית.

2. רקע תיאורטי וסקירת ספרות

2.1 מוצרים קיימים בשוק

2.1.1 שעוני שבת מכניים מסורתיים



איור 2.1: שעון שבת מכני [1]

בתחום זה של שליטה ותזמון 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 לשליטה ותזמון זה עשרות שנים. שעון שבת מכני הוא למעשה טיימר חשמלי פשוט המתחבר בין המכשיר לשקע החשמל, ובו דיסק עם זיזים או פינים המכוונים להפעלה וכיבוי בזמנים מסוימים לאורך היממה (24 שעות). המשתמש קובע את הזמנים על ידי הזזת הפינים למצב "דולק" או "כבוי" בשעות הרצויות, והשעון מפעיל או מפסיק את הזרם בהתאם. פתרון זה אמין וזול, ומשמש בבתים רבים לשליטה בתאורה או במכשירים חשמליים דוגמת פלטת חימום לשבת באופן אוטומטי. עם זאת, הטיימרים המכניים מוגבלים בדיוק שלהם (בד"כ מרווחי תכנות של 15 או 30 דקות) ובגמישות – הם חוזרים על אותו לוח זמנים מדי יום ודורשים כוונן ידני מחדש כאשר זמני כניסת/יציאת השבת משתנים בין עונות השנה.

2.1.2 שעוני שבת דיגיטליים ייעודיים לשומרי שבת

בשנים האחרונות פותחו ונמכרים בשוק מגוון שעוני שבת דיגיטליים המיועדים לשימוש בקרב שומרי שבת, במטרה לשלב נוחות טכנולוגית עם שמירה על כללי ההלכה. שעונים אלו מהווים התפתחות מודרנית של שעוני השבת המכניים הוותיקים, ומציעים דיוק תזמון גבוה יותר, ממשקי תכנות נוחים, ולעיתים גם אינטגרציה עם יישומים סלולריים או מערכות בית חכם.

ZMAN Switch:



איור 2.2: ZMAN Switch [2]

ZMAN Switch הוא שעון שבת דיגיטלי חכם שפותח במיוחד עבור צרכי שמירת שבת וחג (איור 2.2). בניגוד לטיימרים סטנדרטיים שבהם המשתמש נדרש לכוון זמני הפעלה ידנית מדי שבוע, השעון של חברת ZMAN Technologies כולל מיקרו-מחשב עם לוח שנה עברי מובנה עד שנת 2050[2]. המכשיר מגיע עם כלל זמני כניסת ויציאת השבתות והחגים (זמני הדלקת נרות וצאת הכוכבים) לכל מיקום גאוגרפי בצפון אמריקה, ומבצע התאמות אוטומטיות לשעון קיץ ולוח השנה העברי. בעת ההתקנה הראשונית מבוצעת הגדרה חד-פעמית של מיקום המשתמש והעדפותיו – למשל, האם לכבות לפי זמן "צאת שבת רגיל" או להמתין 72 דקות (שיטת רבנו תם) לאחר השקיעה[2]. לאחר מכן, השעון מתזמן אוטומטית את זמני ההדלקה והכיבוי בכל שבת, ללא צורך בכיוון שבועי חוזר. בכך מבטיח המכשיר תאורה מתוזמנת ומדויקת לאורך כל השבת, ומונע טעויות אנוש כגון שכחה או כיוון לא נכון של השעון. מעבר לנוחות, יתרון חשוב הוא הימנעות מטעויות אנוש: בשימוש בטיימר רגיל, המשתמש עשוי לשכוח לכוון מחדש או לשבש את הזמן, ואילו כאן מובטח שהאור יהיה במצב הרצוי

לאורך השבת כולה ללא התערבות נוספת. בנוסף, למוצר זה קיים גם מנגנון נעילה ייעודי למצב שבת, המונע שינוי ידני במצב האור במהלך השבת ("Shabbos-proof deactivation") [2]. במקרה חירום רפואי ניתן להפעיל מנגנון עקיפה להשבת השליטה הידנית. מערכת זו מספקת פתרון אוטומטי ומדויק, המייתר את הצורך בהתעסקות שבועית עם טיימרים.

שעון שבת דיגיטלי של חברת Av-Gad:

חברת Av-Gad הישראלית ייצרה טיימר שבת המתחבר לארון החשמל, המכונה "שעון שבת עם אפליקציה", (איור 2.3) המבוסס על ממסר דיגיטלי מתוצרת Finder. במוצר זה, תהליך התכנות מתבצע באמצעות סמארטפון בתקשורת NFC: המשתמש מקרב את הטלפון למכשיר ומעביר את תוכנית ההפעלה. השעון מאפשר הגדרת עד 48 תוכניות הפעלה יומיות או שבועיות, ומצויד בצג LCD גרפי לחיווי [3]. בנוסף, הוא כולל שינוי אוטומטי של זמנים בין שעון קיץ וחורף. עם זאת, קיימות מגבלות: מרווח התכנות הקטן ביותר הוא 30 דקות [3], מה שעלול להיות גס מדי עבור יישומים הדורשים דיוק גבוה.



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

2.2 מגבלות המוצרים הקיימים

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

- **היעדר תקשורת בין מכשירים יחידת בקרה מרכזית:** מרבית שעוני השבת והמתגים הקיימים פועלים כיחידות עצמאיות, ללא יכולת תקשורת או סנכרון ביניהן. כל טיימר מכני או דיגיטלי שולט בדרך כלל על מעגל חשמלי יחיד בלבד, ללא אינטראקציה עם טיימרים אחרים במערכת. מצב זה מוביל לכך שכל התקן מתוכנת ומופעל באופן נפרד, ללא סנכרון עם התקנים אחרים וללא אפשרות לניהול כולל של פעולות הבית. בהיעדר יחידת בקרה מרכזית המחזיקה לוח זמנים אחיד, לא ניתן לנהל תרחישים חכמים או לתאם פעולות בין מספר יחידות קצה באופן עקבי. מצב זה מקשה על ניהול משולב של מערכות הבית. מגבלה זו מדגישה את הצורך ביחידת בקרה מרכזית אחת – מעין "שעון ביתי חכם" – המאפשרת ניהול מרוכז של לוח הזמנים, סנכרון בזמן אמת ופיקוח כולל על רכיבי הקצה.

- **חוסר גמישות תכנותית והגבלות במספר וארגון האירועים:** פתרונות קיימים רבים מגבילים את המשתמש במספר תוכניות ההפעלה ובאופן הגדרתן וארגונן. מערכות בסיסיות מאפשרות תכנות מצומצם או מבוסס תבניות קבועות מראש, דבר המקשה על התאמה למצבים חריגים או דינמיים. טיימרים דיגיטליים מתקדמים יותר, כדוגמת מוצרי Av-Gad, מציעים עד 48 אירועים שבועיים אפשריים [3], אך גם הם פועלים לפי תבניות תכנות קשיחות (למשל חלוקה יומית או שבועית קבועה). כתוצאה מכך, הם אינם מאפשרים יצירת תרחישים מורכבים או מותנים – כגון דילוג אוטומטי על תוכנית מסוימת במקרה של חג באמצע השבוע. בנוסף, שינוי תדיר בלוחות הזמנים דורש כניסה לממשק התכנות בכל פעם מחדש, ופוגע בנוחות וביעילות התפעול.

- **דיוק מוגבל בתזמון ולוחות זמנים לא-דינמיים:** רבים מהטיימרים הביתיים אינם מאפשרים קביעת זמני הפעלה מדויקים ברזולוציה של דקה. בשעונים מכניים, לדוגמה, רזולוציית התכנון היא של 15–30 דקות בלבד. גם טיימרים דיגיטליים, כגון טיימר ה-NFC של Av-Gad, מאפשרים מרווח תכנות מינימלי של 30 דקות [3], ואינם מתעדכנים אוטומטית בהתאם לעונות השנה. שינויי השקיעה והזריחה מחייבים את המשתמש לכוון מחדש את הטיימר כמעט מדי שבוע, תהליך ידני המועד לטעויות ולשכחה. אף שחלק מהחברות, כדוגמת ZMAN Switch, שילבו לוח שנה עברי מובנה לצורך סנכרון אוטומטי [2], רוב הפתרונות הקיימים אינם כוללים פונקציונליות זו. בנוסף, טיימרים רגילים אינם מתחשבים במעבר בין שעון קיץ וחורף או בערבי חג החלים באמצע השבוע. כתוצאה מכך, חוסר הדינמיות והדיוק 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 במוצר של Av-Gad, נדרשת הצמדת סמארטפון למכשיר בתקשורת NFC בכל שינוי תצורה או עדכון תוכנית. גישה זו מגבילה את הגמישות בתזמון ומחייבת נוכחות פיזית של המשתמש בסמוך לשעון השבת. מצב זה מדגיש את הצורך במערכות בעלות ממשק מקומי עצמאי ויכולת פעולה רציפה, שאינן תלויות בהתקן חיצוני לצורך תפקודן התקין.

לסיכום, מן הסקירה עולה כי פתרונות מסחריים למיתוג ותזמון קיימים בשוק, אך רבים מהם פועלים כיחידה בודדת, בעלי גמישות תכנותית מוגבלת, ולעיתים אינם תומכים בלוחות זמנים דינמיים או בממשק מקומי נגיש. בהתאם לכך, הפריקט הנוכחי מציג יחידת בקרה מרכזית מבוססת ESP32 המאפשרת הגדרת לוח זמנים שבועי, תצוגה וממשק Web מקומי, וכן העברת פקודות ליחידות קצה בתקשורת RF. שילוב זה נועד לספק ניהול מרוכז, דיוק תזמון ונוחות תפעולית – בפרט עבור תרחישי שימוש של שגרה/שבת המוגדרים מראש.

2.3 מטרות ויעדי הפרויקט

הניתוח שבוצע למגוון הפתרונות הקיימים בתחום תזמון ובקרת צרכני חשמל לשבת מצביע על היעדר פתרון מרוכז המספק מענה כולל לדרישות התפקודיות וההלכתיות במלואן. הפתרונות הקיימים, על אף התקדמותם, מאופיינים במגבלות כגון היעדר תקשורת בין התקנים, דיוק תזמון מוגבל, צורך בכוונן 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 בצרכני חשמל לשבת, בעלת גמישות תכנותית גבוהה, תזמון מדויק ותקשורת בין יחידות – תוך שמירה על התאמה מלאה להלכה.

