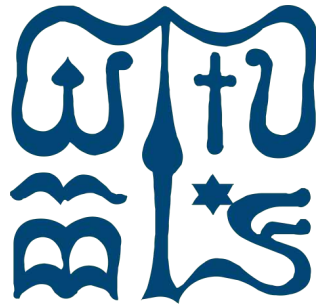


Wesley János Lelkészképző Főiskola
Környezetbiztonsági Tanszék
Környezettan Szak



**Környezeti paraméterek mérése a tudomány és
technológia fejlődésének tükrében**

—

**Egy skálázható szenzorhálózat
megvalósításának tanulságai**

szakdolgozat

Témavezető:
Stróbel Lilla Sarolta

Készítette: Vámos Péter
DV92WM

2026

Abstract

This thesis examines the development and current practical application of environmental parameter measurement, focusing primarily on air temperature, relative humidity, and air pressure. The literature review presents early forms of observation, the main stages in the evolution of measuring instruments, and the key issues of measurement accuracy, calibration, standardization, and data quality. The practical part introduces the design and implementation of a self-developed, low-cost, scalable sensor network. The system is based on wireless ESP32 endpoints, BME280 and SHT40 sensors, and a Kubernetes-based cloud architecture for data ingestion, storage, and visualization. The measurement campaign, carried out at two locations with a total of 13 endpoints, produced more than 2.7 million records. The results confirmed that the system operated reliably and was suitable for comparing sensors, detecting differences between rooms, and identifying short-term microclimatic changes related to residential ventilation, cooking, bathing, and similar everyday events.

Keywords: environmental parameters, microclimate, temperature, relative humidity, air pressure, MEMS sensors, IoT, sensor network, data quality

Összefoglaló

A szakdolgozat a környezeti paraméterek mérésének fejlődését és mai gyakorlati alkalmazását vizsgálja, elsősorban a levegő hőmérsékletére, relatív páratartalmára és légnyomására összpontosítva. Az irodalmi áttekintés bemutatja a megfigyelés korai formáit, a mérőműszerek fejlődésének főbb állomásait, valamint a mérési pontosság, a kalibráció, a standardizálás és az adatminőség alapvető kérdéseit. A dolgozat gyakorlati része egy saját fejlesztésű, alacsony költségű és skálázható szenzorhálózat tervezését és megvalósítását ismerteti. A rendszer vezeték nélküli ESP32 végpontokra, BME280 és SHT40 érzékelőkre, valamint Kubernetes-alapú felhőoldali adatfogadásra, adattárolásra és vizualizációra épül. A két helyszínen, összesen 13 végponttal végzett mérési kampány több mint 2,7 millió rekordot eredményezett. Az eredmények igazolták, hogy a rendszer stabilan működik, és alkalmas a helyiségek közötti különbségek, a szenzorok összevetésére, valamint a lakótéri szellőztetéshez, főzéshez és fürdéshez kapcsolódó rövid idejű mikroklíma-változások kimutatására.

Kulcsszavak: környezeti paraméterek, mikroklíma, hőmérséklet, relatív páratartalom, légnyomás, MEMS-szenzorok, IoT, szenzorhálózat, adatminőség

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, témaválasztás és célkitűzés.....	9
1.1 Bevezetés.....	9
1.2 A témaválasztás szempontjai.....	9
1.3 A dolgozat célkitűzése.....	10
2. A környezeti paraméterek és mérésük fejlődése.....	11
2.1 A környezeti paraméter fogalma és fő csoportjai.....	11
2.2 A megfigyeléstől a tudományos mérésig.....	12
2.3 A hőmérséklet-, páratartalom- és légnyomásmérés tudománytörténete.....	13
2.3.1 A hőmérsékletmérés korai előzményei: thermoszópok.....	13
2.3.2 A zárt folyadék-hőmérők megjelenése.....	14
2.3.3 A hőmérsékleti skálák egységesedése és a hő fogalmának megjelenése.....	14
2.3.4 Vákuum, bányaszivattyúk és a légnyomás fogalmának kialakulása.....	15
2.3.5 A barométer mint meteorológiai eszköz.....	16
2.3.6 A páratartalom fogalmának tisztázása és a páramérés kialakulása.....	16
2.3.7 A három alapváltozó és a rendszeres meteorológiai megfigyelések.....	17
2.4 A mérőeszközök fejlődése.....	17
2.4.1 Hőmérsékletmérés.....	17
2.4.2 Légnyomásmérés.....	18
2.4.3 Páratartalom mérés.....	19
2.4.4 MEMS szenzorok.....	20
2.5 Mérési pontosság, hibák, kalibráció és megbízhatóság.....	20
2.5.1 A kalibráció és a nyomonkövethetőség jelentősége.....	21
2.5.2 A megbízhatóság növelése.....	21
2.6 A választott paraméterek környezettudományi jelentősége.....	22
2.7 A levegő hőmérséklete.....	22
2.8 A relatív páratartalom.....	23
2.9 A légnyomás.....	24
2.10 A három paraméter együttes értelmezése.....	24
3. Környezeti monitoring rendszerek és gyakorlati alkalmazásaik.....	25
3.1 Környezeti monitoring az iparban és az épített környezetben.....	26
3.2 Meteorológiai és repülésmeteorológiai állomások, standardizálás.....	27
3.2.1 A meteorológiai megfigyelőhely mint szabványosított rendszer.....	27
3.2.2 A hálózati szemlélet kialakulása és történeti előzményei.....	28
3.2.3 A jelenleg használatban lévő operatív meteorológiai hálózatok.....	29
3.2.4 Az emberi és az automatikus észlelés viszonya.....	30
3.2.5 Repülésmeteorológiai hálózatok és termékek.....	30
4. Környezeti modellek és numerikus időjárás-előrejelzés adatoldali igényei.....	31
4.1.1 Az adatasszimiláció szerepe.....	31
4.1.2 Regionális és globális modellek, klíma és re-analízis.....	31
4.2 Az IoT-alapú és közösségi monitoring lehetőségei.....	32
4.2.1 Korlátok, adatminőség és a saját rendszer helye.....	33
5. A megvalósított szenzorhálózat bemutatása.....	34
5.1 A rendszertervezés céljai és szempontjai.....	34
5.1.1 A rendszertervezés alapvető célja.....	34
5.1.2 Költséghatékonyság és reprodukálhatóság.....	34
5.1.3 Alacsony energiaigény és autonóm működés.....	35
5.1.4 Megbízhatóság és adatminőségi szempontok.....	35
5.1.5 Skálázhatóság és hálózati szemlélet.....	35

5.2 A választott paraméterek és szenzorok.....	35
5.2.1 A mért paraméterek kiválasztásának szempontjai.....	35
5.2.2 A BME280 és az SHT40 együttes alkalmazása.....	36
5.2.3 Kiegészítő állapotjellemzők: Wi-Fi jelerősség és chiphőmérséklet.....	36
5.3 A BME280 és az SHT40 szenzorok a rendszerben.....	36
5.3.1 A BME280 szenzor.....	36
5.3.2 Az SHT40 szenzor.....	37
5.4 A mérőegység hardverfelépítése.....	37
5.4.1 Az ESP32-C3 SuperMini fejlesztőpanel és az ESP32-C3 chip.....	37
5.4.2 Az I ² C busz és a szenzorok bekötése.....	37
5.5 A szoftver és az adatkommunikáció működési logikája.....	38
5.5.1 A firmware fejlesztési környezete és szerkezete.....	38
5.5.2 A mérési ciklus általános logikája.....	38
5.5.3 Wi-Fi-kezelés és a gyors újracsatlakozás logikája.....	38
5.5.4 A szenzoradatok kiolvasása és előfeldolgozása.....	39
5.5.5 Protobuf adatszerkezet és MQTT-küldés.....	39
5.5.6 Hibakezelés, visszaállás és energiatakarékos működés.....	40
5.6 A felhőoldali adatfogadás, adattárolás és vizualizáció áttekintése.....	40
5.6.1 A használt Kubernetes platform.....	40
5.6.2 A felhőoldali architektúra telepítési szemlélete.....	41
Fig. 17. a használt Kubernetes erőforrások.....	42
5.6.3 Külső MQTT belépési réteg: HAProxy, TLS és a kliens-IP megőrzése.....	42
5.6.4 A VerneMQ broker réteg és az üzenetek előfeldolgozása.....	43
5.6.5 Kafka és Kafka Connect.....	44
5.6.5.1 Kafka Connect elosztott üzemmódban.....	45
5.6.5.2 A saját Kafka Connect image és az egyedi SMT szerepe.....	46
5.6.6 ClickHouse alapú adattárolás és lekérdezés.....	46
5.6.6.1 Az online ingest útvonal.....	46
5.6.6.2 A párhuzamos adattavi ág és a mentések.....	47
5.6.7 Vizualizáció Grafanával.....	48
5.7 A mérési kampány és a vizsgálati elrendezés.....	48
6. Eredmények és értelmezésük.....	49
6.1 A rendszer működőképességének igazolása.....	49
6.2 A szenzorok mérési eredményeinek összevetése.....	49
6.2.1 Bosch BME280 és Sensirion SHT40 hőmérséklet szenzorok.....	50
6.2.2 Az ESP32 mikrokontrollerbe épített hőmérő.....	51
6.2.3 Páratartalom.....	52
6.3 Rövid idősoros esettanulmányok.....	53
6.3.1 Angyalföld, erkély.....	53
6.3.2 Konyha.....	54
6.3.3 Fürdőszoba.....	54
7. Összegzés, következtetések és kitekintés.....	55
7.1 A fő megállapítások összefoglalása.....	55
7.2 A megvalósított szenzorhálózat tanulságai.....	55
7.3 Gyakorlati hasznosítási lehetőségek.....	56
7.4 Továbbfejlesztési irányok.....	56
8. Hivatkozások.....	57
9. Az illusztrációk forrásai.....	63
10. Felhasznált irodalom.....	65
11. Nyilatkozatok.....	71

Mottó

„A fizikai tudományokban bármely tárgy megismerése felé vezető első lényeges lépés az, hogy megtaláljuk a számszerű értelmezés elveit és az ahhoz kapcsolódó valamely tulajdonság mérésére alkalmas, a gyakorlatban is használható módszereket. Gyakran mondom: ha meg tudod mérni azt, amiről beszélsz, és számokban ki tudod fejezni, akkor már tudsz róla valamit; ha azonban nem tudod megmérni, ha nem tudod számokban kifejezni, akkor a tudásod róla szegényes és nem kielégítő : ez lehet a tudás kezdete, de gondolataidban alig jutottál el a tudomány szintjére, bármi legyen is a tárgy.”¹

„In physical science a first essential step in the direction of learning any subject is to find principles of numerical reckoning and practicable methods for measuring some quality connected with it. I often say that when you can measure what you are speaking about and express it in numbers you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind : it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be.”

Lord William Thomson Kelvin előadásának kezdete,
Institution of Civil Engineers,
London, 1883 május 3. [1]

1 saját magyar fordítás

1. Bevezetés, témaválasztás és célkitűzés

1.1 Bevezetés

A környezeti paraméterek vizsgálata az emberi észlelés és a tudományos megismerés alapvető területe. A hőmérséklet és a légnedvesség értelmezése évszázadok óta fontos a mezőgazdaságban, az életfeltételek értékeléséhez és később a műszaki rendszerek szabályozásához is. A közvetlen környezet állapotának pontosabb megértése, a mikroklíma vizsgálata, és vele együtt az energiahatékonyság mostanra mind nagyobb szerepet kap a mindennapi életben.

A mérési lehetőségeket alapvetően átalakította a mikroelektronika, a digitális szenzorok, a vezetékes és vezeték nélküli adatátvitel, és az adatfeldolgozás gyors fejlődése. A klasszikus meteorológiai állomások ma is nélkülözhetetlenek a nagy pontosságú, standardizált és hosszú távon összehasonlítható adatszolgáltatásban. Ezzel párhuzamosan az alacsony költségű, hálózatra kötött szenzoros rendszerek új lehetőséget adnak a lokális, emberközeli környezet folyamatos megfigyelésére.

1.2 A témaválasztás szempontjai

A környezeti monitoring ma már túlmutat a hagyományos meteorológiai megfigyeléseken, a környezeti paraméterek mérése egyre fontosabb a lakókörnyezet, az épületüzemeltetés és a mezőgazdasági és ipari folyamatok felügyelete szempontjából is.

A lakókörnyezet mikroklímája, a hőmérséklet és a relatív páratartalom alakulása összefügg a komfortérzettel, a páralecsapódással, valamint közvetetten az egészségi és épületfizikai kockázatokkal is. Egy lakáson vagy épületen belül is jelentős eltérések alakulhatnak ki az egyes helyiségek között a tájolás, a szellőztetési szokások, a fűtés, a páratérhelés vagy az épületszerkezeti adottságok miatt. Ezért indokolt olyan mérési megoldások vizsgálata, amik több helyszínen és folyamatosan képesek adatot gyűjteni.

A környezeti adatok szerepe mezőgazdasági, ipari és műszaki környezetben is egyaránt növekszik. A gyártási folyamatok, a raktározás, az érzékeny berendezések üzembiztonsága vagy a munkaterek ellenőrzése gyakran igényli a hőmérsékleti és páráviszonyok folyamatos megfigyelését. A környezeti monitoring ilyen esetekben nemcsak leíró, hanem megelőző szerepet is betölthet.

1.3 A dolgozat célkitűzése

A dolgozat célja annak bemutatása, hogy a környezeti paraméterek mérése miként fejlődött a tapasztalati megfigyelésektől a tudományosan megalapozott, standardizált és műszeresen támogatott rendszerekig.

Emellett a dolgozat célja egy saját fejlesztésű, többpontos, skálázható szenzorhálózat bemutatása és értékelése. A hangsúly a mérési célok szempontjából fontos tervezési döntéseken van, nem az elektronikai és informatikai háttér leírásán (aminek egy része mellékletként szerepel).

A dolgozat azt is vizsgálja, hogy az alacsony költségű, korszerű szenzorokra és digitális adatgyűjtésre épülő rendszerek milyen feltételek mellett alkalmasak a környezet állapotának folyamatos követésére, a mért adatok környezettudományi értelmezésére.

A fő kérdések a következők:

- Milyen fejlődési út vezetett a környezeti paraméterek korszerű digitális méréshez?
- Miért tekinthető elsősorban a hőmérséklet és a relatív páratartalom, és mellettük a légnyomás a mikroklíma alapparamétereinek?
- Képes egy többpontos, olcsó szenzorhálózat megbízható és értelmezhető adatokat szolgáltatni?
- Mennyiben használhatóak ilyen mérések környezettudományi, környezetbiztonsági, mezőgazdasági vagy ipari szempontból értékelhető jelenségek vizsgálatához?

A dolgozat nem állítja, hogy az alacsony költségű szenzoros rendszerek kiválthatják a professzionális mérőhálózatokat. Azt kívánja bemutatni, hogy megfelelő tervezéssel és megvalósítással, a mérések kritikus értelmezésével ezek a rendszerek hasznos kiegészítő eszközök lehetnek a helyi környezeti állapotok tömeges nyomon követésére és vizsgálatára.

2. A környezeti paraméterek és mérésük fejlődése

A mottóban szereplő Kelvin idézetnek (is) megfelelően, a környezet állapotának leírása csak akkor válik tudományosan értelmezhetővé és összehasonlíthatóvá, ha a megfigyelt jelenségek számszerű formában, ismert módszerrel és ismert bizonytalanság mellett kerülnek rögzítésre. Ezt a szemléletet jól tükrözi a Meteorológiai Világszervezet „WMO-No. 8” számú, „*Guide to Instruments and Methods of Observation*” című ajánlása. [2] A „WMO-No. 8” ajánlás „*Measurement of Meteorological Variables*” című I. kötete szerint a meteorológiai megfigyelések nem csupán időjárás-előrejelzésre szolgálnak, hanem valós idejű analízisekhez, veszélyjelzésekhez, hidrológiai, agrár- és repülésmeteorológiai feladatokhoz, klímakutatáshoz, valamint meteorológiai alapkutatáshoz is nélkülözhetetlenek. [2, 1. o.] A felszíni állomások ma már nem pusztán néhány alapparamétert mérnek, a korszerű megfigyelőrendszerek hőmérséklet, talajhőmérséklet, talajnedvesség, légnyomás, relatív páratartalom, szél, csapadék, hóborítottság, napsugárzás, látástávolság, párolgás, a légköri összetétel és a felhőzeti jellemzők egy részének mérésére alkalmasak. [2, 4. o.]

2.1 A környezeti paraméter fogalma és fő csoportjai

A „környezeti paraméter” fogalma alatt olyan jellemzőket értünk, amelyek egy adott környezet – például a légkör, egy épített tér, egy talajtest vagy egy víztest – aktuális állapotát írják le. A paraméter kifejezés egyszerre utal arra, hogy az adott jelenség mérhető, összehasonlítható és időben nyomon követhető, valamint arra is, hogy az állapotnak csak egy-egy összetevőjét ragadja meg.

A környezeti paraméter nem egyszerűen bármilyen mérhető tulajdonság, hanem olyan, célhoz kötötten kiválasztott állapotjelző, amely a vizsgált rendszer megértéséhez valódi információt hordoz. Ugyanaz a környezet más és más paraméterekkel írható le attól függően, hogy meteorológiai, épületfizikai, mezőgazdasági vagy környezetbiztonsági szempontból vizsgáljuk.

A környezeti paraméterek egyik kézenfekvő felosztása szerint beszélhetünk fizikai, kémiai és biológiai jellegű változókról.

- Fizikai paraméter például a hőmérséklet, a légnyomás, a zajszint, a sugárzás vagy a szélsébség;
- kémiai jellegű változó lehet egy gáz koncentrációja, a pH vagy bizonyos szennyezőanyagok jelenléte;
- biológiai paraméternek pedig tekinthetők például egy élőhely állapotára, a mikrobiológiai terhelésre vagy az ökológiai folyamatokra utaló jellemzők.

A dolgozat három alapváltozóra, a levegő hőmérsékletére, a relatív páratartalomra és a légnyomásra összpontosít, mert együtt alkalmasak a mikroklíma leírására, és korszerű digitális szenzorokkal viszonylag egyszerűen, költséghatékonyan mérhetők. [2] Ezek egyrészt klasszikus meteorológiai alapváltozók, másrészt közvetlenül befolyásolják az emberi komfortot, az épített környezet mikroklímáját, a páralecsapódási viszonyokat és bizonyos esetekben a környezetbiztonsági kockázatokat is. Műszaki szempontból is előnyösek, mert a korszerű MEMS-alapú szenzorok több ilyen paramétert egyetlen kis méretű, alacsony fogyasztású és gyárilag kalibrált egységben képesek mérni.

2.2 A megfigyeléstől a tudományos mérésig

A környezet állapotának értelmezése kezdetben közvetlen emberi megfigyelésen alapult. A hőérzet, a szél, a felhőzet, a csapadék, a pára, a köd vagy a szárazság tapasztalati úton is felismerhető jelenségek, ezért a korai társadalmak környezeti tudása hosszú ideig főként minőségi megfigyelésekből épült fel. Ezek gyakorlati szempontból hasznosak voltak, ugyanakkor nehezen voltak számszerűsíthetők és korlátozottan voltak összehasonlíthatók.

A tudományos mérés felé vezető fordulat abban állt, hogy az észlelt jelenségekhez fokozatosan mérőeszköz, skála és egységes értelmezési keret társult. A dolgozat mottója, Lord Kelvin 1883-as előadásának kezdőgondolata, ezt az alapelvet fogalmazza meg tömören. [1] A Műszaki Lexikon szerint a mérés lényegében összehasonlítás: valamely mennyiség viszonyítása egy ismert, állandó értékhez, vagyis a mértékegységhez. Ugyanez a meghatározás kiemeli, hogy a mérés lehet közvetlen, különbségi vagy közvetett, és a mérési eredmény értelmezésénél a rendszeres és a véletlen hibákat is figyelembe kell venni. [3, II. köt., „mérés”, 1001–1002. o.]

Az érzékelés és a valódi mérés közötti különbség ezért nemcsak technikai, hanem módszertani természetű. A méréshez nem elég, hogy egy eszköz reagáljon a környezet változására; szükség van arra is, hogy a reakció reprodukálható, egységes skálához köthető és más mérésekkel összevethető legyen. A környezeti paraméterek számszerűsítése ebből a szempontból a modern meteorológia és környezettudomány egyik alapfeltétele. A mai környezeti monitoring rendszerek a megfigyelés, a műszeres mérés, az automatikus adatgyűjtés és az adatelemzés egymásra épülő fejlődésének eredményei.

2.3 A hőmérséklet-, páratartalom- és légnyomásmérés tudománytörténete

A hőmérséklet, a páratartalom és a légnyomás a meteorológiai és környezettudományi megfigyelések klasszikus alapváltozói közé tartoznak. E három paraméter mérése tette lehetővé, hogy a légköri állapotot ne pusztán leíró jelzőkkel, hanem számszerűen, összehasonlítható formában lehessen jellemezni. A fejlődés során nemcsak új műszerek jelentek meg, hanem maga a hőmérséklet, a nyomás és a légnedvesség fogalma is pontosabbá és természettudományosan megalapozottá vált.

