



**Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri
Konferencia
2024**



**SensorDice - Alacsony fogyasztású elosztott szenzorhálózat
fejlesztése**

Készítette: Fódi Adél Melinda

Témavezető: Dr. Medvegy Tibor

Mérnöki Kar, Rendszermérnöki Intézeti Tanszék

A pályamunka lezárásának dátuma: 2024. december 19.

Tartalom

Absztrakt.....	1
Bevezető	2
1. Elosztott szenzorhálózatok.....	4
2. Vezeték nélküli kommunikációk.....	8
2.1. Összehasonlítás	8
2.2. Bluetooth Low Energy (BLE)	9
2.3. Antenna	15
3. Hardver.....	16
3.1. Mikrovezérlő	16
3.2. Timer IC (Integrated Circuit)	18
3.3. Szensorok, érzékelők	20
3.3.1. Hőmérséklet, páratartalom	20
3.3.2. Rázkódás, dőlés	21
3.3.3. Fény	23
3.4. Az áramkör	24
4. Szoftver	27
4.1. Elosztott egységek.....	27
4.2. Központi vezérlőegység	29
5. Megvalósítás.....	30
5.1. Próbapanel.....	30
5.2. Nyomtatott áramkör	31
5.3. Doboz	35
6. Mérési eredmények	37
6.1. Fogyasztás	37
6.2. Hatótávolság.....	40
6.3. Összehasonlítás	40

7. Alkalmazási lehetőségek	42
8. Összefoglalás.....	44
Köszönetnyilvánítás.....	45
Hivatkozások	46
Függelék	

Absztrakt

A TDK dolgozat témája egy olyan elosztott szenzorhálózat fejlesztése, amely egy központi vezérlőegységből, valamint több mérőegységből áll, amelyek egy meghatározott hatótávon belül helyezkednek el. Ezek a mérőegységek telepes üzemmódban (elemről táplálva) működnek, és alacsony fogyasztásúak, így akár több éves üzemidővel rendelkezhetnek akár egy gombelemről történő táplálás esetén is. A mérőegységek különböző szenzorokkal vannak ellátva, amelyek a környezeti paramétereket figyelik, mint például a hőmérsékletet, páratartalmat, vagy fizikai eseményeket (pl. dőlés). Az egységek adatokat küldenek a vezérlőnek: hibajelzést (pl. eldőlt a mérőegység) vagy rendszeres státuszfrissítést a megbízható működésről. Az eszközök kompakt dobozokban kapnak helyet, biztosítva a könnyű telepítést.

A dolgozatban először az elosztott szenzorhálózatok működése és előnyei kerülnek bemutatásra, különösen a vezeték nélküli technológia terén. Szó esik több kommunikációs megoldás összehasonlításáról, bemutatva azok előnyeit és hátrányait. Ezt követően részletezésre kerül a hardverfejlesztés folyamata beleértve az alkatrészek kiválasztását. A két nyomtatott áramköri prototípus közül az első ESP32-WROOM-32E, míg a második az STM32WB55CGU7 mikrovezérlővel készült, az energiatakarékosságot és méretcsökkentést szem előtt tartva. Ismertetésre kerülnek a szoftverfejlesztés és a rendszerintegráció kihívásai is.

A dolgozat végén a kész prototípusokkal végzett mérések eredményei és az alkalmazási lehetőségek kerülnek tárgyalásra.

Kulcsszavak: elosztott szenzorhálózat, alacsony fogyasztás, Bluetooth Low Energy, vezeték nélküli

Bevezető

Az elosztott szenzorhálózatok (Distributed Sensor Networks, DSN) napjainkban jelentős szerepet játszanak a technológiai fejlesztésekben, különösen az Internet of Things (IoT) rendszerek terjedésével. Ezek a hálózatok több, egymástól független, különböző helyeken elhelyezett érzékelőt foglalnak magukban, amelyek folyamatosan figyelik a környezetüket, adatokat gyűjtenek, és ezeket egy központi egységhez továbbítják. Az ilyen hálózatok különösen fontosak az ipari automatizálás, a környezetfigyelés, és a mezőgazdasági alkalmazások, valamint okosotthon rendszerek területén is. Az elosztott szenzorhálózatok segítségével nagy területek figyelhetők meg hatékonyan, és az adatok akár valós idejű feldolgozása révén képesek gyors reakciókra.

Az elosztott rendszerek előnyei között kiemelendő a modularitás és a könnyű skálázhatóság: az új szenzorok hozzáadása viszonylag egyszerű, és nem igényel jelentős módosítást a már meglévő rendszerben. Ezáltal olyan rendszerek építhetők ki, amelyek idővel bővíthetők és új funkciókkal gazdagíthatók. Az elosztott szenzorhálózatok másik előnye, hogy képesek nagy területek monitorozására, illetve alkalmazhatók távoli helyszíneken vagy olyan környezetekben, ahol a folyamatos emberi felügyelet nem megvalósítható. Ezzel lehetőség nyílik precíz és megbízható adatgyűjtésre akár nehezen hozzáférhető helyeken is.

Az ilyen rendszerek tervezésének egyik legnagyobb kihívása az alacsony energiafogyasztás biztosítása. Mivel a szenzorok gyakran elemről vagy akkumulátorról működnek, hosszú távú üzemeltetésük csak akkor valósítható meg, ha rendkívül alacsony fogyasztású áramkörökkel és optimalizált működési ciklusokkal rendelkeznek. A szenzorhálózatok energiahatékonyságának javítása érdekében minimalizálni kell az érzékelők készenléti fogyasztását, és olyan ütemezett működési modelleket kell alkalmazni, ahol a szenzorok csak a szükséges időközönként aktiválódnak. Ez lehetővé teszi, hogy akár több évig is üzemeljenek egyetlen elemről, ami különösen fontos az olyan telepítések esetében, ahol nehéz az elemek cseréje vagy a folyamatos karbantartás.

Az alacsony energiafogyasztás tehát nemcsak a költséghatékonyság, hanem a hosszú távú megbízhatóság kulcsa is az elosztott szenzorhálózatokban. A modern szenzorok és vezérlőegységek képesek rendkívül alacsony áramfelvétellel működni, valamint olyan üzemmódra, amelyben csak akkor aktiválódnak, amikor szükséges, ami drasztikusan megnöveli az elemek élettartamát. A megfelelő fogyasztás-optimalizálás és energiahatékonyság

elérése érdekében fontos a hardveres és szoftveres elemek gondos kiválasztása és finomhangolása.

A dolgozat célja egy olyan elosztott szenzorhálózat tervezésének és megvalósításának bemutatása, amely nagy hangsúlyt fektet az alacsony energiafogyasztásra és a vezeték nélküli kommunikáció kihívásaira. A rendszer működése és felépítése lehetőséget nyújt arra, hogy a hálózat hosszú ideig megbízhatóan működjön, miközben minimális energiaforrásokra van szüksége.

1. Elosztott szenzorhálózatok

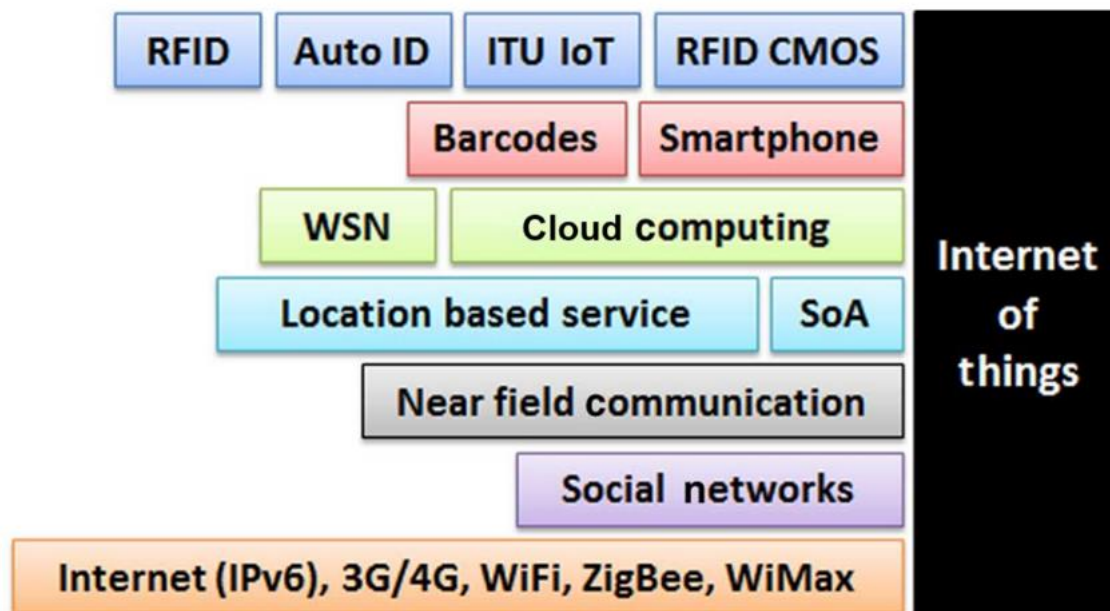
Az elosztott szenzorhálózatok olyan rendszerek, amelyek jellemzően kis méretű szenzorokból állnak, amelyek kapcsolatban állnak egymással és általában egy központi vezérlőegységgel. Ezek a szenzorok rendszerint különféle környezeti paramétereket mérnek, például hőmérsékletet, páratartalmat, elmozdulást vagy fényerősséget, majd az adatokat továbbítják a hálózaton belül. Az elosztott szenzorhálózatok működése lehetővé teszi a térben kiterjedt, akár valós idejű adatgyűjtést és feldolgozást, ami nélkülözhetetlenné teszi őket számos modern alkalmazásban, az okosotthonoktól és városoktól kezdve a mezőgazdaságon és iparon át egészen az egészségügyi monitorozásig.

Az elosztott szenzorhálózatok kiemelkedő szerepe abban rejlik, hogy képesek nagy mennyiségű adatot gyűjteni. Ezek a rendszerek nemcsak a környezeti tényezők monitorozására használhatók, hanem kulcsfontosságúak az ipari automatizációban, az IoT eszközök integrálásában, és a katasztrófavédelemben is.

Az IoT általánosságban a mindennapi tárgyak hálózati összekapcsolását jelenti, amelyek intelligens funkciókkal vannak ellátva. A technológia forradalmi lehetőségeket rejt magában az ipar, az egészségügy, az okosotthonok, és számos más terület számára. [1]. Az IoT mint feltörekvő technológia várhatóan ígéretes megoldásokat kínál számos meglévő ipari rendszer, például a közlekedési és gyártási rendszerek működésének és szerepének átalakítására. Például, amikor intelligens közlekedési rendszerek létrehozására alkalmazzák, a közlekedési hatóság képes nyomon követni az egyes járművek pillanatnyi helyzetét, figyelni azok mozgását, és megjósolni a jövőbeni elhelyezkedésüket, valamint az esetleges közlekedési helyzeteket. A kifejezést eredetileg az egyedi azonosítással ellátott, interoperábilis kapcsolódású tárgyakra utalva javasolták, amelyek a rádiófrekvenciás azonosítási (RFID) technológián alapultak. Azóta a kutatók számos más technológiával is összekapcsolják, mint például érzékelőkkel, GPS-eszközökkel és mobilkészülékekkel. Ma az IoT általánosan elfogadott definíciója egy dinamikus, globális hálózati infrastruktúrát jelent, amely önkonfiguráló képességekkel rendelkezik, és szabványos, interoperábilis kommunikációs protokollokra épül. Ebben a hálózatban a fizikai és virtuális „dolgok” saját identitással, fizikai jellemzőkkel és virtuális „személyiséggel” bírnak, intelligens interfészek segítségével kommunikálnak, és zökkenőmentesen integrálódnak az információs hálózatba [2].

Az IoT meghatározó technológiája a vezeték nélküli szenzorhálózatok (angolul: Wireless Sensor Network, továbbiakban WSN), amelyek összekapcsolt intelligens érzékelőket

használnak a környezet, az egészségügy, az ipar vagy a forgalom megfigyelésére. Az RFID technológia és a WSN-ek fejlődése kulcsszerepet játszik az IoT terjedésében. Ezek mellett más technológiák, például vonalkódok, okostelefonok, közösségi hálózatok, és a felhőalapú számítástechnika is részei az IoT-nek, támogatva a hálózat működését. Az 1. ábrán láthatjuk, hogy milyen technológiák kapcsolódnak hozzá.



1. ábra: Az IoT-hez kapcsolódó technológiák [2].

Egy elosztott szenzorhálózat lehet vezetékes és vezeték nélküli. Az alábbiakban ezt a kettőt hasonlítom össze:

A vezetékes érzékelők egyik fő előnye, hogy folyamatosan magas adatátviteli sebességgel lehet adatokat továbbítani. Nincs korlátozás az átadott adatok mennyiségére, illetve a mintavétel sűrűsége sem befolyásolja az élettartamot. Nem támaszkodnak akkumulátorokra. A vezetékes szenzorok egyik legnagyobb hátránya azonban, hogy könnyen megsérülhetnek – például ha átsétálnak a vezetékeken, vagy valami rájuk esik. Ezek a fizikai behatások károsíthatják a vezetékeket, amelyek javítást igényelnek. Emellett a hosszú, bonyolult és kusza vezetékhalozatok is problémát jelentenek. Hatótávolságuk sem mindig kielégítő, hiszen a legtöbb kommunikációs forma 1-2 km-re korlátozódik. Bár stabilabbak és kevésbé zavarérzékenyek, mint vezeték nélküli társaik, a vezetékezés miatt drágábbak, nehezebben bővíthetőek, valamint bonyolultabb a telepítésük és karbantartásuk [3].

A vezeték nélküli érzékelők könnyen telepíthetők ipari környezetben, okosotthonokban és szántóföldeken, mivel nem igényelnek kábelezést az érzékelők és az adatgyűjtő rendszer között,

ami jelentősen leegyszerűsíti a telepítést. Széles választék áll rendelkezésre vezeték nélküli érzékelőkből is, így könnyedén találhatunk igényeinknek megfelelő megoldást, legyen szó a mérendő fizikai mennyiségről, a kommunikációs protokollról, a méretről, illetve a pontosságról vagy akár a fogyasztásról.

Az adatátvitel a leginkább energiaigényes funkció, ezért leggyakrabban ezt a két stratégiát alkalmazzuk:

- az érzékelő rendszeresen továbbítja az adatot,
- csak akkor küldi az adatot, ha egy adott feltétel teljesül.

A valós alkalmazásokban az említett két stratégia kombinációi is előfordulnak. Az ilyen hálózatok nagy előnye a rugalmasságuk, mivel könnyen telepíthetők és adaptálhatók különböző környezetekhez anélkül, hogy bonyolult vezetékes infrastruktúrát igényelnének.

Az energiahatékonyság szintén kulcsfontosságú szempont, különösen akkor, ha az eszközök korlátozott energiaforrással, például gombelemekkel működnek. Az energiatakarékossági technikák, mint például az alacsony teljesítményű kommunikáció és az adaptív adatgyűjtési stratégiák, jelentősen megnövelhetik az ilyen rendszerek élettartamát[3].

Az 1. táblázat összefoglalja a vezetékes és a vezeték nélküli szenzorhálózatok tulajdonságait a fenti adatok alapján:

Táblázat 1: Vezetékes és vezeték nélküli szenzorhálózat összehasonlítása.

Tulajdonság	Vezetékes érzékelők	Vezeték nélküli érzékelők
Adatátviteli sebesség	Folyamatosan magas	Korlátozott
Adatmennyiség korlátja	Nincs korlátozás	Gyakran korlátozott
Mintavétel gyakorisága	Magas	Alacsony, hogy kímélje az akkumulátort
Energiaforrás	Nincs szükség akkumulátorra	Akkumulátorral vagy elemről működik
Telepítés és karbantartás	Bonyolult, a vezetékezés sok időt és pénzt igényel	Egyszerűbb, nincs szükség kábelekre, rugalmasan telepíthető
Fizikai károsodás kockázata	Nagy	Alacsony
Hatótávolság	Korlátozott, általában 1-2 km	A vezeték nélküli kommunikáció hatótávolságától függ
Költség	Magasabb a vezetékezés és a telepítés költségei miatt	Alacsonyabb telepítési költségek
Zavarérzékenység	Stabilabb, kevésbé érzékeny az elektromágneses zavarokra	Nagyobb zavarérzékenység
Élettartam	Gyakorlatilag korlátlan, nincs akkumulátor	Energiatakarékos módszerekkel növelhető

2. Vezeték nélküli kommunikációk

Az alábbiakban különböző vezeték nélküli kommunikációkat hasonlítottam össze adatátviteli sebességük, fogyasztásuk alapján, kiválasztottam a megvalósított eszköz számára legkedvezőbb tulajdonságokkal rendelkezőt, majd részleteztem annak működését.

2.1. Összehasonlítás

Az általam vizsgált elterjedtebb technológiák közül a ZigBee-t, BLE-t (Bluetooth Low Energy), és a WiFi-t hasonlítottam össze:

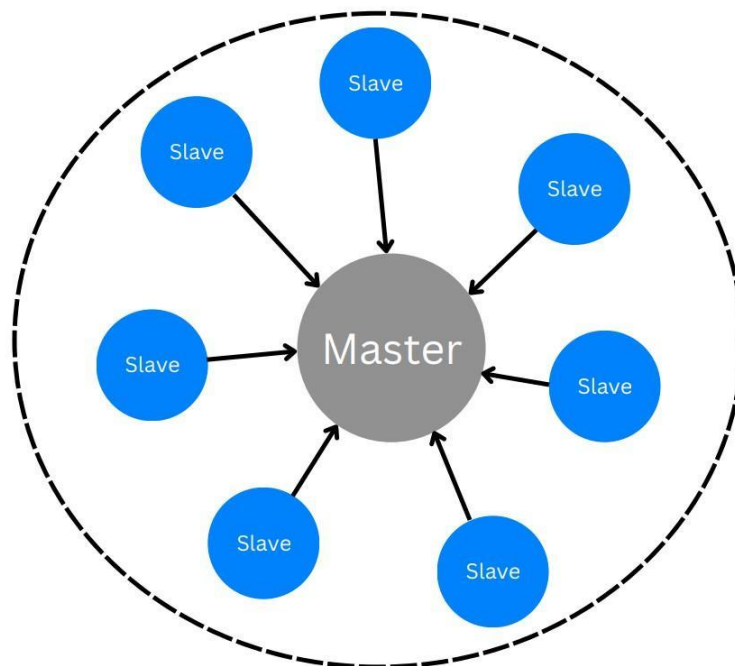
Táblázat 2: ZigBee, BLE és WiFi összehasonlítása [4].