לשם מימוש המטרה המרכזית, הוגדרו יעדי הפיתוח הבאים, המהווים את מסגרת העבודה של הפרויקט ומכוונים למתן מענה שיטתי למגבלות שנסקרו:

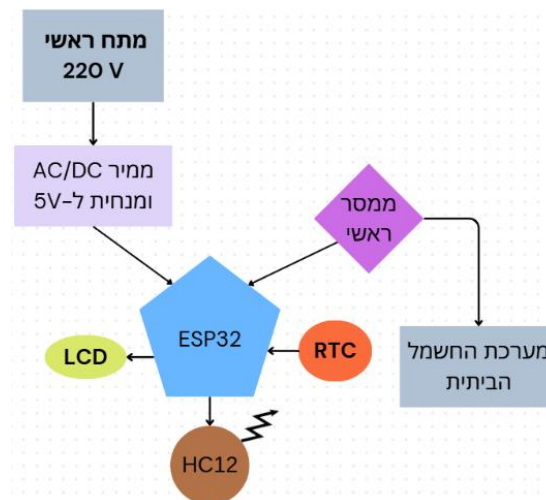
- **בקרה מרכזית ותקשורת בין יחידות:** יצירת ארכיטקטורה שבה יחידת בקרה מרכזית מתקשרת ומסנכרנת יחידות קצה מרוחקות, ובכך מציעה ניהול מערכתי כולל במקום פתרונות עצמאיים.
- **גמישות תכנותית רחבה:** תמיכה במספר גדול של אירועים שבועיים, עם רזולוציית זמן גבוהה וגמישות מלאה בתבניות התזמון, ללא אילוצים קשיחים.
- **תזמון מדויק המבוסס זמן-אמת:** שימוש במנגנון שמירת זמן אמת המאפשר תזמון מדויק ברזולוציית דקה, מפחית את הצורך בכוונן ידני, ומקל על עדכון לוחות זמנים לאורך השנה.
- **התאמה הלכתית מלאה:** יצירת מצב פעולה ייעודי המבטיח שהמערכת תפעל באופן אוטונומי ובלתי תלוי במעורבות המשתמש במהלך השבת, בהתאם לעקרונות ההלכתיים המקובלים.
- **נגישות וחוייט משתמש משופרת:** פיתוח ממשק תכנון וניהול נוח ואינטואיטיבי, המאפשר תפעול מרחוק ללא צורך באמצעי תכנות ייעודיים או גישה פיזית קבועה למכשיר.

יעדים אלה מגדירים את הדרישות הפונקציונליות המרכזיות של יחידת השעון, ויהוו בסיס להערכת עמידת הפרויקט במטרותיו בפרקי הדיון 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 היכולה לתקשר עם יחידות קצה חכמות (כגון מתג שבת חכם). התכנון ההנדסי בוצע מתוך מחויבות לעמוד בכל אחד מיעדי הפיתוח שהוגדרו בפרק "רקע תיאורטי וסקירת ספרות", סעיף 3 (מטרות ויעדי הפרויקט). מטרתו של פרק זה היא להציג את הפתרונות המבניים והטכנולוגיים שנבחרו, החל מארכיטקטורת המערכת ועד מימוש מצבי הפעולה הייעודיים.

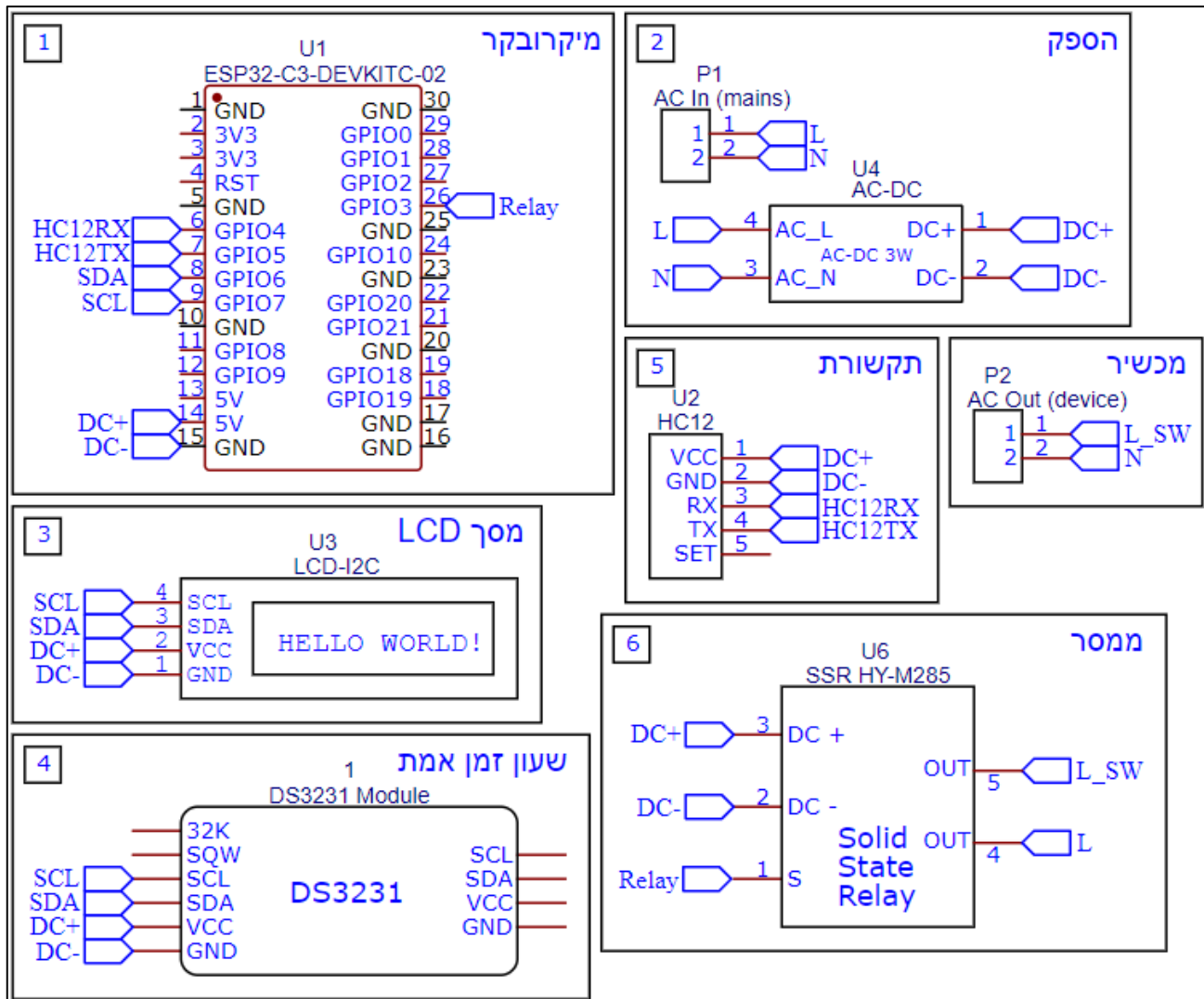
3.1 דיאגרמת בלוקים



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

3.2 שרטוט מערכת "שעון שבת חכם"

איור 3.2 מציג את חיבורי החומרה של מערכת "שעון שבת חכם" ברמת רכיבים. לצורך קריאות השרטוט חולק לשישה בלוקים: (1) בקר ESP32-C3, (2) ספק כוח, (3) תצוגת LCD, (4) מודול זמן אמת DS3231, (5) תקשורת HC-12, ו(6) ממסר SSR. האותות המרכזיים במערכת הם קווי I^2C (SDA/SCL) המשותפים ל-LCD ול-RTC, קווי UART לתקשורת עם HC-12, ואות הבקרה להפעלת הממסר. בנוסף, חיבורי ההספק כוללים כניסת מתח רשת (L/N), מסילת DC להזנת רכיבי הבקרה, ויציאת פאזה ממותגת (L_SW) להזנת הצרכן.



איור 3.2: שרטוט מערכת "שעון שבת חכם"

3.3 תיאור חשמלי ומיפוי חיבורים

לאחר הצגת השרטוט, מובא כאן תיאור חשמלי משלים המפרט את החיבורים בפועל: מהיכן מתקבל כל מתח וכל אות, לאן הם מתחברים, ומה תפקידם במערכת. פירוט זה נועד לאפשר מעבר חד בין השרטוט לבין החיווט והמימוש בפועל.

3.3.1 רשתות מתח ואותות מרכזיים

טבלה 3.1 מציגה את רשתות המתח והאותות העיקריים במערכת. לכל רשת מצוינים סוג הרשת (מתח רשת 230VAC, מתח DC, או אות תקשורת/בקרה), מקור ההזנה/האות והרכיבים אליהם היא מחוברת. ריכוז זה מאפשר להבין את מסלולי ההזנה, את קווי התקשורת (I²C ו-UART), ואת מסלול מיתוג הפאזה לעומס באמצעות ה-SSR.

הערות	צרכנים	מקור	רמת מתח / סוג	Net / Signal
פאזה נכנסת למערכת	AC-DC (AC_L), SSR (AC IN)	Mains (P1-1)	230VAC (פאזה)	L
אפס משותף (לא ממותג)	AC-DC (AC_N), Device (P2-2)	Mains (P1-2)	230VAC (אפס)	N
מסילת הזנה	ESP32-C3 (5V), LCD-I2C (VCC), DS3231 Module (VCC), HC-12 (VCC), SSR (DC+)	AC-DC (DC+)	+5VDC (ספק)	DC+
אדמה משותפת	ESP32-C3 (GND), LCD-I2C (GND), DS3231 Module (GND), HC-12 (GND), SSR (DC-)	AC-DC (DC-)	0V (GND)	DC-
פאזה לעומס לאחר מיתוג SSR	Device (P2-1)	SSR (AC OUT)	230VAC (קו לצרכן)	L_SW
I ² C Bus משותף	LCD-I2C (SDA), DS3231 Module (SDA)	ESP32-C3 (GPIO8)	I2C (TTL 0/3.3V)	SDA
I ² C Bus 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 מרכזיים

3.3.2 מיפוי פני הבקר (ESP32-C3) שבשימוש

טבלה 3.2 מפרטת את פני ה-GPIO שבשימוש במערכת ואת תפקידם. הפירוט כולל את קווי ה-I²C המשותפים לתצוגת ה-LCD ולמודול ה-RTC, את קווי ה-UART למודול ה-HC-12, ואת יציאת הבקרה לממסר ה-SSR. מיפוי זה מקשר באופן ישיר בין השרטוט לבין מימוש החומרה והתוכנה.