2.3.1 A hőmérsékletmérés korai előzményei: thermoszkópok

A melegítés hatására bekövetkező levegőtágulást már korábban is ismerték, de ezt a jelenséget csak a XVII. század elején kezdték tudatosan a hőállapot jelzésére felhasználni. A korai thermoszkópok nyitott rendszerek voltak: a csőben rekedt levegő térfogatváltozása jelezte a melegedést vagy lehűlést, működésük azonban a külső légnyomástól is függött. [4][5][6, 4.5.1.] Ez jól mutatja, hogy kezdetben még nem vált szét egyértelműen a hőmérséklet és a légnyomás hatása.

Fig. 1.
Galilei thermoszkóp, 1592



2.3.2 A zárt folyadék-hőmérők megjelenése

II. Ferdinánd toszkán herceg 1654-ben már olyan lezárt, részben alkohollal töltött üvegcsöveket készíttetett, amelyek működése nem függött közvetlenül a külső légnyomástól. [4][6, 4.5.1.] Ez döntő lépés volt a valódi hőmérő kialakulása felé.

A II. Ferdinánd által alapított Accademia del Cimento² tagjai tették meg az első fontos lépéseket a fokbeosztott alkoholos hőmérők irányába, és az azonos standardhoz igazított hőmérők egy korai meteorológiai megfigyelőhálózat alapját is képezték. [7]

2.3.3 A hőmérsékleti skálák egységesedése és a hő fogalmának megjelenése

A XVII–XVIII. században sokféle hőmérsékleti skála létezett, Daniel Gabriel Fahrenheit 1724-ben vezette be saját skáláját, műszer-készítőként és üvegfúvóként „sorozat-gyártotta” igen pontos hőmérőit. Egységes kalibrálásukhoz eredetileg jég-só „fagykeveréket” és az emberi test hőmérsékletét használta referenciának. [4] (Később áttértek a Celsius skálával azonos referenciapontokra.)

Anders Celsius 1742-ben olyan skálát javasolt, amely két pontosabban meghatározott és könnyebben előállítható fixpontra épül: a vízjég olvadási és a víz forrási hőmérsékletére. Az eredeti Celsius skála iránya eltért a maitól, de a lényeg azonos: a két fixpont és az ezek közötti egyenletes felosztás. A ma használt formában: 0 °C a jég olvadáspontja, és 100 °C a víz forráspontja. [4][6, 4.5.1.]

A Celsius- és Fahrenheit-skálák bevezetése nem pusztán technikai egyszerűsítés volt, a hőmérséklet így meghatározott, közvetlenül számszerűsíthető fizikai mennyiséggé vált.



Fig. 2.
eredeti Fahrenheit hőmérő

A XVIII–XIX. század fordulóján a hő értelmezése körül még komoly elméleti viták zajlottak. [6, 4.5.2.–4.5.3.] Joseph Black világosan megkülönböztette a hőmérsékletet és a hőmennyiséget, bevezette a fajhő és a látens hő fogalmát. [6, 4.5.2.]

² Az *Accademia del Cimento* („A Kísérletezés Akadémiája”) a XVII. századi Firenzében működő olasz tudós társaság volt, amely a természettudományos jelenségek megfigyelését és kísérleti vizsgálatát helyezte a középpontba. [6, 336. o.]

A XIX. századi termodinamika és a statisztikus mechanika tette lehetővé, hogy a hőmérsékletet a részecskék átlagos mozgásállapotához kapcsolják. [8, 164–169. o.] A statisztikus szemlélet szépsége éppen abban áll, hogy egyszerű átlagos mennyiségek (például a részecskék átlagos sebessége) határozzák meg az olyan makroszkopikus tulajdonságokat, mint a hőmérséklet. [8, 165. o.] Ezzel a hőmérséklet fogalma az anyag szerkezetéhez kapcsolódó fizikai állapotjelzővé vált.

A termodinamika első, második, és később a harmadik főtétele nemcsak a hőerőgépek működésének megértését tette lehetővé, hanem a hőmérséklet elméleti értelmezését is alapvetően meghatározta. [8, 165–168. o.] Kelvin Fourier és Carnot eredményeire támaszkodva határozta meg az „abszolút nulla hőmérsékletet”, azt a végső hőmérsékleti alsó határt, amely alatt további lehűlés már nem értelmezhető a klasszikus fizika keretei között. [8, 168. o.][9, 263–265. o.]

2.3.4 Vákuum, bányaszivattyúk és a légnyomás fogalmának kialakulása

A légnyomás mérésének története szorosan összefonódik a vákuum problémájával. A klasszikus descartes-i filozófia, és az arisztotelészi hagyomány szerint vákuum nem jöhet létre, mert a természet „irtózik az ürtől” (*horror vacui*), ezért minden „üres helyet” valaminek ki kell töltenie. [6, 3.5.3.]

A XVII. században a bányászok számára komoly gondot jelentett, hogy a szivattyúk körülbelül harminc lábnál, azaz nagyjából 9–10 méternél magasabbra nem tudták emelni a vizet. [9, 133. o.] Galilei a jelenséget még a „*horror vacui*” mérhetővé tételével próbálta értelmezni, de Beeckman már helyesen felismerte, hogy a vízoszlop határmagasságát valójában a levegő nyomása szabja meg. [6, 3.5.3.]

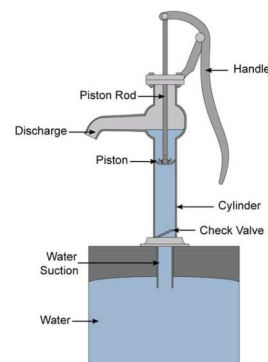


Fig. 3. kézi szivattyú

A döntő fordulatot Torricelli 1643-as kísérlete jelentette. A higannyal telt, egyik végén zárt csövet higannyal töltött edénybe fordítva a higanyoszlop 76 cm magasságban megáll, fölötté pedig létrejön a Torricelli-űr. [6, 3.5.3.][9, 134. o.]

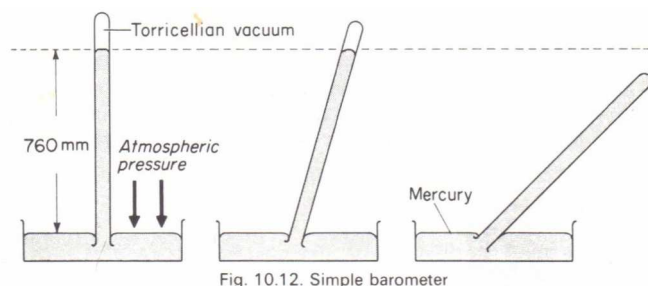


Fig. 4. Torricelli kísérlete

A következő kérdés az volt, hogy mi van a Torricelli-úrban, és mi tartja meg a higanyoszlopot. [6, 3.5.3.] A végső áttörést Pascal munkássága hozta meg. A *Puy-de-Dôme* hegyen elvégzett barométeres kísérletsorozat egyértelműen megmutatta, hogy a higanyoszlop magassága csökken a tengerszint feletti magassággal, vagyis a jelenség oka a levegő súlyából eredő légnyomás. [6, 3.5.3.][9, 134. o.]

A vákuumtechnika fejlődésében Otto von Guericke szerepe volt meghatározó, megalkotta az első légszivattyút és elvégezte a híres magdeburgi félgömb-kísérletet, amivel látványos módon mutatta meg a külső légnyomás hatalmas erejét. [6, 3.5.3.] Guericke légszivattyúja és később Boyle módosított berendezése lehetővé tette a levegő összenyomhatóságának és a vákuum jelenségeinek részletes vizsgálatát. [9, 140. o.] Ez lehetővé tette a Boyle–Mariotte-törvény felismerését. [6, 3.5.3.]

2.3.5 A barométer mint meteorológiai eszköz

A XVIII. század elejére a barométer Európa-szerte ismert műszerré vált, és hamar kiderült, hogy a higanyoszlop magassága az időjárás változásával is összefügg. [9, 135. o.] Száraz időben magasabban állt, viharos időben pedig alacsonyabban. A XIX. századra a barométer már a rendszeres meteorológiai megfigyelések egyik alapvető műszere lett.

2.3.6 A páratartalom fogalmának tisztázása és a páramérés kialakulása

A páratartalom mérésének fejlődése részben más logikát követett. Itt nem egyetlen látványos kísérlet, hanem a fogalmi tisztázás és a megfelelő mérőeszközök fokozatos kialakulása volt döntő. John Dalton meteorológiai érdeklődése közvetlenül kapcsolódott a páratartalom kérdéséhez. Saját barométereket, hőmérőket és esőmérőket készített, és kiemelten foglalkozott azzal, hogyan lép be a víz a levegőbe párolgás útján, illetve hogyan távozik onnan. A gázok keveredésének és oldódásának vizsgálata során jutott el azokhoz a felismerésekhez, amelyek végül a résznyomás-elmélethez vezettek. Dalton résznyomás-törvénye felismerte, hogy egy gázelegy össznyomása az egyes összetevők résznyomásainak összege, és ezt a gondolatot a vízgőz jelenlétének leírására is alkalmazta. [9, 280. o.][10]

Horace Bénédict de Saussure 1783-ban készítette el az első hajszál-higrométert, amely a haj hosszváltozását használta fel a levegő nedvességtartalmának jelzésére. [11] Az aspirációs pszichrométer a levegő kényszerített áramoltatásával növelte a mérés

megbízhatóságát, egy száraz és egy nedves hőmérő különbségéből lehetővé tette a relatív páratartalom számítását. [3, I. köt., „aspirációs pszichrométer”, 152. o.][12]

2.3.7 A három alapváltozó és a rendszeres meteorológiai megfigyelések

A XVIII–XIX. századra a hőmérséklet, a páratartalom és a légnyomás mérése a rendszeres meteorológiai megfigyelések része lett. Együtt lehetővé tették, hogy a légköri folyamatokat ne pusztán leírni, hanem összehasonlítani és egyre pontosabban modellezni is lehessen.

2.4 A mérőeszközök fejlődése

A korai eszközök többnyire közvetlen, makroszkopikus hatásokra épültek: folyadékoszlop emelkedésére, hőtágulásra, párolgásra vagy rugalmas alakváltozásra. Ezek az eszközök sokáig jól használhatók voltak, de méretük, sérülékenyséjük, leolvashatóságuk vagy automatizálhatóságuk korlátozta az alkalmazásukat.

2.4.1 Hőmérsékletmérés

A hőmérsékletmérés többféle elven történhet: kontakt módszerrel, amikor a hőmérő érintkezik a mérendő testtel, valamint sugárzásméréseken alapuló, pirométeres módszerrel, ami nagy hőmérsékleteknél nélkülözhetetlen. [3, II. köt., „hőmérsékletmérés”, 300. o.][13, 78-81. o.] A hőmérsékletmérés területén a folyadékos hőmérők mellett fokozatosan megjelentek az elektromos elven működő megoldások: a platina ellenállás-hőmérők, a termisztorok és a termoelemek. [14, 78–84. o.]

A meteorológiai gyakorlatban a szenzor önmagában nem elegendő: a gondos elhelyezésre, sugárzásvédő pajzsra vagy műszerházra és megfelelő légáramlásra is szükség van, mert a sugárzási hiba, a nem megfelelő szellőzés és a közeli hőforrások jelentősen befolyásolhatják a mérés eredményét. [2, 114–118. o.]

A standardizált kültéri levegőhőmérséklet-mérés klasszikus megoldása a Stevenson-ház. A levegőhőmérsékletet szinoptikus és automatikus állomásokon a talaj fölött körülbelül 1,25 m magasságban, Stevenson-házban elhelyezett platina ellenállás-hőmérővel mérik, és a szellőzés természetes módon, az oldalsó zsalukon keresztül történik. [15][13, 66-72. o.][16][17]

Fig. 5. Stevenson ház



A Venera-7 küldetés során a Vénusz bolygó légkörének és felszínének a hőmérsékletét platina ellenállás-hőmérőkkel mérték. [18]

Az egyik legelterjedtebb modern hőmérő megoldás a szilícium-alapú bandgap hőmérő, ami a félvezető p-n átmenetek hőmérsékletfüggő tulajdonságait használja fel, és rendkívül széles körben elterjedt az integrált áramkörökben. [19] Ez a megoldás azért vált meghatározóvá, mert közvetlenül az IC-technológiába integrálható, könnyen miniaturizálható, olcsó, kevés energiát igényel, és tömeggyártás mellett is jól kalibrálható.

2.4.2 Légnyomásmérés

A Torricelli féle „higanyos barométer” viszonylag pontos mérésre alkalmas, de sérülékeny, nem alkalmas terepi munkára. [3, I. köt., „barométer”, 213. o.][20, 38-41 o.]

Gottfried Wilhelm Leibniz 1700 körül már felvetette az fémbarométer (vagy aneroid barométer) alapötletét, de csak 1844-re valósította meg a gyakorlatban Lucien Vidie. Az aneroid barométer egy lapos henger alakú fémdoboz, amiben (részleges) vákuum van. A doboz hajlékony oldalai a változó légnyomás szerint tágulnak, illetve húzódnak össze. Ez megfelelő áttétel-szerkezettel könnyen mérhető mutatóelmozdulássá alakítható. [3, I. köt., „aneroid”, 118. o.][20, 41-42 o.] A barográf pedig az aneroid barométer írószerkezettel ellátott változata, amely a légnyomás időbeli alakulását automatikusan rögzíti. [3, I. köt., „barográf”, 213. o.][20, 42 o.]



Fig. 6. barográf vagy légnyomásíró

A modern nyomásmérésben a mechanikai elmozdulást közvetlenül elektromos jellé alakítjuk. A korszerű nyomásmérők jellemzően piezorezisztív-, kapacitív- vagy ezeken alapuló MEMS- elven működnek. [21][20, 42 o.]

A kapacitív nyomásmérő lényege, hogy egy aneorid barométerre két párhuzamos fémlemezről álló kondenzátort szerelünk. A nyomásváltozás megváltoztatja a kondenzátor fegyverzet-lemezei közötti távolságot, amivel a kapacitás is változik, ami közvetlenül mérhető elektromosan. A kapacitív nyomásmérő nagyon érzékeny, és kis elmozdulásokra is jól reagál, de nem jól miniaturizálható. [20, 38-41 o.][13, 83-84 o.]

A piezorezisztív elvű nyomásmérés „szilíciumbarát”: a nyomás megfeszít egy membránt vagy szilícium struktúrát, a mechanikai feszültség hatására a félvezető ellenállása megváltozik, ami igen pontosan mérhető.[13, 86-87 o.]

A MEMS-technológia lényege az, hogy ugyanezeket a rugalmas membránokat és érzékelőstruktúrákat integrált áramkör-gyártási eljárásokkal állítják elő, ezért az ilyen nyomásmérők kicsik, olcsók, tömegesen gyárthatók és jól kalibrálhatók. [21][20, 41 o.]

2.4.3 Páratartalom mérés

A levegő nedvességtartalma többféle elven mérhető: klasszikus pszichrométeres, gravimetrikus, kondenzációs, mechanikai, valamint elektromos és kémiai tulajdonságváltozáson alapuló módszerekkel. [2, 159–160. o.] [20, 47. o.]

A modern szenzorok többsége kapacitív elven működik: egy finom fésűs elektróda-mintázatot elfed egy vékony polimer réteg. A vízgőz a polimer rétegbe diffundálva megváltoztatja dielektromos tulajdonságait, ami elektromosan mérhető kapacitás változást okoz. [2, 160. o.]

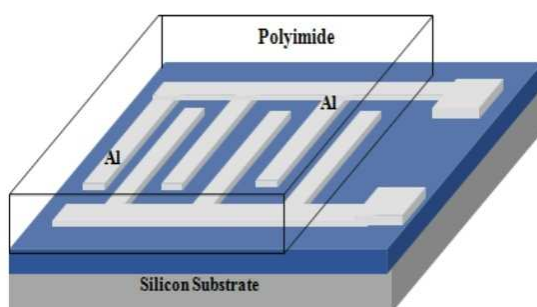


Fig. 7. MEMS kapacitív páratartalom szenzor működési elve

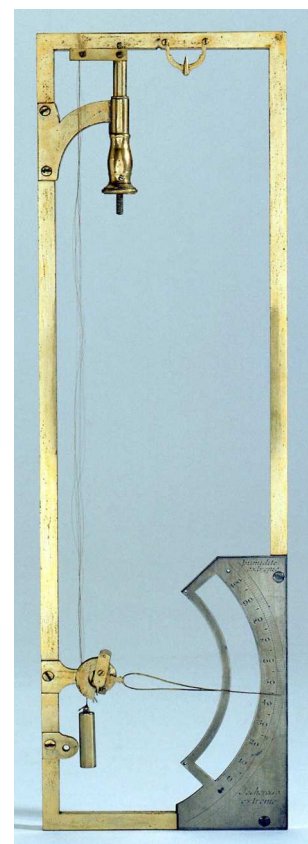


Fig. 8. Saussure hajszál-hygrométere

2.4.4 MEMS szenzorok

A jelenlegi fejlődési szintet jól jellemzi a MEMS-technológia megjelenése. A MEMS-eszközök a mechanikai és elektronikai elemeket egyetlen kis méretű szilíciumalapú egységben egyesítik, ami tömeges, olcsó gyártást, gyári kalibrációt, alacsony anyag- és energiaigényt tesz lehetővé. Ennek az integrációnak köszönhető, hogy egyetlen kis méretű érzékelő több paraméter mérésére is alkalmas lehet [21]. A saját dolgozati témám szempontjából ennek a fejlődésnek azt az eredményét hasznosítom, hogy a mai, gyárilag kalibrált digitális szenzorokkal már alacsony költség mellett is létrehozható olyan többpontos mérőrendszer, amely néhány évtizeddel korábban csak lényegesen nagyobb méretű, és drágább eszközökkel lett volna megvalósítható. A BME280 és az SHT4X érzékelők ennek a hosszú fejlődési folyamatnak a jelenlegi, gyakorlati szempontból igen kedvező állomásai. [21][22][23]

2.5 Mérési pontosság, hibák, kalibráció és megbízhatóság

A környezeti mérés értelmezésének egyik legfontosabb szempontja, hogy a mért érték soha nem tekinthető a vizsgált mennyiség teljesen biztos valódi értékének. A mérés lényege valamely tulajdonság értékének standardhoz viszonyított meghatározása, és a mérési eredményhez szükségszerűen hozzátartozik a kapcsolódó bizonytalanság értékelése is. [24] A mérési hiba a mért érték és a valódi érték közötti eltérés; fő típusai a véletlen hiba, a rendszeres hiba és a durva hiba. [3, II. köt., „mérési hiba”, 1002. o.] [14, 6–7. o.][25, 11–13. o.]

A rendszeres hibák elvileg meghatározhatók és korrigálhatók, a véletlen hibák statisztikai módszerekkel becsülhetők, a durva hibák pedig jelentősen torzíthatják az eredményt. [14, 6–7. o.][25, 11–13. o.][3, II. köt., „mérési hiba”, 1002. o.] A pontosság, a válaszügy és az adatfeldolgozás időléptéke együtt határozzák meg egy mérőrendszer teljesítményét. A WMO ajánlása például a levegőhőmérsékletre 0,1 K felbontást, a relatív páratartalomra 1% felbontást, a légnyomásra pedig 0,1 hPa felbontást és ezekhez kapcsolódó jellemző időállandókat és bizonytalansági célértékeket ad meg. [2, 25–27. o.]

2.5.1 A kalibráció és a nyomonkövethetőség jelentősége

A NIST meghatározása szerint a metrológiai nyomonkövethetőség dokumentált, megszakítatlan kalibrációs láncot jelent, amelynek minden eleme hozzájárul a teljes bizonytalansághoz. [24] A meteorológiai állomásoknál a kalibrált műszerek, az egységes mérési módszer, a rendszeres ellenőrzés és a hosszú távú stabilitás biztosítása alapkövetelmény. [20, 8–9. o.][2, 80–82. o.]

A gyakorlati mérésben számos hibaforrás jelenhet meg. A BME280 beépítési útmutatója például külön kiemeli a hőforrások közelségét, az önmelegedést, a rossz légáramlást, a túl nagy holtteret, a folyadékszennyezést és a nem megfelelő ventillációt mint pontosságot rontó tényezőket. [22][26] A nyomásmérést a hőmérséklet-változás, a rázkódás vagy a műszer elállítódása, a léghőmérséklet mérését pedig a sugárzási hiba és a nem megfelelő árnyékolás is befolyásolhatja. [20, 133–134. o.]

2.5.2 A megbízhatóság növelése

A megbízhatóság növelésének egyik módja a kereszt-ellenőrzés. A megvalósított szenzor-projektben ezért két eltérő típusú szenzort alkalmaztam párhuzamosan: ha két egymástól független gyártói háttéren alapuló érzékelő hasonló eredményt ad, az erősíti az adatokba vetett bizalmat; ha pedig eltérés jelentkezik, az figyelmeztethet elhelyezési, kalibrációs vagy szenzorhibára. Ez nem helyettesíti a laboratóriumi hitelesítést, de jelentősen javíthatja a mért adatok használhatóságát.

Összességében a mérési pontosság és megbízhatóság kérdése központi jelentőségű a környezeti monitoring rendszereknél. A szenzor típusán túl számít a beépítési mód, a mintavételi stratégia, a kalibrációs háttér, a dokumentált metaadatok megléte és az eredmények kritikus értelmezése is. [2, 81–82. o.][3, II. köt., „mérési hiba”, 1002. o.][24][25, 18–21. o.][27, 17–20. o.][28, 58–63. o.]