	ZigBee 802.15.4	Bluetooth Low Energy 802.15.1	WiFi 802.11b
Adatátviteli sebesség	250 Kbps	1 Mbps	11 Mbps
Hatótávolság [m]	Kb. 75	10-100	100
Teljesítményfelvétel	Alacsony	Közepes	Magas

A 2. táblázatban látható, hogy a WiFi kínálja a legnagyobb hatótávolságot és a leggyorsabb adatátvitelt, a nagyobb teljesítmény azonban nagyobb fogyasztást von maga után. A BLE hatótávolsága a közvetítés hatékonyságától, az antennák erősítésétől és a kommunikáló eszközök közötti környezettől függ, ezek alapján megbecsülhetjük a minimum és maximum hatótávolságokat a Bluetooth hivatalos weboldalán [5]. Lényegesen kevesebb adatot képes szolgáltatni adott időn belül a WiFi-hez képest, viszont sokkal kevesebbet is fogyaszt. A ZigBee rendelkezik a legkedvezőbb fogyasztással, ezt kis adatátviteli sebességének köszönheti. Ebből adódóan a ZigBee nem alkalmas gyors kommunikációt igénylő alkalmazásokra.

A választás a Bluetooth Low Energy-re esett. Míg a WiFi kiválóan alkalmas nagy adatátviteli sebességet igénylő alkalmazásokra, energiaigénye sokkal nagyobb, ami nem ideális az elemes működésű, de hosszú élettartamú szenzorok esetében. A ZigBee szintén alacsony fogyasztású technológia, azonban a BLE előnye a szélesebb körű felhasználhatóságban rejlik. Emellett a BLE jobb kompatibilitást kínál különböző eszközökkel és platformokkal, és kiválóan megfelel rövid hatótávolságú kommunikációra, ami gyakran elegendő az elosztott szenzorhálózatokban. A BLE egyszerűbb hálózati topológiákat alkalmaz, például közvetlen

kapcsolatot egy központi eszközzel, ami jelentősen megkönnyíti a hálózat kiépítését és karbantartását. Ezt az elrendezést a 2. ábrán láthatjuk, amelyet piconetnek nevezünk.



2. ábra: Piconet hálózat felépítése.

Összességében a BLE választása elosztott szenzorhálózatok esetén ideális kompromisszumot kínál az energiahatékonyság és az egyszerű integráció szempontjából.

2.2. Bluetooth Low Energy (BLE)

A Bluetooth eredetileg rövid hatótávolságú kábelhelyettesítő technológiaként jött létre, amely olyan eszközök vezetékeit váltotta ki, mint az egér vagy a billentyűzet. Szinte mindenhol jelen van: hangszórókban, vezeték nélküli fejhallgatókban, autókban, viselhető eszközökben, orvosi berendezésekben és még sok másban.

A Bluetooth első hivatalos verzióját az Ericsson adta ki 1994-ben. A nevét Harald „Bluetooth” Gormsson dán királyról kapta, aki a Kr. u. 10. században segített egyesíteni az egymással harcoló frakciókat [6].

A BLE-t a Bluetooth 4.0-s verziójában vezették be 2010-ben, és leginkább olyan alkalmazásokban terjedt el, ahol az alacsony energiafogyasztás kulcsfontosságú (például az elemmel működő eszközök esetében), valamint ahol ritkán és kis mennyiségű adatot továbbítanak (például szenzoros adatgyűjtő alkalmazásokban).

A Bluetooth Classic (BR/EDR) és a BLE nem kompatibilis egymással, annak ellenére, hogy ugyanazt a márkanévet és specifikációs dokumentumot használják. Egy Bluetooth Classic eszköz nem képes (közvetlenül) kommunikálni egy BLE eszközzel. Ezért van az, hogy egyes eszközök, például okostelefonok, mindkét technológiát integrálják (ezeket hívjuk Dual Mode Bluetooth eszközöknek), lehetővé téve számukra, hogy mindkét típusú eszközzel kapcsolatot létesítsenek.

Az alábbiakban a BLE néhány műszaki jellemzője következik:

- Az elfoglalt frekvenciaspektrum 2,400 - 2,4835 GHz.
- A frekvenciaspektrum 40 darab, egyenként 2 MHz széles csatornára van osztva.
- A rádió által támogatott maximális adatátviteli sebesség (a Bluetooth 5. verziójában bevezetve) 2 Mbps.
- A BLE eszközök hatótávolsága nagymértékben függ a környezettől és az alkalmazott üzemmódtól; ez akár meghaladhatja az egy kilométert, de lehet kisebb is, mint egy méter. Általában a hatótávolság 10-30 méter között van.
- Az energiafogyasztás is széles skálán mozog. Ez függ az alkalmazás megvalósításától, a különböző BLE paraméterektől és a használt chipkészlettől. Egy BLE chipkészlet csúcscsúsfogyasztása rádióadás közben jellemzően 15 mA alatt van.
- A BLE-t alacsony sáv szélességű adatátvitelre tervezték. A BLE alkalmazása nagy sáv szélességű alkalmazásokhoz jelentősen rontja az alacsony energiafogyasztás ígértét. Így a rádió használatának minimalizálása amennyire csak lehetséges, biztosítja az optimális energiafogyasztást.
- A Bluetooth verziók (a BLE-t tekintve) visszafelé kompatibilisek egymással. Azonban a kommunikáció korlátozódhat a két kommunikáló eszköz közül a régebbi verzió jellemzőire. Például egy Bluetooth 5 BLE eszköz képes kommunikálni egy Bluetooth 4.1 BLE eszközzel, de az 5-ös verzió specifikus funkciói nem lesznek támogatottak. Másrészt a csatlakozás, az elsődleges hirdetések, a szolgáltatások felfedezése, a jellemzők felfedezése és ezen jellemzők olvasása/írása mind lehetséges két BLE eszköz között, függetlenül azok Bluetooth verziójától (mivel ezek már az első BLE verzióban is támogatottak voltak) [6, 7].

Fontos megjegyezni, hogy a Bluetooth Classic és a Bluetooth Low Energy között jelentős különbségek vannak a műszaki specifikációk, a megvalósítás módja, valamint az általuk

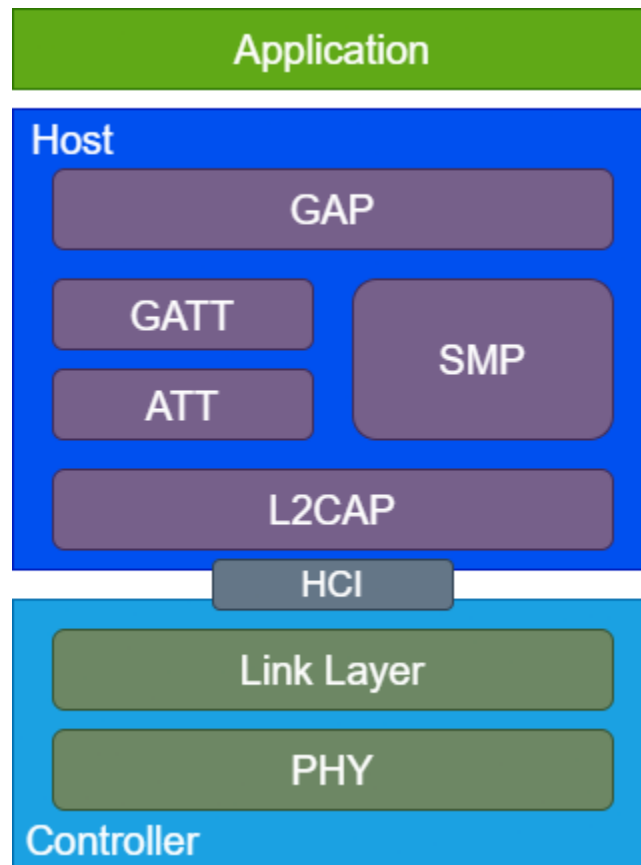
támogatott alkalmazások típusai tekintetében. Ezen kívül az is lényeges, hogy a két technológia nem kompatibilis egymással.

A legfontosabb különbségek az alábbi táblázatban találhatók összefoglalva:

Táblázat 3: Bluetooth Classic és BLE összehasonlítása.

Bluetooth Classic	BLE
Streaming alkalmazásokhoz, mint például audió streamelés, fájlátvitel és fejhallgatók.	Szenzoradatokhoz, eszközök vezérléséhez és alacsony sáv szélességű alkalmazásokhoz.
Nem optimalizált alacsony fogyasztásra, de nagyobb adatátviteli sebességgel rendelkezik (maximum 3 Mbps, szemben a BLE 2 Mbps sebességével).	Alacsony fogyasztású, kis adatátviteli ciklusokra tervezve.
79 RF (rádiófrekvenciás) csatornán működik.	40 RF csatornán működik.
Felfedezés 32 csatornán történik.	A felfedezés 3 csatornán történik, ami gyorsabb felfedezést és csatlakozást eredményez.

A 3. ábrán látható a Bluetooth Low Energy felépítése. Három fő blokkból épülnek fel a BLE eszközök: *application*, *host*, és *controller* [6].



3. ábra: BLE Protocol Stack [8].

A legalsó réteg, az úgynevezett „controller”, magában foglalja a rádió hardveréhez kapcsolódó elemeket, mint például a rádiós vevőegységet, a frekvenciacsatorna választót, a kezdeti csomagfelépítést, valamint a közvetlen kommunikációt.

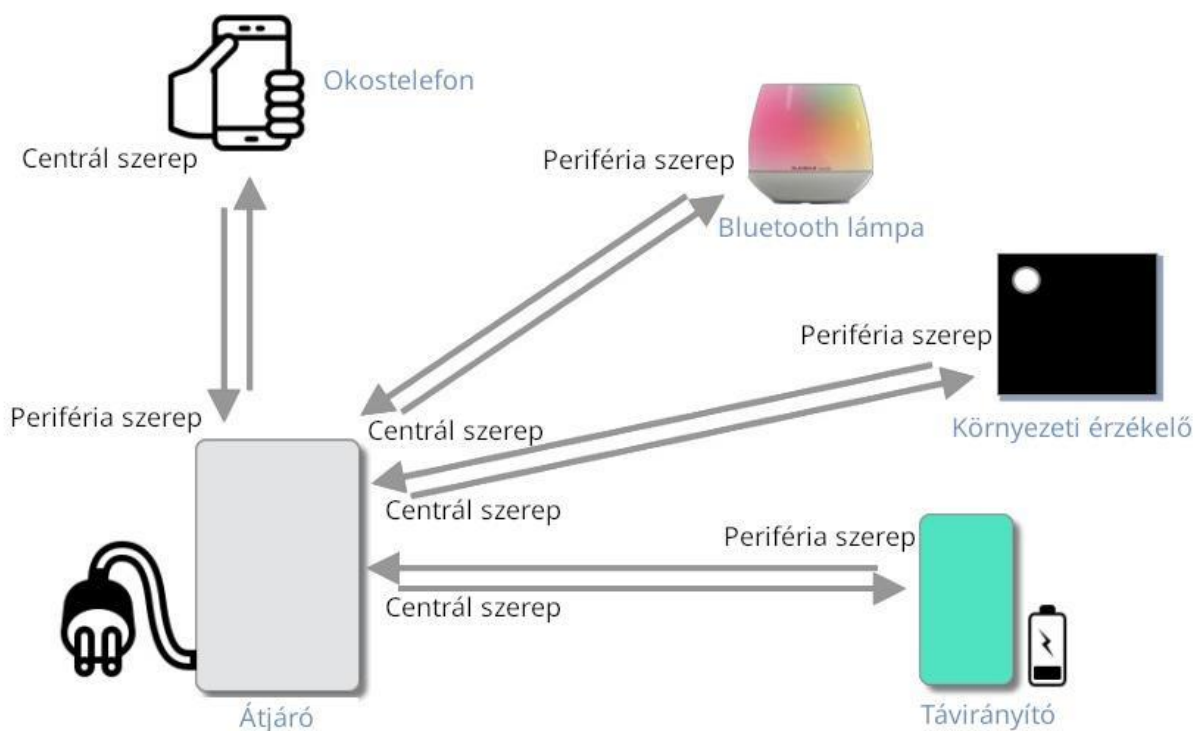
A fizikai réteg (PHY – physical layer) felelős a tényleges rádiófrekvenciás kommunikációért. A PHY réteg határozza meg, hogyan történik a jelek továbbítása a levegőn keresztül, és ezen a rétegen belül történik a bitsebesség és a frekvenciasáv kezelése is. A hozzáférési réteg (LL – Link Layer) felelős a kapcsolatkezelésért, beleértve a csatlakozások létrehozását, fenntartását és bontását. Ezenkívül ide tartozik a csomagok formátumának és címezésének meghatározása, valamint az időzítések kezelése.

A két fő réteg között helyezkedik el a Host Controller Interface (HCI) réteg, amely biztosítja a kommunikációt a „host” és a „controller” réteg között. Ez a két réteg elkülönült, mert korábban a rétegek külön chipen helyezkedtek el, mivel a rendelkezésre álló chipek teljesítménye nem volt elég nagy. Napjainkban azonban jellemzően egy chip-es megoldásokkal találkozhatunk, ahol mindkét réteg egyetlen chipen található meg. A „host” réteg biztosítja a

tényleges Bluetooth funkcionalitást, amely különbözik a Bluetooth Classic és a BLE esetében [6, 8].

A GATT (Generic Attribute Profile) határozza meg a Bluetooth Low Energy (BLE) szolgáltatásokat és tulajdonságokat, valamint az adatokat, amelyeket a kliensnek küldünk. Előre meghatározott szolgáltatásokat és karakterisztikákat használhatunk, amelyekhez egyedi 16-bites UUID-k (Universally Unique Identifier) tartoznak. Minden szolgáltatásnak vannak attribútumai, amelyeket a BLE-ben karakterisztikának nevezünk. Például a környezeti érzékelés szolgáltatásnak UUID-ja hexadecimális számban kifejezve 0x181A, és az ehhez tartozó karakterisztikák lehetnek: nyomás (0x2A6D), hőmérséklet (0x2A6E) és páratartalom (0x2A6F). Egyedi szolgáltatásokat is létrehozhatunk 128-bites UUID-k segítségével, amelyeket online UUID generátorokkal alkothatunk meg.

Az ATT (Attribute Protocol) meghatározza a kliens-szerver architektúra szerepeit: a kliens adatokat kér a szervertől, míg a szerver adatokat küld a klienseknek. Noha ezek a szerepek általában a master és slave fogalmakhoz kapcsolódnak, egy eszköz lehet egyszerre kliens és szerver is. A 4. ábrán látható erre egy példa, amelyben a „gateway” tölti be ezt a kettős szerepet.



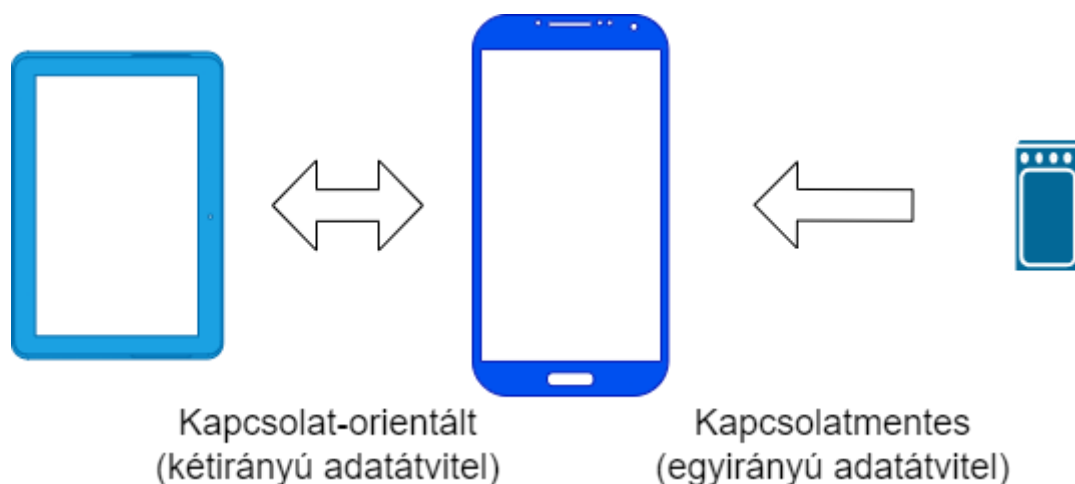
4. ábra: BLE otthoni automatizációs projekt példa [6].

A GAP (Generic Access Profile) felelős a csatlakozás létrehozásáért és a csatlakozás típusának meghatározásáért. Lehetővé teszi a kapcsolatmentes és kapcsolat-orientált adatcserét,

amelyeket az 5. ábrán szemléltetnek. A Bluetooth Low Energy (BLE) rendszerében az úgynevezett Broadcaster olyan eszközként működik, amely periodikusan sugározza adatait a környezetében lévő eszközök számára, anélkül, hogy közvetlen kapcsolatot létesítene velük. Az ilyen eszközöket „sugárzóknak” is nevezhetjük. Ezzel szemben az Observer, azaz megfigyelő, olyan eszköz, amely figyel és észlel a Broadcaster által sugárzott adatokat, de nem létesít közvetlen kapcsolatot a sugárzó eszközzel.

Amikor eszközök közvetlen kapcsolatára van szükség, akkor a periféria (Peripheral) és a központi (Central) szerepeket használjuk. A periféria olyan eszköz, amely adatokat szolgáltat és lehetőséget biztosít a központi eszköz számára, hogy hozzáférjen az adataihoz. A központi eszköz viszont irányítja a kapcsolatokat, lekérdezi az adatokat, és kezeli a periféria eszköztől származó információkat.

Összességében a Broadcaster és az Observer kapcsolatmentes kommunikációt, míg a periféria és a központi eszköz közvetlen kapcsolatot és adatcserét biztosít a BLE rendszerében [6, 8]. Az 5. ábrán látható a két fajta adatátvitel.