פין במיקרו (שם / מספר)	Net	מחובר ל...	תפקיד	הערות
5V	DC+	AC-DC (DC+)	הזנת לוח	כניסת הזנה ללוח הפיתוח
GND	DC-	AC-DC (DC-)	אדמה	אדמה משותפת לכל המערכת
GPIO8	SDA	LCD-I2C (SDA), DS3231 Module (SDA)	I ² C – נתונים	Bus משותף (SDA)
GPIO9	SCL	LCD-I2C (SCL), DS3231 Module (SCL)	I ² C – שעון	Bus משותף (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 ה-SSR

טבלה 3.2: ESP32-C3 פנים בשימוש

3.3.3 חיבורים חיצוניים (מחברים)

במערכת קיימים שני מחברים חיצוניים: Mains להזנת המערכת ממתח הרשת, ו-Device להזנת הצרכן. במחבר Mains מתקבלים מוליכי הפאזה (L) והאפס (N) המשמשים הן להזנת ספק ה-AC-DC והן לשרשרת מיתוג העומס. במחבר Device מועבר האפס (N) ישירות לצרכן, בעוד שהפאזה לצרכן (L_SW) מתקבלת לאחר מיתוג באמצעות ה-SSR. חלוקה זו מאפשרת שליטה בעומס באמצעות מיתוג הפאזה, תוך שמירה על חיבור אפס רציף לצרכן.

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

טבלה 3.3: חיבורים חיצוניים

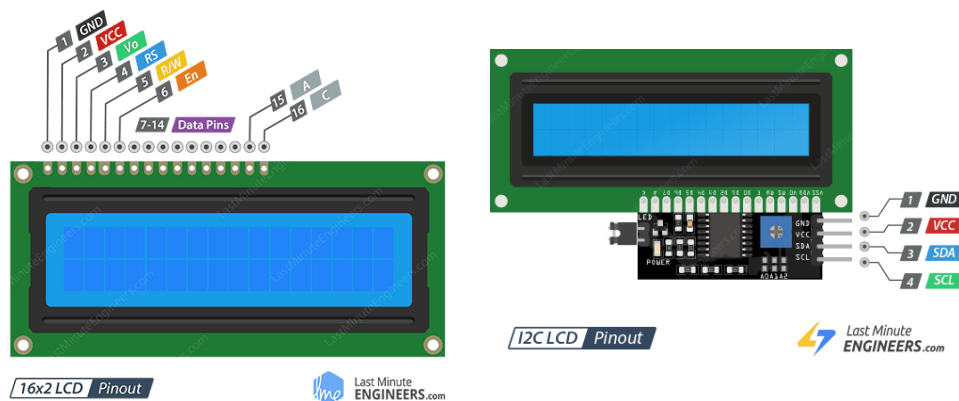
3.3.4 פרוטוקולי תקשורת

3.3.4.1 פרוטוקול I²C

ממשק (Inter-Integrated Circuit) I²C הוא ממשק תקשורת טורי דו-כיווני המשמש להעברת מידע בין התקנים דיגיטליים על גבי שני קווים משותפים בלבד: SDA (נתונים) ו-SCL (שעון). בממשק זה יש בדרך כלל התקן אחד המשמש כ-Master ויוזם את התקשורת, והתקנים נוספים (Slaves) המזוהים לפי כתובת. ה-Master מתחיל תקשורת בתנאי התחלה (START), שולח את כתובת ההתקן וכיוון הפעולה (קריאה/כתיבה), מעביר נתונים בבייטים כאשר לאחר כל בייט מתקבל ACK לאישור קבלה, ולבסוף מסיים בתנאי סיום (STOP) (איור 3.3).



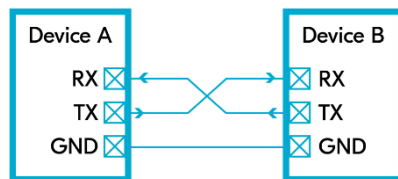
במערכת "שעון שבת חכם" ה-ESP32-C3 משמש כ-Master ומפעיל את זוג קווי התקשורת המשותף של I²C, המחובר במקביל למודול ה-DS3231 (RTC) ולמודול LCD-I²C. ה-DS3231 מתקשר ישירות בממשק I²C, בעוד שמודול ה-LCD-I²C כולל מתאם שמתרגם את פקודות ה-I²C להפעלה של בקר ה-LCD בממשק מקבילי פנימי. בחירה זו מאפשרת לחבר גם RTC וגם תצוגה על אותם שני קווים, ובמקביל מצמצמת את חיבור התצוגה ממספר גדול של קווי נתונים ובקרה לשני קווים בלבד (בנוסף להזנה) (איור 3.4), כך שהחיווט פשוט יותר ונשמרים פני GPIO למשימות נוספות ולהרחבות עתידיות.



איור 3.4: השוואת חיבור LCD עם (מימין) ובלי (משמאל) מתאם I²C [4-5]

3.3.4.2 פרוטוקול UART

ממשק (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) UART הוא ממשק תקשורת טורי אסינכרוני להעברת נתונים בין שני התקנים באמצעות שני קווים: TX (שידור) ו-RX (קליטה), ובתוספת אדמה משותפת (איור 3.5). מאחר שאין קו שעון ייעודי, שני הצדדים חייבים להיות מוגדרים לאותו Baud Rate – קצב השידור בביטים לשנייה (bps) – כדי שהדגימה של הביטים תתבצע בתזמון נכון. הנתונים נשלחים במסגרת הכוללת ביט התחלה (Start), רצף ביטי נתונים (בדרך כלל 8), ולעיתים ביט זוגיות (Parity), ולבסוף ביט סיום (Stop).



איור 3.5: חיבור UART בין שני התקנים [6]

במערכת שעון השבת, ה-ESP32-C3 מתקשר עם מודול ה-HC-12 דרך UART. מודול ה-HC-12 מתפקד כמתאם "UART אלחוטי", כך שהמידע שנשלח מהבקר ב-UART משודר בקישור RF ומתקבל בצד השני כזרם UART שקוף. בחירה זו מספקת ערך מעשי בפרויקט: תקשורת נקודתית פשוטה ליישום בין יחידת השעון ליחידת הקצה, ללא תלות בתשתית Wi-Fi ביתית וללא צורך בפרוטוקול רשת מורכב, 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 RISC-V 32bit ומשלב ליבה אחת (Single-Core). הרכיב כולל יחידות תקשורת אלחוטיות: Wi-Fi ו-Bluetooth. הוא מציע שילוב מאוזן בין ביצועים מספקים, צריכת הספק נמוכה יחסית, ופונקציונליות מלאה. ה-C3 כולל גם יכולות אבטחה מתקדמות חיוניות, כגון Secure Boot ו-Flash Encryption.

עקרון פעולה:

הבקר פועל כיחידת עיבוד מרכזית. התוכנה מנצלת את הקישוריות האלחוטית המובנית לצורך סנכרון זמן אינטרנטי (NTP), והרצת שרת אינטרנט מקומי (web server) המאפשר גישה לממשק המשתמש (UI). הליבה היחידה מנהלת את לוגיקת לוח הזמנים, את שמירת הנתונים בזיכרון לא־נדיף ואת התקשורת עם רכיבים חיצוניים באמצעות פרוטוקולים דוגמת UART (למודול HC-12) ו-I²C (ל-RTC ולתצוגה).

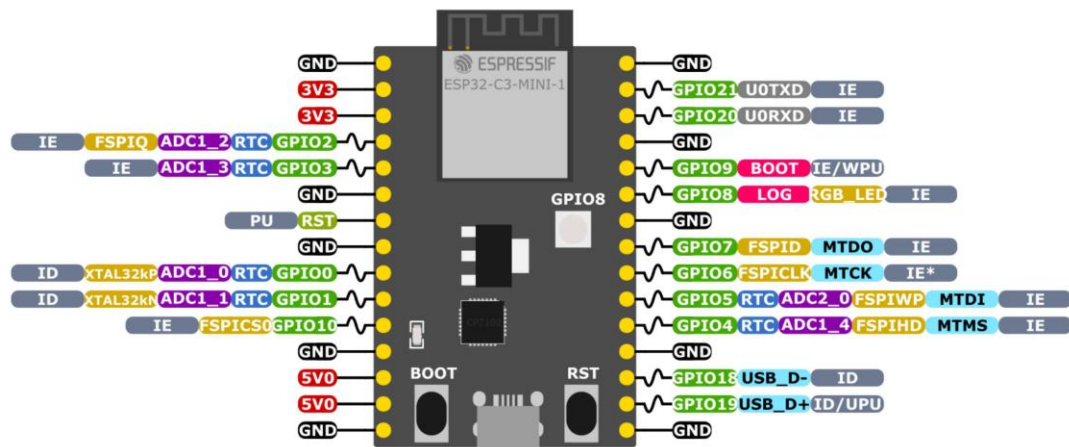
השימוש בפרויקט שלנו:

ה-ESP32-C3 משמש כיחידת הבקרה המרכזית. הוא אחראי על ניהול לוח הזמנים להפעלה וכיבוי של הממסרים, תקשורת עם מודול ה-RTC לשמירה על דיוק הזמן, שליטה במסך ה-LCD, ותיאום עם מודול ה-HC-12 לצורך שליחת פקודות ובקרת מצב יחידות קצה. בנוסף, ה-ESP32-C3 מספק ממשק אינטרנטי לשליטה נוחה של המשתמש.