2.6 A választott paraméterek környezettudományi jelentősége

A dolgozat nem az összes meteorológiai elemre terjed ki, hanem arra a három változóra összpontosít, amelyek viszonylag egyszerűen, alacsony költségű szenzorokkal is mérhetők, és a mikroklima értelmezésében közvetlenül használhatók: *a levegő hőmérsékletére, a relatív páratartalomra és a légnyomásra*, amelyek a légköri és a beltéri környezeti viszonyok leírásában egyaránt fontos szerepet játszanak. E három változó segítségével az időjárási események túlnyomó része leírható és megmagyarázható. [32, 105. o.]

2.7 A levegő hőmérséklete

A levegő hőmérséklete a környezet állapotának egyik legalapvetőbb fizikai jellemzője. A hőmérséklet az anyag makroszkopikus állapotát jellemző állapothatározók egyike, mérésére pedig a testek számos olyan tulajdonsága felhasználható, amely a hőmérséklettel egyértelmű összefüggésben áll. [30, „hőmérséklet”, 330. o.] A hőmérséklet a légkör energetikai állapotáról ad információt, és közvetlen hatással van a hőáramlási folyamatokra, a sűrűségviszonyokra, a konvekcióra, a párolgás intenzitására és számos más meteorológiai, illetve mikroklimatikus jelenségre.

Fontos a hőmérséklet és a hőmennyiség elkülönítése: más a melegség intenzitása és más a melegség mennyisége; a hőmérséklet intenzív mennyiség, míg a hőtartalom vagy belső energia extenzív jellegű. [6, 4.5.1–4.5.2.] Ez a különbség a környezeti mérések értelmezésében is lényeges.

A növénytermesztés a világon mindenhol a szabad ég alatt történik, ezért közvetlenül ki van téve a meteorológiai és éghajlati viszonyoknak; ebből következően az éghajlat a növénytermesztés egyik legfontosabb meghatározó tényezője és egyben természeti erőforrása. [31, 1. o.] A hőmérséklet a biológiai folyamatok szempontjából is alapvető jelentőségű, szorosan összefügg a biológiai produktivitással. A növények csírázása, növekedése, párologtatása, a mikroorganizmusok aktivitása és számos ökológiai folyamat közvetlenül függ a hőmérsékleti viszonyoktól. [31, 50. o.]

A gyakorlati meteorológiai megfigyelés szempontjából nemcsak a fogalom, hanem a mérés módja is fontos. A levegő hőmérsékletének mérésére a gyakorlatban folyadékos hőmérők, bimetalhőmérők és maximum-minimum hőmérők is használhatók. [32, 111. o.] A hőmérő csak akkor a levegő hőmérsékletét méri, ha jól szellőző, közvetlen napsütéstől védett helyen van; az ablak vagy a házfal közelsége meghamisíthatja a

mérést. [32, 112. o.] A napi hőingás a szárazföldön általában nagyobb, mint a tengeren, és a troposzféra alsó részében a hőmérséklet általában csökken a magassággal, bár bizonyos helyzetekben inverzió is kialakulhat. [32, 113., 115. o.]

A túl alacsony vagy túl magas hőmérséklet kedvezőtlen hatással lehet az emberi közérzetre, a teljesítőképességre, és szélsőséges esetben egészségügyi kockázatokat is jelenthet. Az épített környezetben a határolószervezetek belső felületének hőmérséklete a hőérzet, a páralecsapódás és a penészképződés elkerülése szempontjából is kulcsfontosságú. [33, 61. o.]

2.8 A relatív páratartalom

A levegő nedvességtartalma a környezeti állapot egyik legfontosabb, ugyanakkor értelmezésében egyik legösszetettebb jellemzője. A páratartalom szerepet játszik a párolgásban, a kondenzációban, a felhő- és csapadékképződésben, valamint a beltéri terek komfortviszonyaiban is. [30, „pára”, 578–579. o.]

A relatív páratartalom azt fejezi ki, hogy az adott hőmérsékleten a levegő mennyire van közel a telítettségi állapothoz. Ugyanaz a levegő más hőmérsékleten eltérő relatív páratartalommal jellemezhető, ezért a páratartalom adatai önmagukban sokszor félrevezetőek lehetnek, és csak a hőmérséklettel együtt értelmezhetők.

A vapour pressure deficit (VPD) az atmoszféra „szárítóerejét” jellemzi: azt a gőznyomás-különbséget fejezi ki, amely a nedves növényzet vagy felület és a fölötté lévő szárazabb légkör között fennáll. [34] Azonos relatív páratartalom mellett melegebb levegő esetén a VPD nagyobb, tehát a párolgási kényszer is erősebb. [34]

A relatív páratartalom mérésére a meteorológiában hajszálas higrométert és pszichrométert is használtak. [32, 116. o.] A felületi páralecsapódás akkor lép fel, ha a hűlő a felület hőmérséklete eléri a harmatponti hőmérsékletet vagy az alá csökken, vagyis a felülettel azonos hőmérsékletű levegő relatív nedvességtartalma eléri a 100%-ot. [30, „kicsapódás”, 398. o.][33, 62. o.] A harmatpont kültéren a köd- és fagyveszély, beltérben pedig a páralecsapódási kockázat értelmezésében fontos. [32, 117–118. o.]

A penészképződéshez több tényező szükséges, de épületfizikai szempontból a legfontosabb befolyásolható feltétel a nedvesség jelenléte; a kondenzáció néhány napos fennállása már elősegítheti a penészesedést. [33, 63–67. o.] A relatív páratartalom napi menete is jellemző: nyugodt időben éjszaka általában nő, nappal pedig csökken. [32, 117. o.]

A pára a természetes vízkörforgás alapvető eleme. A transpiráció, vagyis párologtatás a növények szabályozott vízleadása, az evapotranspiráció pedig a párolgás és a párologtatás együttesét jelenti. [30, „párologtatás”, 580. o.][35, 4–5. o.] Egy tipikus növény tömegének nagy része víz, és a felvett víz jelentős része transpirációval távozik. [36, 756–757. o.] Az evaporáció és a transpiráció aránya a növényállomány fejlettségétől függ, sűrű állományban a teljes vízvesztésget döntően a növények párologtatása adhatja. [35, 6. o.]

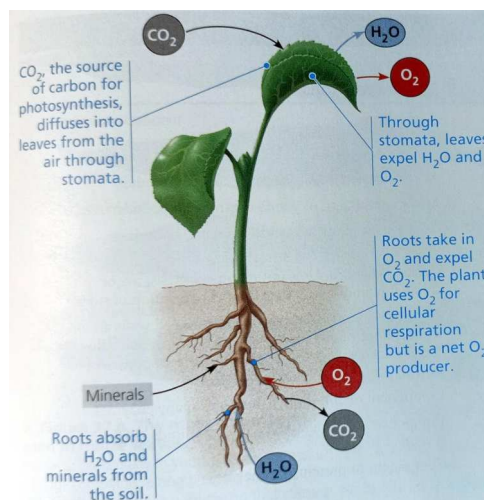


Fig. 9. a növények párologtatása

2.9 A légnyomás

A légnyomás a légkör fizikai állapotának egyik alapvető jellemzője, a levegőréteg nyomása, amely az észlelőhely magasságával változik. [30, „légnyomás”, 459. o.] A meteorológiai folyamatok értelmezésében azért fontos, mert a nyomáskülönbségek hozzák létre a légmozgásokat, és szoros kapcsolatban állnak a ciklonális és anticiklonális helyzetekkel, a frontok mozgásával és az időjárás változásaival.

A WMO szerint a meteorológiai gyakorlatban nemcsak a pillanatnyi nyomás, hanem a nyomástendencia is lényeges, vagyis az, hogy a nyomás adott időszak alatt mennyit és milyen karakterrel változott. [2, 124. o.] A fokozatos nyomáscsökkenés vagy nyomásnövekedés gyakran együtt jár a nagytérségű időjárási változásokkal. [32, 105–110. o.]

A gyakorlatban különbséget kell tenni az abszolút, az átlagos és a tengerszintre átszámított barométerállás között. A különböző magasságban fekvő helyek mérései csak a tengerszintre átszámítva vethetők össze közvetlenül. [32, 108. o.]

2.10 A három paraméter együttes értelmezése

A hőmérséklet, a relatív páratartalom és a légnyomás más-más oldalról közelíti meg ugyanannak a környezetnek az állapotát. A hőmérséklet az energetikai viszonyokról, a páratartalom a nedvességi állapotról, a légnyomás pedig a tágabb légköri háttérrel és dinamikai összefüggésekről ad információt.

A kapcsolat különösen a hőmérséklet és a páratartalom esetében szoros. A relatív páratartalom értéke a hőmérséklettel együtt változik, ezért a beltéri mikroklíma értelmezésében a két paraméter együttes vizsgálata elengedhetetlen. A harmatpont és a kondenzációs kockázat például csak akkor értelmezhető megfelelően, ha a hőmérsékleti és nedvességi viszonyokat együtt kezeljük. [32, 105., 115–118. o.]

A légnyomás ehhez képest inkább háttérváltozóként működik, de éppen emiatt hasznos. Míg a lakótéri mérési pontok közötti rövid távú eltéréseket elsősorban a hőmérséklet és a páratartalom mutatja meg, addig a légnyomás idősoros alakulása segíthet a külső időjárási környezet hatásainak azonosításában.

A három paraméter együttes értelmezése a gyakorlati elemzés során rövid idejű események megértésében is hasznos. Egy ablaknyitás, főzés vagy hosszabb szellőztetés más mintázatot rajzolhat ki a hőmérséklet- és páratartalom-idősorokban, miközben a légnyomás inkább háttérreferenciát biztosít.

3. Környezeti monitoring rendszerek és gyakorlati alkalmazásaik

A XIX. század közepére megnövekedő tengeri forgalom, a viharokkal és hajózási veszteségekkel kapcsolatos tapasztalatok és a távíróhálózat fejlődése oda vezettek, hogy az időjárási adatok gyors gyűjtése, továbbítása és térképi feldolgozása intézményes keretet kapott. [9, 134–136. o.]

A XX. század közepére a mérések numerikus modellek bemenő adataivá is váltak. A numerikus meteorológia megjelenése óta az előrejelzéshez nagy mennyiségű, gyorsan továbbítható, összehangolt és szabványos megfigyelési adat szükséges. [31, 145–152., 169–171. o.]

A WMO műszeres megfigyelési útmutatója a változók mérése mellett foglalkozik az automata időjárás-állomásokkal, a repülésmeteorológiai állomásokkal, a városi megfigyelésekkel, valamint a megfigyelőrendszerek minőségirányításával, mintavételezésével és kalibrációjával is. [2] Ezzel párhuzamosan a *WMO Integrated Global Observing System (WIGOS)* keretrendszer kifejezetten a meglévő megfigyelőrendszerek integrációját, koordinációját és összehangolt fejlődését célozza. [30] A *WMO No. 8* útmutató 2025-ös kiadása a megfigyelések célját, a reprezentativitást, a metaadatok szerepét, az automata állomásokat, az emberi megfigyelők szerepét, a telepítési és expozíciós követelményeket, valamint a mérési

bizonytalanság és osztályozás kérdéseit is egységes keretben tárgyalja. [2, 1–5., 24–32., 80–82. o.]

3.1 Környezeti monitoring az iparban és az épített környezetben

A környezeti monitoring jelentősége az épített környezetben ma már nem korlátozódik a jó közérzet kérdésére. A folyamatos beltéri monitoring egyik fő előnye, hogy jobban képes megragadni egy épület valós működését, mint az alkalomszerű ellenőrző mérések. [37]

A gyakorlatban az IoT-alapú épületmonitoring nemcsak mérési, hanem üzemeltetési eszköz is lehet. Egy 2018-as épületenergetikai felújításhoz kapcsolódó kutatás olyan alacsony költségű, nyílt forráskódú monitoring rendszert mutatott be, amely mikrokontrollerrel és felhőoldali tárolással gyűjtött épületkörnyezeti adatokat, és alkalmas volt a felhasználói viselkedés beltéri levegőminőségre gyakorolt hatásának kimutatására. [38]

Az ASHRAE³ 62.1⁴ és 62.2⁵ szabványai az elfogadható beltéri levegőminőség és a szellőzés tervezésének elismert alapidokumentumai. [39][40] Az Európai Unió szabályozása ezzel párhuzamosan különböző határértékeket és célértékeket alkalmaz a levegőminőség és az épületüzemeltetés területén. [41][42] A 2024/1275/EU épületenergetikai irányelv hangsúlyozza, hogy az épületek energetikai teljesítményének javításakor figyelembe kell venni a beltéri környezetminőséget is, beleértve a hőmérsékletet, a páratartalmat, a szellőzési rátát és a szennyezőket. [43]

Az épületfizikai szemlélet szerint a határolószervezetek belső felületi hőmérsékletének elegendően magasnak kell lennie az elfogadható hőérzet, a páralecsapódás és a penészképződés elkerülése érdekében. [33, 61–63. o.] A nedvességeképződés és a szellőzés együttes figyelése ezért alapvető. A monitoring ilyen helyzetben nem csupán leíró, hanem megelőző eszköz is. [33, 63–68. o.][40][44]

Az éghajlat a növénytermesztés egyik legfontosabb meghatározó tényezője és egyben kockázati tényező is. [31, 1. o., 36. o.] Ez igaz a kontrollált vagy félig kontrollált környezetekre is, például üvegházakra, növénynevelő terekre, raktárakra vagy

3 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [39]

4 ASHRAE Standard 62.1 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality [40]

5 ASHRAE Standard 62.2 – Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings [40]

laboratóriumi helyiségekre, ahol a hőmérséklet- és nedvességviszonyok közvetlenül kapcsolódnak a tárolás, a termelés vagy az élő rendszerek működésének sikeréhez.

Az ipari és egyéb kontrollált környezetekben a monitoring gyakran közvetlenül kapcsolódik a biztonsághoz és a minőségbiztosításhoz. A brit munkavédelmi útmutató szerint a munkáltatónak gondoskodnia kell az észszerű munkahelyi hőmérsékletről, a megfelelő szellőzésről, valamint a túlzott meleg vagy hideg kockázatának csökkentéséről. [44] Az EU 89/654/EGK irányelve hasonlóan előírja a megfelelő mennyiségű friss levegőt és az ember számára megfelelő hőmérsékleti körülményeket. [45]

A városi klíma létrejöttének alapja az emberi tevékenység és az általa létrehozott mesterséges felszín, amely a sugárzási viszonyokat, a vízháztartást, a légáramlást és a hőháztartást is befolyásolja. [46, 131–141. o.] A városklíma összehasonlítható leírásának egyik korszerű kerete a Local Climate Zone (LCZ) osztályozás, amely a felszínszerkezet, a felszínfedettség és az emberi aktivitás alapján standard zónákba sorolja a városi tereket. [47] Az UHCI mutató pedig arra mutat rá, hogy az emberi hőterhelés értelmezéséhez a hőmérséklet, a páratartalom, a szél és a sugárzási viszonyok együttes figyelembevétele szükséges. [48]

3.2 Meteorológiai és repülésmeteorológiai állomások, standardizálás

A meteorológiai állomás szabványosított megfigyelőhely: sokféle paramétert mér, ismert módon, ismert körülmények között és ismert bizonytalansággal. A felszíni meteorológiai állomás több érzékelőből, adatgyűjtő és adatátviteli elemből, valamint metaadat- és minőségbiztosítási rendszerből felépülő megfigyelőállomás. [2, 4. o.]

3.2.1 A meteorológiai megfigyelőhely mint szabványosított rendszer

A mért környezeti paraméterekkel kapcsolatos tudományos vagy gyakorlati következtetések csak akkor tekinthetők megalapozottnak, ha ismert a mérés helye, ideje, módja, a használt szenzor típusa, a mértékegység, a mintavétel gyakorisága és a mérési környezet fő jellemzői. A mérési adat mellett a hozzá tartozó metaadatok és a dokumentált mérési feltételek legalább ugyanilyen fontosak.

A WMO No. 8 szerint a meteorológiai megfigyelések reprezentativitása nem rögzített tulajdonság, hanem a műszerezés, a mérési intervallum és az expozíció közös eredménye, amelyet mindig a konkrét felhasználási céllal összefüggésben kell értelmezni. [2, 2. o.] A telepítési körülmények, a mérési gyakoriság és az állomás típusa ezért önmagukban is

befolyásolják, hogy egy adott mérés milyen tágabb környezetre tekinthető érvényesnek. [20, 8–9. o.]

Az adatminőség több szinten jelenik meg. Befolyásolhatja a szenzor gyári pontossága, a hosszú távú kúszás, az önmelegedés, a közeli hőforrások, a rossz légáramlás vagy a közvetlen napsugárzás. A WMO site classification rendszere a hőmérséklet- és páratartalom-mérőhelyekre külön osztályokat ad meg, és számszerűsíti, hogy a különböző expozíciós viszonyok milyen többletbizonytalanságot okozhatnak. [2, 46–47. o.]

3.2.2 A hálózati szemlélet kialakulása és történeti előzményei

Korábban már több kísérlet történt meteorológiai hálózatok szervezésére, például az Accademia del Cimento, a Royal Society vagy a Société de médecine de Paris részéről, de ezek nem működtek olyan sikeresen és egységesen, mint a Societas Meteorologica Palatina 1781 és 1792 között működő hálózata, ami 39 állomással az első modern értelemben vett nemzetközi meteorológiai hálózatnak tekinthető. Műszereit egységesen gyártották és kalibrálták, részletes megfigyelési utasításokat adtak, a méréseket meghatározott időpontokban (a később Mannheim-óráknak nevezett 07:00, 14:00 és 21:00) végezték, az adatokat pedig egységes formában gyűjtötték és publikálták. [49, 93–94. o.][17]

A modern nemzetközi meteorológiai együttműködés gyökerei az 1873-as bécsi Nemzetközi Meteorológiai Kongresszusig nyúlnak vissza. Az 1879-es római kongresszuson ebből nőtt ki az International Meteorological Organization, amely a későbbi WMO közvetlen elődjének tekinthető. [50][51, 35–37. o.] Az IMO, majd később a WMO egyik fő törekvése az volt, hogy a meteorológiai állomások összehasonlítható műszerekkel, egységes mértékegységekkel és jelentési logikával dolgozzanak. [51, 36–39. o.]

A hálózati szemlélet fejlődésében a kommunikációs infrastruktúra is kulcsszerepet játszott. A távíróhálózat fejlődése és a vihar-előrejelzés gyakorlati igénye tette lehetővé, hogy a helyi megfigyelések nagyobb léptékű légköri helyzetképpé álljanak össze. [9, 134–136. o.][52]

3.2.3 A jelenleg használatban lévő operatív meteorológiai hálózatok

A WIGOS keretében működő GOS a felszíni, felsőlégköri, tengeri, repülőgépes, radaros és műholdas megfigyelések integrált rendszere. [53][54][55] A felszíni alrendszer gerincét mintegy 11000 szárazföldi állomás adja (amelyek legalább háromóránként, gyakran óránként szolgáltatnak adatot), a felsőlégköri komponensben pedig körülbelül 1300 rádiószondás állomás működik. [55] A tengeri részrendszer hajókra és bójákra, a repülőgépes megfigyelések pedig a nagy forgalmú légifolyosók és repülőterek környezetére támaszkodnak. [55]

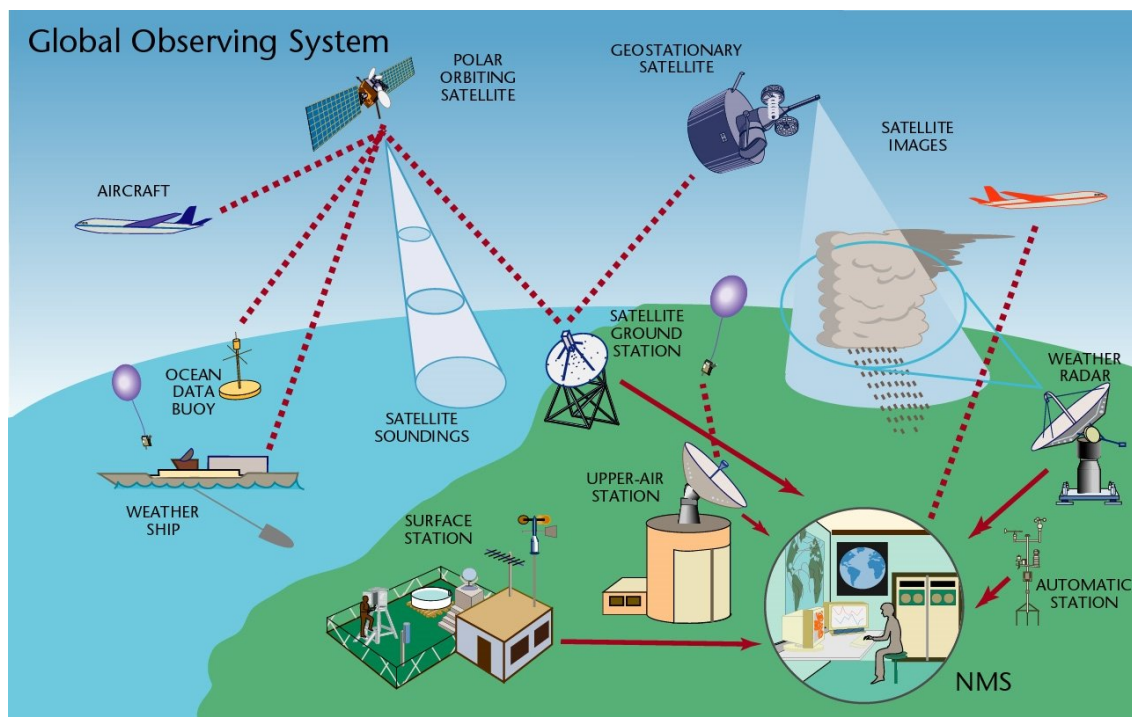


Fig. 10. WMO Integrated Global Observing System (WIGOS)

A szinoptikus főállomások továbbra is a földbázisú megfigyelőrendszer gerincét adják, és azonos időben végzett, standardizált észleléseik teszik lehetővé az időjárási helyzet áttekintését. [20, 10–11. o.][56, 130–131. o.] A főterminusok hagyományosan 00, 06, 12 és 18 UTC-kor vannak, sok állomás mellékterminusokban is észlel, számos mérőhely ezen felül óránként is szolgáltat adatot. [56, 130. o.] A főállomásokon általában időjárási helyzetet, széladatokat, felhőzetet, felhőalapot, léghőmérsékletet, légnedvességet, légnyomást és annak változását, látástávolságot, csapadékot, talajállapotot és hóvastagságot figyelnek meg. [56, 130–131. o.] A csapadékmérés a klasszikus meteorológiai állomások egyik alapfeladata, a csapadék intenzitását a lehullás időegységére vonatkozó mennyisége jellemzi. [30, „csapadék”, 107. o.]