5. ábra: Kapcsolat-orientált és kapcsolatmentes adatátvitel [6].

Az SMP (Security Manager Protocol) réteg a Bluetooth Low Energy (BLE) protokollban a biztonsági funkciókért felelős, mint például a titkosítás és a párosítás. Az SMP célja a kommunikáló eszközök közötti biztonságos kapcsolat létrehozása és fenntartása. A réteg biztosítja a szükséges titkosítást és hitelesítést a BLE kapcsolatok védelme érdekében [6].

Az L2CAP (Logical Link Control and Adaption Protocol) egy olyan protokoll, amely multiplexerként működik. Feladata, hogy kezelje az alsó rétegekből érkező adatokat, és azokat a standard BLE csomagformátumba kapszulázza, figyelembe véve a felső rétegeket [8].

Az Application Layer használata a konkrét esettől függ, és a GAP és GATT rétegek fölött valósul meg. Ez a réteg határozza meg, hogyan dolgozza fel az alkalmazás az adatokat, amelyeket más eszközöktől kap vagy küld számukra, valamint a működés mögötti logikát. Ebbe a rétegbe tartozik az a kód, amelyet kifejezetten a saját egyedi BLE alkalmazásodhoz írsz [6].

2.3. Antenna

Az antennák kulcsfontosságú szerepet játszanak a vezeték nélküli kommunikációban, mivel ezek felelősek az elektromágneses jelek sugárzásáért és vételéért. Az alkalmazott antennatípus jelentős mértékben befolyásolja a kommunikáció hatékonyságát, hatótávolságát és stabilitását. Számos különféle antenna létezik, amelyek mind eltérő előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek. A projektem során a chip antennákat és a PCB (nyomtatott áramkört) antennákat részesítettem előnyben. Ezek az antennatípusok kompakt méretük és egyszerű integrálhatóságuk révén ideálisak alacsony fogyasztású, helytakarékos megoldásokhoz, és jól illeszkednek a modern IoT eszközök követelményeihez.

A 4. táblázatban összefoglaltam a PCB és a chip antenna érveit és ellenérveit:

Táblázat 4: PCB antenna és chip antenna összehasonlítása [9]

PCB antenna	Chip antenna
Gyártási költség olcsó, mert nem kell külön alkatrész.	Külön alkatrész, plusz költségekkel jár.
A felépítés nagyon egyszerű, kis helyet foglal.	Kis méretek és rengeteg kialakítás elérhető.
Nem működik megfelelően, ha közel van az alkatrészekhez.	Nem okoz nagy gondot, ha közelebb helyezkedik el az alkatrészekhez.
Az antenna teljesítménye és hangolása jelentősen függ a PCB layout-tól.	Az antenna teljesítménye és hangolása kevésbé függ a PCB layout-tól.

Összegzésként elmondható, hogy a chip és PCB antennák kiválasztása a projekt számára hatékony és költséghatékony megoldást kínálnak.

3. Hardver

Ebben a fejezetben a hardverekről lesz szó. Több alkatrészt hasonlítottam össze, és leírtam, hogy mi alapján választottam ki őket. Miután az alkatrészek kiválasztásra kerültek, a kapcsolási rajzot is bemutatom.

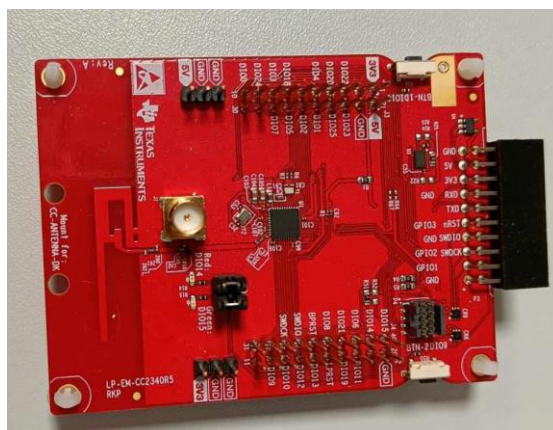
3.1. Mikrovezérlő

Elsőként az ESP32-WROOM-32E mikrovezérlő panelt használtam, amelyet az Arduino IDE felületén programoztam. Sokan használják hobbi szinten az Espressif mikrovezérlőit, hiszen egyszerű programozni az interneten elérhető segédanyagok segítségével. Ez a verzió támogatja azokat a kommunikációs protokollokat is, amelyek a projekt szempontjából szóba jöhetnek (pl. I²C, BLE), így kezdésnek jó választásnak bizonyult. A 6. ábrán megtekinthető az ESP32-WROOM-32E mikrovezérlő panel:



6. ábra: ESP32-WROOM-32E mikrovezérlő panel.

Második lehetőségként a Texas Instruments CC2340R5 mikrovezérlőjét próbáltam ki, amely nemrég jelent meg a piacon, és rendkívül alacsony fogyasztással rendelkezik: aktív módban 2,6 mA, míg az előző mikrovezérlőnél ez körülbelül 200 mA-re tehető. A 7. ábrán megtekinthető az LP-EM-CC2340R5 mikrovezérlő panel. Alvó módban a fogyasztása kevesebb, mint 710 nA, ami ígéretes választásnak tűnt [10]. Azonban a rendelkezésre álló gyártói dokumentáció sajnos nem volt kellően részletesre kidolgozva, így praktikussági megfontoltságokból más mikrovezérlő típus keresése mellett döntöttem.



7. ábra: LP-EM-CC2340R5 mikrovezérlő panel.

Harmadik lehetőségként az STM32WB55 mikrovezérlő sorozat került szóba. A P-NUCLEO-WB55 mikrovezérlő panellel próbálkoztam, amely alvó módban 600 nA, aktív módban pedig körülbelül 10 mA fogyasztással rendelkezik [11]. Az STM32 panellel gördülékenyebben tudtam dolgozni, mert már korábban foglalkoztam hasonló panellel kisebb projektek során, így a meglévő ismeret jelentősen megkönnyítette a haladást a fejlesztés során.

Az 5. táblázatban látható a három mikrovezérlő típus összehasonlítása néhány, a fejlesztés szempontjából fontos szempont szerint.

Táblázat 5: Mikrovezérlők összehasonlítása.

	ESP32-WROOM-32E	CC2340R5	STM32WB55
Fogyasztás	magas	alacsony	alacsony
Standby mód fogyasztás	nem elérhető	alacsony	alacsony
Ár	alacsony	alacsony	magas
Fejlesztői környezet	Arduino IDE	Code Composer Studio	STM32CubeIDE
Elérhető oktatóanyag	jelentős	erősen korlátozott	közepes
Beépített PCB antenna	van	nincs	nincs

Összefoglalva, az ESP32-WROOM-32 viszonylag magas fogyasztása miatt nem bizonyult megfelelő választásnak, azonban jelentős elérhető oktatóanyag található hozzá, így a gyorsabb koncepció tesztelés érdekében első prototípusként ezt használtam. Az STM32WB55 mikrovezérlő energiaigénye hasonló a CC2340R5-éhez, de az ára magasabb. Bár a Texas Instruments mikrovezérlő tűnt a legkézenfekvőbb megoldásnak, végül az STM32-t választottam második prototípusnak, mert már volt tapasztalatom ezzel a mikrovezérlőcsaláddal, és a programozása is egyszerűbb volt a rendelkezésre álló online oktatóanyagok bősége miatt. Az STM32-es mikrovezérlők kiterjedt HAL (Hardware Abstraction Layer) könyvtárakkal rendelkeznek, amelyekkel az összes periféria könnyen kezelhető és inicializálható. Az így megírt kód az STM32 családon belül és különböző platformokon is könnyen hordozható, így az architektúra időtálló marad.

3.2. Timer IC (Integrated Circuit)

Az alacsony fogyasztás érdekében két lehetőség jöhet szóba:

- Alvó üzemmód
- Külső timer IC használata

Alvó üzemmódban a mikrokontroller egy meghatározott időpontig alszik, majd felébred, és elvégzi a mérést. Az ébrenlét alatt elvégzi a szükséges feladatokat, majd ismét alvó módba kapcsol. Mivel az alvás közbeni teljesítményfelvétel a hosszú alvásidők miatt jelentős hatással lehet az energiahatékonyságra, különböző optimalizálási technikákkal ez tovább csökkenthető. Mivel célunk az ultra alacsony fogyasztás elérése, egy ki-/bekapcsolási ciklust alkalmazunk, amelynek során kikapcsolt állapotban a mikrovezérlő nem fogyaszt áramot. Ezt legegyszerűbben egy időzítő IC-vel lehet megvalósítani. Az IC a mikrovezérlő és egyéb perifériák (mint a szenzor) tápját szakítja meg, aminek hátránya lehet, hogy a mikrovezérlő RAM-ja (Random Access Memory) nem őriz meg semmilyen adatot. A timer IC használata természetesen akkor célszerű, ha a fogyasztása alacsonyabb mint a mikrovezérlő fogyasztása a legkedvezőbb módban.

Az egy mérési periódusra eső átlagos áramfogyasztást az alábbi (3.1)-es egyenlettel tudjuk modellezni:

$$I_{avg} = I_{avg_off} + I_{avg_on} = (\alpha_{off} * I_{off}) + (\alpha_{on} * I_{on}). \quad (3.1)$$

Az átlagos áramfogyasztás (I_{avg}) a kikapcsolt (I_{avg_off}) és a bekapcsolt állapotban (I_{avg_on}) mért átlagos áram összegeként határozható meg, figyelembe véve az egyes állapotok időbeli arányát.

Például, ha a mikrovezérlő az idő 90%-ban kikapcsolt állapotban van, α_{off} 0,9-cel lenne egyenlő, α_{on} pedig 0,1-el.

Miután kiszámoljuk az átlagos fogyasztást ezzel a képlettel, majd elosztjuk az elem kapacitását (mAh) az átlagos fogyasztással, megkapjuk az elem élettartamát órában kifejezve [12]. Ezt a számítást a mérési eredmények című fejezetben fejtem ki.

A timer IC kiválasztásánál fontos volt, hogy ultra alacsony fogyasztással rendelkezzen. A TPL5110 típusú timert használtam, ami rendkívül keveset fogyaszt, mindössze 35 nA-t. A tápfeszültsége választható 1,8 és 5,5 V között. Az eszköz lehetőséget biztosít arra, hogy kívánt időközönként adjon jelet, majd ezt akkor kapcsolja ki, ha kapott egy visszaigazolást. Az időt 100 ms és 7200 s között választhatjuk ki a hármas láb és a GND közé kapcsolt különböző értékű ellenállásokkal.

Az alkalmazott timer lábkiosztása a 8. ábrán tekinthető meg:

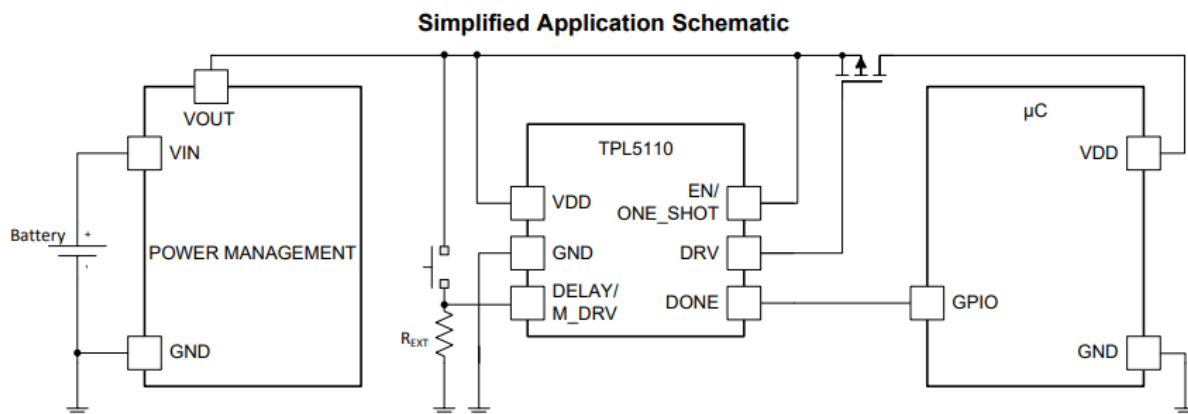
PIN		TYPE ⁽¹⁾	DESCRIPTION	APPLICATION INFORMATION
NO.	NAME			
1	VDD	P	Supply voltage	
2	GND	G	Ground	
3	DELAY/ M_DRV	I	Time interval set and manual MOSFET Power ON	Resistance between this pin and GND is used to select the time interval. The manual MOSFET power ON switch is also connected to this pin.
4	DONE	I	Logic Input for watchdog functionality	Digital signal driven by the μC to indicate successful processing.
5	DRV	O	Power Gating output signal generated every t_{IP}	The Gate of the MOSFET is connected to this pin. When DRV = LOW, the MOSFET is ON.
6	EN/ ONE_SHOT	I	Selector of mode of operation	When EN/ONE_SHOT = HIGH, the TPL5110 works as a TIMER. When EN/ONE_SHOT = LOW, the TPL5110 turns on the MOSFET one time for the programmed time interval. The next power on of the MOSFET is enabled by the manual power ON.

(1) G= Ground, P= Power, O= Output, I= Input.

8. ábra: TPL5110 lábkiosztása [13].

Ha a 7200 s nem lenne elég, mert nagyobb időközönként szeretnénk csak használni a mikrovezérlőt, a jelet tovább oszthatjuk egy D-tárolókból álló frekvenciaosztóval, azonban ebben a projektben csak kisebb időközökről van szó, így itt ez nem került megvalósításra. Figyelembe kell azonban vennünk a D-tároló(k) fogyasztását is, hiszen ha a timer IC és a D-tároló(k) többet fogyasztanak összességében, mint a mikrovezérlő legkedvezőbb fogyasztása, akkor már nem éri meg ez a módszer.

A TPL5110 egy, az adatlap alapján javasolt alkalmazási példája a 9. ábrán látható:



9. ábra: TPL5110 alkalmazási példa [13].

3.3. Szenzorok, érzékelők

A szenzorok kiválasztásánál figyelembe kell venni, hogy milyen területen kívánjuk használni a szenzorhálózatot. Például egy sajátérlelő üzemben fontos lehet a hőmérséklet, páratartalom érzékelése, míg egy növénytermesztő laborban a környezeti fény mérése. Az is fontos lehet, hogy például egy tartály ne boruljon fel, vagy ne érje ütés. Ha mégis megtörténne valamelyik eset, ezeket jelezni kell a központi vezérlőegységnek, ami figyelmezteti a kezelőszemélyzetet a nemkívánt esemény bekövetkezéséről, így ők meg tudják tenni a szükséges lépéseket az esetleges problémák elhárításához.

A fejezetben szó lesz aktív és passzív érzékelési módokról, melyek alatt az alábbiakat értem:

- **Aktív érzékelés:** Csak akkor szolgáltat adatot, ha a mikrovezérlő ébren van, mivel az adatokat ki kell olvasni. Ha külső hatás éri a rendszert, az érzékelő nem küld jelzést a központi egységnek. Adatokat csak lekérdezéskor kapunk.
- **Passzív érzékelés:** A mikrovezérlő nem csak a timer jelzésére ébredhet fel, hanem külső hatások, például mechanikai folyamatok által is aktiválódhat. Ez lehetővé teszi, hogy a mikrovezérlő alvó állapotban is észlelje a külső jeleket, és szükség esetén jelezzon a központi egységnek.

3.3.1. Hőmérséklet, páratartalom

Hőmérséklet, páratartalom mérésére a Texas Instruments HDC1080 és HDC3022 szenzorok kerültek felhasználásra.

Ezek a szenzorok I²C kommunikációs protokollt használnak. A gyártó állítása szerint a HDC1080 páratartalom-mérésének pontossága ± 2 RH%, míg a hőmérsékletet $\pm 0,2$ °C

pontossággal méri. Az újabb HDC3022 szenzor ennél még pontosabb, a páratartalmat $\pm 0,5$ RH%-kal, a hőmérsékletet pedig $\pm 0,1$ °C eltéréssel méri. A fogyasztásuk alacsony: a HDC1080 esetében 190 μ A, míg a HDC3022 mindössze 110 μ A-t igényel, ami különösen kedvező, mivel csak rövid ideig és időszakosan kerülnek aktiválásra [14, 15].

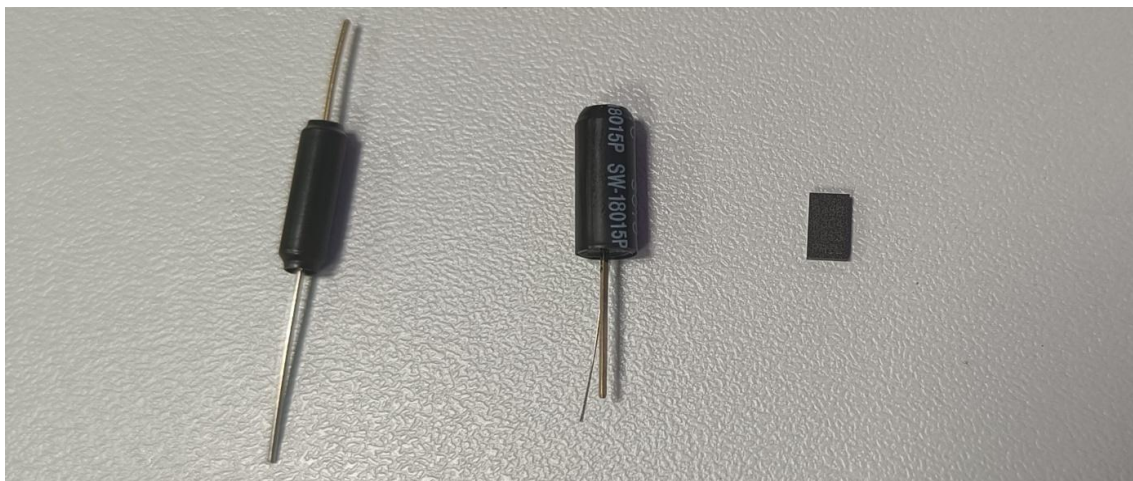
Másik hőmérséklettel kapcsolatos szenzornak egy S-5844A65CB-I4T1U3 nevű hőmérsékletkapcsolót választottam, ami 65 °C felett logikai magas jelet ad, alatta pedig alacsony [16].