תיאור פינים עיקריים (לפי גרסת DevKitM):

- **3.3V** – יציאת מתח 3.3V.
- **GND** – הארקה.
- **EN** – איפוס/הפעלה מחדש של הבקר.
- **GPIO0 – GPIO21** – פינים רב-שימושיים לקלט/פלט (כולל תמיכה ב-UART, I²C, SPI, PWM).
- **USB** – ממשק טעינה ותכנות (דרך USB-to-UART).
- **5V** – כניסת מתח חיצונית (מומר 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

PWM Capable Pin
GPIOX GPIO Input and Output
JTAG/USB JTAG for Debugging and USB
FLASH External Flash Memory (SPI)
ADCX_C 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)

SPIO STATE:
UPU: USB Weak Pull-up
WPU: Weak Pull-up (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)

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

3.4.2 HC-12 – מודול תקשורת אלחוטית לטווח ארוך

תיאור כללי:

ה-HC-12 הוא מודול תקשורת אלחוטית חזק ואמין העובד בתדר 433MHz. המודול מאפשר תקשורת דו-כיוונית בין שני מיקרו-בקרים באמצעות ממשק UART (Serial) רגיל. 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 מתפקד כמעין "כבל סיריאלי 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 ה-HC-12 משמש לתקשורת בין "שעון שבת חכם" לבין יחידות הקצה. בקר השעון משמש כיחידת בקרה מרכזית, ושולח באמצעות HC-12 פקודות ("shabbat" או "week") לבקר יחידת הקצה, אשר מגיב בהתאם ומפעיל את ממסריו. באופן זה מתאפשר סנכרון מלא בין שני המכשירים גם ללא חיבור רשת אלחוטית מקומית.

תיאור פינים עיקריים:

- **VCC** – הזנת מתח פעולה (3.2V-5V).
- **GND** – הארקה.
- **TXD** – פלט סיריאלי (מתחבר ל-RX של המיקרו-בקר).
- **RXD** – קלט סיריאלי (מתחבר ל-TX של המיקרו-בקר).
- **SET** – כניסה לתכנות באמצעות פקודות AT (כאשר נמשך ל-LOW).



איור 3.4: מודול HC-12 [8]

3.4.3 מודול RTC מבוסס DS3231 (RTC IC)

תיאור כללי:

ה-DS3231 הוא רכיב שעון זמן אמת (RTC IC) מדויק ואמין, הכולל מתנד פנימי מיוצב טמפרטורה (TCXO) וחיישן טמפרטורה לתיקון סטיות תדר. בפרויקט נעשה שימוש במודול RTC הכולל את רכיב ה-DS3231 יחד עם רכיבי עזר (כגון תושבת סוללה ורכיבי תמיכה), ומאפשר שמירה על שעה ותאריך גם בזמן הפסקת מתח באמצעות סוללת גיבוי.

עקרון פעולה:

רכיב ה-DS3231 שומר על זמן אמת באופן עצמאי ומספק נתוני תאריך/שעה דרך ממשק I^2C . בעת הפסקת מתח ראשי המודול עובר אוטומטית להזנה מסוללת הגיבוי וממשיך לפעול ללא איבוד מידע. המיקרו-בקור קורא את נתוני הזמן מה-RTC לפי דרישה, ויכול לעדכן אותו בעת סנכרון זמן.

השימוש בפרויקט שלנו:

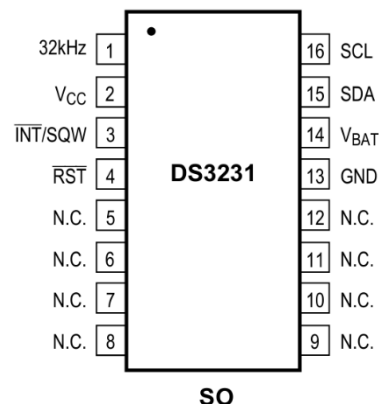
מודול ה-RTC המבוסס DS3231 משמש כמקור זמן יציב ללוח הזמנים של ה"שעון שבת חכם". הוא מאפשר שמירה על זמן מדויק גם לאחר הפסקות חשמל, ובכך מבטיח שתזמון פעולת הממסר יתבצע בשעות שנקבעו. בנוסף, בעת אתחול ה-ESP32 נקרא הזמן מה-RTC ומשמש כבסיס לשעון המערכת, ובמקרה שקיימת קישוריות רשת מתבצע סנכרון מול NTP וה-RTC מתעדכן בהתאם.

תיאור פינים עיקריים:

- **VCC** – הזנת מתח פעולה (3.2V-5V).
- **GND** – הארקה.
- **SDA** – קו נתונים לתקשורת I^2C .
- **SCL** – קו שעון לתקשורת I^2C .



איור 3.6: מודול RTC [10]



איור 3.5: תצורת פינים של DS3231 [9]

3.4.4 LCD 16x2 עם ממשק I²C

תיאור כללי:

ה-LCD בגודל 16x2 הוא תצוגה אלפאנומרית סטנדרטית המבוססת על בקר HD44780 של חברת Hitachi. התצוגה כוללת שתי שורות, כל אחת בעלת 16 תווים, וכל תו מורכב מ-40 פיקסלים (5x8). בעזרת ממיר ממשק (expander) מדגם PCF8574, התצוגה מקבלת תקשורת דרך ממשק I²C במקום שימוש ב-8 קווי נתונים ישירים, ובכך מצמצמת משמעותית את מספר הפינים הדרושים מהמיקרו-בקר.

עקרון פעולה:

בקר ה-HD44780 מנהל את כל פעולת התצוגה הפנימית: כתיבת תווים, שליטה בתאורה אחורית, הזזת סמן, והצגת טקסט בשתי השורות. המודול מקבל פקודות ונתונים מהמיקרו-בקר דרך ממשק I²C אשר מתורגמים לאותות לוגיים מתאימים עבור בקר ה-LCD. בדרך זו נדרש רק קו נתונים אחד (SDA) וקו שעון אחד (SCL), בנוסף למתח והארקה.

השימוש בפרויקט שלנו:

תצוגת ה-LCD משמשת להצגת מידע בזמן אמת למשתמש – שעה, מצב שבת/שבוע, מצב רשת Wi-Fi ומצב הממסר. התצוגה מאפשרת חיווי ברור ונוח על מצב המערכת בכל רגע, ומהווה ממשק משתמש מרכזי לצד השליטה דרך הממשק האינטרנטי.

תיאור פינים עיקריים:

- **VCC** – הזנת מתח 5V.
- **GND** – הארקה.
- **SDA** – קו נתונים לתקשורת I²C (מתחבר ל-SDA של ה-ESP32).
- **SCL** – קו שעון לתקשורת I²C (מתחבר ל-SCL של ה-ESP32).



איור 3.7: תצוגת LCD עם ממשק I²C [11]

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

תיאור כללי:

ממסר מצב-מוצק (Solid-State Relay) הוא התקן אלקטרוני המאפשר מיתוג צרכני חשמל ללא חלקים מכניים. בניגוד לממסר אלקטרומכני רגיל, שבו מגעים נסגרים ונפתחים פיזית, ב-SSR פעולת המיתוג מתבצעת באמצעות רכיבים מוליכים-למחצה כגון טריאק או טרנזיסטורים. היתרון המרכזי הוא פעולה שקטה לחלוטין, מהירות מיתוג גבוהה מאוד, אורך חיים ארוך במיוחד ואמינות גבוהה תחת עומס.

עקרון פעולה:

בממסר מצב-מוצק (SSR) למתח AC, המיתוג מתבצע אלקטרונית. כאשר המיקרו-בקר שולח אות DC, הוא מפעיל מבודד אופטי (Opto-Triac Driver), אשר בתורו מפעיל Triac בצד העומס ומבטיח בידוד גלויני מלא בין מעגל הבקרה (DC) לצד העומס (AC). ה-Triac משנה את מצב ההולכה שלו בצורה אלקטרונית לחלוטין וללא תנועה פיזית. בממסרים אלו משולבת לרוב פונקציית Zero-Cross, המפעילה את ה-Triac רק כאשר גל ה-AC עובר בנקודת האפס. מגגנון זה מפחית רעשים אלקטרומגנטיים (EMI) ומצמצם עומסי התנעה. באופן זה, המערכת משיגה מיתוג שקט לחלוטין, אמין, ובעל אורך חיים גבוה במיוחד.

השימוש בפרויקט שלנו:

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

תיאור פינים עיקריים:

- **DC+ \ DC-** – כניסת מתח (בדרך כלל DC 3-32V).
- **CH1** – כניסת שליטה מצד המיקרו-בקר.
- **AC Load** – יציאת המתח המחוברת לצרכן החשמל (בדרך כלל נקודות L ו-N).



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

3.4.6 AC-DC Converter – ממיר מתח לרכיבי בקרה

תיאור כללי:

ממיר ה-AC-DC משמש להמרת מתח הרשת (230V AC) למתח ישר נמוך (בדרך כלל 5V DC או 3.3V DC) המתאים להזנת המיקרו-בקר ושאר רכיבי הבקרה במערכת. מדובר ברכיב קומפקטי ואמין הכולל מעגלי יישור, סינון וייצוב 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 בקבלים וממיר אותו למתח ישר יציב באמצעות ממיר ממותג פנימי (Switching Regulator). הממיר כולל בידוד גליוני בין כניסת הרשת לבין יציאת ה-DC, ומספק מתח יציב להזנת ה-ESP32, מודולי התקשורת והמסרים.

השימוש בפרויקט שלנו:

הממיר משמש להזנת ה-ESP32 וכל שאר רכיבי הבקרה במתח 5V DC. הוא מאפשר חיבור ישיר של המערכת לרשת החשמל, תוך שמירה על בטיחות ובידוד מלא. כך נשמרת אספקת מתח יציבה לכלל הרכיבים.

תיאור חיבורים עיקריים:

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



איור 3.9: ממיר AC-DC 5V [13]

3.4.7 הצדקת בחירת רכיבי חומרה מרכזיים

בחירת רכיבי החומרה לפרויקט "שעון שבת חכם" נעשתה מתוך איזון בין דרישות ליבה פונקציונליות – תזמון מדויק, קישוריות אמינה ויכולת ניהול ממשק אינטרנטי – לבין שיקולי אמינות, זמינות, עלות ופשטות הרחבה ליחידות קצה נוספות. תכנון המערכת נשען על ארכיטקטורה היררכית, שבה יחידת שעון מרכזית מבצעת את עיקר הלוגיקה והבקרה, ומולה פועלות יחידות קצה פשוטות יותר, הנשלטות מרחוק.