A meteorológiai adatáramlás maga is rendszerszerűen szervezett. Az adatok különböző meteorológiai táviratok formájában kerülnek továbbításra, például szárazföldi SYNOP, magaslégköri TEMP, repülőgépes AIREP, bójás DRIBU, valamint műholdas SATEM és SATOB formában. [56, 139–140. o.] A meteorológiai mérések feltétele tehát a kommunikációs és informatikai rendszer is. A mai hálózatokat a WIGOS fogja össze, a globálisan elvárt minimum felszíni adatsere-követelményeket a GBON rögzíti, különösen a numerikus előrejelzés szempontjából kritikus területeken. [57]

3.2.4 Az emberi és az automatikus észlelés viszonya

A WMO No. 8 hangsúlyozza, hogy bár a legtöbb alapvető meteorológiai elem ma már automatikusan is mérhető, nem minden jelenség írható le azonos teljességgel műszeresen. [2, 4–5. o.] Bizonyos kvalitatív elemek (például egyes felhőtípusok vagy pillanatnyi jelenségek) esetében az emberi megfigyelő továbbra is fontos kiegészítő szerepet tölthet be. Az automatizálás fő előnyei a sűrűbb állomáshálózat, a jobb időbeli felbontás, a homogénebb adatgyűjtés és az emberi hibák csökkentése. [20, 128–136. o.]

3.2.5 Repülésmeteorológiai hálózatok és termékek

A XX. század első felében a polgári repülés gyors fejlődése szükségessé tette az időjárási információk szabványosítását. A meteorológiai információ a repülés biztonságának alapvető feltétele lett, ezért az ICAO és a meteorológiai szervezetek együttműködése idővel intézményes formát öltött [58]. A WMO és az ICAO közötti formális együttműködés 1954 óta áll fenn, és célja éppen az, hogy a légiközlekedés számára szükséges meteorológiai információk előállítását és szabványosítását összehangolt keretben biztosítsa [58]. Emiatt a repülésmeteorológiai állomások az ICAO által standardizáltak, és sok esetben sűrűbb frissítésűek és szigorúbb minőségbiztosítási követelmények mellett működnek, mint az általános meteorológiai állomások. [59][60] A repülésmeteorológiai hálózatok tehát a klasszikus földfelszíni és felsőlégköri megfigyelőrendszerre épülnek, de annál szigorúbb és közvetlenebb műveleti logikával.

A repülésben használt fő termékek közé tartoznak a METAR és SPECI jelentések, a TAF előrejelzések, valamint a SIGMET és GAMET információk. [59][60] Ezek a jelentések és előrejelzések olyan rövid kódolt formában teszik átadhatóvá a meteorológiai helyzetet, amely közvetlenül illeszthető a légiforgalmi és fedélzeti döntéstámogatás rendszerébe. Ebben az értelemben a repülésmeteorológiai szolgáltatás a meteorológia egyik leginkább operatív és legszigorúbban szabványosított ága.

4. Környezeti modellek és numerikus időjárás-előrejelzés adatoldali igényei

A numerikus meteorológia gyakorlati áttöréséhez négy feltétel együttes fejlődése kellett: az atmoszféra leírására alkalmas fizikai elmélet egyszerűsítése, a numerikus megoldási módszerek kidolgozása, a nagy mennyiségű megfigyelési adat rendszeres begyűjtése és szervezése, valamint a gyors elektronikus számítógépek megjelenése. [61, 143–144. o.]

A korszerű környezeti modellek és numerikus időjárás-előrejelzések működésének egyik alapfeltétele a jó minőségű megfigyelési adat. A modell csak annyira tud jó kiindulási állapotból dolgozni, amennyire a megfigyelőrendszer ezt a kiindulási állapotot képes valósághűen leírni. [2, xix–xx. o.]

4.1.1 Az adatasszimiláció szerepe

A modellek szempontjából az egyik kulcsfogalom az adatasszimiláció. A numerikus előrejelzés rendkívüli érzékenységet mutat a kezdeti feltételekre a nemlineáris dinamikájú folyamatok miatt, ezért a kezdeti feltételek minél pontosabb meghatározása kulcsfontosságú. [62, 58–59. o.][63] Az adatasszimiláció célja, hogy minden rendelkezésre álló információt (a térben és időben szabálytalanul elhelyezkedő megfigyeléseket, az ún. háttérmezőt és a légköri egyensúlyi folyamatokra vonatkozó ismereteket) együtt használjon fel a legjobb kezdeti állapotbecslés előállítására. Különböző adatasszimilációs módszerekből már rövid időtávon is érzékelhetően eltérő előrejelzések származhatnak, vagyis a kezdeti állapotok minősége a prognózis minőségét közvetlenül befolyásolja. [62, 58–59. o.][63]

4.1.2 Regionális és globális modellek, klíma és re-analízis

Hosszabb időléptéken a regionális modellek peremfeltételeit globális modellek szolgáltatják, ezért a regionális eredmények minősége részben a globális modellek minőségétől is függ. [62, 109–110. o.]

A mérési adatok minősége klímakálán különösen érzékeny kérdés. A Klímaváltozás jegyzet hangsúlyozza, hogy a meteorológiai mérőállomás-hálózatokból származó hosszú idősorok értelmezéséhez az adatok ellenőrzése, homogenizálása és szükség esetén pótlása kulcsfontosságú. [64, 34–35. o.] Az állomásáthelyezésekből, műszerváltásokból eredő törések kiszűrése nélkül a hosszú távú trendek félreértelmezhetők lennének. A homogenizálás és az interpoláció ezért nem pusztán technikai adatkezelés, hanem a klímakutatás és a modellezés alapfeltétele. [64, 34–35. o.]

A modern meteorológiai és klímakutatói gyakorlat egyik kulcsfontosságú adatforrása a reanalízis. 1940-től napjainkig óras időléptékben szolgáltat nagy számú légköri, felszíni és óceáni változóra vonatkozó becslést az ECMWF ERA5 ötödik generációs globális atmoszférikus reanalízise, mintegy 31 km-es vízszintes rácsfelbontással és 137 függőleges modellszinttel. Az ERA5 számos megfigyelést (köztük műholdas és felszíni méréseket) asszimilál, és ezekből egységes, konzisztens képet ad a Föld légköréről. [65]

4.2 Az IoT-alapú és közösségi monitoring lehetőségei

Az utóbbi években a szenzortechnika, a mikrokontrollerek, a vezeték nélküli adatátvitel és az adatkezelés fejlődése lehetővé tette az alacsony költségű, sűrűbben telepíthető környezeti mérőrendszerek elterjedését. Az ilyen eszközök egyik fő ígérete éppen az, hogy jóval nagyobb mennyiségű és változatosabb terepi adat gyűjthető velük, mint a hagyományos, drágább műszerekkel. A climateBOX például kifejezetten arra a problémára reagál, hogy a személyes és helyi mikroklíma folyamatos gyűjtéséhez olcsóbb, dokumentált és reprodukálható mérőegységekre van szükség. [66]

Az IoT-alapú monitoring rendszerek erőssége abban áll, hogy sok kis olcsó mérőegységet lehet hálózatba szervezni, amelyek folyamatosan, automatizált módon gyűjtik és továbbítják az adatokat. A megbízhatóság azonban csak akkor várható el, ha a low-cost eszközöket megfelelő telepítéssel, kalibrációval vagy más minőségbiztosítási eljárásokkal támogatják. [67] Egy mikroklíma-monitoring rendszerrel feltárhatók például egy lakáson belüli helyiségkülönbségek, egy iroda termikus homo- vagy heterogenitása vagy az egy épületen belüli páracúcsok. [37]

Az IoT-megoldások további előnye, hogy csökkenthetik a technikai belépési küszöböt, és új felhasználói köröket vonhatnak be a környezeti megfigyelésbe. Az alacsony költségű, nyílt forrású szenzorplatformok nemcsak kutatók, hanem állampolgárok és nem szakértő felhasználók számára is hozzáférhetővé tehetik a környezeti adatgyűjtést és az adatelemzést. [29] Ez különösen akkor lehet hasznos, ha a helyi környezeti állapotok, a lakókörnyezeti különbségek vagy más, nagy felbontású térbeli jelenségek a vizsgálat tárgyai. Az ilyen rendszerek leginkább a hivatalos monitoring hálózatok kiegészítőiként értelmezhetők.

A közösségi állomáshálózatok, mint például a Weather Underground, a Weathercloud és az Időkép, jelentősen növelik a nyilvánosan elérhető, hiper-lokális meteorológiai adatok mennyiségét. [68][69][70] Ezek a hálózatok különösen értékesek lehetnek ott, ahol a

hivatalos állomások közötti tér túl nagy, vagy ahol a felhasználók kifejezetten saját telephelyükre, kertjükre, lakókörnyezetükre vagy városrészükre kíváncsiak. Ugyanakkor az ilyen adatok tudományos vagy üzemeltetési célú felhasználásuknál különösen fontos a validáció és a minőség-ellenőrzés. [3, 81–82. o.][15]

4.2.1 Korlátok, adatminőség és a saját rendszer helye

A „személyes” időjárás-állomások tényleges adatminőségének kérdését a legújabb városklimatológiai vizsgálatok is kiemelik. Bécsi hőmérséklet- és páratartalom-idősorokon azt találták, hogy az amatőr adatokban jelentős hibás előfordulások jelenhetnek meg, különösen a páratartalom-idősorokban. Ilyen adatok empirikus és numerikus kutatási felhasználása előtt kifejezett adatminőség-ellenőrzésre és strukturális vizsgálatra van szükség. [71]

Ez a jelen dolgozat szempontjából különösen releváns, mert a saját rendszer is többpontos hőmérséklet- és páratartalom-adatokra épül, ezért az adatok értelmezésében a minőségellenőrzés és a szenzorok közötti összevetés kulcskérdés.

A saját fejlesztésű rendszernek nem célja hivatalos meteorológiai adatközlés, repülésbiztonsági támogatás vagy szabványos országos megfigyelőhálózat helyettesítése. A klasszikus állomások logikáját kisméretű, olcsó és sűrűbben telepíthető formában alkalmazza emberközelí mikroklima-monitoring területére. Így a professzionális rendszerek nem versenytársai, hanem viszonyítási pontjai a bemutatott megoldásnak. Összességében az IoT-alapú mikroklima-monitoring a klasszikus meteorológiai hálózatok kiegészítője. A hivatalos állomások továbbra is nélkülözhetetlenek a referenciaértékek, az előrejelzés és a klimatológiai összehasonlíthatóság szempontjából. Az alacsony költségű, lokális szenzorhálózatok ott adhatnak többletértéket, ahol a nagyobb térbeli felbontás, a helyi folyamatok követése és az emberközelí környezet vizsgálata előnyt jelent. [53] A jelen dolgozatban bemutatott rendszer is ebbe a kiegészítő szerepkörbe illeszkedik.

5. A megvalósított szenzorhálózat bemutatása

A bemutatott rendszer célja, hogy viszonylag alacsony költséggel, kis méretű végpontokkal és automatizált adatkezeléssel olyan mérőhálózat épüljön, amely lakótéri és más emberközelű környezetek mikroklímáját képes folyamatosan követni, alkalmas a már meglévő nagyobb léptékű mérőhálózatokat lokálisan kiegészítve, ezzel sűrűbb helyi térbeli lefedettséget és nagyobb időbeli felbontást nyújtani. [29][53][67][68]

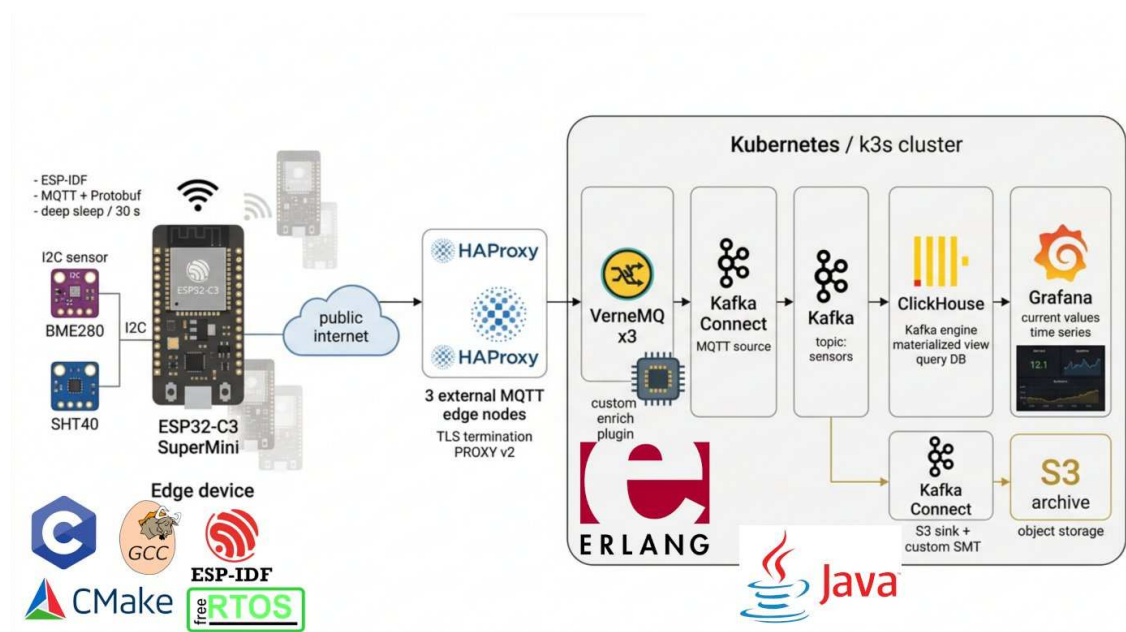


Fig. 11. a megvalósított szenzorhálózat

5.1 A rendszertervezés céljai és szempontjai

5.1.1 A rendszertervezés alapvető célja

A cél olyan többpontos mérőrendszer kialakítása volt, amely a valós használati környezetben is működőképes, gazdaságosan többszörözhető és módszertanilag megfelelő adatokat szolgáltat. A fő kérdés az volt, hogy létrehozható-e ilyen rendszer viszonylag egyszerű és alacsony költségű elemekből, és képes-e emberi beavatkozás nélkül a mikroklíma szempontjából fontos paraméterek folyamatos megfigyelésére. [37][67][29]

5.1.2 Költséghatékonyság és reprodukálhatóság

A megfelelő működés mellett az egyik legfontosabb tervezési szempont a költséghatékonyság volt, és az, hogy a rendszer minél több példányban megvalósítható legyen a rendelkezésemre álló erőforrásokból. Ezért széles körben elterjedt és hozzáférhető hardver-komponenseket használtam.

Az is fontos cél volt, hogy a megvalósított rendszer adaptálható és felhasználható legyen mindenki számára. Emiatt csak nyílt forráskódú szoftveres megoldásokat használtam; és a saját fejlesztésű szoftverek teljes forráskódját közzéteszem online MIT licenccel⁶. [72] Ez módszertani szempontból is lényeges, mert egy kutatási célú monitoringrendszer értékét növeli, ha működése nem „fekete doboz”, hanem dokumentált, visszakövethető és szükség esetén újra alkalmazható. [27][29]

5.1.3 Alacsony energiaigény és autonóm működés

Egy mérőhálózat gyakorlati használhatóságát jelentősen javítja, ha a végpontok alacsony energiafogyasztásúak, így később akár elemes vagy más korlátozott energiaellátású környezetben is üzemeltethetők. Így rövid aktív mérési ciklusokat és a mérések között mélyalvó üzemmódot használó megoldást választottam. [73][74]

5.1.4 Megbízhatóság és adatminőségi szempontok

A megbízhatóság növelése érdekében a rendszer nem egyetlen hőmérséklet- és páratartalom-érzékelőre épül, hanem két eltérő gyártótól származó szenzort alkalmaz. Ez a megoldás alkalmas arra, hogy a mérések belső konzisztenciáját javítsa, és segítsen az esetleges anomáliák felismerésében. [71][67]

5.1.5 Skálázhatóság és hálózati szemlélet

A cél olyan architektúra kialakítása volt, amivel tetszőlegesen nagy számú végpont működtethető. Így a végpontok „sorozat-gyárthatóak” és a felhőoldali infrastruktúra minden eleme a terhelésnek megfelelően horizontálisan skálázható. Egyetlen pont mérése gyakran csak korlátozott képet ad, míg több, egységesen működő végpontból már térbeli összehasonlítás is lehetségessé válik. [27][29]

5.2 A választott paraméterek és szenzorok

5.2.1 A mért paraméterek kiválasztásának szempontjai

A rendszer központi változói a levegő hőmérséklete, a relatív páratartalom és a légnyomás lettek. E három paraméter a mikroklíma leírásának klasszikus alapváltozói közé tartozik, és a Meteorológiai Világszervezet ajánlásaiban is kiemelt szerepet kapnak a meteorológiai állapot, a lokális környezeti viszonyok és az idősoros változások jellemzésében. [2]

6 Az MIT licenc megengedi a szabad, tetszőleges felhasználást, egyetlen feltételt támaszt: hivatkozni kell az eredeti szerzőt. (a tudományos publikációkhoz hasonlóan) [72]

5.2.2 A BME280 és az SHT40 együttes alkalmazása

A konkrét szenzorválasztás során két eltérő gyártótól származó digitális MEMS-érzékelő együttes alkalmazása mellett döntöttem. A Bosch BME280 a hőmérséklet, a relatív páratartalom és a légnyomás mérésére képes integrált környezeti szenzor, míg a Sensirion SHT40 a hőmérséklet és a relatív páratartalom mérésére szolgáló, kis fogyasztású digitális érzékelő. [22][23] A két szenzor közös használatának legfontosabb előnye, hogy a hőmérséklet és a páratartalom esetében részleges redundanciát biztosítanak. Ez módszertani szempontból értékes, mert lehetővé teszi a mérések belső keresztellenőrzését, és segít elkülöníteni a valós környezeti változásokat az esetleges szenzorspecifikus eltérésektől.

5.2.3 Kiegészítő állapotjellemzők: Wi-Fi jelerősség és chiphőmérséklet

A rendszer nemcsak a klasszikus környezeti paramétereket rögzíti, hanem két kiegészítő állapotjellemzőt is: a Wi-Fi kapcsolat jelerősségét (RSSI), valamint az ESP32-C3 mikrokontroller chip belső hőmérsékletét. Ezek nem tekinthetők elsődleges környezeti változóknak, de a végpont működésének értelmezésében hasznos metaadatot jelentenek.

5.3 A BME280 és az SHT40 szenzorok a rendszerben

5.3.1 A BME280 szenzor

A Bosch BME280 egy integrált digitális környezeti szenzor, amely egyetlen tokban egyesíti a hőmérséklet-, relatív páratartalom- és légnyomásmérést. [22] A jelen rendszerben a BME280 szerepe kettős: egyrészt biztosítja a három alapváltozó közül mindhárom mérését, másrészt referenciajellegű összevetési pontot ad a hőmérséklet- és páratartalom-méréshez az SHT40 szenzor mellett.