A HDC szenzorok és a hőmérsékletkapcsoló közötti különbség az is, hogy utóbbi, amint eléri a kritikus, ebben az esetben 65 °C-os hőmérsékletet, azonnal jelez, és bekapcsolja a mikrovezérlőt, így azonnal értesülünk a túlmelegedésről. Ezt nevezhetjük passzív érzékelőnek. Ezzel szemben a HDC szenzorok csak akkor adnak információt, ha lekérdezzük tőlük a hőmérsékletet, tehát aktív érzékelők.

3.3.2. Rázkódás, dőlés

Rázkódás, dőlés érzékelésre az alábbi három szenzor került kiválasztásra, amely a 10. ábrán látható:

- TCSW200D dőlésérzékelő (azonnal ad jelet),
- TCSW18015P rázkódásérzékelő (azonnal ad jelet),
- és ADXL345BCCZ-R gyorsulásérzékelő (lekérdezéssel kapunk információt).

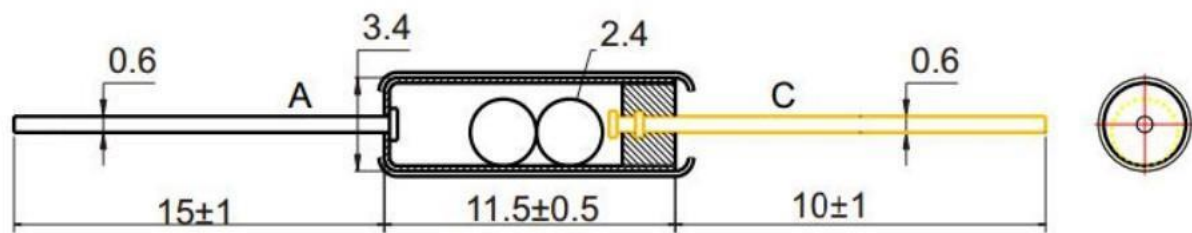


10. ábra: Balról indulva TCSW200D, TCSW18015P, ADXL345BCCZ-R egymás mellett.

A TCSW200D dőlésérzékelő belsejében golyók vannak elhelyezve a 11. ábrán látható módon, amelyek egy adott dőlésfok felett érintkeznek a szemben lévő lábbal, így magas jelet adva. Alkalmazási lehetőség például, hogyha egy fontos palack vagy tartály, amihez oda van

erősítve a szenzor, eldől, akkor a szenzor jelet ad, a mikrovezérlő pedig jelez a központi vezérlőegységnek.

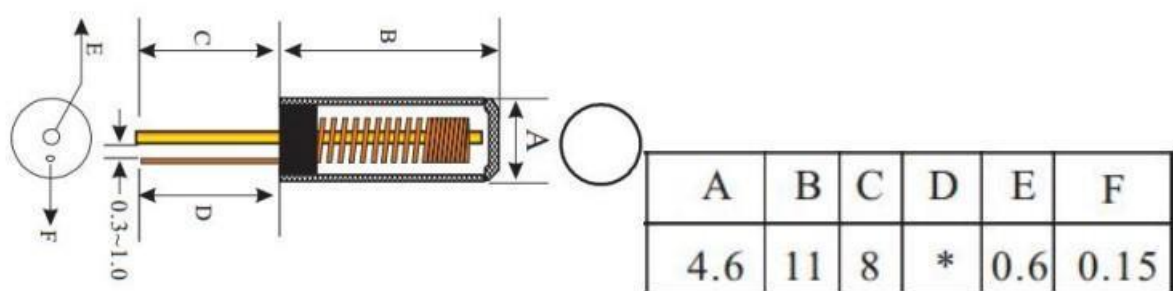
Egység = mm



11. ábra: TCSW200D belső felépítése és jellemző méretei [17].

A TCSW18015P rázkódásérzékelő belsejében egy rugó van elhelyezve a 12. ábrán látható módon. Ha rázkódás éri az érzékelőt, akkor egy pillanatnyi ideig ad jelet, majd visszaáll nyugalmi helyzetbe. Ez az időszak ebben a projektben nem lenne elég a mikrovezérlő felébresztéséhez és a központi vevőegység „riasztásához”, hiszen ez az idő egy másodperc töredéke, ezért ezt a jelet egy SN74LVC1G175 D-tárolóval „kapjuk el”, majd az felébreszti a mikrovezérlőt, ami jelez a központi egységnek, hogy valamilyen esemény érte az eszközt. A jelzés után a mikrovezérlő vár egy kicsit, és a D-tároló RESET lábára logikai magas jelet ad, hogy kitörölje a benne lévő értéket. Ezzel elzárjuk a mikrovezérlő tápellátását, hiszen a D-tároló tartotta ébren. A dőlésérzékelőnél hasonló módon jártam el, hiszen ott is előfordulhat, hogy csak kevés ideig ad logikai magas jelet, és nem érzékeli a központi egység az eseményt. Így már passzív érzékelőnek nevezhetjük ezeket a modulokat.

Egység = mm



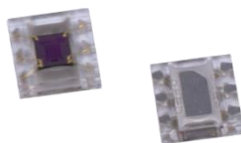
12. ábra: TCSW18015P belső felépítése és jellemző méretei [18].

Az ADXL345BCCZ-R gyorsulásérzékelő I²C kommunikációval működik, tehát nem küld magától információt, hanem lekérdezés után kapható meg a mérési adat, ezért az aktív érzékelőkhöz került besorolásra. Az előző kettő érzékelőhöz képest ez a hátrány, viszont a szenzor pontosan meg tudja határozni az adott orientációját, például mennyire van eldőlvé,

melyik irányban. Ez fontos lehet speciális esetben, például, hogy megtudjuk, az adott tartályból kiborulhatott-e valami, annak az ismeretében természetesen, hogy mekkora dőlésszög kell ahhoz, hogy kifolyjon belőle a folyadék. Ezt az érzékelőt lehet együtt is alkalmazni a fenti érzékelők egyikével, amely felébreszti a D-tárolón keresztül a mikrovezérlőt, ami működés közben lekérdezi a gyorsulásérzékelő adatait I²C kommunikáción keresztül.

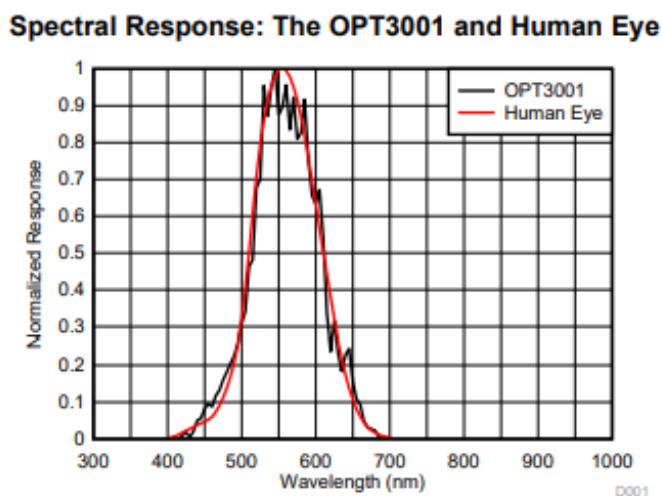
3.3.3. Fény

A fényérzékeléshez a Texas Instruments OPT3001 környezeti fényérzékelője került felhasználásra, amely szintén I²C kommunikációval működik, így csak lekérdezéskor szolgáltat információt, azaz aktív érzékelő. Az érzékelő 0,01 lux és 83 000 lux között képes mérni, miközben egy átlagos iroda megvilágítása általában 100-1000 lux között mozog. Ez a széles mérési tartomány lehetővé teszi a szenzor alkalmazását változatos környezetekben, például beltéri világítás optimalizálására vagy akár kültéri körülmények között is, ahol a természetes fény intenzitása jelentős változásokon mehet keresztül [19, 20]. A szenzor megtekinthető a 13. ábrán:



13. ábra: OPT3001 környezeti fényérzékelő.

Az érzékelő spektrális érzékenységi karakterisztikája a 14. ábrán látható:



14. ábra: OPT3001 környezeti fényérzékelő karakterisztikája [19].

3.4. Az áramkör

Az áramkör kapcsolási rajzainak és nyomtatott áramkör layout tervének készítésekor nagy szerepet kapott a moduláris felépítés. Az említett kapcsolási rajzok a dolgozat függelékében találhatók. A megvalósított áramkör funkciók szempontjából három részegységre bontható, amelyek rendre a következők:

- tápellátás,
- adatfeldolgozás és továbbítás,
- valamint érzékelés.

Két kapcsolási rajz és nyomtatott áramkör készült: az egyik az ESP32-WROOM-32E mikrovezérlő panel, a másik az STM32WB55CGU7 mikrovezérlő felhasználásával. Az első, ESP32-höz készült áramkör nagyobb fogyasztással rendelkezik, míg a második, STM32-es áramkör nemcsak kisebb helyet foglal, de jelentősen alacsonyabb energiafogyasztással is rendelkezik.

A tápellátásért felelős egység feladata a megfelelő, stabil tápfeszültségek előállítása mind a panelen helyet kapó alkatrészek, mind a külső perifériák számára. Mindkét panel elemmel működik: az első négy darab 1,5 V-os AA elemmel, míg a második egy darab CR2032 3 V-os gombelemmel. Az első verzióhoz egy külső DC-DC konvertert használtam, amely a 15. ábrán látható, és 6 V-ról 5 V-ra konvertálja a feszültséget. A második verziónál lehetőséget biztosítottam arra, hogy választható legyen a 3 V-os feszültség megtartása, vagy a megfelelő alkatrészek beültetésével egy LT3494 DC-DC konverter IC segítségével a feszültség 3,7 V-ra történő felkonvertálása, amelyet ezt követően egy TPS73001DBVR disszipatív feszültségszabályzó IC-vel 3,3 V-ra állítottam be. A disszipatív elemre azért van szükség, mert a DC-DC konverter alapvetően egy ingadozó feszültséget állít elő, amely zavaró lehet például a HDC3022 szenzor számára, amely, annak mérési módja miatt, érzékeny az ingadozó tápfeszültségre. A disszipatív elem ugyan nem túl jó az energiatakarékosság szempontjából, azonban a mérés pontossága érdekében szükséges lehet. A projekt esetében a HDC3022-nek és a többi szenzornak is megfelel a 3 V-os feszültség, ezért nem készült olyan prototípus, amelyben használnunk kellene a DC-DC konvertert, de a későbbiekben újfajta szenzor esetében lehet, hogy kelleni fog, így biztosítottam rá lehetőséget. Ezen kívül a TPL5110 timer IC gondoskodik a mikrovezérlő időzített be- és kikapcsolásáról. A timer IC 3-as lába és a GND közé két darab sorba kötött 10 k Ω -os ellenállást helyeztem. Két ellenállással több variáció képezhető, így könnyebben személyre szabható a két bekapcsolás között eltelt idő. Ezzel az

értékkel az IC körülbelül 50 másodpercenként kapcsolja be a mikrovezérlőt. Ez azért célszerű, mert a fejlesztés szakaszában kellemetlen lenne hosszabb időtartamokra várni.



15. ábra: Az általam alkalmazott külső DC-DC konverterek (az eltérő szín ellenére nincs közöttük különbség).

Az adatfeldolgozásért és kommunikációért felelős egység az első változatban az előzetesen bemutatott ESP32-WROOM-32E mikrovezérlő panel, míg a második változatban a szintén korábban tárgyalt STM32WB55CGU7 mikrovezérlő. Az utóbbi mikrovezérlőhöz készült kapcsolási rajzot az ST AN5165 alkalmazási útmutató alapján készítettem. Az első mikrovezérlőhöz már rendelkezésre állt a fejlesztőpanel antennája, míg a másodikhoz tesztelés és mérés céljából kétféle lehetőséget biztosítottam: egy PCB-antennát és egy chip-antennát. A PCB-antennát az ST AN5129 alkalmazási útmutató alapján készítettem, míg a chip-antennák közül az 2450AT43B100E alkatrészre esett a választás, amely a 16. ábrán látható:



16. ábra: 2450AT43B100E chip antenna.

Az érzékelési egység választhatóan tartalmazza a korábban tárgyalt szenzorokat, ahogy az a 6. táblázatban is látható:

Táblázat 6: Első és második verzió szenzorai.

	Első verzió	Második verzió
Hőmérséklet, páratartalom	HDC1080, S-5844A65CB-I4T1U3	HDC3022, S-5844A65CB-I4T1U3
Rázkódás, dőlés	TCSW200D, TCSW18015P	TCSW200D, TCSW18015P, ADXL345BCCZ-R
Fényérzékelés	nincs	OPT3001

A nyomtatott áramkörök úgy lettek tervezve, hogy egyszerre csak egy szenzort tudjanak használni. Ezért, ha egyidejűleg szeretnénk mérni a hőmérsékletet és a rázkódást, azt két külön egységgel kell megvalósítanunk.

4. Szoftver

Ebben a fejezetben bemutatom a beágyazott szoftverek fejlesztésének folyamatát. Az ESP32-WROOM-32E fejlesztése az Arduino IDE szoftverben, C++ programnyelven történt, míg az STM32WB55CGU7 fejlesztése STM32CubeIDE szoftverben, C nyelven valósult meg.

4.1. Elosztott egységek

Az alábbiakban részletezem, hogyan kérdeztem le az adatokat, és hogyan kaptam vissza az eredményeket. Fontos szempont volt, hogy amikor a mikrovezérlő tápfeszültséget kap, a BLE nevét a mérés után inicializálja, hogy a mért adatok is szerepeljenek benne. Így a központi vezérlőegységnek nem kell közvetlenül csatlakoznia, csupán szkennelnie kell a környező Bluetooth-eszközöket, amelyek közül kiszűri a megfelelő eszközneveket, illetve a bennük tárolt adatokat.

A mikrovezérlő érzékeli, ha rázkódás, dőlésérzékelés vagy hőmérsékletkapcsoló aktiválása esetén a D-tároló ébresztette fel, és ennek megfelelően sugározza az üzenetet a nevében. Ha a timer ébreszti fel a mikrovezérlőt, akkor a mért adatokat sugározza a nevében. Dőlés-, rázkódásérzékelés vagy hőmérsékletkapcsoló esetén, amennyiben nem adnak jelet, azt írja, hogy minden rendben van. Más szenzorok esetén az adatokat I²C-n keresztül lekérdezi, és azokat beleteszi a nevébe. Az alábbi táblázat összefoglalja a lehetséges BLE neveket:

Táblázat 7: Lehetséges BLE nevek összefoglalva.

	ESP32-WROOM-32E	STM32WB55
Timer általi felébresztés rezgésérzékelő, dőlésérzékelő és hőmérsékletkapcsoló esetén	ESPn_OK	STMn_OK
Rezgésérzékelő magas jel	ESPn_forced	STMn_forced
Dőlésérzékelő magas jel	ESPn_forced	STMn_forced
Hőmérsékletkapcsoló magas jel	ESPn_hot	STMn_hot
Hőmérséklet- és páratartalom-mérés (I²C)	ESPn_Txx.xx_Hyy.yy	STMn_Txx.xx_Hyy.yy
Gyorsulásérzékelő (I²C)	-	STMn_OK vagy STM32_forced
Környezeti fényérzékelés (I²C)	-	STMn_light_OK vagy STMn_light_NOT_OK

Az *n* helyére egy egyedi szám kerül, amely segít megkülönböztetni az eszközöket egymástól. Például így lesz azonosítható az egyes eszközök állapota: ESP1_OK, ESP2_OK. A hőmérséklet- és páratartalom-mérésnél az xx.xx a mért hőmérsékletet, míg az yy.yy a relatív páratartalmat tartalmazza, mindkettőt két tizedes pontossággal.

Miután a BLE név be lett állítva, az egység körülbelül 10 másodpercig hirdeti magát. Ez az idő elegendő arra, hogy a vezérlőegység észlelje a hirdető eszközt. Ezután a mikrovezérlő egyik pinje jelet ad a timernek, amely lekapcsolja a tápfeszültséget a mikrovezérlőről. Majd 50 másodperc múlva a mikrovezérlő újra tápot kap, és ez a ciklus folytatódik, amíg az elem le nem merül.

4.2. Központi vezérlőegység

A központi vezérlőegység egy különálló ESP32-WROOM-32E mikrovezérlő panel, amely egy laptop-hoz van csatlakoztatva, és UART-on keresztül kommunikál vele. A vezérlőegység folyamatosan keresi a közeli Bluetooth eszközöket. Amikor olyan Bluetooth nevet észlel, amely ESP-vel vagy STM-mel kezdődik, elküldi ezt az információt a laptopnak UART-on keresztül. A laptopon a LabVIEW szoftver dolgozza fel az adatokat, amely nemcsak a pillanatnyi értékeket jeleníti meg, hanem egy fájlba is rögzíti azokat, így később vissza is nézhető.