1. מיקרו-בקרים: ESP32-C3

ארכיטקטורת המערכת מתבססת על הפרדה בין בקר מרכזי (יחידת השעון) לבין יחידות קצה מבוקרות, כך שעומס העיבוד, ניהול הזמן, התקשורת והרצת ממש המשתמש מרוכזים ביחידה המרכזית.

• ESP32-C3 – יחידת הבקרה המרכזית:

בשלב התכנון הראשוני נשקלה האפשרות לממש את יחידת השעון באמצעות בקר Arduino קלאסי (כגון ATmega328P), בשל פשטותו ומספר קווי ה-I/O הזמינים. עם זאת, במהלך התקדמות הפרויקט התברר כי נדרש ממשק אינטרנטי מובנה לצורך ניהול נוח של לוח הזמנים ושל מצבי המערכת. דרישה זו הצריכה יכולות רשת מתקדמות, ובראשן תמיכה ב-Wi-Fi והרצת שרת Web מקומי.

לאור זאת, הוחלט לוותר על השימוש ב-Arduino כבקר מרכזי ולעבור לשימוש ב-ESP32-C3. בקר זה מספק קישוריות Wi-Fi ו-Bluetooth מובנית, יכולות אבטחה מתקדמות (כגון Secure Boot), ומהירות עיבוד מספקת לניהול לוגיקת השעון והממשק האינטרנטי. יתרונו העיקרי של ה-Arduino – מספר רב של כניסות ויציאות – אינו מהווה 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 ופשטות מימוש.

2. תקשורת אלחוטית: מודול HC-12

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

• HC-12 (433MHz RF)

נשקלו מספר חלופות, ובהן Wi-Fi, Bluetooth Low Energy ופתרונות RF ייעודיים. מודול HC-12 נבחר בשל אמינותו, טווח פעולה ארוך (עד כ-1 ק"מ בקו ראייה) וכושר חדירה טוב דרך קירות, הנובע מתדר העבודה 433MHz. יתרון משמעותי נוסף הוא אופי הפעולה השקוף של המודול – תקשורת UART פשוטה – המאפשר תכנון יחידות קצה מבוססות מיקרו-בקרים פשוטים וזולים, תוך הפחתה משמעותית של מורכבות התוכנה בצד הפריפריה. כמו כן, השימוש ב-HC-12 מאפשר למערכת לפעול ללא תלות בזמינות רשת Wi-Fi, דבר המהווה דרישה קריטית עבור מערכת תזמון.

3. תצוגה ומיתוג: LCD ו-SSR

• תצוגת LCD 16x2 עם ממשק I²C

התצוגה נבחרה על פני חיבור מקבילי ישיר. חיבור מקבילי היה דורש מספר רב של פני GPIO, משאב מוגבל ויקר בבקר ESP32-C3. שימוש בממיר I²C (PCF8574) אפשר חיסכון משמעותי במשאבי הבקר, והסתפקות בשני קווים בלבד (SDA ו-SCL) לצורך שליטה מלאה בתצוגה.

• Solid-State Relay (SSR):

לצורך מיתוג העומס שולב ממסר מצב מוצק (SSR), בנוסף לממסר אלקטרומכני סטנדרטי. שילוב זה נועד להדגמת ההבדלים בין טכנולוגיות מיתוג. בעוד שממסר מכני הוא פתרון פשוט וזול, ה-SSR מציג יתרונות של מיתוג שקט לחלוטין, זמן תגובה מהיר ואורך חיים גבוה במיוחד, עקב היעדר רכיבים מכניים נעים.

4. ספק כוח: ממיר AC-DC

רכיב ה-AC-DC נבחר לצורך אספקת מתח יציב לכל רכיבי המערכת – הבקר, מודול התקשורת, התצוגה והממסרים. מבחינה עקרונית, ניתן היה להזין את הבקר דרך שקע חשמל חיצוני, אולם פתרון כזה 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 כלל הרכיבים המחוברים אליו. לפיכך, נדרש מקור מתח מרכזי שיספק הזנה יציבה ואמינה לכלל המערכת. ממיר ה-AC-DC מאפשר המרה ישירה ממתח רשת (230V AC) למתח נמוך (5V DC), תוך שמירה על בידוד חשמלי ובטיחות, ומאפשר הזנה משותפת לכל רכיבי הבקרה ללא תלות ביכולת ההספק של הבקר עצמו.

4.1 תוכנות שפותחו

במסגרת הפרוייקט 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 נכתבה בשפת ++C/C באמצעות סביבת Arduino IDE, ומבוססת על בקר ESP32. היא אחראית על ניהול השעון, לוח הזמנים, התקשורת עם המתג, והתצוגה למשתמש.

- נעשה שימוש בספריות:
WiFi.h, WebServer.h, ArduinoOTA.h, Preferences.h, RTCLib.h, LiquidCrystal_I2C.h, ו-time.h.
- השעון מתחבר לרשת ה-Wi-Fi הביתית, מסנכרן את השעה דרך NTP, ומעדכן את שעון ה-RTC (רכיב DS3231).
- במערכת פועל שרת אינטרנט 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 בממסר המקומי (מצבי ON / OFF / AUTO), והגדרת לוח זמנים שבועי להדלקה וכיבוי אוטומטיים.
- המערכת שומרת את נתוני לוח הזמנים בזיכרון הלא-נדיף של ה-ESP32 (Preferences) כך שהם נשמרים גם לאחר כיבוי המתח.
- תמיכה מלאה ב-עדכון תוכנה דרך האוויר (OTA) מאפשרת העלאת גרסה חדשה ללא צורך בגישה פיזית למכשיר.
- התקשורת עם המתג נעשית באמצעות מודול HC-12 בתקשורת טורית (Serial), באמצעות פקודות טקסט פשוטות כגון "shabbat" ו-"week".
- בנוסף, מוצגת על גבי תצוגת LCD I²C (0x27) השעה, מצב הממסר והחיבור לרשת.

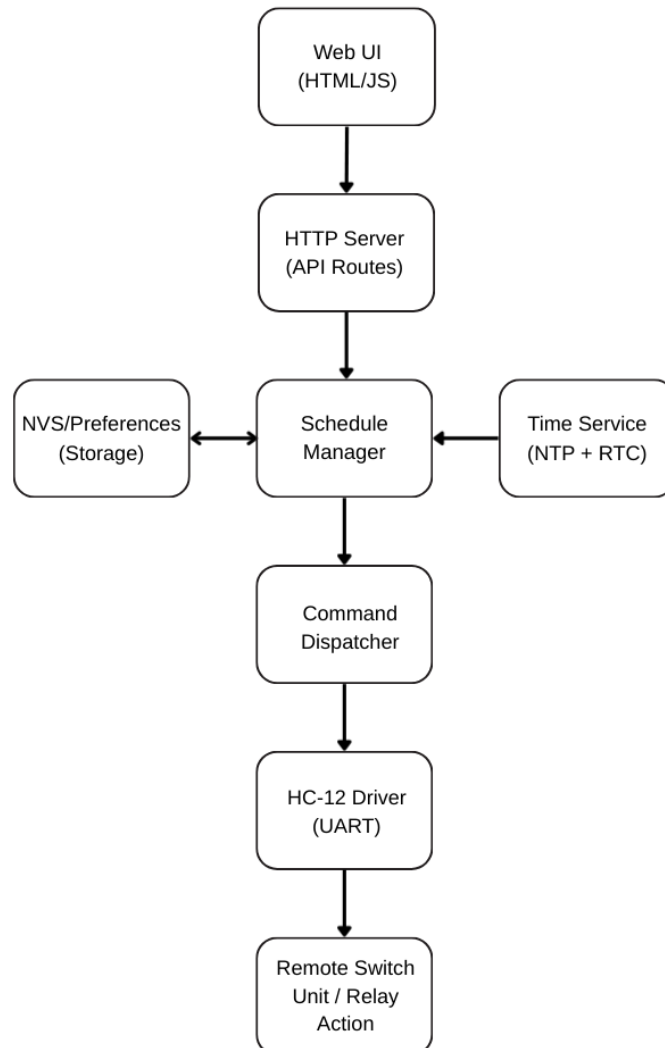
4.1.2 ממשק אינטרנטי למשתמש (Web Interface)

ממשק השליטה (המוגדר בקובץ index_page.h) נכתב ב-CSS, HTML ו-JavaScript, ומשולב ישירות בזיכרון ה-ESP32.

- הממשק מאפשר:
 - הצגת השעה בזמן אמת.
 - שליטה ידנית בממסר המקומי (ON / AUTO / OFF).
 - מעבר בין מצב חול ל-מצב שבת.
 - הוספה, שינוי וצפייה באירועי לוח הזמנים השבועי.
- התקשורת עם ה-ESP32 נעשית בפרוטוקול HTTP דרך קריאות (fetch) AJAX, אל נקודות קצה כגון /status/ ו-/cmd, /schedule/.

4.1.3 ארכיטקטורת תוכנה (תרשים בלוקים)

התוכנה תוכננה במבנה מודולרי המפריד בין ממשק ה-Web (קלט משתמש), לוגיקת התזמון (Schedule Manager), ושכבת התקשורת ליחידת הקצה (HC-12). איור 3.13 מציג את זרימת המידע מהפקודות בממשק ועד לביצוע פעולת מיתוג ביחידת הקצה, תוך שימוש בשירות זמן (NTP/RTC) ושמירת נתונים ב-Preferences (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 בבקרה מרכזית ובתקשורת בין יחידות. בניגוד לטיימרים נפרדים שעובדים בבידוד, המערכת בנויה סביב שעון מרכזי (מבוסס רכיב ESP32), המהווה את יחידת השליטה הראשית, ויחידות קצה מרוחקות הפרוסות בבית. יחידות הקצה מקושרות ליחידה המרכזית באופן אלחוטי (באמצעות תקשורת RF), כך שמתאפשרת בקרה מרוכזת.

- **שליטה מרוכזת:** המשתמש קובע את לוח הזמנים פעם אחת בשעון המרכזי, והפקודות משודרות לכל היחידות הרלוונטיות בבית. לדוגמה, ניתן בלחיצת כפתור להעביר בבת אחת את כל הבית למצב "שבת" – לחסום שינוי מצב מתגים – ובצאת השבת להחזיר את הכל למצב רגיל.