A szenzor gyárilag kalibrált, a szükséges kompenzációs együtthatókat a belső memóriájában tárolja, így a mikrokontroller oldalán nincs szükség külső analóg jelfeldolgozásra vagy külön kalibrációs elektronikára. [22]

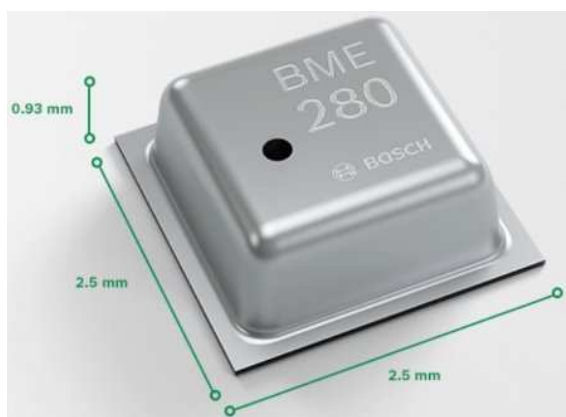


Fig. 12. Bosch BME280 külső nézete

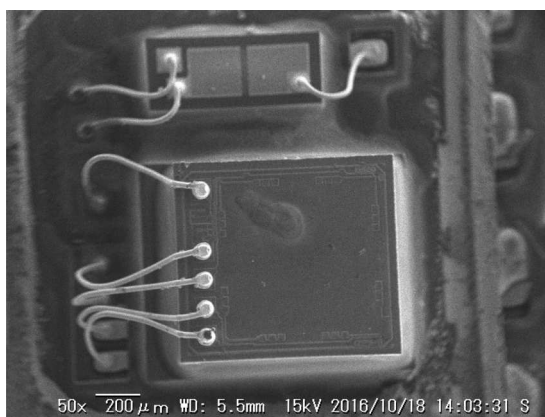


Fig. 13. Bosch BME280 szerkezete pásztázó elektronmikroszkóppal

5.3.2 Az SHT40 szenzor

A Sensirion SHT40 digitális hőmérséklet- és páratartalom-érzékelő. [23]

A jelen projektben az SHT40 elsődleges szerepe a hőmérséklet- és páratartalom-adatok második, a BME280-tól független forrásának biztosítása.

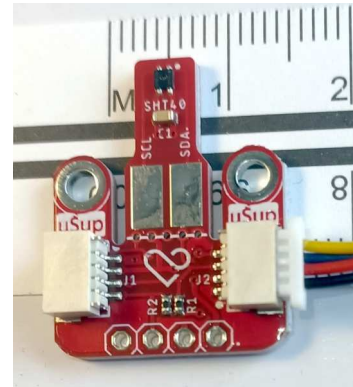


Fig. 14.
SHT40 szenzor modul

5.4 A mérőegység hardverfelépítése

5.4.1 Az ESP32-C3 SuperMini fejlesztőpanel és az ESP32-C3 chip

A mérőegység központi eleme egy ESP32-C3 SuperMini fejlesztőpanel. A választás fő oka az volt, hogy ez a panel kis méretben és igen kedvező áron biztosítja a szükséges funkciókat.

Az ESP32-C3 egy alacsony fogyasztású, modern mikrokontroller, amelyet az Espressif Systems fejlesztett ki. Kifejezetten IoT (Internet of Things) alkalmazásokhoz tervezték, ahol fontos a vezeték nélküli kommunikáció, az energiahatékonyság és a biztonság. A 32 bites RISC-V architektúrájú 80-160 MHz órajelű processzort ~400 KB RAM-ot Wi-Fi és I2C busz vezérlőt is tartalmazó ESP32-C3 chip feladata a teljes mérési ciklus vezérlése. Ide tartozik a szenzorok inicializálása, a mérési eredmények kiolvasása, a rádiós kapcsolat kezelése, az adatcsomag összeállítása és elküldése, valamint a mély alvás állapotból való ébredés időzítése.[73]

5.4.2 Az I²C busz és a szenzorok bekötése

A mérőegységben a BME280 és az SHT40 közös I²C buszra csatlakozik, ami csökkenti a vezetékezés és a csatlakozások számát, ami a kis méretű és a megbízhatóság szempontjából előnyös. [75]

A BME280 a 0x77, az SHT40 pedig a 0x44 I²C busz címen érhető el. A firmware az I²C-buszt közös absztrakciós rétegen keresztül kezeli: először létrehozza a buszt, majd a két érzékelőt külön eszközként regisztrálja rajta. Ez később könnyen bővíthető, további I²C-szenzorok ugyanebbe a logikába illeszthetők. [75]

5.5 A szoftver és az adatkommunikáció működési logikája

5.5.1 A firmware fejlesztési környezete és szerkezete

A mérőegységen futó szoftver az Espressif ESP-IDF nyílt forráskódú keretrendszerre épülő firmware. A FreeRTOS⁷ alapú ESP-IDF olyan fejlesztési környezetet biztosít, amely a hálózati kommunikáció, a perifériakezelés, az energiatakarékosság és az alkalmazáslogika megvalósításához alapszintű szolgáltatásokat nyújt. [74][76]

A projekt szerkezete moduláris: külön komponens kezeli az I²C-buszt, a Wi-Fi kapcsolatot, a BME280 és az SHT40 szenzorokat, a belső chiphőmérséklet mérését, valamint az MQTT-adatküldést és a Protobuf-kódolást. Ez a tagolás fejlesztési és dokumentációs szempontból is előnyös. [77][78]

A mikrokontroller projekt ANSI C⁸ nyelven íródott, CMake-alapú felépítésben. Ez lehetővé teszi, hogy ugyanaz az alaprojekt több, részben eltérő hardverű végponthoz is felhasználható legyen. [79][80][81][82]

5.5.2 A mérési ciklus általános logikája

A firmware működése ismétlődő, időzített mérési ciklusokra épül. A végpont a két mintavétel között mélyalvó állapotban van, majd ébredés után rövid aktív szakaszban elvégzi az adatgyűjtést és a továbbítást. A jelen implementációban a normál mérési periódus 30 másodperc.

A bekapcsolás utáni első induláskor a program véletlen, 0 és 15 másodperc közötti kezdeti késleltetést alkalmaz, hogy áramszünet után a végpontok ne egyszerre próbáljanak csatlakozni. A mérési ciklusban a Wi-Fi kapcsolat elindítása a szenzorok kiolvasásával párhuzamosan történik, ami csökkenti az aktív idő hosszát és az energiafogyasztást.

⁷ A *FreeRTOS* nyílt forráskódú, kis erőforrásigényű valós idejű operációs rendszer, amelyet elsősorban mikrokontrollereken és beágyazott rendszerekben használnak időkritikus feladatok kezelésére. [76]

⁸ A *C nyelv* általános célú, strukturált programozási nyelv, amelyet nagy teljesítményű rendszerszoftverek, operációs rendszerek és beágyazott alkalmazások fejlesztésére széles körben használnak. [80]

5.5.3 Wi-Fi-kezelés és a gyors újracsatlakozás logikája

A program nem minden ébredésnél indul teljes hálózati kereséssel, hanem megpróbálja felhasználni a korábbi sikeres kapcsolódásból származó információkat. A rendszer a sikeres Wi-Fi kapcsolódás paramétereit RTC memóriában tárolja, és a következő ébredéskor ezekkel próbál gyorsabban újracsatlakozni. Ha a gyors újracsatlakozás sikertelen, visszatér a teljes kereséshez. [74]

5.5.4 A szenzoradatok kiolvasása és előfeldolgozása

A szoftver a mérési ciklus során először inicializálja az I²C-buszt, majd a konfiguráció szerint engedélyezett szenzorokat.

A BME280 esetében a program ellenőrzi a chipazonosítót, kiolvassa a gyári kalibrációs adatokat. Azt tapasztaltam, hogy ébredés után a legelső mérések hibája nagyobb, mint a későbbieké. Emiatt minden mérési ciklusban a három paraméterhez külön-külön először egy gyors „előmelegítő” kisebb túlmintavételezésű mérés-sorozatot végzünk, aminek az eredményét figyelmen kívül hagyjuk. Közvetlenül ezután maximális túlmintavételezéssel végzem az érdemi mérést.

A firmware a SHT40 nagy pontosságú mérési parancsát használja, kivárja a konverzióhoz szükséges időt, majd ellenőrzi a visszaadott adatok CRC hibajavító kódját, és hiba esetén a mintát már a végponton kiszűri.

A mikrokontroller belső chiphőmérséklete az ESP-IDF driverén keresztül, külön modul segítségével kerül kiolvasásra.

A kiolvasott adatok lebegőpontos értékeként kerülnek a további feldolgozásba. Ha valamelyik szenzorolvasás sikertelen, a program azt nem tekinti érvényes mérésnek. Az adatminőség szempontjából jobb egy hiányzó vagy opcionálisan nem jelen lévő mező, mint egy hibás, de numerikusan mégis értelmezhető érték továbbítása.

5.5.5 Protobuf adatszerkezet és MQTT-küldés

A projekt adatkommunikációja Protobuf-alapú⁹ bináris üzenetsémát használ. A firmware egy Reading típusú üzenetet állít össze, amely tartalmazza a mérőegység egyedi MAC-címéből származtatott azonosítót, a Wi-Fi RSSI-értéket, a chip belső hőmérsékletét, valamint opcionális alüzenetekként a BME280 és az SHT40 mérési eredményeit.

9 A *Protobuf* adatszerkezet a Google által fejlesztett *Protocol Buffers* formátum szerinti, tömör és hatékony bináris adatleírás, amely strukturált adatok tárolására és rendszerek közötti továbbítására szolgál. [77]

Az MQTT¹⁰ üzenet küldésekor a kliens kapcsolódik a brókerhez, elküldi az üzenetet, megvárja a publikálás visszaigazolását, majd bontja a kapcsolatot. Sikertelen küldés esetén a firmware egyszeri újrapróbálkozást is végrehajt.

5.5.6 Hibakezelés, visszaállítás és energiatakarékos működés

Ha a Wi-Fi kapcsolat vagy az MQTT-küldés többször egymás után sikertelen, a firmware RTC memóriában számlálja a hálózati hibákat. Hat egymást követő sikertelen ciklus után a végpont 30 másodperces várakozás helyett helyett 15 perces alvásra vált. Ez megakadályozza, hogy tartós hálózati hiba esetén az eszköz folyamatosan nagy energiaigénnyel próbálkozzon újra.

5.6 A felhőoldali adatfogadás, adattárolás és vizualizáció áttekintése

5.6.1 A használt Kubernetes platform

A felhőoldali komponensek a francia OVH szolgáltató által OpenStack környezetben futtatott virtuális számítógépeken működnek, fizikailag a közvetlenül a gravelines-i atomerőmű melletti, egy korábbi fém italos dobozokat gyártó üzemből kialakított adatközpontban. [83]

Az összes virtuális gép Alpine Linux operációs rendszert futtat, és „infrastructure as code (IaC)” automatizálással kerültek telepítésre és konfigurálásra Ansible-vel.

```
$ kubectl get node -owide
```

NAME	STATUS	ROLES	AGE	VERSION	OS-IMAGE	KERNEL-VERSION	CONTAINER-RUNTIME
control1	Ready	control-plane,etcd	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1
control2	Ready	control-plane,etcd	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1
control3	Ready	control-plane,etcd	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1
worker1	Ready	kafka,worker	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1
worker2	Ready	kafka,worker	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1
worker3	Ready	kafka,worker	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1
worker4	Ready	kafka,worker	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1
worker5	Ready	kafka,worker	83d	v1.35.0+k3s1	Alpine Linux v3.23	6.18.5-0-virt	containerd://2.1.5-k3s1

Fig. 15. a Kubernetes cluster nodejai

A rendszer alapját három „control-plane” és öt „worker” számítógépből álló k3s klaszter adja. A control-plane gépek 8 GB memóriával, 4 virtuális CPU-maggal és 75 GB SSD tárhellyel, a worker csomópontok pedig 12 GB memóriával, 6 virtuális CPU-maggal és 100 GB SSD tárhellyel rendelkeznek. A k3s klaszter telepítéséhez használt Ansible-megoldás kódját közzé tettem. [84]

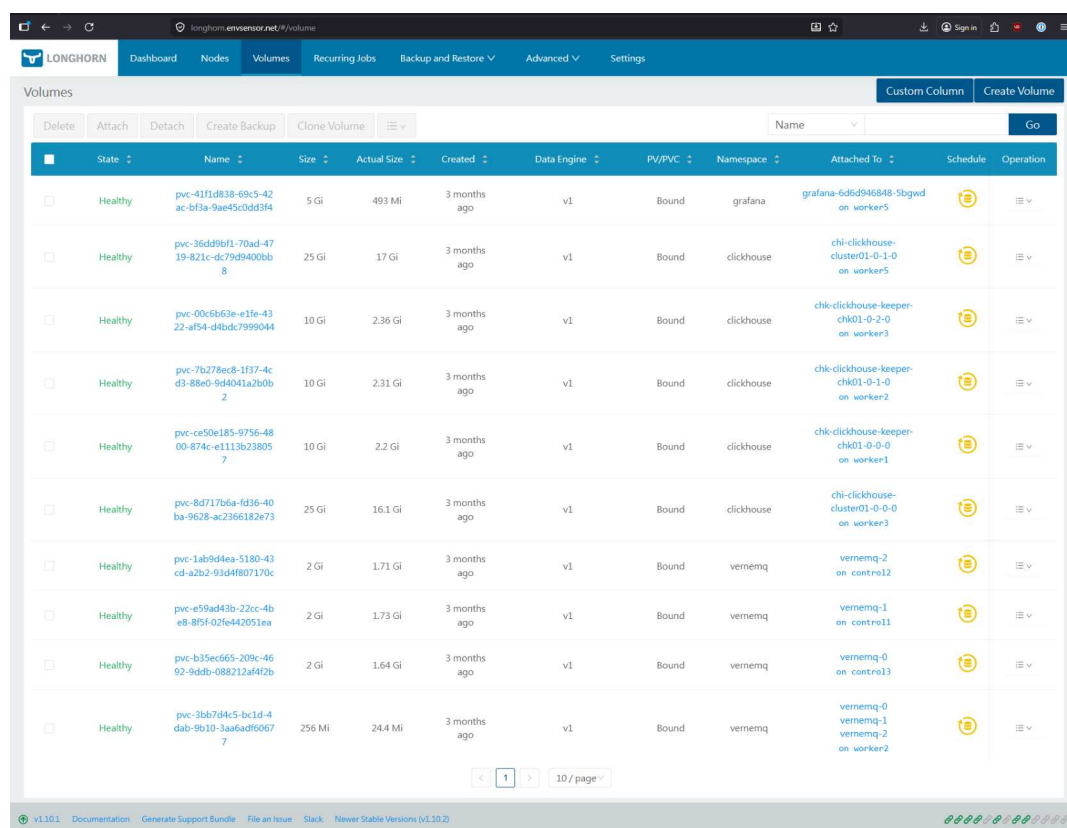
A klaszterhez két további, a Kubernetesen kívül futó kisebb OVH virtuális gép is kapcsolódik HAProxy¹¹ szerepkörben. Az egyik a Kubernetes API külső elérését

10 Az MQTT publish-subscribe elven működő üzenetküldési protokoll, amelyet alacsony sávszélességű vagy erőforrás-korlátozott eszközök közötti megbízható adatkommunikációra terveztek. [78]

11 A HAProxy nagy teljesítményű, nyílt forráskódú terheléelosztó és proxy szerver, amely a hálózati forgalom elosztását, valamint a szolgáltatások magas rendelkezésre állását segíti. [90][91]

biztosítja, a másik pedig a nyilvános szolgáltatások, például a Grafana és az egyéb webes felületek belépési pontjaként szolgál.

A legtöbb Kubernetesben futó komponens számára Longhorn biztosítja az adattárolást; a Longhorn a worker node-ok helyi VM-lemezein kialakított ext4 partíciókat használja. [85] A Kafka brókerek a worker node-okon, és a Kafka KRaft controller-ek a control-plane node-okon saját, helyi Persistent Volume-okat kapnak XFS partíciókon. Ez a megoldás azt szolgálja, hogy a legtöbb komponens egységesen kezelt, replikált és rugalmas tárolást kapjon, miközben a Kafka teljesítményérzékeny tárolása közvetlen, helyi lemezen marad.



State	Name	Size	Actual Size	Created	Data Engine	PV/PVC	Namespace	Attached To	Schedule	Operation
Healthy	pvc-41f1d838-69c5-42ac-bf3a-9ae45c0dd3f4	5 Gi	493 Mi	3 months ago	v1	Bound	grafana	grafana-6d6d946848-5bgwd on worker5		
Healthy	pvc-36cd9bf1-70ad-4719-821c-dc79d9400bb8	25 Gi	17 Gi	3 months ago	v1	Bound	clickhouse	chi-clickhouse-cluster01-0-1-0 on worker5		
Healthy	pvc-00c6b63e-e1fe-4322-a154-d4bd7999044	10 Gi	2.36 Gi	3 months ago	v1	Bound	clickhouse	chk-clickhouse-keeper-chk01-0-2-0 on worker3		
Healthy	pvc-7b278ec8-1f37-4cd3-88e0-9d4041a2b0b2	10 Gi	2.31 Gi	3 months ago	v1	Bound	clickhouse	chk-clickhouse-keeper-chk01-0-1-0 on worker2		
Healthy	pvc-ce50e185-9756-4800-874c-e1113b238057	10 Gi	2.2 Gi	3 months ago	v1	Bound	clickhouse	chk-clickhouse-keeper-chk01-0-0-0 on worker1		
Healthy	pvc-8d717b6a-fd36-40ba-9628-ac2366182e73	25 Gi	16.1 Gi	3 months ago	v1	Bound	clickhouse	chi-clickhouse-cluster01-0-0-0 on worker3		
Healthy	pvc-1ab9d4ea-5180-43cd-a2b2-93d4f807170c	2 Gi	1.71 Gi	3 months ago	v1	Bound	vermemq	vermemq-2 on control2		
Healthy	pvc-e59ad43b-22cc-4be8-8f9f-02fe442051ea	2 Gi	1.73 Gi	3 months ago	v1	Bound	vermemq	vermemq-1 on control1		
Healthy	pvc-b35ec665-209c-4692-9ddb-088212af4f2b	2 Gi	1.64 Gi	3 months ago	v1	Bound	vermemq	vermemq-0 on control3		
Healthy	pvc-3bb794c5-bc1d-4dab-9b10-3aafad60677	256 Mi	24.4 Mi	3 months ago	v1	Bound	vermemq	vermemq-0 vermemq-1 vermemq-2 on worker2		

Fig. 16. a Longhorn kötetek listája

5.6.2 A felhőoldali architektúra telepítési szemlélete

A Kubernetesben futó teljes rendszer telepítését egy Bash szkript végzi, amely komponensenként egy-egy Helm chartot telepít meghatározott sorrendben, míg a klaszteren kívüli HAProxy gépek konfigurálása külön Ansible playbookkal történik. [86][87] Ez a megközelítés azért előnyös, mert a teljes infrastruktúra deklaratív, ismételhető és verziókezelhető formában áll rendelkezésre. A Helm chartok egymással összefüggő Kubernetes-erőforrások csomagolt leírását adják, az Ansible playbookok pedig ismételhető, többgépes konfigurációkezelést tesznek lehetővé. [88][89]

A komponensek replika száma sztenderd Kubernetes eszközökkel skálázható az esetleg növekvő terhelésnek megfelelően. A ténylegesen futó komponensek Kubernetes podjai:

- 3 VerneMQ MQTT broker
- 3 Kafka Connect worker
- 5 Kafka broker
- 3 Kafka controller
- 2 ClickHouse replika
- 3 ClickHouse Keeper példány
- 1 Grafana példány

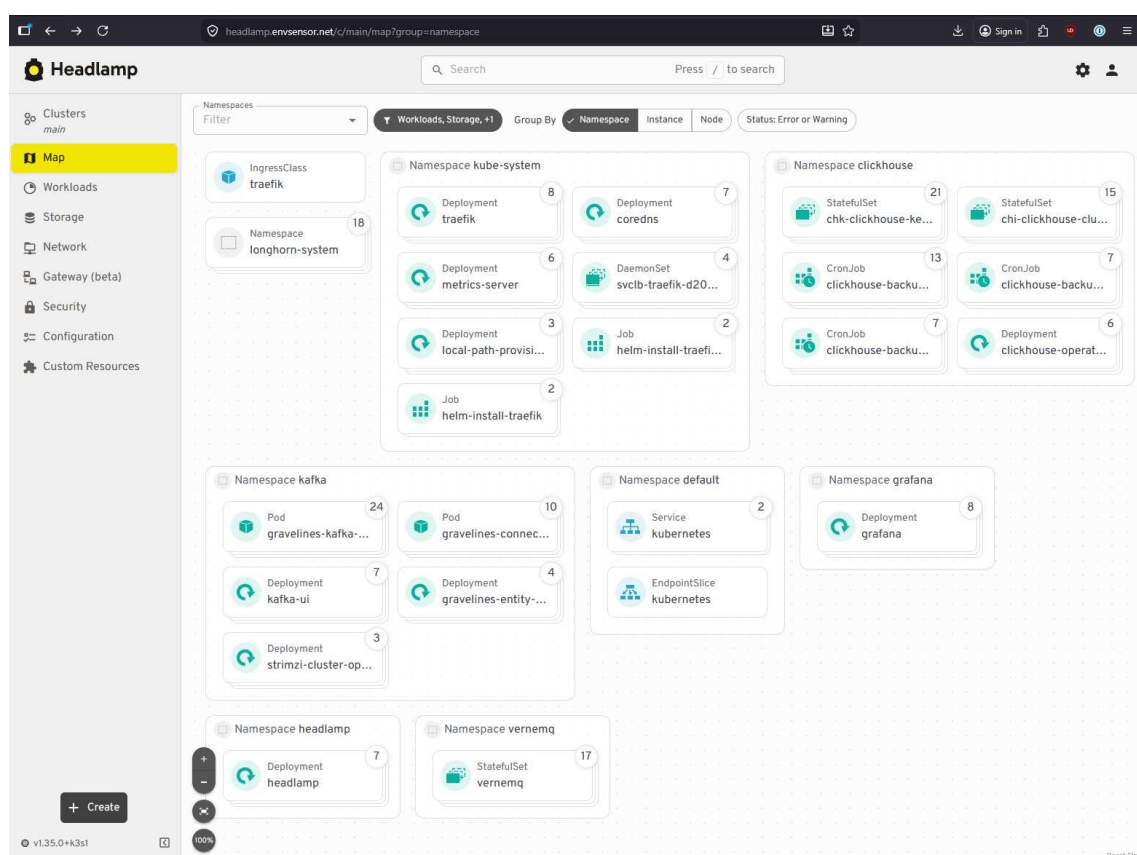


Fig. 17. a használt Kubernetes erőforrások

5.6.3 Külső MQTT belépési réteg: HAProxy, TLS és a kliens-IP megőrzése

A szenzor-végpontok nem közvetlenül a Kubernetesben futó MQTT brokerhez kapcsolódnak, hanem először három, a klaszteren kívül elhelyezett HAProxy edge node valamelyikéhez. Ennek az elrendezésnek több előnye van: egyrészt a nyilvános internet felől csak az edge réteg látható, így a broker klaszter közvetlenül nem elérhető. Másrészt a TLS-terminálás, a kapcsolatkorlátozás és a terheléelosztás így egy jól kontrollálható külső rétegben összefogható. Emellett a HAProxy a továbbított üzenetekhez hozzáteszi a PROXY protocol v2 fejlécet, ami elérhetővé teszi a küldő

kliens publikus IP címét a Kubernetesen belüli MQTT brókernek. [90] A jelen rendszerben ez azért különösen fontos, mert a brokeroldali gazdagítás során a kliens IP-címe is bekerül a később tárolt metaadatok közé. Így az IP-cím nem a proxy, hanem a tényleges szenzorvégpont hálózati eredetét tükrözi.