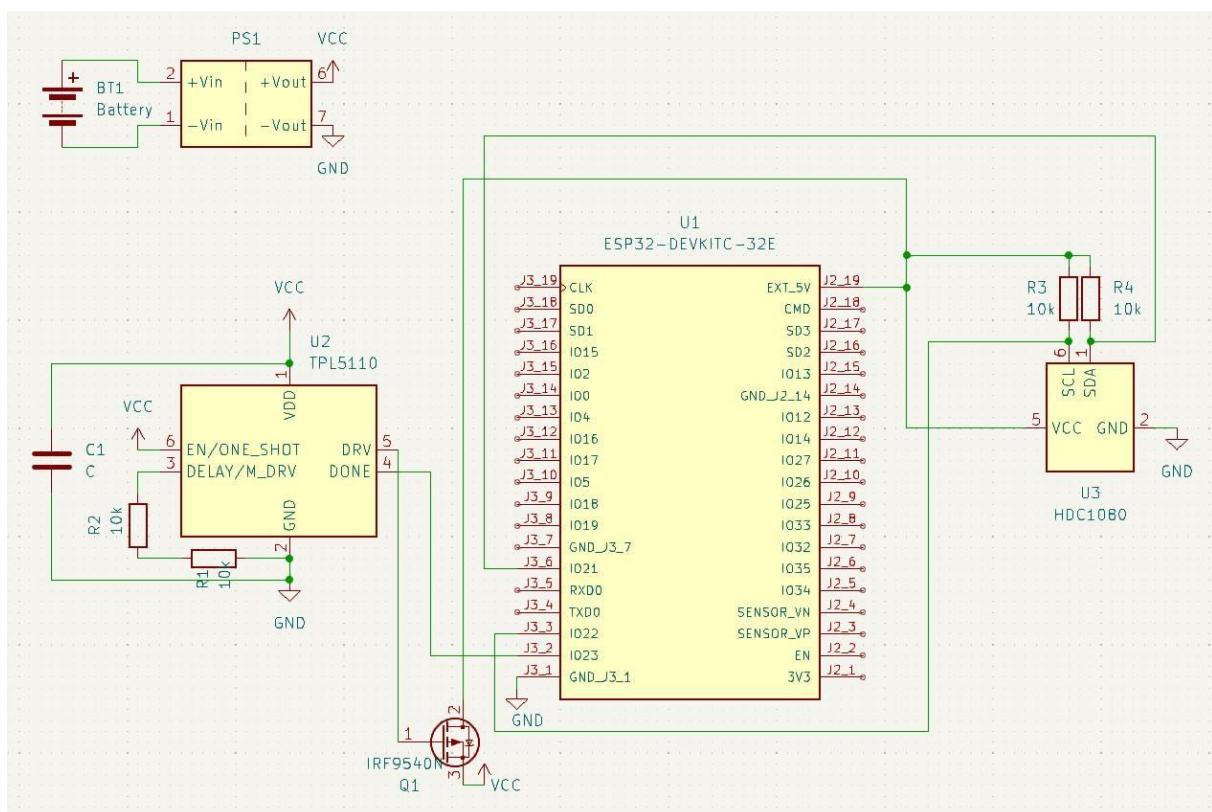
Az adatok tehát érkezhettek periodikusan és aperiodikusan is. Periodikus adatküldés történik az I²C kommunikációval rendelkező egységek esetén, amelyek előre meghatározott időközönként továbbítják az adatokat. Aperiodikus adatküldés figyelhető meg a dőlésérzékelő, rezgésérzékelő és hőmérsékletkapcsoló esetében, mivel ezek külső hatásra reagálva azonnal jeleznek a mikrovezérlőnek, amely ennek hatására bekapcsol. Így a timer által adott két jelzés között előfordulhatnak további impulzusok. Amennyiben egy idő után valamelyik mérőegységtől nem érkezik jel, a rendszer szoftvere valószínűsíti, hogy az elem lemerült, és erről értesíti a felhasználót.

5. Megvalósítás

Ez a fejezet az elkészült paneleket mutatja be, és részletezi a fejlődésüket. Először az első próbapanel kerül bemutatásra, majd a nyomtatott áramkör és végül a hozzá készült mechanikai elemek ismertetése következik.

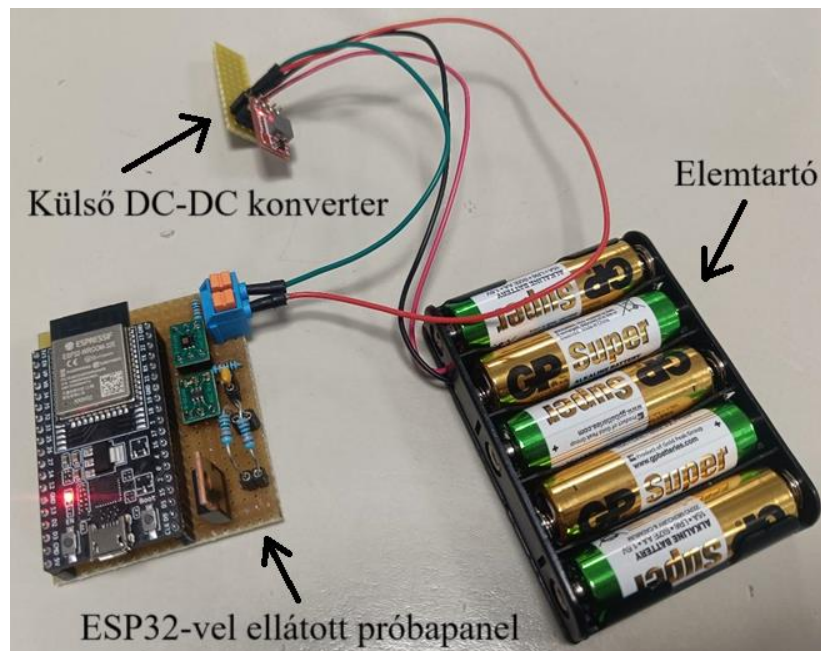
5.1. Próbapanel

Az első próbapanel az ESP32 mikrovezérlő panellel készült. A próbapanel tápellátását a timer IC aktiválta, majd a mikrovezérlő lekérte a HDC1080 érzékelőtől a hőmérséklet- és páratartalom-értékeket. Ezeket az adatokat a mikrovezérlő beágyazta a BLE eszköz hálózati nevébe, és elkezdte sugározni. 10 másodperc elteltével a timer IC magas jelet adott a DONE lábára, ami megszakította a mikrovezérlő áramellátását. Az eszköz helyes működéséről egy Android operációs rendszert futtató okostelefon segítségével győződtem meg, amelyen az nRF Connect for Mobile alkalmazás segítségével jelenítettem meg a releváns adatokat. A kapcsolási rajzok és a PCB tervek a KiCAD 7.0 nevű nyomtatott áramkör tervező programban készültek. A próbapanel kapcsolási rajza a 17. ábrán látható:



17. ábra: ESP32 kapcsolási rajz HDC1080 szenzorhoz.

A rendszert öt darab sorosan kapcsolt 1,5 V-os elemmel működtettem, amelyek feszültségét 5 V-ra kellett konvertálni. Ezt a korábban említett külső panelen elhelyezkedő DC-DC konverter segítségével végeztem el. A megépített rendszer a 18. ábrán látható:



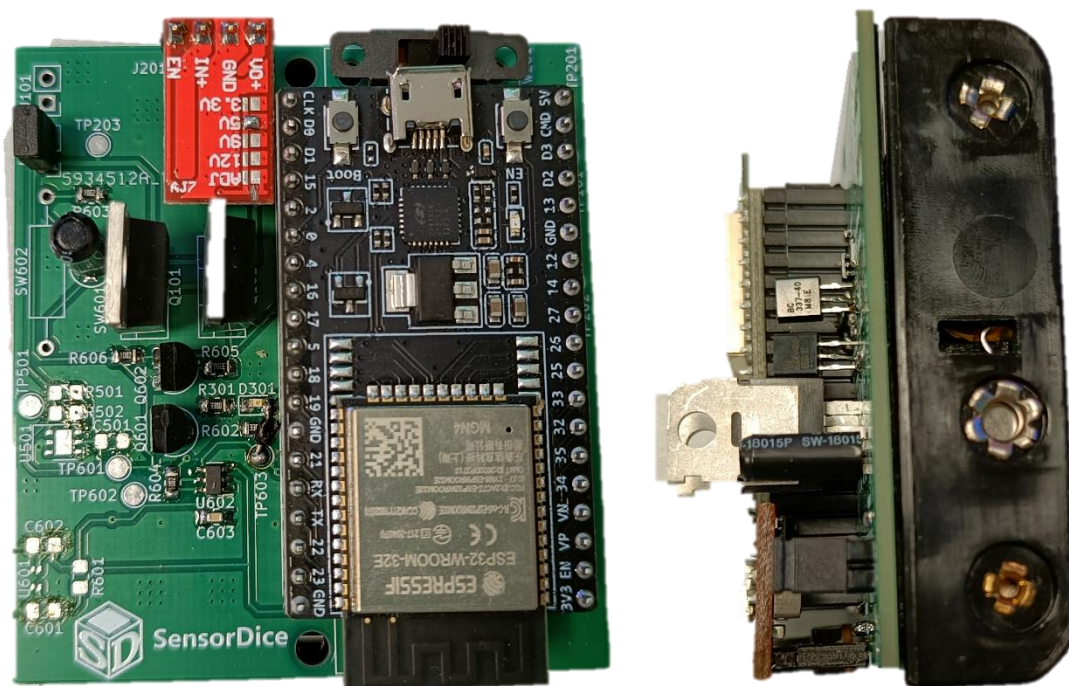
18. ábra: ESP32 mikrovezérlő panel HDC1080 szenzorral elemről táplálva próbapanelen.

Hasonló elrendezéssel készítettem egy újabb próbapanelt rezgésérzékelővel. Amikor a rendszer valamilyen rezgést érzékelt, a D-tároló észlelte a jelet, majd megtartotta azt, és aktiválta a mikrovezérlőt. A mikrovezérlő meg tudta állapítani, hogy a D-tároló vagy a timer IC ébresztette fel, és ennek megfelelően állította be az eszköz BLE nevét.

5.2. Nyomtatott áramkör

Miután a kapcsolási rajz működőképesnek bizonyult, megterveztem a hozzá tartozó nyomtatott áramkört. Az eredeti kapcsolási rajzot úgy egészítettem ki, hogy egyetlen nyomtatott áramkör több lehetőséget is támogasson. Ez lehetővé teszi, hogy ha rezgésérzékelőre vagy dőlésérzékelőre van szükség, akkor azt ültessük be, ha pedig hőmérsékletmérőt szeretnénk használni, akkor arra legyen lehetőség. A verziókhoz külön-külön elkészítettem a BOM (Bill Of Materials) táblázatokat, a variánsok kezelésének megkönnyítése miatt.

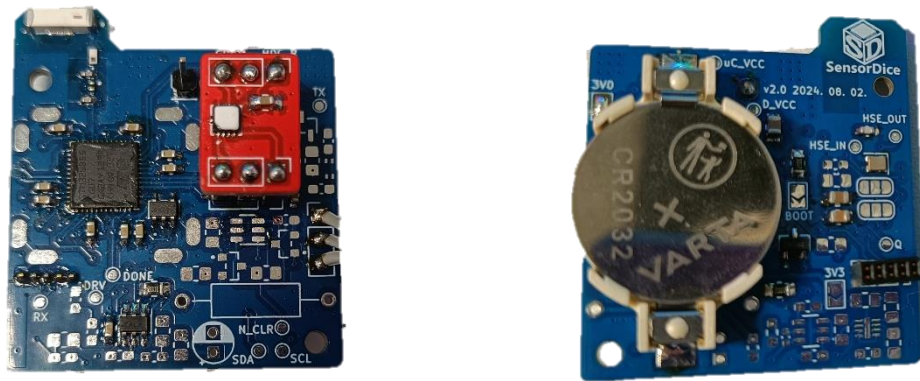
A nyomtatott áramkört úgy terveztem meg, hogy a hátoldalára kizárólag az elemtartó kerüljön, míg az elülső oldalra az összes többi alkatrész és a mikrovezérlő panel kerül. Az elkészült prototípus a 19. ábrán látható:



19. ábra: Első verzió prototípusa szemből és oldalnézetből.

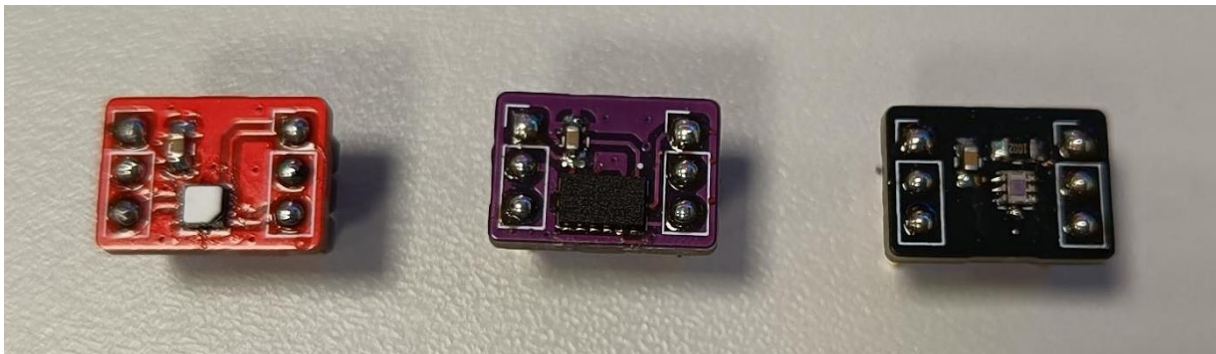
Az első verzióban még nem volt elsődleges szempont az SMD (Surface-Mount Device) alkatrészek használata az egyszerűbb szerelés és gyorsabb koncepció tesztelés szempontjából. Ennek következtében került be a szükségesnél nagyobb, THT (Through Hole Technology) tokozású MOSFET, valamint a THT tranzisztorok is. A második verzióhoz már nem készült külön próbapanel; az STM32WB55CGU7 mikrovezérlőhöz terveztem egy kapcsolási rajzot, amelyhez már több verziót is készítettem:

- I²C kommunikációs szenzorok:
 - mint HDC3022 hőmérséklet- és páratartalom-érzékelő,
 - OPT3001 környezeti fényérzékelő,
 - és ADXL345BCCZ-R gyorsulásérzékelő,
- valamint rezgésérzékelő,
- dőlésérzékelő,
- és hőmérsékletkapcsoló.



20. ábra: Második verzió prototípusa szemből és hátulról.

A második prototípus a 20. ábrán látható. Az I²C kommunikációval működő szenzorokhoz külön adapterpaneleket készítettem, amelyek segítségével könnyen cserélhetőek az érzékelők. Ezek a 21. ábrán tekinthetők meg. Bár a cseréhez a kódban is változtatás szükséges, hiszen az egyes szenzorok eltérő címmel és regisztertérképpel rendelkeznek, a moduláris felépítés helytakarékoságát eredményez. A kommunikációhoz szükséges felhúzó ellenállásokat a tervezett áramkörre helyeztem, az adapterpaneleken pedig a szükséges lábakat azonos pozícióban vezettem ki.

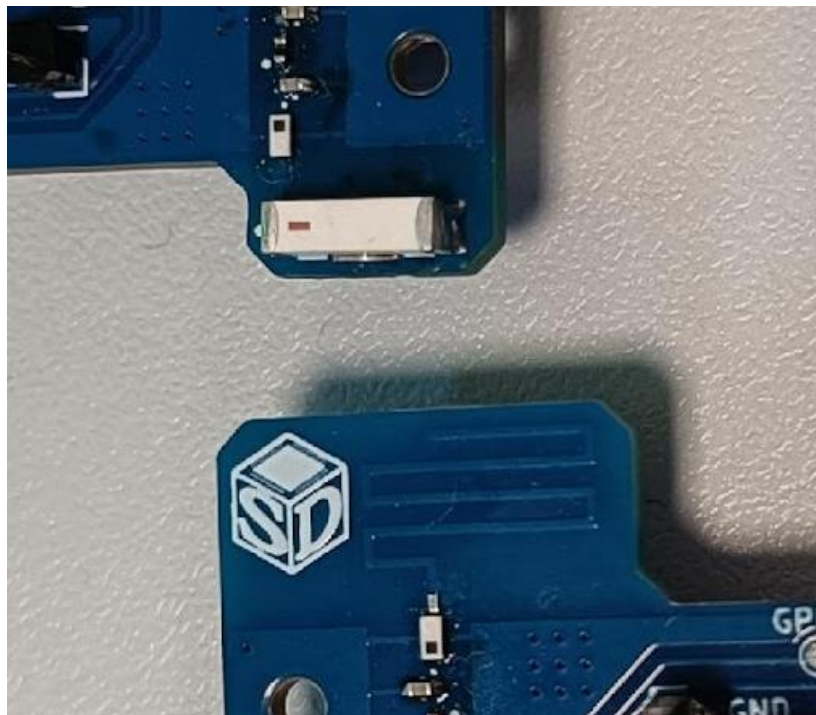


21. ábra: Adapterpanelek (balról jobbra): HDC3022, ADXL345BCCZ-R, OPT3001.

Ez a verzió lehetővé teszi a 3,0 V és a 3,3 V közötti üzemeltetési feszültség választását, de jellemzően a 3,0 V-os feszültséget részesítettem előnyben. A rendszer modulárisan fejleszthető, mivel a mikrovezérlő valamennyi nem használt kommunikációs és egyéb perifériája kivezetésre került (pl. UART, GPIO lábak kivezetése TestPoint felületre). Így a későbbiekben bármilyen külső modul könnyedén hozzáadható.

A második verzió tervezésénél az elsődleges szempont a fogyasztás és a méret csökkentése volt. Emiatt főként SMD alkatrészeket használtam, így az előző PCB méretet megközelítőleg a 3/8-ad részére csökkentettem. Előnynek bizonyult, hogy nem egy teljes mikrovezérlő panelnek, hanem csak a mikrovezérlőnek terveztem helyet a rendszerben. Szabadabban gazdálkodtam a két oldalon, mert az elemtartó nem foglalt annyira nagy helyet. Valamint nem külső DC-DC konverter panelt használtam, hanem kisebb alkatrészekből terveztem egyet. A mikrovezérlő megfelelő bekötése érdekében a gyártó által szolgáltatott ST AN5165 dokumentumát használtam fel referenciaként a kapcsolási rajz tekintetében, mikrovezérlő és RF alkatrészek esetében.

A nyomtatott áramkörön helyet kellett adni egy antennának is, ugyanis ez szükséges valamennyi rádiófrekvenciás kommunikáció, így a BLE működéséhez is. A korábbi, 2.3-as fejezetben összehasonlítottam a PCB antennát, illetve a chip antennát. Mindegyik típusnak megvannak az előnyei és hátrányai, a gyakorlatban azonban mindkét verziót megvalósítottam, hogy össze tudjam őket hasonlítani. A PCB antennát az ST AN5129 dokumentuma szerint terveztem, amelyben a gyártó ajánlást tesz a PCB antenna struktúrájára, valamint méreteire. A chip antenna kiválasztásánál fontos volt a kis méret és a jó frekvenciatartomány. A 2450AT43B100E chip antennára esett a választás, mely ezeknek megfelel. Az antennák a 22. ábrán tekinthetők meg.