- **תקשורת דו-כיוונית:** התקשורת הדו-כיוונית (הכוללת ACK או מנגנון ניטור) מאפשרת אימות שהפקודות בוצעו. במקרה של תקלה או חוסר תגובה של אחד המתגים, יחידת השעון יכולה להתריע.

יכולת זו מייצגת צעד לכיוון "בית חכם כשר", שבו הרכיבים פועלים כמכלול מתואם ולא בצורה יחידנית.

4.2.2 מנגנון תזמון מדויק וסנכרון זמן

כדי לעמוד ביעד של **דיוק מרבי בתזמון**, המערכת משלבת מנגנוני שמירת זמן מתקדמים:

- **רזולוציית תזמון גבוהה:** המערכת מציעה רזולוציית תזמון ברמת הדקה, המאפשרת לקבוע אירועים לזמן מדויק (בניגוד למרווחים של 15–30 דקות בטיימרים אנלוגיים).
- **סנכרון אוטומטי:** הדיוק מושג בזכות סנכרון NTP (Network Time Protocol) ושימוש בשעון זמן אמת (RTC) מדויק. המערכת מטפלת אוטומטית בשינויי שעון קיץ/חורף ובכל עדכון זמן, ובכך חוסכת את הצורך בכוונן ידני שבועי.
- **פוטנציאל הרחבה:** בזכות הסנכרון הרשתי, קיימת אפשרות להרחבה עתידית שתשלב API של זמני הלכה (זריחה/שקיעה אוטומטיים), מה שמבטיח דיוק וביטחון מרבי בתזמון.

4.2.3 גמישות תכנותית וממשק משתמש ידידותי (Web-Based Interface)

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

- **לוח זמנים דינמי:** המערכת מבוססת תוכנה המאפשרת רמה גבוהה מאוד של גמישות בהגדרת זמני ההפעלה, עם אפשרות לתכנת עשרות אירועים שונים לשבוע (במימוש הנוכחי הוגדר למשל מקסימום 32 אירועים, אך עקרונית ניתן להרחיב זאת בקוד). ניתן לקבוע תרחישים מגוונים ולוחות זמנים שונים לימים שונים או לחגים.
- **ממשק משתמש:** המערכת מעניקה ממשק משתמש גרפי דרך הדפדפן (Web-based), המקל מאוד את ההגדרה והשימוש. ממשק זה מאפשר למשתמש לערוך ולשמור תוכניות בקלות רבה, ללא צורך בגישה פיזית להתקן או בחיבור מחשב מיוחד.
- **ניטור מרחוק:** המערכת מאפשרת ניטור מרחוק באמצעות ה-Wi-Fi המקומי, המאפשר לראות במבט מהיר את כל זמני ההפעלה המתוכננים לשבת הקרובה ולעדכןם.

4.2.4 מימוש התאמה הלכתית ומצב שבת אוטומטי

הפרויקט מיועד לעמוד ביעד של **התאמה מובנית למסגרת ההלכתית** באמצעות שילוב מצב פעולה ייעודי:

- **מצב שבת (Shabbat Mode):** בעת כניסת שבת, יחידת השעון שולחת לכל יחידות הקצה פקודת מעבר ל"מצב שבת". במתג השבת החכם (המתואר במסמך נפרד) מצב זה כולל הפעלת **ממסר עקיף במתג החכם** שמשלים את המעגל ללא תלות במפסק הידני. מצב הממסרים **נקבע וננעל** כך שהמכשיר נשאר

במצב בו היה (דלוק/כבוי) לאורך השבת. גישה זו מממשת נעילה אלקטרונית של המפסק ובכך **מונעת חילול שבת בטעות** (בדומה ל- ZMAN Switch [2]).

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

4.2.5 פתיחות והרחבה עתידית

המערכת תוכננה להיות מודולרית ופתוחה לשינויים:

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

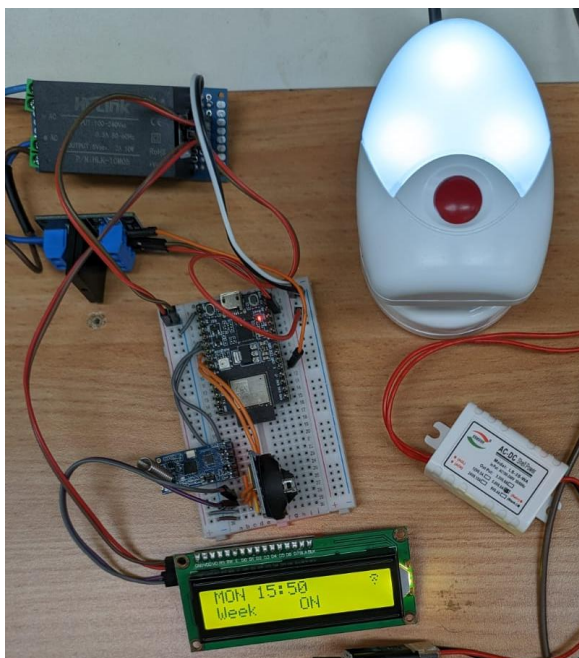
5. תוצאות

איור 4.1 מציג דוגמה ללוח זמנים שבועי שהוגדר במערכת. באיורים 4.2–4.6 מוצגת התנהגות המערכת בזמן אמת: ביצוע אירועי OFF/ON בדקות עוקבות כפי שהוגדר בלוח, כאשר התצוגה מציגה את יום השבוע, השעה והפעולה שבוצעה. לצורך המחשה רציפה של פעולת המערכת בזמן אמת, נוסף סרטון הדגמה (איור 4.7) הזמין באמצעות קוד QR או הקישור [11].

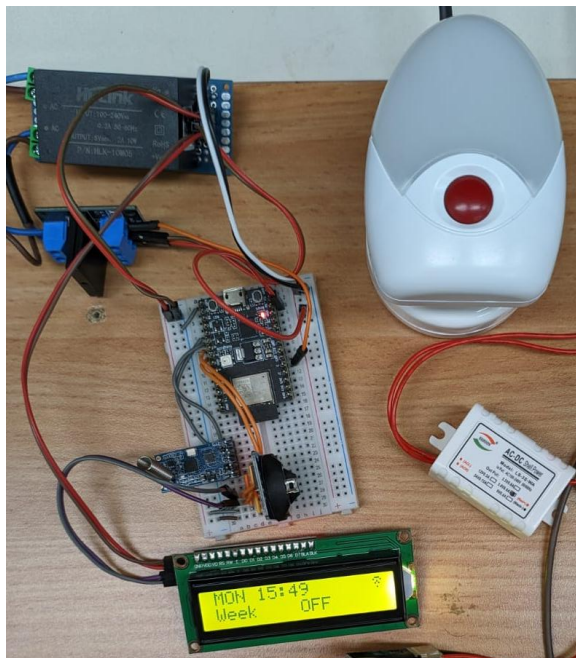
במהלך ניסויי תקשורת נמצא כי רצף פקודות מהיר במיוחד (מעבר מצבים בתדירות גבוהה) מפחית את אמינות הקליטה בקישור ה-RF. בהתאם לכך, מנגנון ההפעלה הוגדר סביב הנחת שימוש ריאלית: המשתמש משנה מצב לעיתים רחוקות (בחירה אחת, ולעיתים תיקון נקודתי), ולא מבצע החלפות מצב חוזרות בפרקי זמן קצרים. על בסיס הנחה זו, המערכת פעלה באופן יציב בתרחישי שימוש רגילים.

זמן	יום	מצב	פעולות
15:50	הדלקה	ב'	מחק
15:51	כיבוי	ב'	מחק
15:52	הדלקה	ב'	מחק
15:53	כיבוי	ב'	מחק