A TLS-tanúsítványokat szintén a HAProxy edge rétegben kezeljük. Egy külön, a klaszteren belül rendszeresen futó időzített szkript újítja meg a Let's Encrypt TLS tanúsítványokat, majd ezeket szinkronizálja a három külső HAProxy gépre. [91]

5.6.4 A VerneMQ broker réteg és az üzenetek előfeldolgozása

A MQTT bróker réteget három VerneMQ pod adja, amiket egy hárompéldányos Kubernetes StatefulSet futtat a control-plane node-okon. [92][78][76]

A broker csak azonosítással fogad üzeneteket. Egyedi VerneMQ inicializáló szkript hozza létre az MQTT-felhasználókat és az ACL-szabályokat egy megosztott hitelesítési állományban, amit egy Longhorn kötetten ér el a három VerneMQ pod. Az egyes szenzorvégpontok csak a saját MQTT topic-alágukba írhatnak. [92][78]

A szenzorok topic-jaiba beérkező MQTT üzeneteken egy egyedi Erlang¹² nyelven írt VerneMQ plugin előfeldolgozást végez: [93][92][94][78]

1. Dekódolja a szenzor-végpont protobuf üzenetét a bejövő MQTT topic-okból, a beágyazott BME280- és SHT40 részstruktúrákat ellapítja (flattening), majd egy új, lapos protobuf üzenetet állít elő,
2. majd hozzáadja a HAProxy-tól kapott PROXY v2 fejlécből származó eredeti IPv4 vagy IPv6 formában értelmezett kliens forráscímet, a fogadási időbélyeget, az eredeti topic nevét, a felhasználónevet, a kliensazonosítót, és a broker azonosítóját,
3. és végül egy metaadatokkal gazdagított „enriched” MQTT topicba visszahelyezi az üzenetet.

¹² Az *Erlang* párhuzamos és elosztott rendszerek fejlesztésére tervezett programozási nyelv, amelyet eredetileg távközlési alkalmazásokhoz hoztak létre, és különösen megbízható, hibátűrő működéséről ismert. [93]

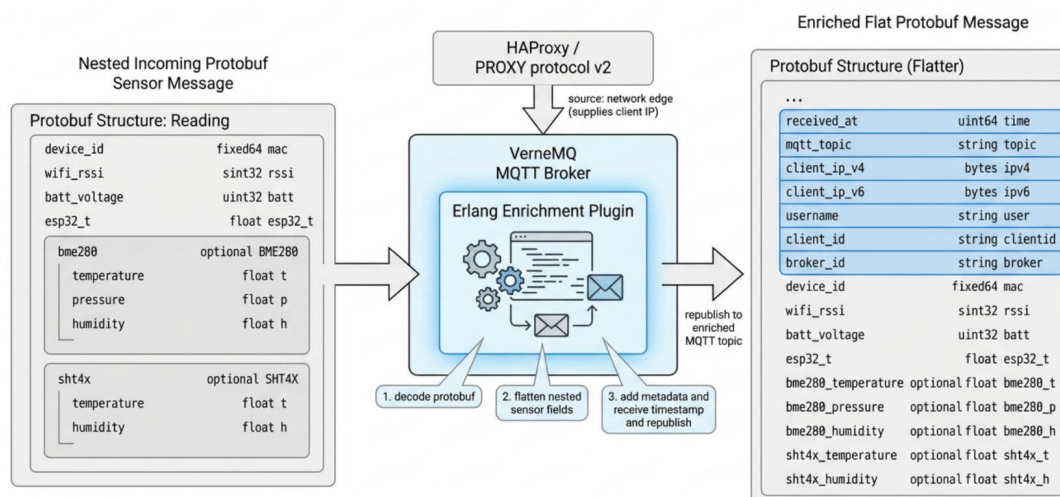


Fig. 18. a VerneMQ Erlang plugin adatfeldolgozása

Ezzel a további integráció egyszerűbbé válik, mert a Kafka, a ClickHouse, az adattavi export és a Grafana felé már ez az egységes, lapos mezőstruktúra továbbítható, ami közvetlenül felhasználható. A broker tehát ebben a megoldásban nem passzív „átjátszó”, hanem az adatfolyam aktív szemantikai előfeldolgozó rétege.

5.6.5 Kafka és Kafka Connect

A VerneMQ után a következő fő réteg az Apache Kafka¹³. A futó környezetben a Kafka Strimzi operátorral menedzselt klaszterként működik, ötpéldányos brokerkészlettel és három controllerrel. Elsődleges szerepe a fogadási és a feldolgozási oldal közötti elválasztás és a tetszőlegesen nagy számú beérkező üzenet igen jól skálázható befogadása, a feldolgozás alatt az üzenetek pufferelése. Ez azért előnyös, mert az adatfogadás, az integráció, az archiválás és az analitikai feldolgozás egymástól függetlenül skálázható és újraindítható. [105]

¹³ Az *Apache Kafka* elosztott üzenetközvetítő és eseményfolyam-kezelő platform, amely nagy mennyiségű adat valós idejű továbbítására és feldolgozására szolgál. Szinte korlátlanul skálázható. [106]

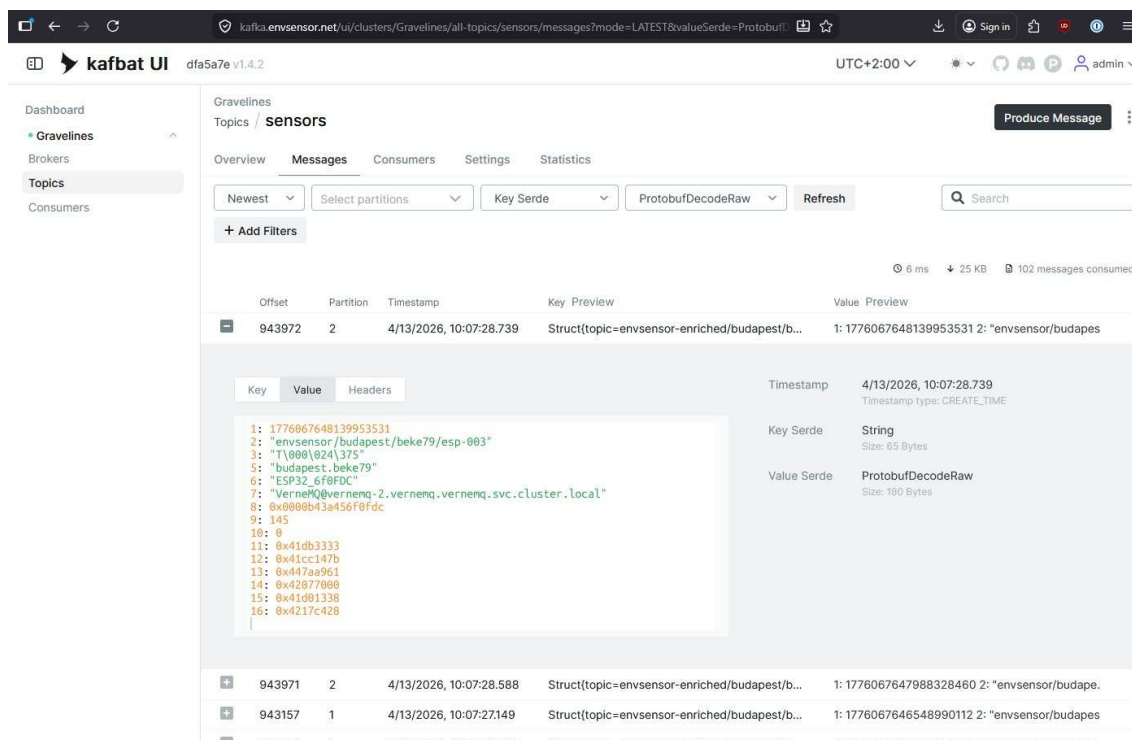


Fig. 19. Kafka üzenetek

5.6.5.1 Kafka Connect elosztott üzemmódban

A Kafka és a külső rendszerek közötti integrációt Kafka Connect végzi. Distributed módban a Kafka Connect worker példányok a konfigurációkat, állapotokat és topic offszeteket magában a Kafka klaszterben tárolják, és több worker együtt alkot egy skálázható, hibatűrő Connect klasztert. A jelen megvalósításban három Kafka Connect worker fut, ami szükség szerint skálázható. [95] A Kafka Connect source connector a VerneMQ brókeren az előfeldolgozott üzeneteket tartalmazó envsensor-enriched/# topicfára iratkozik fel, és a bejövő MQTT üzenet protobuf formátumú bináris tartalmát nyers bájtömbként írja a Kafka sensors topicjába.[77]

Ez fontos tervezési döntés: a Kafka-topikban nem JSON, nem CSV és nem előzetesen szétszedett oszlopszerkezet tárolódik, hanem továbbra is a tömör, hatékony, típusos protobuf rekord. [77]

5.6.5.2 A saját Kafka Connect image és az egyedi SMT szerepe

A Kafka Connect worker példányok nem egy általános, gyári image-ből indulnak, hanem egy saját építésű image-ből, ami a Strimzi Kafka-alapimage-re épül, és három fontos elemet tartalmaz:

- az MQTT source connector plugint (forrás illesztő bővítményt),
- a Confluent S3 sink connector plugint (nyelő illesztő bővítményt),
- valamint a saját fejlesztésű Java nyelven¹⁴ írt Single Message Transform-ot (SMT).

A Kafka Connect réteg a rendszerben nem egy „kész dobozos” komponens, hanem célzottan az adott adatfolyamhoz igazított egyedi megoldás.[96][97][98][105]

A Kafka Connect Single Message Transform-ok (SMT) az üzeneteket Connecten való áthaladás közben módosítják, és egyedi SMT is készíthető saját Java-osztály implementálásával. A saját SMT az érkező protobuf bináris üzeneteket dekódolja, majd egyetlen RFC4180-kompatibilis CSV adattábla-sort állít elő belőlük, majd az eredményt gzip tömörítésű CSV-táblázat fájlkként írja ki külső OVH S3-kompatibilis objektumtárolóba. [96][99][100][97][98]

5.6.6 ClickHouse alapú adattárolás és lekérdezés

5.6.6.1 Az online ingest útvonal

A felhőoldali rendszer elsődleges analitikai adattára a ClickHouse DB¹⁵. A futó környezetben a ClickHouse két replikából álló klaszterként működik egy shardon belül, a replikáció és a koordináció háttérét pedig három ClickHouse Keeper példány biztosítja. Longhorn alapú perzisztens köteteken tárolják az adatokat a ClickHouse Kubernetes podok. [85] A telepítést Helm charttal feltett Altinity ClickHouse operátor vezérli, ami lehetővé teszi a klaszter deklaratív leírását, a replikák menedzsmentjét és az automatizált inicializáló szkriptek futtatását.

A ClickHouse nem közvetlenül MQTT-ről vagy Kafka Connect sinkből kapja az adatokat „push jelleggel”, hanem maga olvassa a Kafka topicot a Kafka table engine segítségével „pull művelettel”. A ClickHouse Kafka table engine-t olvasva a

14 A *Java* általános célú, objektumorientált programozási nyelv és platform, amelyet hordozhatóságra terveztek, ezért a Java-programok különböző operációs rendszereken is futtathatók a Java virtuális gép segítségével. [99][100]

15 A *ClickHouse DB* oszloporientált adatbázis-kezelő rendszer, amelyet nagy mennyiségű adatok gyors analitikai lekérdezésére és feldolgozására terveztek. [101][102]

ClickHouse Materialized View segítségével írható a végleges (lekérdezésre szolgáló) adattábla. Így a rekordok táblába beszúrása idejére helyezhető át a tábla lekérdezésének a számítási költségének jelentős része, (a várható lekérdezésekhez megfelelő előfeldolgozással).[101][102]

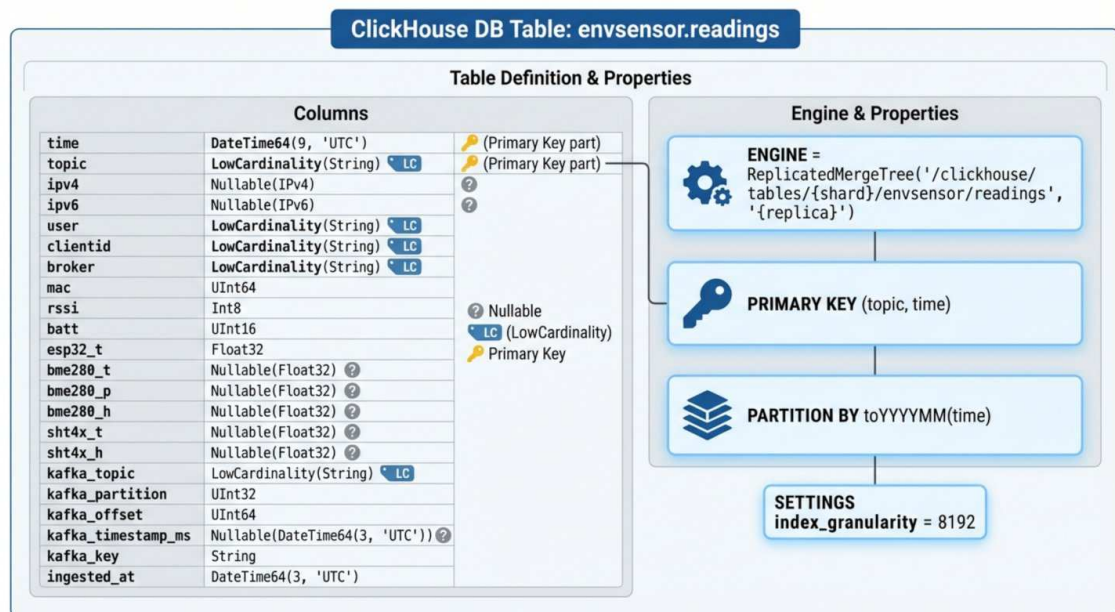


Fig. 20. az „envsensor.readings” ClickHouse DB adatbázis tábla szerkezete

A ClickHouse inicializáló szkript létrehozza a envsensor.readings_kafka Kafka-engine táblát, amely a sensors MQTT topicból olvassa a protobuf rekordokat, majd egy materialized view ezt az adatfolyamot a tényleges envsensor.readings táblába irányítja. A végső tábla ReplicatedMergeTree engine-t használ, időalapú particionálással és (topic, time) kulcsolással.

5.6.6.2 A párhuzamos adattárolás és a mentések

Az online, MergeTree-alapú adattárolás mellett a rendszer egy párhuzamos, objektumtárolóra épülő ágot is fenntart. Ennek célja nem az elsődleges dashboard-kiszolgálás, hanem a hosszabb távú archiválás, a nyers export és a független visszaellenőrizhetőség. A Kafka Connect S3 sink által előállított gzip tömörített CSV-fájlok OVH S3-kompatibilis objektumtárolóba kerülnek. Így ugyanaz az adatfolyam kétféle tárolási formában is jelen van: egy gyors, online lekérdezésre optimalizált MergeTree táblában, valamint egy fájlalapú adattárolási ágon.

A megbízhatóságot a rendszer további mentési mechanizmusokkal is növeli. A ClickHouse-hoz külön backup megoldást készítettem, amely napi teljes és óránkénti inkrementális mentéseket készít.

5.6.7 Vizualizáció Grafanával

A rendszer felhasználói oldalát a Grafana biztosítja. A Grafana nem pusztán egy grafikonrajzoló eszköz, hanem dashboard-alapú megjelenítési környezet, amelyben a panelek egy lekérdezés és egy vizualizációs forma összekapcsolásából állnak. [103] [104]

A jelen megoldásban a Grafana hozzákapcsolódik a ClickHouse adatbázishoz, vagyis a dashboardok közvetlen SQL adatbázis lekérdezéseken alapulnak. A Grafana telepítése és az egyedi dashboard konfigurálása is Helm charttal történik (kézi lépés nélkül).

Emellett természetesen tetszőleges Clickhouse adatbázis-lekérdezésekkel is lehet az adatokat elemezni.

5.7 A mérési kampány és a vizsgálati elrendezés

Összesen 13 db szenzor-végpontot készítettem és telepítettem két helyszínen:

- 8 db egy budapesti panellakás különböző helyiségeiben és erkélyén
- 5 db Legénd községben egy vályogház szobáiban, teraszán és a nyári konyhában

A beltéri szenzor-egységeket készülékház nélkül, a táp-vezeték végére szabadon felfüggesztve helyeztem el.

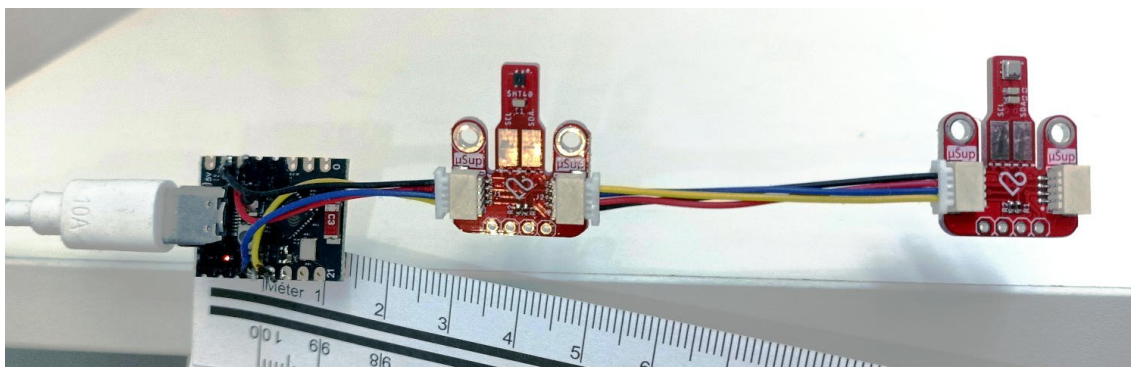


Fig. 21. beltéri szenzor-végpont

A kültéri egységek ESP32 mikrokontroller részét IP55 védetségű légmentesen zárt készülékházba tettem, a BME280 és SHT40 szenzorokat az I²C buszra 40cm-es vezetékkel csatlakoztattam. A szenzorokat kis Stevenson ház szerű átszellőző műanyag árnyékoló-esővédő belsejébe tettem a vezeték végére.



Fig. 22. kültéri szenzor-végpont

6. Eredmények és értelmezésük

2026. január 19-től kezdve gyűjtöm a mérések eredményeit 30 másodpercenként, amiket április közepéig több, mint 2,7 millió adatbázis rekordban (táblázatsorban) tároltam el.

6.1 A rendszer működőképességének igazolása

2026 január és április között folyamatosan üzemelt a rendszer érdemi beavatkozás nélkül. A szenzor végpontok néhány áramszünet és internet szolgáltatás-kiesést leszámítva folyamatosan szolgáltatott mérési adatokat. A cloud adatfogadó rendszer folyamatosan működött, a mérési eredmények lekérdezhetőek a Clickhouse adatbázisból. Az adatok Apache Kafkából, és az S3 CSV „data lake-ből” is olvashatóak.

6.2 A szenzorok mérési eredményeinek összevetése

A rendelkezésre álló, több, mint 2,7 millió mérés már tekinthető kellően nagy számúnak ahhoz, hogy statisztikai eszközökkel vizsgálva őket, már megalapozott következtetések legyenek levonhatóak.

Az egynél több (esetünkben 2) szenzor mérései együtt alkalmasak a mért értékek kölcsönös validálására és szenzorhibák felismerésére. A gyakorlatban érdemes a szenzorok értékeinek az átlagát a mérési eredménynek tekinteni.