22. ábra: Chip antenna beültetve (fent), és PCB antenna (lent).

5.3. Doboz

Az elosztott egységekhez 3D nyomtatott dobozok is készültek, melyben könnyedén tudjuk tárolni őket. Ez fontos szerepet játszik majd a szenzorok és az áramkörök védelmében, valamint a készülék kompakt és esztétikus megjelenésében is. A tervezett doboz biztosítja majd a környezeti hatásokkal szembeni védelmet, például a por és a mechanikai sérülések ellen, és megkönnyíti a készülék telepítését is különböző környezetekben. Az első verzióhoz egy FDM (Fused Deposition Modeling) technológiával készült, felülről nyitható tárolót terveztem, amelynek tetejét oldalirányban elhúzva lehet kinyitni. Az egység behelyezése után csavarral rögzíthetjük, hogy ne nyíljon ki véletlenül. Az oldalára került egy nyílás, hogy könnyedén ki- és be tudjuk kapcsolni az egységünket, és ne kelljen mindig kinyitni, ha ezen változtatni szeretnénk. A 23. ábrán megtekinthető a doboz:



23. ábra: Első prototípushoz készült doboz.

Ezen kívül készült egy másik doboz is, ami az eszköz nevét (SensorDice) próbálja utánózni. Ez a 24. ábrán látható:



24. ábra: Első prototípushoz készült ütéstompítás doboz.

Maga a doboz és a betűk FDM (Fused Deposition Modeling) technológiával készültek, és az oldalaira az ütéstompítók SLA (Stereolithography) technológiával készültek. Utóbbi használata azért bizonyult jobb megoldásnak, mert elasztikus műgyantát használtam, ami puhább alapanyagként szolgált.

A második prototípus doboza hasonló lett az első tárolóhoz, a 25. ábrán látható:



25. ábra: A gombelemes prototípus doboza.

6. Mérési eredmények

Ebben a fejezetben kitérek arra, hogy mennyit fogyasztanak az egységek, mekkora a hatótávolságuk, illetve összehasonlítom az első és a második verziót.

6.1. Fogyasztás

Multiméterrel megmértem az egységek fogyasztását. A mérésekhez a multimétert sorosan kapcsoltam az áramellátás mellé, majd feljegyeztem az eredményeket. Az első verzió ébrenléti állapotában 90 mA áramfelvételt mértem. Amikor a timer megszakította a tápellátást, csak a timer és a D-tároló igényelt minimális áramot. A timer 35 nA-t, míg a D-tároló az I²C mérések kivételével (mivel ott nem szerepel a D-tároló) 10 μ A-t fogyasztott. A mikrovezérlő 50 másodpercig kikapcsolt állapotban van, majd 10 másodpercig működik. Ez alapján $\alpha_{on} = 10 \text{ s}/60 \text{ s} = 0,167$ és $\alpha_{off} = 50 \text{ s}/60 \text{ s} = 0,833$. A 3.1-es fejezetben említett egyenletbe behelyettesítve megbecsülhetjük az átlagos fogyasztást:

$$I_{avg} = (0,167 * 0,09 \text{ A}) + (0,833 * 0,000000035 \text{ A}) \approx 0,015 \text{ A} = 15 \text{ mA.} \quad (6.1)$$

A D-tárolót a passzív érzékelésnél használjuk, 10 μ A a fogyasztása, ha ezzel is számolok, akkor szintén kb. 15 mA az átlagos fogyasztás, néhány μ A-rel tér el, tehát elhanyagolható a változás.

Egy átlagos AA elem kapacitása 2870 mAh, amelyből négy van, és ha ezt elosztjuk az átlagos fogyasztással, megkapjuk az elem élettartamát [21]:

$$\text{Működési idő (óra)} = \frac{\text{Elem kapacitása (mAh)}}{\text{Fogyasztás (mA)}} = \frac{2870 \text{ mAh}}{15 \text{ mA}} = 191,33 \text{ óra.} \quad (6.2)$$

A becslés szerint körülbelül 8 napig bírja egy elosztott egység, amely nem bizonyul megfelelőnek egy elosztott szenzorhálózat esetén.

Ha az egységet percenként aktiváljuk, akkor mindössze 8 napig működik az egység, ami a projekt szempontjából nem ideális eredmény. A hőmérséklet és a páratartalom nem változik ilyen gyakran, így nincs szükség az egység percenkénti aktiválására. Ráadásul, ha valamilyen külső hatás, például dőlés történik, arról azonnal visszajelzést kapunk a szenzortól. Az energiahatékonyság javítása érdekében nagyobb ellenállások alkalmazásával növelhetjük az alvó időszakot, ezáltal meghosszabbíthatjuk az elemek élettartamát. Ha a timer maximális kapacitását kihasználjuk, és két óránként kapcsoljuk be az egységet, akkor az $\alpha_{on} = 10 \text{ s} / 7200 \text{ s} \approx 0,001$ és $\alpha_{off} = 7190/7200 \text{ s} \approx 0,999$. Az egyenletbe behelyettesítve:

$$I_{\text{avg}} = (0,999 * 0,000000035 \text{ A}) + (0,001 * 0,090 \text{ A}) \approx 0,00009 \text{ A} = 90 \mu\text{A}. \quad (6.3)$$

Ha a D-tároló fogyasztását is beleszámoljuk, akkor körülbelül 100 μA -t kapunk eredményül. A működési idő:

$$\text{Működési idő (óra)} = \frac{2870 \text{ mAh}}{0,09 \text{ mA}} = 31888,89 \text{ óra} \approx 1329 \text{ nap}. \quad (6.4)$$

Ha tehát két óránként kapcsoljuk be az egységet, a becslések szerint az akár több mint 3 és fél évig képes lenne működni. Ez az időtartam jelentős javulást mutat, és jól tükrözi az alvási időszak növelésének hatását az energiafogyasztásra.

A második verziónál szintén elvégeztem a fogyasztásmérést. Ébrenléti állapotban 6,2 mA-t mértem, ami jelentős csökkenést mutat az első verzióhoz képest, amelynél 90 mA volt az érték. Az α_{on} és α_{off} értéke itt is megegyezik a fenti számításokkal. Ezeket behelyettesítve a (6.5)-ös egyenletbe, kiszámítható a második verzió becsült átlagos fogyasztása:

$$I_{\text{avg}} = (0,167 * 0,0062 \text{ A}) + (0,833 * 0,000000035 \text{ A}) \approx 0,001 \text{ A} = 1 \text{ mA}. \quad (6.5)$$

Eredményül 1 mA-t kaptam, ami lényegesen kedvezőbb az első verzió 15 mA-es átlagfogyasztásához képest, így jelentős javulást mutat az energiahatékonyságban. A D-tároló fogyasztását beleszámolva nincs nagy eltérés ebben az esetben sem. A CR2032 elem kapacitása 225 mAh, ezt behelyettesítve a képletbe:

$$\text{Működési idő (óra)} = \frac{225 \text{ mAh}}{1 \text{ mA}} = 225 \text{ óra}. \quad (6.6)$$

Ha az egységet percenként aktiváljuk, akkor mindössze 9 napig működik egy gombelemről, ami a projekt szempontjából nem ideális eredmény. Ha azonban kihasználjuk, hogy a timer két óránként tud kapcsolni, akkor ugyanazokkal az α_{on} és α_{off} értékekkel számolhatunk, amelyeket az első prototípus esetén használtunk. Az egyenletbe behelyettesítve:

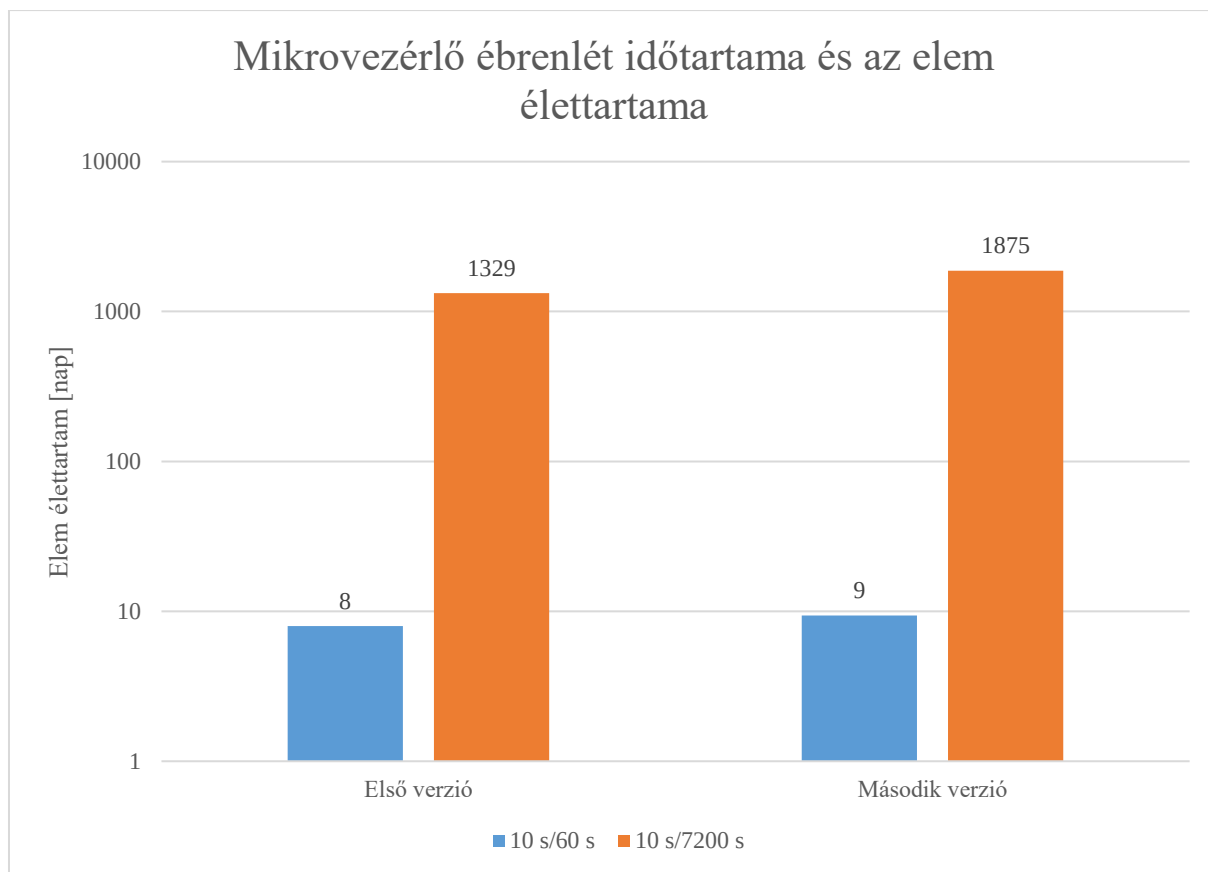
$$I_{\text{avg}} = (0,999 * 0,000000035 \text{ A}) + (0,001 * 0,005 \text{ A}) \approx 0,000005 \text{ A} = 5 \mu\text{A}. \quad (6.7)$$

Itt azonban a D-tároló fogyasztását behelyettesítve 15 μA -es átlagfogyasztást kapunk, ami ebben az esetben nem elhanyagolható. Tovább számolva a működési idő:

$$\text{Működési idő (óra)} = \frac{225 \text{ mAh}}{5 \mu\text{A}} = 45\,000 \text{ óra}. \quad (6.8)$$

Az így kapott eredmény 45 000 óra, ami átváltva 1875 nap. Ha tehát a második verziót két óránként ébresztjük fel, több mint 5 évig üzemel egy gombelemről, ami már ideális egy elosztott

szenzorhálózat esetén. Ha D-tároló is szerepel az egységben, az jelentősen csökkenti az élettartamot, azzal számolva 15 000 órát kapunk eredményül, ami kicsit több mint másfél év. Ennél a típusnál tehát ajánlott a D-tároló nélküli, azaz I²C-vel működő szenzorokat használni a magasabb élettartam érdekében. Az alábbi grafikonon látható az elemek becsült élettartamai logaritmikus skálán:



26. ábra: Elemek becsült élettartama.

Az elemek élettartamának becslésekor figyelembe kell venni a „shelf life” (polcon tartható élettartam) fogalmát, amely azt jelzi, hogy az elem mennyi ideig használható a gyártástól számítva. Általánosan elfogadott, hogy az alkáli elemek 5-7 évig, míg a lítium elemek akár 10 évig is eltarthatóak, mielőtt jelentős teljesítményvesztést szenvednének [22]. Továbbá figyelembe kell vennünk az önkisülés jelenségét is, azonban ebben a dolgozatban nem térek ki rá részletesen. A CR2032 elem önkisülésének mértéke 1% évente, egy AA típusú alkáli elemé pedig 5% évente [23, 24].

Ezek alapján, ha az egységeket kétóránként aktiváljuk, az első prototípus (amely négy darab AA alkáli elemmel üzemel) akár 3 évig működhetne egyetlen elemcserével. Ezzel szemben a

második, energiahatékonyabb prototípus, amely egy darab CR2032 gombellel van ellátva, becslések szerint akár 5 évig üzemelne.

6.2. Hatótávolság

Az első prototípus hatótávolságát kültéren és beltéren egyaránt megvizsgáltam. A mérést úgy végeztem, hogy fokozatosan távolodtam az elosztott egységgel a központi egységtől. Azt a pontot, ahol a központi egység utoljára érzékelte a kapcsolatot, a Zeopoxa Running telefonos applikációval mértem le. Kültéren, ahol a jelet nem árnyékolják épületek vagy falak, a szerver és a kliens közötti kommunikáció stabil maradt körülbelül 130 méterig. Beltéri környezetben, ahol a jelnek több falon és egy emeleten is át kellett haladnia, a hatótávolság jelentősen csökkent, becslés szerint nagyjából 30 méterre. Ez az eredmény rávilágít arra, hogy a jelek terjedését beltéren erősen befolyásolják a fizikai akadályok, mint a falak és az épület szerkezeti elemei, ami jelentős hatótávolság-csökkenést eredményez.

A második prototípus esetében a hatótávolság mérésére még nem került sor. Az antenna még további finomhangolást igényel, mert nem észlelte a vevőegység a modult.

6.3. Összehasonlítás

Az ESP32-WROOM-32 és az STM32WB55CGU7 alapú prototípusokat összehasonlítva több szempont alapján értékelhetők, mint például az elem élettartama, fogyasztás, hatótávolság, méret és költség. A 8. táblázat összefoglalja a prototípusok tulajdonságait különböző szempontok alapján:

Táblázat 8: A két prototípus összehasonlítása.

	ESP32-WROOM-32	STM32WB55CGU7
Elem becsült élettartama [év]	3	5
Elem mennyisége és típusa	4 db AA alkáli elem	1 db CR2032 gombelem
Hatótávolság [m]	Kültéren 130 Beltéren kb. 30	-
Fogyasztás aktív módban[mA]	90	6,2

Méret	kicsit nagy	kompakt
Költség	kb. 20 €	kb. 10 €

Az elem élettartamát tekintve, az ESP32 prototípus akár 3 évig képes működni négy darab AA alkáli elemről, míg az STM32WB55 alapú megoldás becslések szerint körülbelül 5 évig üzemelne egy CR2032 gombelemről. Ezek alapján tehát az STM32 prototípus előnyösebb választás lehet. A gombelem kompaktabb és kevesebb helyet is foglal, mint az alkáli elemek.

A hatótávolság tekintetében az ESP32 prototípus kültéren körülbelül 130 métert ért el, míg beltéren, falakon keresztül, ez a távolság nagyjából 30 méterre csökkent. Az STM32 prototípus hatótávolságának mérésére még további tesztek szükségesek, de a kültéri/beltéri teljesítményéről egyelőre nincs adat. Ennek fényében az ESP32-es megoldás jelenleg erősebb eredményeket mutat a hatótávolság terén.

Fogyasztás szempontjából az STM32WB55CGU7 prototípus jelentősen jobb eredményeket mutat, mindössze 6,2 mA-es fogyasztással ébrenléti állapotban, míg az ESP32 verzió 90 mA-t igényel. Ez az eltérés az STM32-t energiahatékonyabb választássá teszi azokban az alkalmazásokban, ahol az alacsony fogyasztás kritikus.

Az első prototípus mérete kicsit nagyobb lett, mint a második. A második prototípus körülbelül fele annyiba kerül, mint az első, ezért költségekben és méretben a második prototípus a nyerő.

7. Alkalmazási lehetőségek

A projekt során fejlesztett alacsony fogyasztású, moduláris szenzoros rendszer számos alkalmazási területen alkalmazható, különösen olyan környezetekben, ahol az energiatakarékosság és a vezeték nélküli kommunikáció fontos szempont. Íme néhány alkalmazási lehetőség:

- Adatok gyűjtése, elemzése

A szenzorhálózatokkal rengeteg adatot kaphatunk, ami számtalan lehetőséget von maga után. Például, ha hőmérsékletet és páratartalmat mérünk, és az adatokat később elemezzük, akkor lehet következtetni arra, hogy mikor volt nyitva az ablak vagy mikor voltak bent többen egy helyiségben. Rezgés- és dőlésérzékelő esetén megfigyelve az adatokat következtethetünk arra, hogy milyen időközönként éri rezgés az egységet és a környezetét, vagy mikor dőlt el az egység, és ezt a meglévő időpontok alapján mi befolyásolhatta. Fényérzékelő esetén megfigyelhető, hogy egy helyiségben mikor kapcsolták fel a lámpákat. Ha egy hőmérséklet- és páratartalom érzékelőt is teszünk ebbe a helyiségbe, akkor azt is megnézhetjük, hogy mikor a lámpa fel volt kapcsolva, akkor volt-e valaki a helyiségben. Ha csökkent a hőmérséklet, de a lámpa még mindig ég, akkor akár vezérelni is lehet a rendszert, hogy kapcsolja le a lámpát, ezzel energiát takaríthatunk meg.

- Okosotthonok

Az okosotthonokban a vezeték nélküli szenzorok széles körben használhatók hőmérséklet, páratartalom, és egyéb környezeti tényezők megfigyelésére. Az alacsony fogyasztás lehetővé teszi, hogy hosszú élettartamú mérőegységeket használjunk az otthonunk különböző pontjain, minimalizálva a kábelezés szükségességét.