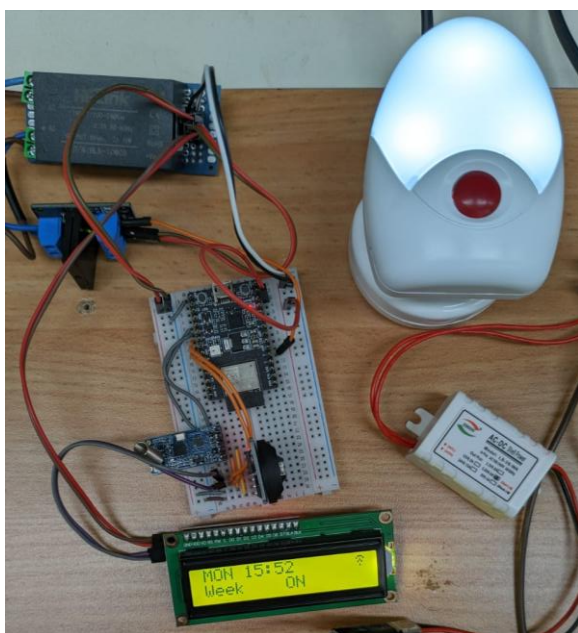
איור 4.1: דוגמה ללוח



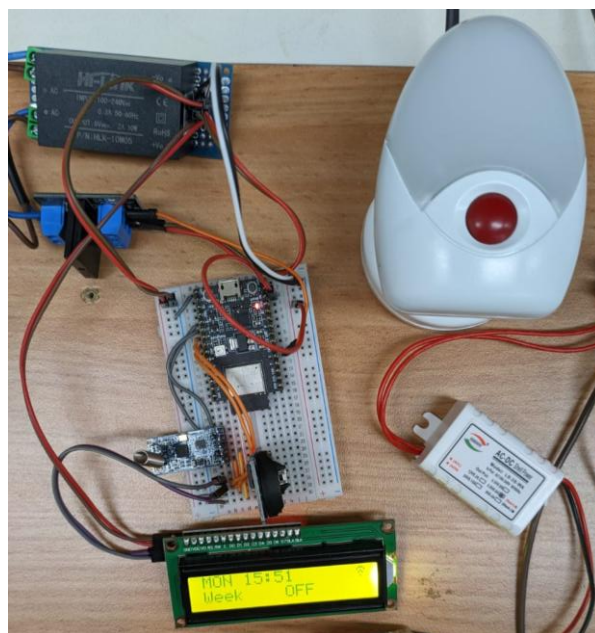
אזור 4.3: MON 15:50 ON



אזור 4.2: MON 15:49 OFF



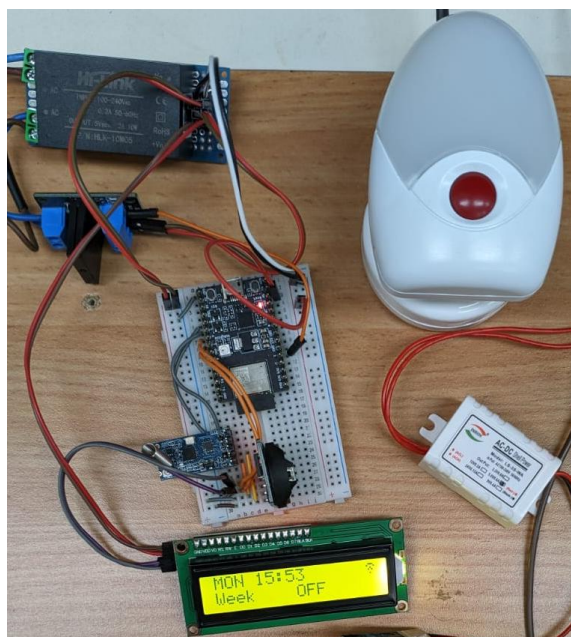
אזור 4.5: MON 15:52 ON



אזור 4.4: MON 15:51 OFF



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



איור 4.6: MON 15:53 OFF

6. מסקנות וסיכום

פרק זה מסכם ומעריך באופן ביקורתי את עבודת הפרויקט מראשיתה ועד סופה. הוא מנתח את רמת העמידה במטרות שנקבעו, מציע הסברים לתוצאות שהושגו ומציג כיווני פיתוח עתידיים.

6.1 עמידה במטרות הפרויקט והערכה ביקורתית

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

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

- **בקה מרכזית ותקשורת רשתית:** יעד זה מומש בהצלחה באמצעות פרוטוקול התקשורת האלחוטית RF בין יחידת השעון המרכזית למתגים המרוחקים (סעיף 5.1). יכולת זו מאפשרת סנכרון של כלל המתגים מרחוק ובלחיצת כפתור אחת, ומבטלת את הצורך בתכנות פיזי ומבודד של כל מכשיר, ובכך ממלאת פער משמעותי בשוק.

- **גמישות תכנותית רחבה ונגישות:** יעד זה הושג בזכות פיתוח ממשק משתמש גרפי מבוסס Web (סעיף 5.3) המאפשר תכנות עשרות אירועים שבועיים. הממשק הידידותי מאפשר ניהול נוח ומרחוק של לוח הזמנים, ובכך משפר משמעותית את חוויית המשתמש בהשוואה לממשקים מכניים קיימים.

- **תזמון מדויק המבוסס זמן־אמת:** הדיוק הנדרש מומש באמצעות שילוב סנכרון NTP ורכיב RTC מדויק (סעיף 5.2). שילוב זה מאפשר שמירה על זמן עדכני, ובמקרים של חוסר זמינות רשת – הסתמכות על RTC כגיבוי. בנוסף, המערכת תומכת בעדכון זמן בהתאם להגדרות שעון קיץ/חורף כפי שהוגדרו במימוש.

לסיכום, פרויקט "שעון שבת חכם" הוכיח היתכנות טכנולוגית מלאה והביא ליצירת יחידת שליטה מרכזית מתקדמת, המשלבת חכמת בית חכם עם דיוק הלכתי. השעון מהווה בסיס למערכת משולבת רחבה יותר, הכוללת גם מתגי 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 מוסף:

6.2.1 שיפורים במימוש הנוכחי (Immediate Improvements)

- **שיפור תצוגה על גבי ה-LCD:** ניתן להרחיב את המידע המוצג למשתמש על גבי מסך ה-LCD של יחידת השעון כדי לשפר את חוויית השימוש המקומית ולהפחית תלות בממשק ה-Web. מעבר לחיווי הבסיסי הקיים, ניתן להציג פרטים תפעוליים כגון האירוע הבא בלו"ז (Next Event), כתובת ה-IP של השרת המקומי ומצב עבודה נוכחי (Week/Shabbat/Override). מבחינת מימוש, ניתן להשתמש בגישה "מסך מתחלף" (Pages) במסך דו-שורות (20×16/2×2): המערכת תציג בכל רגע שתי שורות ותעבור בין עמודי מידע בפרקי זמן קבועים או לפי אירוע, כך שניתן להציג בפועל יותר מידע ללא שינוי חומרה.

- **שיפור ממשק המשתמש (UI/UX):** ניתן לשפר את הממשק הקיים כך שתפעול ועדכון לוו"ז יהיו ברורים ומהירים יותר, בעיקר סביב פעולות שכוחות. שיפורים אופייניים כוללים ולידציה לשדות זמן לפני שמירה, הודעות חיווי Success/Error לאחר פעולות, הצגת מצב מערכת נוכחי באופן בולט, וכן כפתורי פעולה

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

- **שיפור אמינות בתרחישי פקודות רצופות (Rate Limiting / Queue):** במהלך הניסויים נמצא כי שליחה של רצף פקודות מהיר (כגון מעבר מצבים בתדירות גבוהה) מפחיתה את אמינות הקליטה בקישור ה-RF. לפיכך, ניתן להוסיף מנגנון ויסות פקודות הכולל תור פקודות (Queue) וקצב שידור מינימלי בין פקודות, ובמידת הצורך ניסיון חוזר (Retry) עם השהיה קצובה עד לקבלת ACK. מנגנון זה אינו משנה את לוגיקת המצבים (Week/Shabbat/Override), אך מצמצם עומס תקשורת רגעי ומשפר עקביות ביצוע.

6.2.2 הרחבות למערכות עתידיות (Future Scope)

- **אינטגרציה עם זמני הלכה אוטומטיים:** הרחבת הקושחה לשילוב API לקבלת זמני שבת/זמנים (לפי מיקום ותאריך) תאפשר תזמון אירועים לא רק על בסיס שעה קבועה, אלא גם על בסיס זמני כניסה/יציאה שבת דינמיים, ובכך להגביר את הדיוק ההלכתי ולהפחית צורך בכיוון ידני. לדוגמה, ניתן להשתמש בממשקי REST של Hebcל לקבלת זמני הדלקת נרות/הבדלה וזמנים נוספים (ב-JSON), כאשר מיקום מוגדר באמצעות geonameid או latitude/longitude ו-tzid [15-17].
- **הרחבת פרוטוקול התקשורת:** החלפת תקשורת RF גנרית בפרוטוקול בית חכם סטנדרטי עשויה לשפר את האבטחה והטווח, ולאפשר אינטגרציה עם פלטפורמות בית חכם (למשל Home Assistant או Google Home). לצורך כך מומלץ לבודד את שכבת התקשורת לממשק אחיד (למשל sendCommand/receiveAck), כך שהחלפת ה-HC-12 תדרוש שינוי ברמת הדרייבר בלבד בעוד לוגיקת המצבים והפקודות תישאר זהה.

6.3 תרומת הפרויקט

פרויקט "שעון שבת חכם" מציג תרומה כפולה:

1. **תרומה טכנולוגית:** המערכת מדגימה מיזוג מוצלח של רכיבי IoT זולים וזמינים (ESP32) למערכת בקרת רשתית ואמינה. היא מהווה מודל ארכיטקטוני למימוש תקשורת חכמה בין יחידות קצה וניהול לוח זמנים מורכב בסביבת קוד פתוח.
2. **תרומה ציבורית/הלכתית:** הפרויקט מהווה פתרון ממוקד, בטוח ונגיש לאוטומציה ביתית עבור הציבור שומר השבת. המערכת מפשטת את התפעול, משפרת את דיוק התזמון, ומפחיתה משמעותית את הסיכון להפעלה לא רצויה באמצעות מנגנון נעילה אלקטרונית בהתאם ללוגיקה שהוגדרה. בכך היא משפרת את איכות החיים ואת רמת הביטחון ההלכתי של המשתמשים.

נספח א

התנהגות המערכת בעת הפסקת חשמל וחזרת מתח

"שעון שבת חכם" תוכנן להתאושש מהפסקות חשמל בצורה בטוחה וצפויה. בזמן הפסקת חשמל הבקר נכבה, ולכן אין יכולת בקרה על יציאת הממסר המקומית עד לחזרת המתח. כאשר החשמל חוזר, מתבצע אתחול מחדש, ובשלב הראשוני של העלייה המערכת מכניסה את הממסר למצב בטוח (כבוי) כדי למנוע הדלקה לא מכוונת של העומס לפני שהמערכת הספיקה לטעון מצבים ולהחליט כיצד עליה לפעול.

לאחר שהמערכת עלתה, היא טוענת מהזיכרון הלא-נדיף את מצב העבודה האחרון שלה, ובראש ובראשונה את מצב התפעול (ידי מול אוטומטי) ואת מצב הממסר האחרון שנשמר. מכאן מתקבלת החלטה בהתאם לעקרון בסיסי: כאשר השעון אינו במצב אוטומטי, מטרת השחזור היא להחזיר את המצב האחרון שבחר המשתמש. לכן במצב ידי המערכת מחזירה את מצב הממסר לערך האחרון שנשמר, גם אם בשלב זה הזמן עדיין אינו תקין. במצב זה אין תלות בזמן, משום שהממסר 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 מסתמכת על מצב הממסר האחרון שהיה לפני הכיבוי, משום שמצב זה עלול להיות לא רלוונטי לזמן האמיתי (למשל, השעון כבה במצב דלוק כאשר בפועל לפי הלוח"ז בזמן הנוכחי הוא אמור להיות כבוי). במקרה כזה השעון נשאר במצב ברירת מחדל בטוח (כבוי) וממשיך בניסיונות לקבוע זמן תקין. רק כאשר נקבע זמן תקין, השעון מחשב את מצב הממסר הנדרש "עכשיו" לפי הלוח"ז, ומיישר את הממסר בהתאם.