6.2.1 Bosch BME280 és Sensirion SHT40 hőmérséklet szenzorok

Az alábbi Clickhouse adatbázis lekérdezéssel összehasonlítottam a két gyártó hőmérséklet szenzorának azonos időben és helyen végzett méréseit. A két mért hőmérséklet különbsége alapján század Celsius fokos sávonként megszámláltam, hány mérési eredmény esett az adott sávba.

```
SELECT intDiv(ROUND((sht4x_t - bme280_t) * 1000), 10) / 100 AS sav,  
       MIN(sht4x_t - bme280_t) AS min_elteres,  
       MAX(sht4x_t - bme280_t) AS max_elteres,  
       COUNT() AS darab  
FROM envsensor.readings  
WHERE ABS(sht4x_t - bme280_t) < 1  
GROUP BY intDiv(ROUND((sht4x_t - bme280_t) * 1000), 10) / 100  
ORDER BY intDiv(ROUND((sht4x_t - bme280_t) * 1000), 10) / 100 ASC;
```

Fig. 23. ClickHouse lekérdezés: hőmérséklet eltérés eloszlás

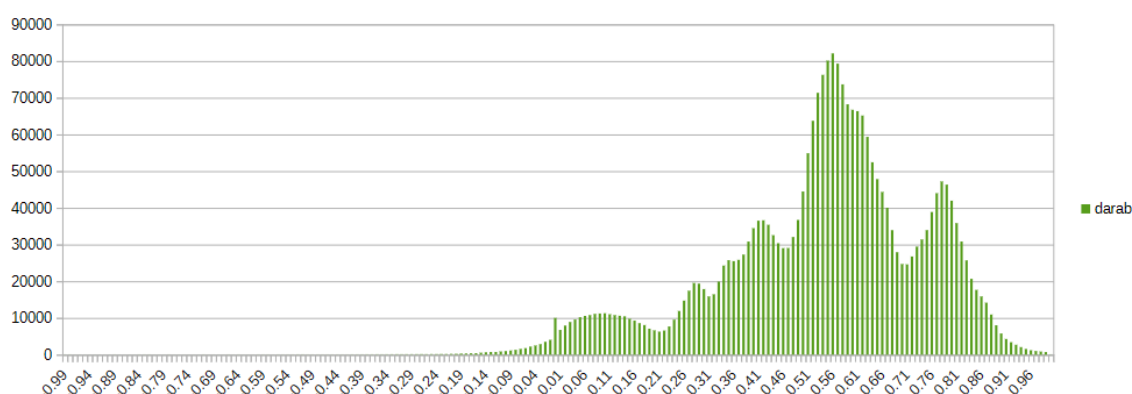


Fig. 24. grafikon: hőmérséklet eltérés eloszlás

Kijelenthetjük, hogy a mérések nagy többségében konzisztensen 0,4-0,8 °C-al többet mért a Sensirion SHT40 szenzor, mint a Bosch BME280. Ez feltételezhetően részben kalibrációs különbség miatt van. Az adott hőmérséklet-eltérés századfok sávba eső mérések darabszámát grafikonon ábrázolva érdekes mintázat rajzolódik ki.

Megvizsgáltam, hogy függ-e a hőmérséklettől a két hőmérséklet szenzor mérése közötti eltérés mértéke, az alábbi lekérdezéssel. A két szenzor mérésének átlaga alapján 1 °C-os fokos sávonként kiszámítottam az adott sávba eső a két gyártó közti mérési eltérések átlagát.

```
SELECT FLOOR(ROUND((bme280_t + sht4x_t) / 2)) AS egesz_celsius,  
       MIN(bme280_t - sht4x_t) AS min_elteres,  
       MAX(bme280_t - sht4x_t) AS max_elteres,  
       AVG(bme280_t - sht4x_t) AS avg_elteres,  
       COUNT() AS darab  
FROM envsensor.readings  
WHERE ABS(bme280_t - sht4x_t) < 1  
GROUP BY FLOOR(ROUND((bme280_t + sht4x_t) / 2))  
ORDER BY FLOOR(ROUND((bme280_t + sht4x_t) / 2)) ASC;
```

Fig. 25. ClickHouse lekérdezés: hőmérséklet eltérés hőmérséklet függése

Jól látható, hogy az eltérés 19-24 °C között a legkisebb. Ez feltételezhetően abból adódik, hogy mindkét gyártó arra törekedett, hogy „szobahőmérsékleten” legyen a legjobb a hőmérőjének a pontossága.

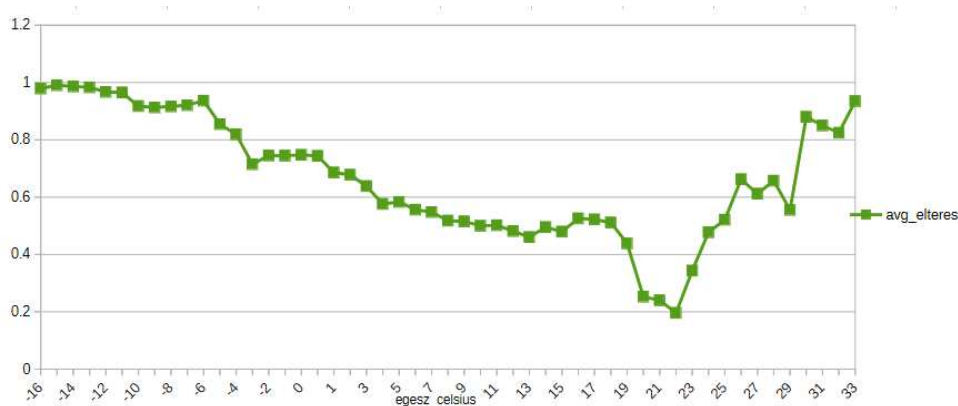


Fig. 26. grafikon: a hőmérséklet eltérés hőmérséklet függése

6.2.2 Az ESP32 mikrokontrollerbe épített hőmérő

Az ESP32-C3 mikrokontrollerben megvalósított hőmérő közvetlenül saját magának a szilícium chipnek a hőmérsékletét méri, kb. 1 °C pontossággal. A műanyag tokozású mikrokontrollert a saját működésének a hőtermelése fűti, és a környező levegő hűti. A szenzor végpontok mikrokontrollerei ugyanazt a programot futtatták a teljes mérési periódus alatt, (és azonosan működtek), így a mikrokontrollerek hőtermelését tekinthetjük állandónak.

Megvizsgáltam, hogy mennyire lehet következtetni a környező levegő hőmérsékletére a mikrokontroller chip hőmérsékletéből. A két szenzor átlagának és a mikrokontroller hőmérőjének a különbsége szerinti 0,1 °C-os sávonként összeszámoltam, hány mérés esik az egyes sávokba. (A három zárt készülékházast egységet nem vettem figyelembe.)

```
SELECT intDiv(ROUND((esp32_t - (bme280_t + sht4x_t) / 2) * 1000), 100) / 10 AS sav,
      MIN(esp32_t - (bme280_t + sht4x_t) / 2) AS min_elteres,
      MAX(esp32_t - (bme280_t + sht4x_t) / 2) AS max_elteres,
      COUNT(*) AS darab
FROM envsensor.readings
WHERE
  mac NOT IN
    (123939710278768,
     110948462765404,
     80225407000928)
  AND ABS(esp32_t - (bme280_t + sht4x_t) / 2) < 14
GROUP BY intDiv(ROUND((esp32_t - (bme280_t + sht4x_t) / 2) * 1000), 100) / 10
ORDER BY intDiv(ROUND((esp32_t - (bme280_t + sht4x_t) / 2) * 1000), 100) / 10 ASC;
```

Fig. 27. ClickHouse lekérdezés: ESP32 hőmérséklet szenzor értékelése

A mikrokontroller a levegő hőmérsékleténél maximum 7 fokkal volt melegebb, és az esetek túlnyomó többségében a levegőénél 2,5-5,5 °C-al magasabb sávon belül volt a hőmérséklete.

Ez alapján kijelenthető, hogy külső környezeti szenzor nélkül, pusztán a mikrokontrollerbe épített hőmérőt használva is lehet a környezeti levegő hőmérsékletre következtetni, körülbelül 3-6 °C pontossággal.

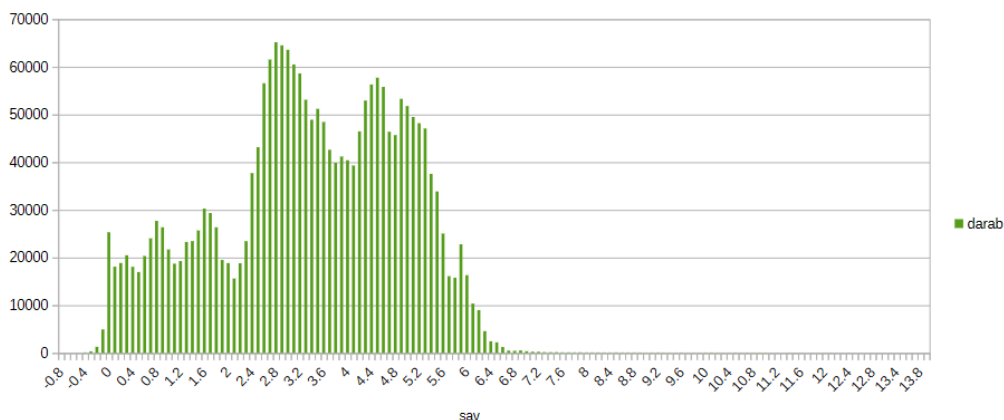


Fig. 28. grafikon: ESP32 hőmérséklet szenzor értékelése

6.2.3 Páratartalom

A két gyártó hőmérséklet szenzorjához hasonló módon a két relatív páratartalom érzékelőt is összehasonlítottam.

```
SELECT intDiv(ROUND((sht4x_h - bme280_h) * 100), 10) / 10 AS sav,
       MIN(sht4x_h - bme280_h) AS min_elteres,
       MAX(sht4x_h - bme280_h) AS max_elteres,
       COUNT() AS darab
FROM envsensor.readings
GROUP BY intDiv(ROUND((sht4x_h - bme280_h) * 100), 10) / 10
ORDER BY intDiv(ROUND((sht4x_h - bme280_h) * 100), 10) / 10 ASC;
```

Fig. 29. ClickHouse lekérdezés: páratartalom eltérés eloszlás

Az elvárásainknak megfelelően jóval pontatlanabb módon mérhető a páratartalom, mint a hőmérséklet, a két szenzor egymástól maximum +/- 10% eltéréssel mér, az esetek nagy többségében +/- 6%-on belül.

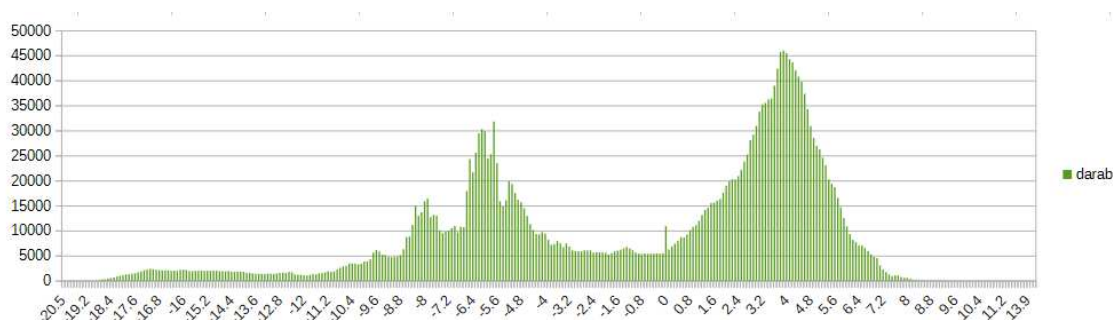


Fig. 30. grafikon: páratartalom eltérés eloszlás

6.3 Rövid idősoros esettanulmányok

6.3.1 Angyalföld, erkély

Angyalföldön egy nyugati fekvésű erkélyen, kültéren elhelyezett szenzorokkal mért 7 napnyi adatot együtt megjelenítve Grafana-val jól látható a napi hőingás, és a vele együtt mozgó relatív páratartalom. Ugyan a mikrokontroller zárt készülékházban van, mégis jól láthatóan korrelál a mikrokontroller chipbe épített hőmérő mérése a levegő mért hőmérsékletével.

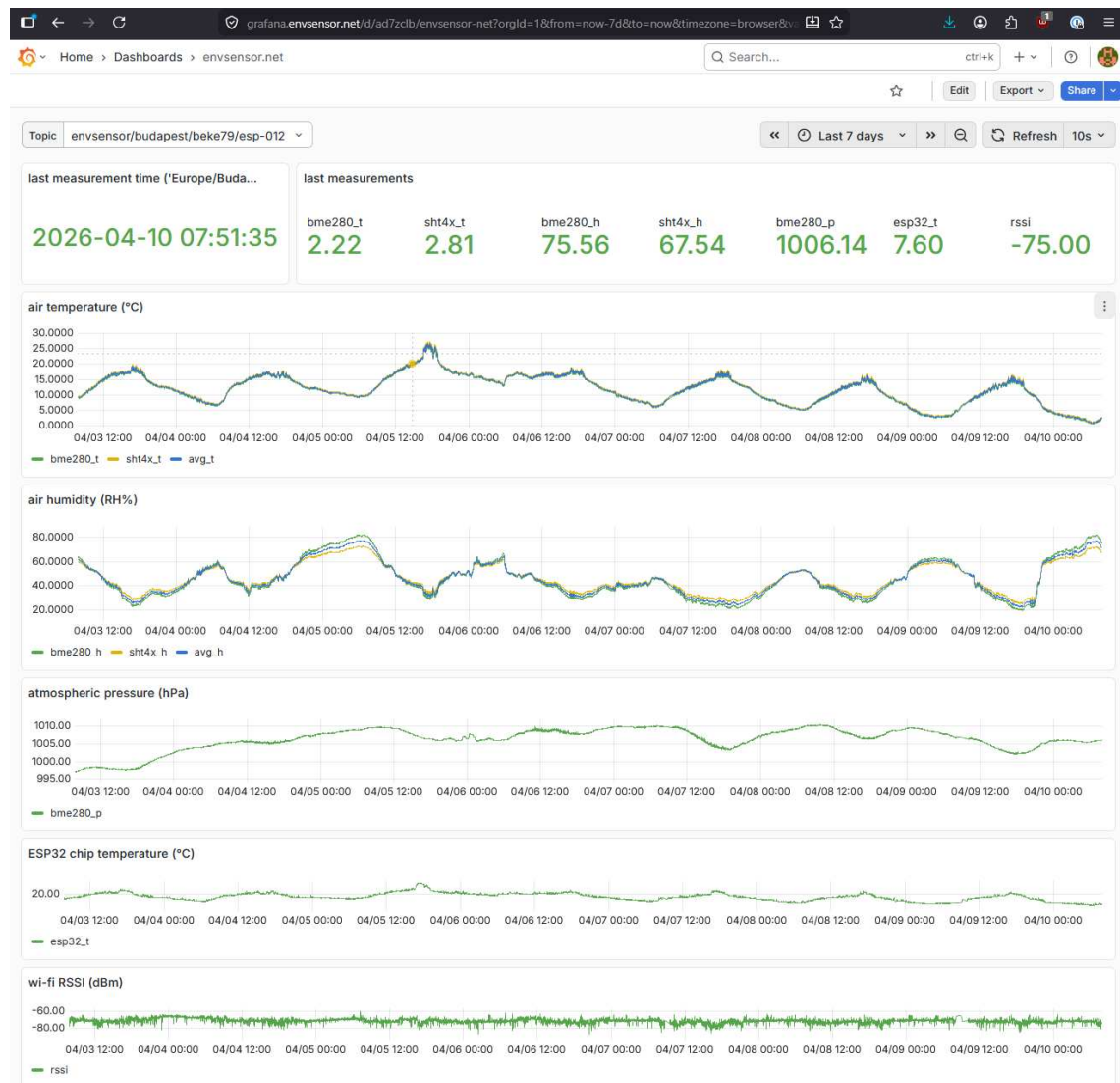


Fig. 31. idősor: 7 napnyi szabadtéri mérés együtt megjelenítve

6.3.2 Konyha

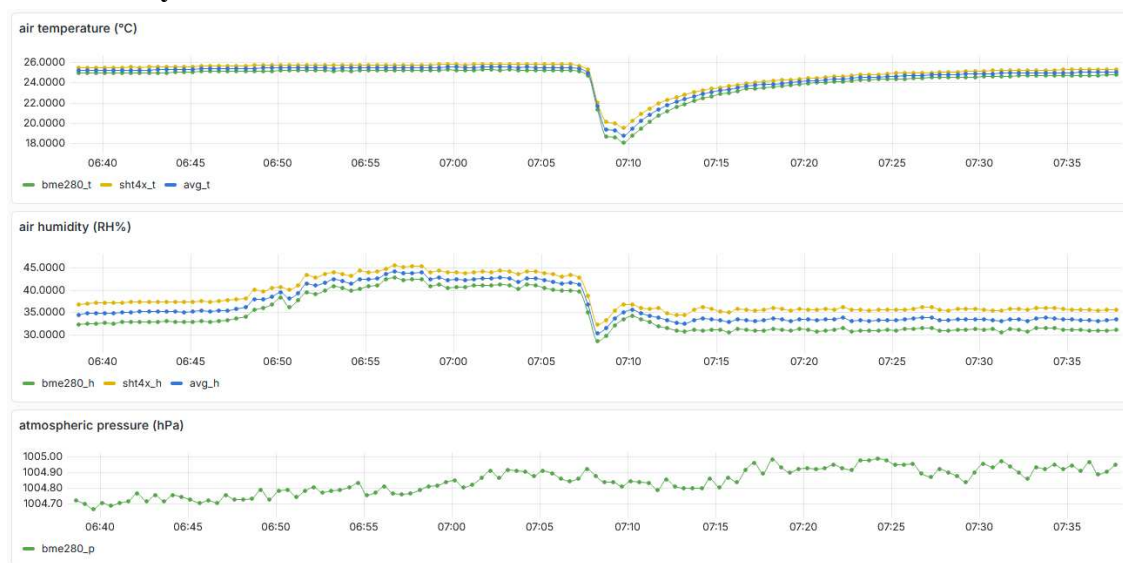


Fig. 32. idősor: reggeli konyhai tevékenység

Egy panellakás „amerikai konyhás” nappalijába, a tűzhelytől kb. 3 méterre telepített szenzor mérésein jól nyomon követhető a reggeli konyhai tevékenység: 6:47-től kávét főzünk és reggelit sütünk kb. 10 percen át, és 7:07-7:10 között ablakot nyitva szellőztetünk.

6.3.3 Fürdőszoba

A fürdőszobai szenzorokkal jól nyomon követhető a fürdőszoba használata:

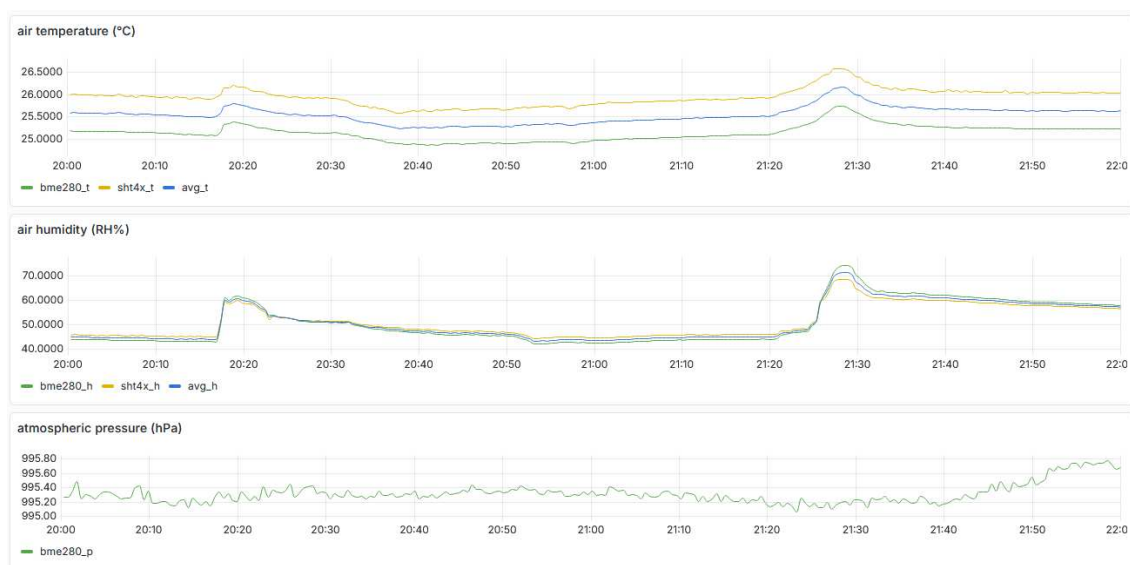


Fig. 33. idősor: fürdőszoba használat

20:17-kor becsuktuk a fürdőszoba ajtaját, és elkezdtünk vizet tölteni a kádba, majd 20:20-20:32-ig fürödtek a gyerekek. 21:21-kor újra becsuktuk az ajtót, és friss vizet töltöttünk a kádba. 21:25-21:28 között haját mostam meleg zuhannyal majd kinyitottam az ajtót, végül 21:32-kor résnyire behajtottam a fürdő ajtót.