- Ipari környezet

Az ipari környezetekben, például raktárakban vagy gyárakban, fontos a folyamatos környezeti monitorozás, hogy biztosítsák a megfelelő hőmérsékletet, páratartalmat. Fontos lehet a rezgés- és dőlésérzékelő is a tartályok, palackok esetében. A szenzorhálózat képes hosszútávú adatgyűjtésre és riasztások küldésére anélkül, hogy nagy mennyiségű energiát fogyasztana. A moduláris kialakítás lehetővé teszi a rendszer egyszerű testreszabását és bővítését. A mérőegységeket elhelyezhetjük olyan helyekre, ami nehezen hozzáférhető, így megkönnyítve az adatok gyűjtését.

- Mezőgazdasági alkalmazások

Szántóföldi és üvegházi környezetekben is hasznos lehet a vezeték nélküli érzékelők használata, ahol nehézkes vagy költséges lenne a kábelezés kiépítése. A fejlesztett rendszer segítségével megfigyelhetjük a talaj hőmérsékletét és páratartalmát, illetve azokat a környezeti tényezőket, amelyek kritikusak a növények fejlődése szempontjából.

- Egészségügyi alkalmazások

Kórházi környezetekben, vagy akár idősok otthonában is alkalmazható a rendszer a környezet folyamatos monitorozására. A hőmérséklet- és páratartalom-szenzorok segíthetnek a betegszobák komfortjának biztosításában. A központi egységgel össze lehet kapcsolni a fűtésvezérlést, ezáltal a rendszer folyamatosan megfigyeli a környezetet, és szükség esetén szabályozza a fűtést, hogy a betegek mindig optimális hőmérsékleten tartózkodhassanak. Az ilyen típusú intelligens vezérlés növeli a komfortot és csökkenti az energiafogyasztást is, mivel a fűtés csak akkor működik, amikor valóban szükséges.

- Logisztikai és szállítási alkalmazások

A logisztikai szektorban a környezeti szenzorok felügyelhetik a szállítmányozás során fellépő hőmérséklet- és páratartalom-változásokat, különösen érzékeny áruk esetében, mint például élelmiszerek vagy gyógyszerek. A szenzorok segítségével a fuvarozók azonnal értesítést kaphatnak, ha a szállítmány környezeti paraméterei kritikus szintre csökkennek.

Az elosztott szenzorhálózatokkal sok adatot kaphatunk, amivel bármit kezdhethetünk, csak a képzeletünk szab határt.

8. Összefoglalás

A projekt célja egy alacsony fogyasztású, vezeték nélküli szenzorhálózat fejlesztése volt, amely különböző környezeti paramétereket, például hőmérsékletet és páratartalmat képes mérni. A rendszer alapja egy mikrovezérlő, amely a szenzorok adatait feldolgozza és Bluetooth Low Energy technológiával továbbítja. A projekt során három különböző mikrovezérlőt teszteltem, és a tapasztalatok alapján az ESP32-WROOM-32 mikrovezérlő panelt és az STM32WB55 mikrovezérlőt választottam végleges megoldásként.

A kezdeti lépéseknél az ESP32-WROOM-32 mikrovezérlővel dolgoztam, amelynek kissé nagy volt a fogyasztása, ezért kipróbáltam a Texas Instruments CC2340R5 mikrovezérlőt, amely ígéretesen alacsony fogyasztással rendelkezik. A rendelkezésre álló gyártói dokumentáció azonban nem volt elég részletes számomra, emiatt a fejlesztés nem haladt a kívánt ütemben. Végül az STM32WB55 mikrovezérlőt is kipróbáltam, amely szintén alacsony fogyasztást biztosít, és korábbi tapasztalataim révén hatékonyabban tudtam vele dolgozni.

A projektben kulcsfontosságú szerepet játszott az alacsony fogyasztás. Ennek érdekében olyan komponenseket választottam, mint a TPL5110 timer IC, amely mindössze 35 nA fogyasztással rendelkezik, és időszakosan kapcsolja be a mikrovezérlőt és egyéb perifériákat. Az érzékelők között használtam hőmérséklet- és páratartalommérő szenzorokat, dőlés- és rezgésérzékelőt, hőmérsékletkapcsolót és környezeti fényérzékelőt. Valamely szenzorok kommunikációja I²C protokollon keresztül történik, így külön adapterpaneleket terveztem hozzájuk, hogy könnyedén cserélhetőek legyenek, szükség esetén minimális szoftveres változtatással.

A projekt során két prototípus is készült, az első az ESP32-WROOM-32 mikrovezérlő panelhez, a második pedig az STM32WB55CGU7 mikrovezérlőhöz. A PCB-k tervezésénél az alacsony fogyasztás és a moduláris bővíthetőség voltak a legfontosabb szempontok. Az első prototípus kicsit nagy lett, és a fogyasztása sem volt a legjobb, ezért a második prototípusnál nagy hangsúlyt fektettem ezek javítására, ami sikerült is.

Összefoglalva, a projekt során sikerült egy alacsony fogyasztással rendelkező, moduláris vezeték nélküli szenzorhálózatot fejleszteni, amely különböző környezeti paraméterek mérésére alkalmas.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek: Dr. Medvegy Tibornak, aki végig segített és irányt mutatott a dolgozatom elkészítése során. Szakértelme, tanácsai és támogatása nélkül nem sikerült volna ilyen eredményesen lezárni a projektet.

Emellett külön köszönet illeti Kocsor Pétert, a Balluff-Elektronika Kft. kiváló szakemberét, aki rengeteg időt és energiát szentelt a munkám támogatására. Péter szakmai tudása, iránymutatása és gyakorlati tanácsai nélkülözhetetlenek voltak a dolgozat megvalósításához.

Szeretnék köszönetet mondani továbbá azoknak a kollégáknak is, akik bármiféle segítséget nyújtottak a dolgozat elkészítésében. Az ő szakmai tanácsaik, visszajelzéseik és együttműködésük is nagyban hozzájárultak a projekt sikeres befejezéséhez.

Hivatkozások

- [1] F. Xia, L. T. Yang, L. Wang, és A. Vinel, „Internet of Things”, *Int. J. Commun. Syst.*, köt. 25, sz. 9, o. 1101–1102, szept. 2012, doi: 10.1002/dac.2417.
- [2] L. D. Xu, W. He, és S. Li, „Internet of Things in Industries: A Survey”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, köt. 10, sz. 4, o. 2233–2243, nov. 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2300753.
- [3] „Wireless or Wired Sensors?”, Wireless or Wired Sensors? Elérés: 2024. augusztus 12. [Online]. Elérhető: <https://www.zensor.be/blog/wireless-or-wired>
- [4] A. Siemuri, T. Glocker, M. Mekkanen, K. Kauhaniemi, T. Mantere, és M. Elmusrati, „Design and implementation of a wireless CAN module for marine engines using ZigBee protocol”, *IET Commun.*, köt. 17, sz. 13, o. 1541–1552, 2023, doi: 10.1049/cmu2.12640.
- [5] Bluetooth SIG, „Understanding Bluetooth Range”, Bluetooth® Technology Website. Elérés: 2024. augusztus 12. [Online]. Elérhető: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/range/>
- [6] M. Afaneh, *INTRO TO BLUETOOTH LOW ENERGY*, 2018. kiad. Novel Bits, LLC.
- [7] Bluetooth SIG, „Bluetooth Technology Overview”, Bluetooth® Technology Website. Elérés: 2024. szeptember 3. [Online]. Elérhető: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>
- [8] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino, és D. Formica, „Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review”, *Sensors*, köt. 17, sz. 12, Art. sz. 12, dec. 2017, doi: 10.3390/s17122898.
- [9] Jouni Lifländer, „Ceramic Chip Antennas vs. PCB Trace Antennas: A Comparison”, 2010.
- [10] „CC2340R Microcontroller Datasheet”. Elérés: 2024. augusztus 29. [Online]. Elérhető: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2340r5.pdf?ts=1724852923837&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FCC2340R5
- [11] „STM32WB55 Microcontroller Datasheet”. Elérés: 2024. szeptember 20. [Online]. Elérhető: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wb55rg.pdf>
- [12] C. Yang, „Natural Timers for IoT”, máj. 2024.

[13] „TPL5110 Timer Datasheet”. Elérés: 2024. augusztus 13. [Online]. Elérhető: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpl5110.pdf?ts=1723490222172&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[14] „HDC1080 Humidity Sensor with Temperature Sensor Datasheet”. Elérés: 2024. október 23. [Online]. Elérhető: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/hdc1080.pdf?ts=1729663529457&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

[15] „HDC3022 data sheet, product information and support”. Elérés: 2024. október 23. [Online]. Elérhető: <https://www.ti.com/product/HDC3022>

[16] „S-5844A Temperature Switch IC Datasheet”. Elérés: 2024. augusztus 13. [Online]. Elérhető: https://hu.mouser.com/datasheet/2/1490/S5844A_E-3430902.pdf

[17] „TCSW200D Ball Type Tilt Sensitive Trigger Switch Datasheet”. Elérés: 2024. augusztus 13. [Online]. Elérhető: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001606624DS01/adatlap-1606624-tru-components-doles-erzekelo-tc-sw-200d-meresi-tartomany-180-max-forraszthato-tueske.pdf>

[18] „TCSW18015P Spring Type Vibration Switch Datasheet”. Elérés: 2024. augusztus 13. [Online]. Elérhető: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001606633DS01/adatlap-1606633-tru-components-razkodas-erzekelo-tc-sw-18015p-meresi-tartomany-360-max-forraszthato-tueske.pdf>

[19] „OPT3001 Ambient Light Sensor Datasheet”. Elérés: 2024. október 18. [Online]. Elérhető: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt3001.pdf?ts=1729171984049&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPT3001

[20] S. Preto és C. C. Gomes, „Lighting in the Workplace: Recommended Illuminance (lux) at Workplace Environs”, in *Advances in Design for Inclusion*, köt. 776, G. Di Bucchianico, Szerk., in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 776. , Cham: Springer International Publishing, 2019, o. 180–191. doi: 10.1007/978-3-319-94622-1_18.

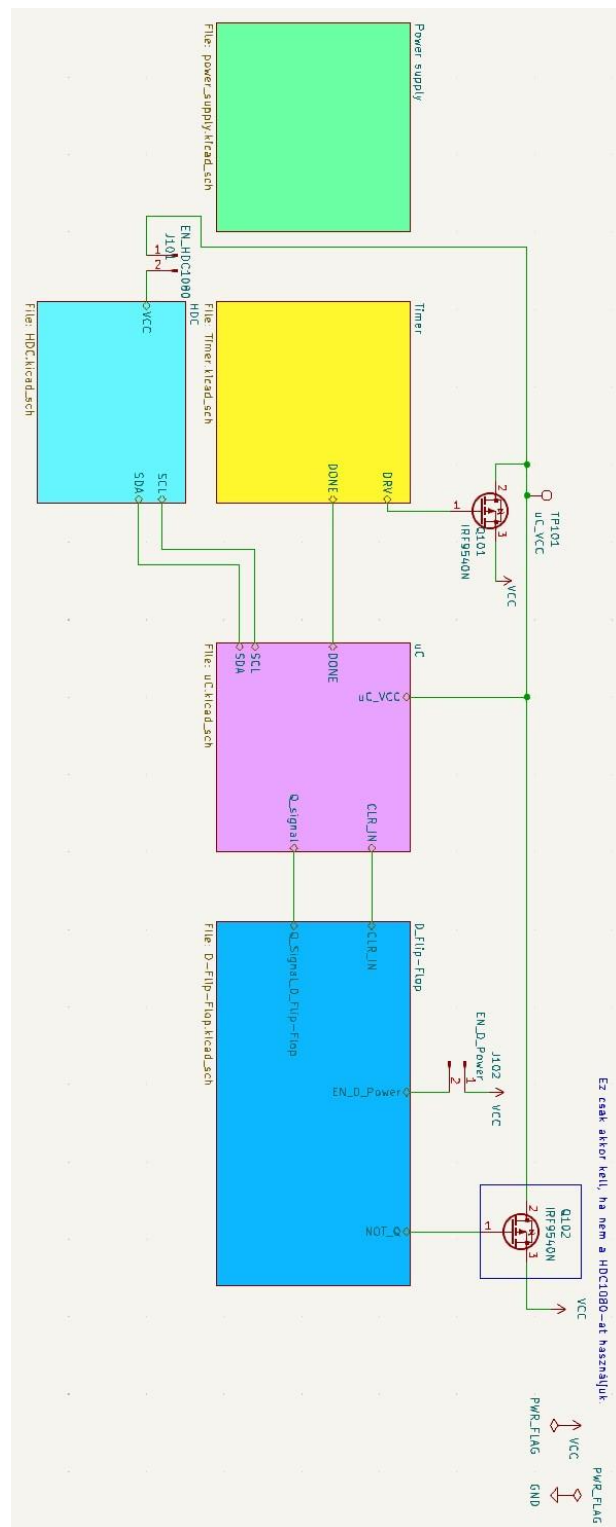
[21] Isidor Buchmann, „BU-106: Advantages of Primary Batteries”, Battery University. Elérés: 2024. szeptember 27. [Online]. Elérhető: <https://batteryuniversity.com/article/bu-106-advantages-of-primary-batteries>

[22] Master Instruments Pty Ltd, „Battery Shelf Life & Shortage”. Elérés: 2024. október 11. [Online]. Elérhető: <https://www.master-instruments.com.au/pages/battery-shelf-life-storage.html>

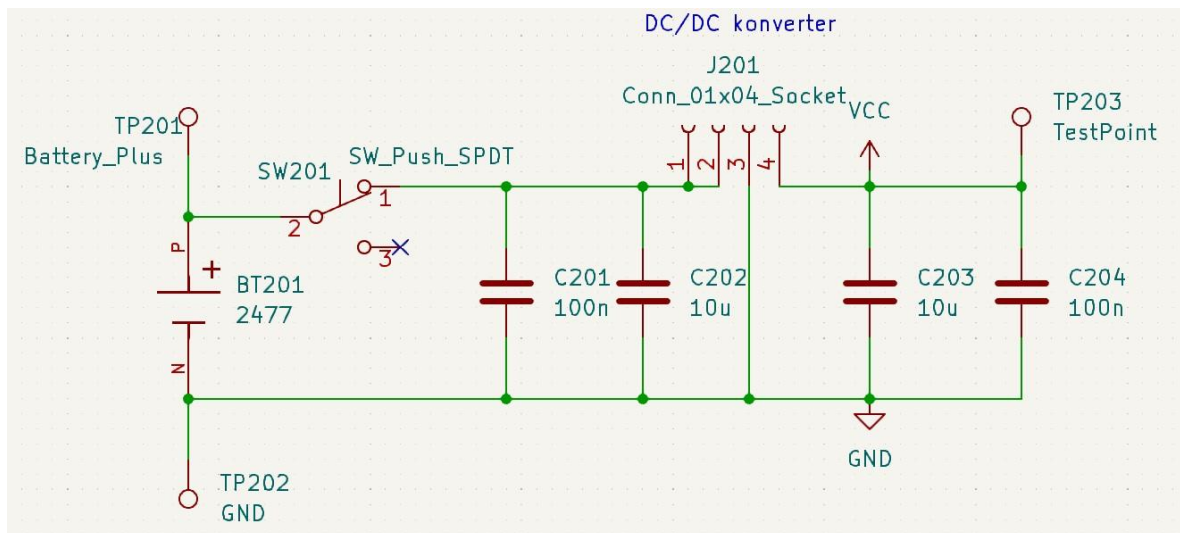
[23] S. Jacobs, „Understanding battery self-discharge”, 2001.

[24] „CR2032 Battery Datasheet”. Elérés: 2024. október 30. [Online]. Elérhető: <https://data.energizer.com/pdfs/cr2032.pdf>

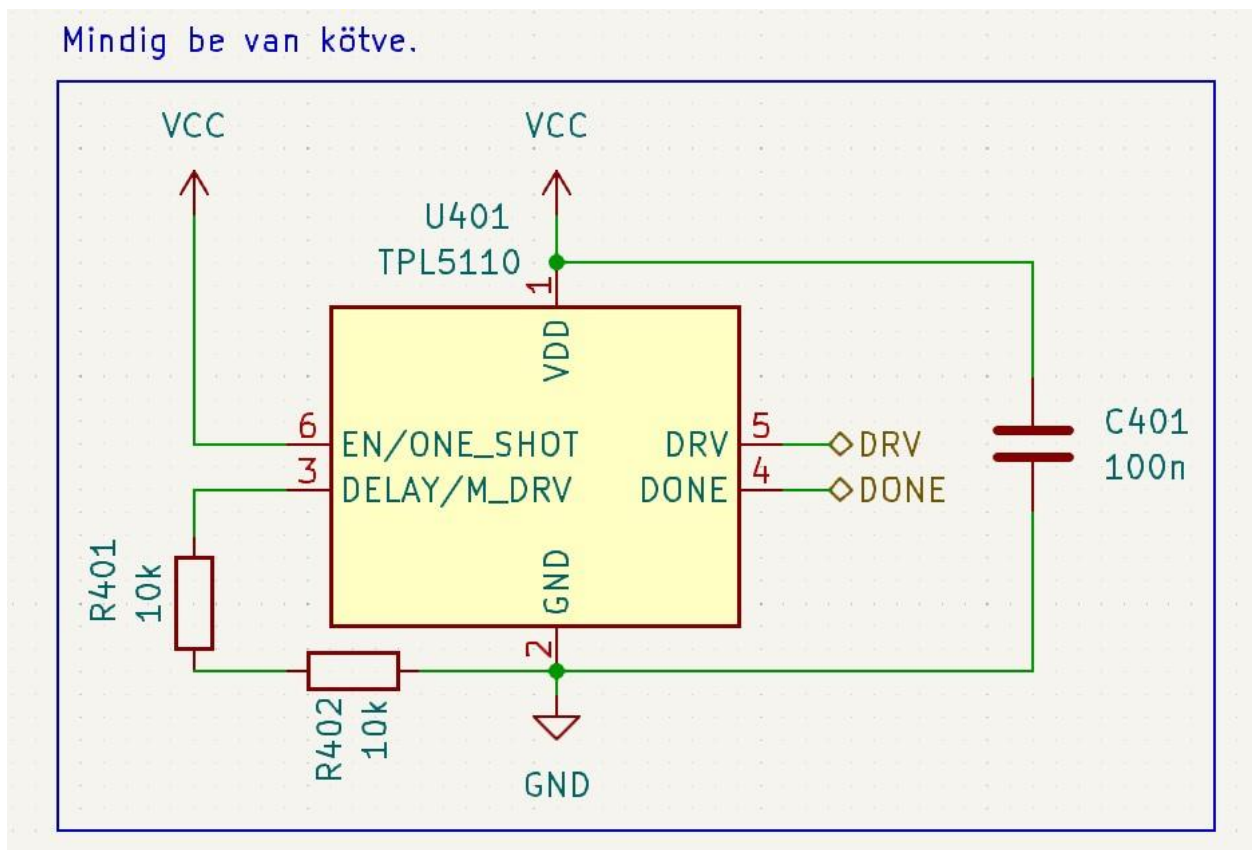
Függelék



F.27. ábra: Az első prototípus kapcsolási rajza I.