גישה זו מאזנת בין שני צרכים מנוגדים: מצד אחד, שחזור מהיר של רצון המשתמש במצב ידי. ומצד שני, מניעת החלטה שגויה במצב אוטומטי כאשר אין בסיס זמן אמין.

נספח ב

לוגיקת זמן וקביעת זמן במערכת

הפעלת לוח זמנים מחייבת זמן מערכת תקין, ולכן השעון תוכנן עם מנגנון קביעת זמן מדורג, הכולל מקור זמן ראשי, מקור גיבוי, ואפשרות התערבות ידנית. כאשר קיימת תקשורת לרשת, השעון משתמש בשרת NTP כמקור זמן מדויק. לאחר קבלת זמן תקין מהרשת, השעון מעדכן את זמן המערכת ומסנכרן אליו גם את רכיב ה-RTC (DS3231), כך שבפעם הבאה גם ללא אינטרנט יהיה מקור זמן מקומי אמין.

במצב שבו אין NTP זמין (למשל, בעיית Wi-Fi או אינטרנט), השעון נשען על ה-RTC כמקור גיבוי. ה-RTC ממשיך לשמור זמן גם בהפסקת חשמל באמצעות סוללת גיבוי, ולכן מאפשר 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 כלא תקין, והמערכת מתנהגת בהתאם: במצב אוטומטי היא אינה מפעילה החלטות לפי לוח 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 הממסר לפי לוח הזמנים, כדי לחזור להתנהגות התקינה ללא המתנה למחזור נוסף.

בנוסף, בממשק ה-Web קיימת אפשרות לקביעת זמן ידנית. אפשרות זו מוצגת למשתמש רק כאשר המערכת מזהה שהזמן אינו תקין, כך שהמשתמש יכול להחזיר את המערכת למצב תפעולי גם ללא רשת וללא RTC. לאחר קביעה ידנית, זמן המערכת מתעדכן, ואם רכיב ה-RTC זמין הוא מסונכרן בהתאם, כך שהזמן יישמר גם בהפסקות חשמל עתידיות. פעולה זו מאפשרת חזרה מיידי להפעלה אוטומטית לפי לוח.

נספח ג

תרחישי קצה ובדיקות מערכת

הטבלה בנספח זה מרכזת תרחישי בדיקה פונקציונליים שנבחרו במטרה לכסות נקודות קצה אופייניות של שעון שבת חכם הנשען על זמן מערכת ועל מצבי עבודה שונים (ידני מול אוטומטי). הדגש הוא על מצבים שבהם המערכת עלולה לקבל החלטה שגויה או לא צפויה, כגון הפסקות חשמל, זמן לא תקין, ואובדן תקשורת, ועל האופן שבו המערכת אמורה להתאושש ולחזור להתנהגות תקינה. לכל תרחיש מוצגים תנאי ההתחלה, האירוע שנבחן והתוצאה הצפויה, כך שניתן לאמת שהמימוש תואם את מדיניות התכנון שהוגדרה בפרויקט.

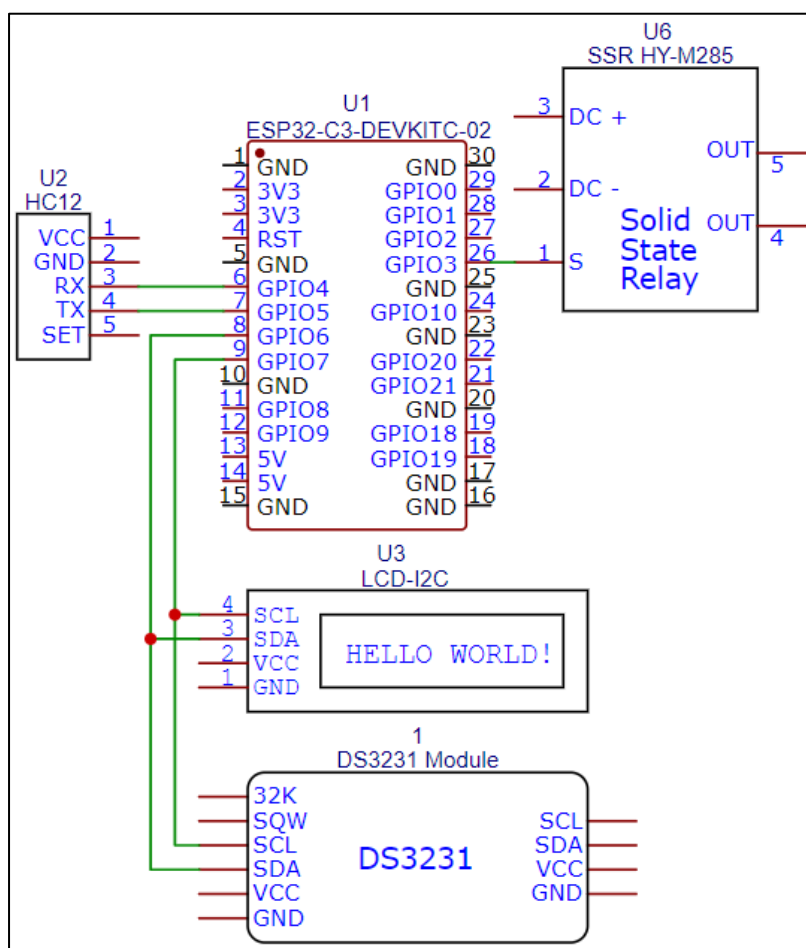
תנאי התחלה	אירוע/פעולה	תוצאה צפויה	הערה (למה זה חשוב)
מצב ידני, הממסר המקומי דלוק	הפסקת חשמל וחזרת מתח	הממסר חוזר למצב דלוק (שחזור מצב אחרון)	שימור רצון המשתמש במצב ידני
מצב ידני, הממסר המקומי כבוי	הפסקת חשמל וחזרת מתח	הממסר חוזר למצב כבוי	עקביות ושחזור מצב מלא
מצב אוטומטי, זמן תקין, קיים לוח זמנים	הפסקת חשמל וחזרת מתח	הממסר נקבע לפי לוח הזמנים בזמן העלייה (לא לפי "מה שהיה לפני הכיבוי")	התאוששות נכונה של לוגיקת לוח זמנים
מצב אוטומטי, אין זמן תקין (אין NTP ואין RTC)	חזרת מתח	ברירת מחדל בטוחה: הממסר נשאר כבוי עד לקביעת זמן תקין	מניעת פעולה שגויה ללא בסיס זמן
מצב אוטומטי, אין זמן תקין בתחילה; רשת חוזרת לאחר מספר דקות	חזרת תקשורת	ניסיונות סנכרון זמן בתדירות גבוהה עד הצלחה; לאחר זמן תקין מתבצע יישור מיידי לפי לוח הזמנים	קיצור "חלון עיוורון"
מצב אוטומטי, זמן תקין; שינוי זמן (NTP מעדכן או RTC מתוקן)	אירוע סנכרון זמן	זמן המערכת מתעדכן והמערכת ממשיכה לפעול לפי הזמן החדש; מצב הממסר מתיישר אם נדרש	התמודדות עם תיקון זמן ושמירת נכונות
מצב אוטומטי, לוח זמנים ריק/לא הוגדר	מעבר ל-AUTO או חזרת מתח	אין החלטות לוח זמן; המערכת נשארת במצב ברירת המחדל שהוגדר (ובהתאם למדיניות)	טיפול במצב "אין נתונים" ללא תקיעה
זמן לא תקין	המשתמש קובע זמן ידנית בממשק Web	זמן המערכת נקבע כתקין; אם יש RTC הוא מתעדכן; אם במצב אוטומטי— מבוצע יישור מיידי של הממסר לפי לוח הזמנים	מאפשר תפעול גם ללא רשת
מצב אוטומטי	המשתמש עובר ל-ידני דרך ה-Web	השליטה הופכת ידנית והממסר נשאר יציב לפי בחירת המשתמש	מניעת "מאבק" בין לוח זמן למשתמש

מצב ידני	המשתמש עובר ל-AUTO דרך ה-Web כאשר הזמן תקין	המערכת מתיישרת מיידית לפי לוח הזמנים	מעבר חלק בין מצבים
מצב אוטומטי, תקשורת למתג לא זמינה	פקודת שבת/חול מהממשק	המערכת מנסה לשדר ומזהה כשל (אין ACK); אינה מציגה פעולה כהצלחה מלאה	אמינות תפעול במערכת מבוצרת
עבודה רציפה לאורך זמן	ריצה ממושכת (שעות/ימים)	אין איפוסים/תקיעות; זמן נשמר; תגובתיות הממשק תקינה	Robustness בתפעול אמיתי

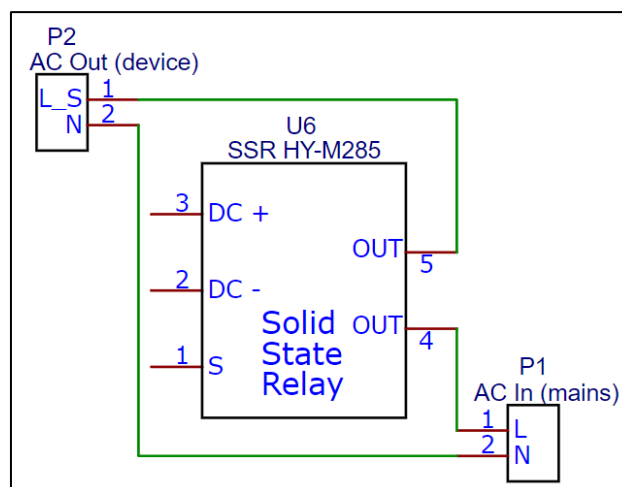
טבלה ג: תרחישי קצה

נספח ד

סכמות חיווט – השלמה לתרשים הבלוקים (פרק 3)



איור ד.1: חיווט יחידת הבקרה והפרופיריאלים (ESP32-C3, LCD-I²C, RTC DS3231, HC-12).



איור ד.2: חיווט המיתוג לעומס באמצעות SSR (כניסה 230V AC / יציאה לצרכן).

- [1] "אביטל אנרגיה חיונית," שוען 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://judaicaplaza.com/products/zte-zs>. [Accessed: 28-Jan-2026].
- [3] "אב-גד - מערכות מתח נמוך מתקדמות," שוען שבת עם אפליקציה, <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 16x2 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].