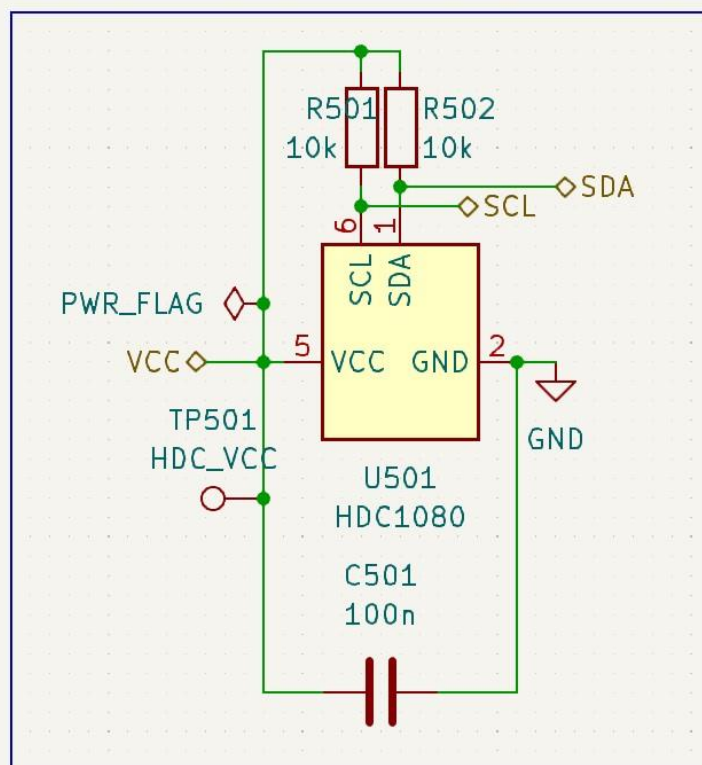


F.28. ábra: Az első prototípus kapcsolási rajza II. (Power supply hierarchikus lap)

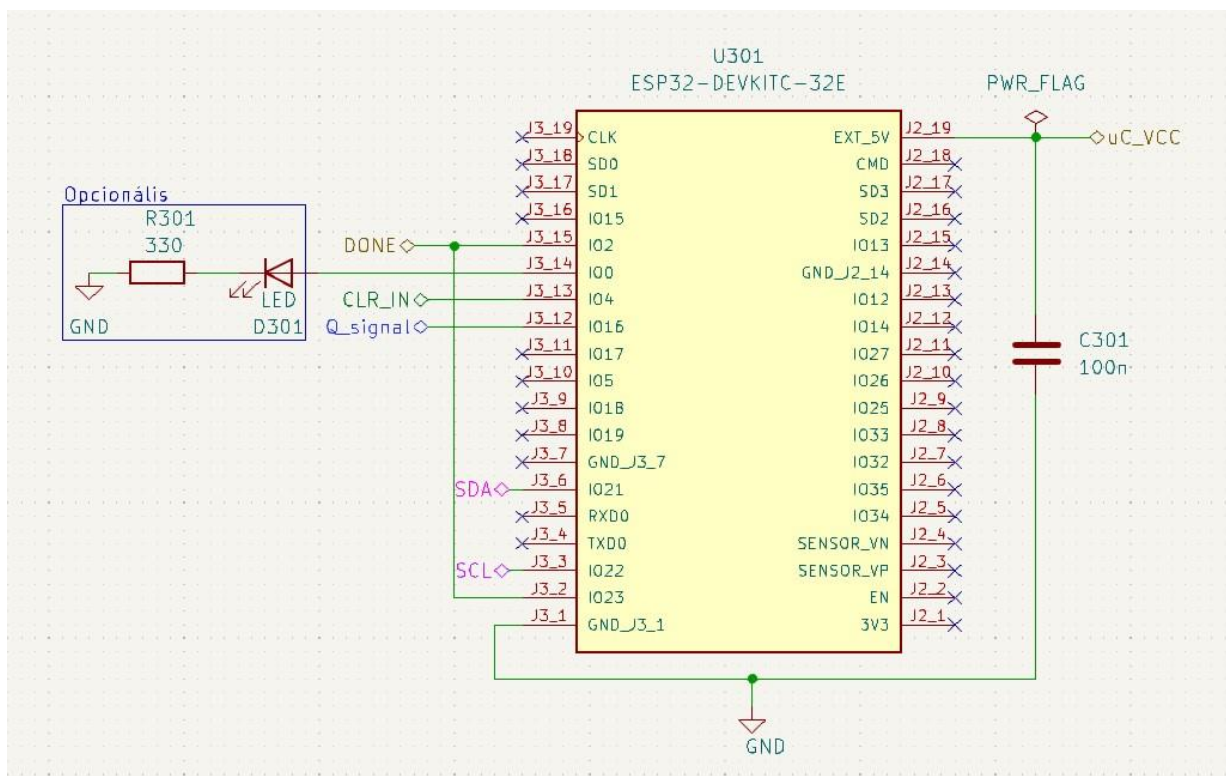


F.29. ábra: Az első prototípus kapcsolási rajza III. (Timer hierarchikus lap)

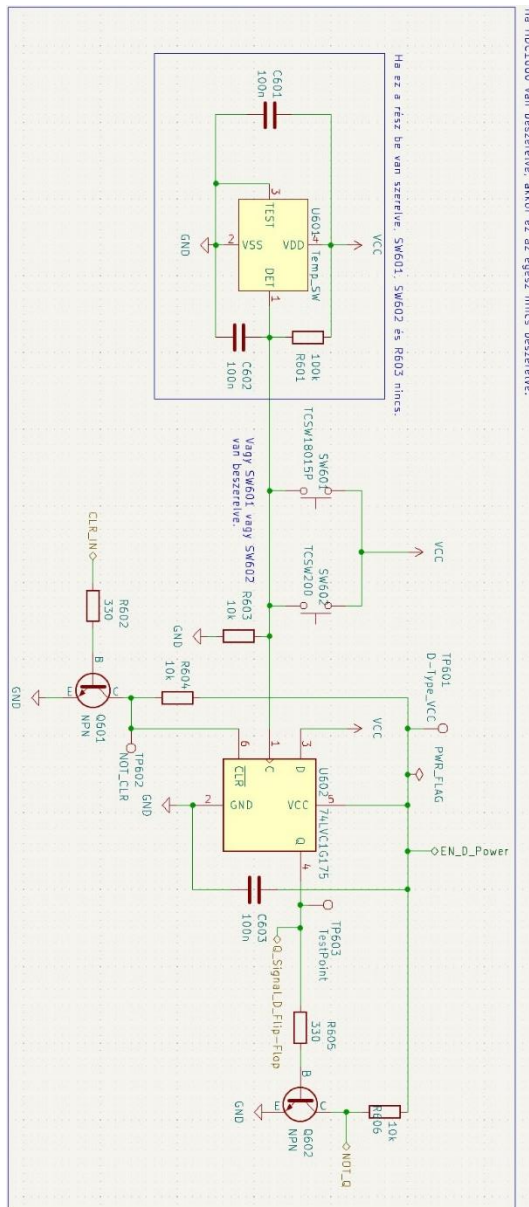
Ez csak akkor van bekötve, ha HDC1080-nal szeretnénk mérni.



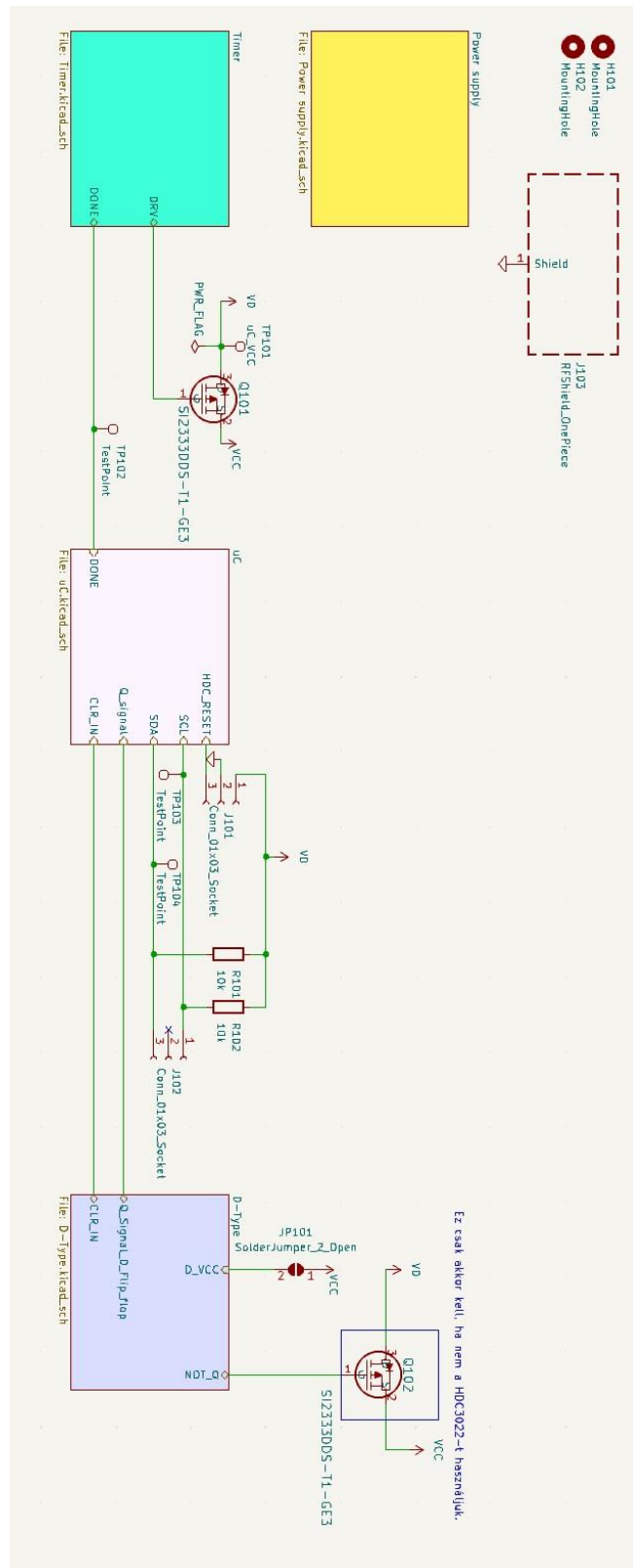
F.30. ábra: Az első prototípus kapcsolási rajza IV. (HDC hierarchikus lap)



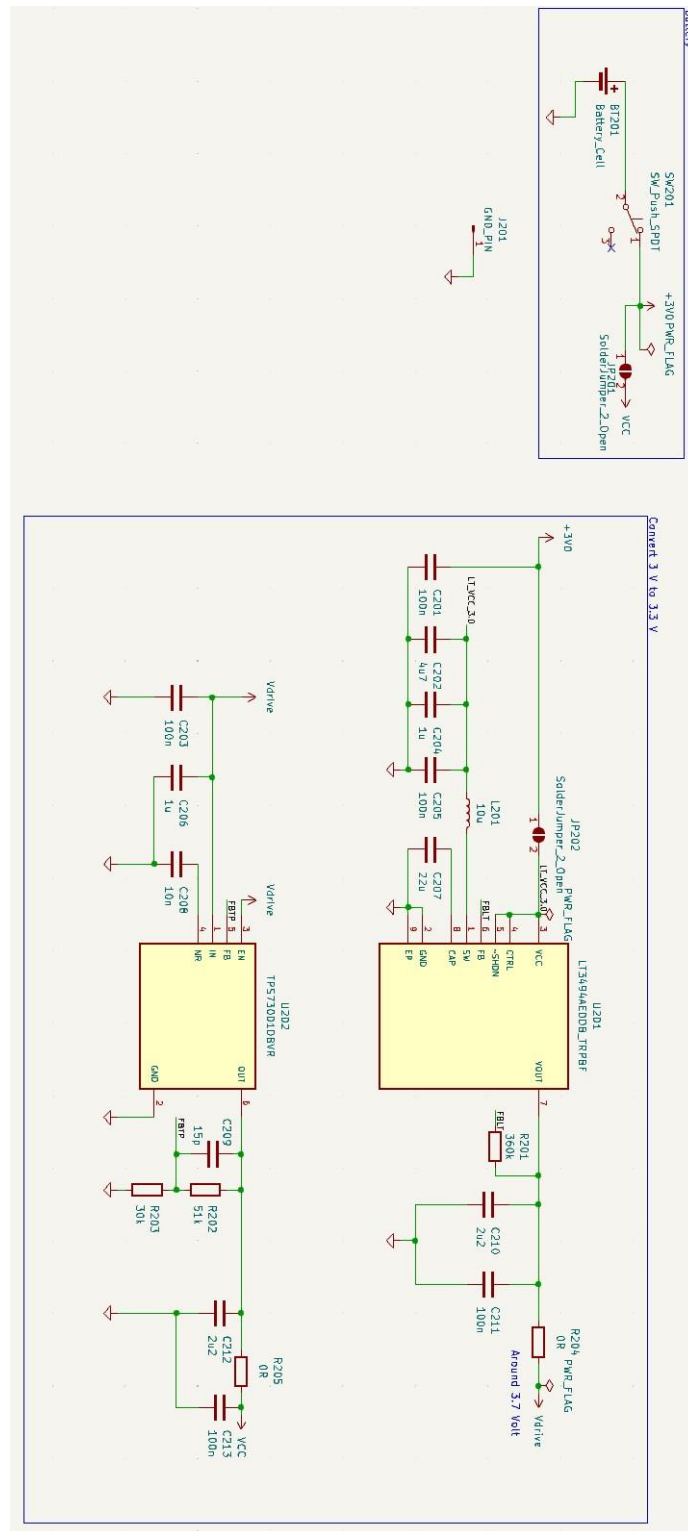
F.31. ábra: Az első prototípus kapcsolási rajza V. (uC hierarchikus lap)



F.32. ábra: Az első prototípus kapcsolási rajza VI. (D_Flip-Flop hierarchikus lap)

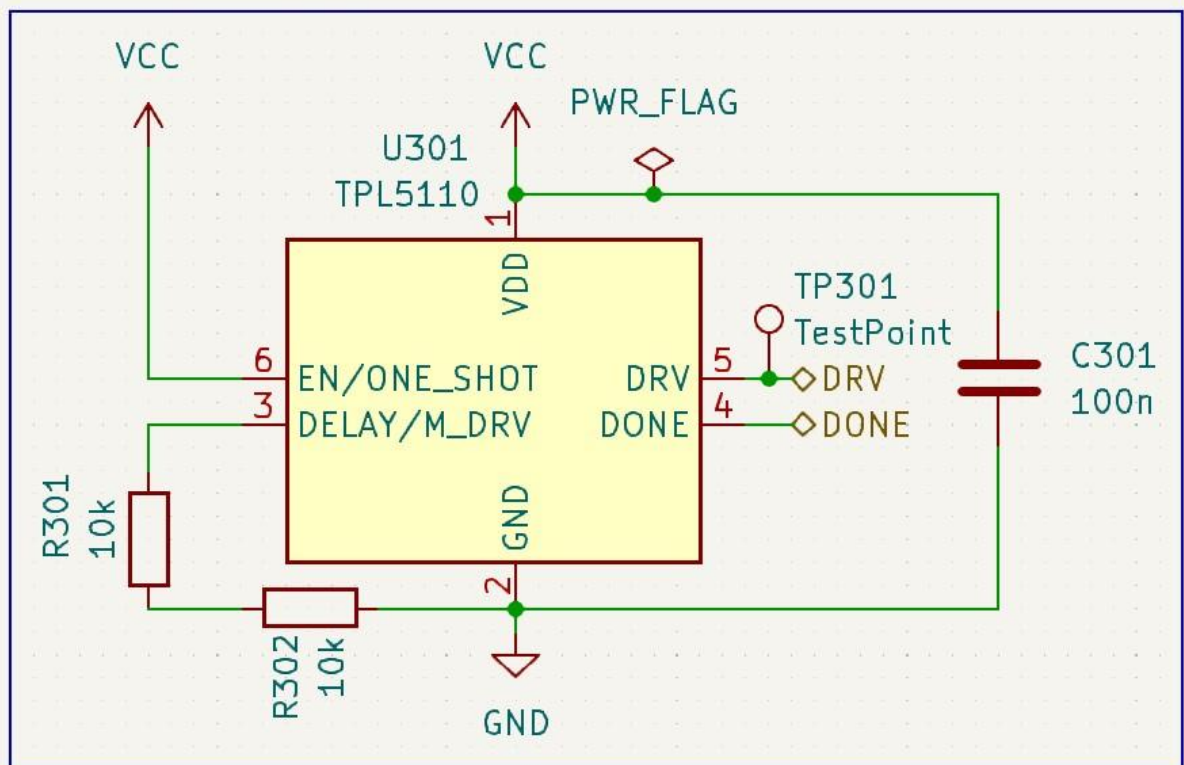


F.33. ábra: A második prototípus kapcsolási rajza I.



F.34. ábra: A második prototípus kapcsolási rajza II. (Power supply hierarchikus lap)

Mindig be van kötve.



F.35. ábra: A második prototípus kapcsolási rajza III. (Timer hierarchikus lap)