7. Összegzés, következtetések és kitekintés

7.1 A fő megállapítások összefoglalása

A dolgozat célja kettős volt: egyrészt a környezeti paraméterek mérésének tudományos és technikai hátterének áttekintése, másrészt egy saját fejlesztésű, többpontos, alacsony költségű szenzorhálózat megvalósítása és értékelése. Az irodalmi áttekintés alapján jól látható, hogy a hőmérséklet, a relatív páratartalom és a légnyomás a mikroklíma leírásának klasszikus alapváltozói, és ezek ma is központi szerepet játszanak mind a meteorológiai, mind az épített környezeti megfigyelésekben.

A gyakorlati megvalósítás eredményei alapján megállapítható, hogy a létrehozott rendszer működőképes. A szenzorvégpontok stabilan szolgáltatnak adatot, a felhőoldali adatfogadó, adattároló és megjelenítő megoldás megbízhatóan működött, és a mérésekből felépített ClickHouse adatbázis lehetővé tette a rugalmas, tetszőleges lekérdezések futtatását, így a rendszer nemcsak adatgyűjtésre, hanem érdemi kiértékelésre is alkalmasnak bizonyult.

7.2 A megvalósított szenzorhálózat tanulságai

A rendszer egyik legfontosabb tanulsága, hogy az alacsony költségű, digitális szenzorokra épülő többpontos mérés valóban a gyakorlatban is használható megoldást jelenthet helyi mikroklíma-folyamatok vizsgálatára. A hőmérséklet- és páratartalom-idősorok, és az egyes helyszínek közötti különbségek jól mutatták, hogy a rendszer képes rövid idejű környezeti események és használati mintázatok érzékelésére is.

A két különböző gyártótól származó szenzor összevetése is hasznosnak bizonyult. Az azonos helyen és időben végzett mérések alapján a rendszer nemcsak adatot gyűjtött, hanem lehetőséget adott a belső összehasonlításra és az eltérések értelmezésére is. Az eredmények alapján a rendszer alkalmasnak látszik a környezeti állapotok követésére, az idősoros változások megfigyelésére és a mérési anomáliák felismerésére, még akkor is, ha az abszolút pontosság további kalibrációval javítható lenne.

Az idősoros példákban az is jól látszik, hogy a rendszer nemcsak statikus állapotok leírására alkalmas, hanem a valós használati események - például szellőztetés, főzés vagy fürdőszobai páratelhelés - jól felismerhetők vele. Vagyis kijelenthető, hogy egy olcsó, többpontos rendszer is képes lehet értelmezhető és gyakorlatilag hasznos környezeti információt szolgáltatni.

7.3 Gyakorlati hasznosítási lehetőségek

A jelenlegi megvalósításban a szenzorvégpontok 5 V egyenáramú tápellátással működnek, így egyszerű USB-s telefon-töltővel is üzemeltethetők. Így már most is alkalmasak olyan helyeken való használatra, ahol folyamatos áramellátás rendelkezésre áll, elsősorban épületekben vagy azok közvetlen közelében.

A rendszert lakótéri környezetben teszteltem, de a jelenlegi kialakítás alapján más felhasználási területeken is értelmezhető lehet. Ilyenek lehetnek például üvegházak, terráriumok, kisebb ipari vagy laboratóriumi helyiségek, raktárak, kutatási terek vagy más olyan környezet, ahol a hőmérséklet és a páratartalom folyamatos követése gyakorlati előnyt jelent. A rendszer különösen ott lehet hasznos, ahol nem a hivatalos meteorológiai pontosság, hanem a helyi állapotváltozások folyamatos és sűrű térbeli követése a fontosabb.

7.4 Továbbfejlesztési irányok

A rendszer további fejlesztésének egyik legfontosabb iránya a kalibráció és az adatminőség további javítása. Bár a jelenlegi szenzorok gyárilag kalibráltak, a hosszabb távú megbízhatóság és az abszolút összehasonlíthatóság növelése érdekében célszerű lenne saját kalibrálást (és ismétlődő időszakonként újrakalibrálást) is végezni.

A rendszer a jövőben kiegészíthető lehet például napsugárzás-, hangnyomás(zaj)-, talaj- és víz-hőmérséklet-, szén-dioxid- vagy VOC-érzékelőkkel, ami bővíthetné a monitorozott és környezeti paraméterek körét és értelmezési lehetőségeit.

Gyakorlati szempontból fontos fejlesztési irány az autonóm energiaellátás megvalósítása is. Napelem és akkumulátor vagy szuperkapacitás alkalmazásával a végpontok már nemcsak épületek közvetlen közelében, hanem a Wi-Fi-eszköztől jellemzően 100-200 méter távolságig, akár kültéri környezetben is könnyebben telepíthetők lennének. Emellett egy egyedi tervezésű, időjárásállóbb és hőtechnikailag átgondoltabb készülékház tovább javíthatná a rendszer terepi használhatóságát és hosszú távú stabilitását.

8. Hivatkozások

- [1] William Thomson. (1891). *Popular Lectures and Addresses* (2nd ed., Vol. 1, pp. 80–81). Macmillan and Co. „Electrical Units of Measurement” [Institution of Civil Engineers, London, 1883. május 3-i előadás].
<https://books.google.hu/books?id=rCwkVYKL2rIC&pg=PA80>
- [2] World Meteorological Organization. (2025). *Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume I – Measurement of Meteorological Variables (WMO-No. 8)*.
<https://library.wmo.int/records/item/41650-guide-to-instruments-and-methods-of-observation>
- [3] *Műszaki lexikon* (3 kötetes). (1974). Akadémiai Kiadó.
- [4] Grodzinsky, E., & Sund Levander, M. (2020). History of the thermometer. In E. Grodzinsky & M. Sund Levander (Eds.), *Understanding Fever and Body Temperature*. Palgrave Macmillan.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-21886-7_3
- [5] Museo Galileo. (n.d.). *Thermoscope*.
<https://catalogue.museogalileo.it/object/Thermoscope.html>
- [6] Simonyi Károly. (1986). *A fizika kultúrtörténete a kezdetektől a huszadik század végéig*. Gondolat Kiadó.
- [7] Museo Galileo. (n.d.). *The Thermometers of the Accademia del Cimento*.
<https://catalogue.museogalileo.it/section/ThermometersAccademiaCimentoArtScienceGlassware.html>
- [8] John D. Barrow. (1994). *A fizika vilásképe*. Akadémiai Kiadó.
- [9] James Burke. (n.d.). *Biliárdeffektus*. Alexandra Kiadó.
- [10] Purdue University, Chemistry Department. (n.d.). *John Dalton – Dalton’s Law of Partial Pressures*.
<https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/history/dalton.html>
- [11] Science Museum Group Collection. (n.d.). *De Saussure Hair Hygrometer, 1815–1841*.
<https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co54855/de-saussure-hair-hygrometer-1815-1841>
- [12] Smithsonian National Museum of American History. (n.d.). *Assmann Psychrometer*.
https://americanhistory.si.edu/collections/object/nmah_1167488
- [13] Tatár József. (1992). *Nem villamos mennyiségek mérése villamos úton*. Műszaki Könyvkiadó.
- [14] Szalai István. (2020). *Méréstechnika: Természettudományi alapoktól az ipari alkalmazásokig*. Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ.
<https://mk.uni-pannon.hu/images/Dokumentumok/jegyzetek/EFOP-3.4.3-16-2016-00009/M%C3%A9r%C3%A9stechnika.pdf>
- [15] Met Office. (n.d.). *How We Measure Temperature*.
<https://weather.metoffice.gov.uk/guides/observations/how-we-measure-temperature>
- [16] Morvai Krisztián. (2010). *Az árnyékolók hatása a léghőmérséklet-mérések és a hosszú távú adatsorok megbízhatóságára*.
https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MorvaiKrisztian_2010.pdf
- [17] Dunkel Zoltán. (2018). A meteorológiai műszerek fejlődése a „kezdetektől” a közelmúltig (Előszó a modern műszerekhez). *Léghő*, 63(4), 156.
<http://www.mettars.hu/wp-content/uploads/2019/05/3072eb909b287766294687f1af81b0f3-legkor-2018-4.pdf>

- [18] Avduevsky, V. S., et al. (1971). Soft Landing of Venera 7 on the Venus Surface and Preliminary Results of Investigations of the Venus Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*.
https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/28/2/1520-0469_1971_028_0263_slovot_2_0_co_2.xml
- [19] Analog Devices. (n.d.). *IC Temperature Sensors Find the Hot Spots*.
<https://www.analog.com/en/resources/design-notes/ic-temperature-sensors-find-the-hot-spots.html>
- [20] Mészáros Róbert. (2013). *Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek* Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/05/Meteorologiai_muszerek_READER.pdf
- [21] Bosch Sensortec. (n.d.). *Pressure Sensors Overview*.
<https://www.bosch-sensortec.com/en/products/environmental-sensors/pressure-sensors/>
- [22] Bosch Sensortec. (n.d.). *BME280 Datasheet*.
<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>
- [23] Sensirion. (n.d.). *Datasheet – SHT4x*.
https://sensirion.com/media/documents/33FD6951/67EB9032/HT_DS_Datasheet_SHT4x_5.pdf
- [24] NIST. (n.d.). *Metrological Traceability: Frequently Asked Questions and NIST Policy*.
<https://www.nist.gov/metrology/metrological-traceability>
- [25] Váradiné Szarka Angéla, Hegedűs János, Bátorfi Richárd, & Unhauzer Attila. (2007). *Méréstechnika* Széchenyi István Egyetem – Miskolci Egyetem.
https://moodle.jrobi.hu/BOCI/moodle/Merestechnika/Merestechnika_jegyzet.pdf
- [26] Bosch Sensortec. (n.d.). *BME280 HSMI*.
https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/handling_soldering_mounting_instructions/bst-bme280-hs006.pdf
- [27] Domokos Endre. (2014). *Környezetvédelmi monitoring*. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Tudástár, XXV. kötet.
<https://tudastar.mk.uni-pannon.hu/anyagok/25-Monitoring.pdf>
- [28] Domokos Endre & Pokol György. (2012). *Környezeti analitika*. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Tudástár, 5. kötet.
https://tudastar.mk.uni-pannon.hu/anyagok/05-Kornyezeti_analitika.pdf
- [29] Sachit Mahajan. (2022). *Design and Development of an Open-Source Framework for Citizen-Centric Environmental Monitoring and Data Analysis*. Scientific Reports.
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-18700-z>
- [30] *Vízgazdálkodási lexikon*. (1970). Mezőgazdasági Kiadó.
- [31] Varga-Haszonits Zoltán & Varga Zoltán. (2006). *A makro- és mikroklíma hatása a növénytermelésre (Fitoklimatológia)*. Nyugat-Magyarországi Egyetem.
- [32] Günter D. Roth. (n.d.). *Meteorológiáról mindenkinek: Általános időjárási helyzetek, időjárás-előrejelzés, időjárási jelenségek*. Magyar Könyvklub.
- [33] Reis Frigyes, Várfalvi János, & Zöld András. (2007). *Az épületfizika alapjai*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építésmérnöki Kar, Műegyetemi Kiadó.
<https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/595895b0-1c12-4a5d-8f29-9c8a6379987b>
- [34] Brown, P. (2014). Basics of Evaporation and Evapotranspiration. *Backyards & Beyond*. University of Arizona Cooperative Extension.
<https://cales.arizona.edu/backyards/sites/cales.arizona.edu.backyards/files/14summer.pdf>

- [35] Hupuczai Júlia. (n.d.). *Precíziós öntözés és vízgazdálkodás*.
https://eta.bibl.u-szeged.hu/5329/9/EFOP343_AP6MGK_Preciziosontozes_olasolecke_Hupuczai_9_20210312.pdf
- [36] Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2005). *Biology* (7th ed.). Pearson.
- [37] Thomas Parkinson, Alex Parkinson, Richard de Dear. (2019). *Continuous IEQ Monitoring System: Performance Specifications and Thermal Comfort Classification*. Building and Environment.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318307522>
- [38] A. Martín-Garín, J.A. Millán-García, A. Bañri, J. Millán-Medel, J.M. Sala-Lizarraga (n.d.). *Environmental Monitoring System Based on an Open Source Platform and the Internet of Things for a Building Energy Retrofit*. Energy and Buildings.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517300729>
- [39] ASHRAE. (n.d.). *Indoor Environmental Quality (IEQ) Resources*.
<https://www.ashrae.org/technical-resources/ieq-resources>
- [40] ASHRAE. (n.d.). *Standards 62.1 & 62.2*.
<https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
- [41] European Commission. (n.d.). *EU Air Quality Standards*.
https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en
- [42] EUR-Lex. (2008). *Az Európai Parlament és a Tanács 2008/50/EK irányelve (2008. május 21.) a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>
- [43] EUR-Lex. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (recast)*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024L1275>
- [44] HSE. (n.d.). *Temperature in the Workplace: Managing Workplace Temperatures*.
<https://www.hse.gov.uk/temperature/employer/managing.htm>
- [45] EUR-Lex. (1989). *Council Directive 89/654/EEC of 30 November 1989 Concerning the Minimum Safety and Health Requirements for the Workplace*.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31989L0654>
- [46] Pongrácz Rita & Bartholy Judit (szerk.). (2013). *Alkalmazott és városklimatológia* Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.elterreader.hu/media/2014/04/Alkalmazott_es_varosklimatologia_READER.pdf
- [47] Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.
<https://journals.ametsoc.org/abstract/journals/bams/93/12/bams-d-11-00019.1.xml>
- [48] European Environment Agency. (n.d.). *Universal Thermal Climate Index (UTCI), 1979–2020*.
<https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/thermal-comfort-indices-universal-thermal-climate-index-1979-2019>
- [49] Peter Winkler. (2023). *The Early Meteorological Network of the Societas Meteorologica Palatina (1781–1792): Foundation, Organization, and Reception*.
<https://www.vliz.be/imisdocs/publications/391849.pdf>
- [50] World Meteorological Organization. (n.d.). *History of IMO and WMO*.
<https://wmo.int/about-wmo/history-of-imo-and-wmo>
- [51] Randy Cerveny. (2023). The History of the World Meteorological Organization. *Weatherwise*, 76(2), 34–40.
<https://doi.org/10.1080/00431672.2023.2159222>;
<https://sci-net.xyz/10.1080/00431672.2023.2159222>

- [52] Lindgrén, S., & Neumann, J. (1980, December). Great Historical Events That Were Significantly Affected by the Weather. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61(12), 1570–1583.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1980\)061%3C1570:GHETWS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1980)061%3C1570:GHETWS%3E2.0.CO;2)
https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/61/12/1520-0477_1980_061_1570_ghetws_2_0_co_2.xml
- [53] World Meteorological Organization. (n.d.). *WMO Integrated Global Observing System*.
<https://wmo.int/activities/wmo-integrated-global-observing-system-wigos/wmo-integrated-global-observing-system>
- [54] World Meteorological Organization. (n.d.). *Global Observing System (GOS)*.
<https://wmo.int/activities/global-observing-system-gos/global-observing-system-gos>
- [55] WMO Community. (n.d.). *Observation Components of the Global Observing System*.
<https://community.wmo.int/observation-components-of-global-observing-system>
- [56] Bartholy Judit, Mészáros Róbert, Geresdi István, Matyasovszky István, Pongrácz Rita, & Weidinger Tamás. (2013). *Meteorológiai alapismeretek* Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/05/Meteorologiai_alapismeretek_READER.pdf
- [57] World Meteorological Organization. (n.d.). *Global Basic Observing Network (GBON)*.
<https://wmo.int/activities/global-basic-observing-network-gbon>
- [58] ICAO Postal History. (n.d.). *ICAO and the World Meteorological Organization*.
https://www.icao.int/sites/default/files/postalhistory/icao_and_the_world_meteorological_organization.htm
- [59] HungaroMet. (n.d.). *Repülőtéri észlelések kódleírása – METAR – Repülési rendszeres időjárás-jelentő távirat*.
https://aviation.met.hu/download.php?fn=METAR_SPECI_leiras.pdf
- [60] HungaroMet. (n.d.). *A SIGMET, GAMET, TAF, METAR táviratokban, a szignifikáns térképeken és a regionális előrejelzésben használt leggyakoribb rövidítések jegyzéke*.
https://aviation.met.hu/download.php?fn=repmet_roviditesek.pdf
- [61] William Aspray. (2004). *Neumann János és a modern számítástechnika kezdetei*. Vince Kiadó.
- [62] Gyöngyösi András Zénó & Weidinger Tamás (szerk.). (2013). *Alkalmazott számszerű előrejelzés: Numerikus időjárási és csatolt modellek a gyakorlatban* Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/04/Alkalmazott_szamszeru_elorejelzes_READER.pdf
- [63] HungaroMet. (n.d.). *Adatasszimiláció*.
<https://www.met.hu/rolunk/tevekenysegek/idojarasmodellezes/adatasszimilacio/index.php>
- [64] Bartholy Judit & Pongrácz Rita (szerk.). (2013). *Klimaváltozás* Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/05/Klimavaltozas_READER.pdf
- [65] Copernicus Climate Data Store. (n.d.). *Complete ERA5 Global Atmospheric Reanalysis*.
<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-complete>
- [66] Tobias Kramer, Veronica Garcia-Hansen, Sara Omrani. (2023). *climateBOX: A Low-Cost and Open-Source Monitoring Device for Personal Thermal Comfort Evaluation*. Energy and Buildings.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778823000609>
- [67] *Low-Cost Sensor Systems and IoT Technologies for Indoor Air Quality Monitoring: Instrumentation, Models, Implementation, and Perspectives for Validation*. (n.d.).
<https://www.mdpi.com/1424-8220/25/24/7567>

- [68] Weather Underground. (n.d.). *PWS Network Overview*.
<https://www.wunderground.com/pws/overview>
- [69] Weathercloud. (n.d.). *Global Network of Weather Stations*.
<https://weathercloud.net/en>
- [70] Időkép. (n.d.). *Webkamera és időjárás-állomás csatlakoztatási útmutató*.
<https://www.idokep.hu/hirek/igy-csatlakoztasd-webkamerad>
- [71] Vuckovic, M., & Schmidt, J. (2023). *On the Importance of Data Quality Assessment of Crowdsourced Meteorological Data*. *Sustainability*, 15(8), 6941.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6941>
- [72] Open Source Initiative. (n.d.). *The MIT License*.
<https://opensource.org/license/mit>
- [73] Espressif Systems. (n.d.). *ESP32-C3 Series Datasheet*.
https://www.espressif.com/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf
- [74] Espressif Systems. (n.d.). *ESP-IDF Programming Guide / API Reference for ESP32-C3 (sleep modes, temperature sensor, MQTT/TLS support)*.
<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32c3/api-reference/index.html>
- [75] Nicholas Zambetti, Karl Söderby, & Jacob Hylén. (2025, September 30). *Inter-Integrated Circuit (I2C) Protocol*.
<https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire/>
- [76] FreeRTOS. (n.d.). *Real-Time Operating System for Microcontrollers and Small Microprocessors*.
<https://www.freertos.org/>
- [77] Protocol Buffers Documentation. (n.d.). *Protocol Buffers Documentation*.
<https://protobuf.dev/>
- [78] MQTT. (n.d.). *The Standard for IoT Messaging*.
<https://mqtt.org/>
- [79] Vámos Péter. (2026). *esp32-envsensor-mqtt* GitHub.
<https://github.com/pvamos/esp32-envsensor-mqtt>
- [80] Kernighan, B. W., & Ritchie, D. M. (1985). *A C programozási nyelv*. Műszaki Könyvkiadó.
- [81] GCC, the GNU Compiler Collection. (n.d.).
<https://gcc.gnu.org/>
- [82] *Cross Compiling with CMake*. (n.d.).
<https://cmake.org/cmake/help/book/mastering-cmake/chapter/Cross%20Compiling%20With%20CMake.html>
- [83] OVHcloud. (2024). *OVHcloud Reveals Story Behind Its 'Recycled' Datacentres*.
<https://corporate.ovhcloud.com/en-gb/newsroom/news/ovhcloud-recycled-datacentres/>
- [84] Vámos Péter. (2026). *alpine-k3s* GitHub.
<https://github.com/pvamos/alpine-k3s>
- [85] Longhorn Storage. (n.d.).
<https://longhorn.io/>
- [86] GNU Bash. (n.d.).
<https://www.gnu.org/software/bash/>
- [87] Vámos Péter. (2026). *kafka-cluster* GitHub.
<https://github.com/pvamos/kafka-cluster>
- [88] Helm Project. (n.d.). *Charts*.
<https://helm.sh/docs/topics/charts/>

- [89] Ansible Community Documentation. (n.d.). *Ansible Playbooks*.
https://docs.ansible.com/projects/ansible/latest/playbook_guide/playbooks_intro.html
- [90] HAProxy Technologies. (n.d.). *Enable the PROXY Protocol*.
<https://www.haproxy.com/documentation/haproxy-configuration-tutorials/proxying-essentials/client-ip-preservation/enable-proxy-protocol/>
- [91] HAProxy Technologies. (n.d.). *HAProxy Runtime API; Commit SSL Cert*.
<https://www.haproxy.com/documentation/haproxy-runtime-api/>
- [92] VerneMQ. (n.d.). *VerneMQ*. GitHub.
<https://github.com/vernemq/vernemq>
- [93] *Erlang*. (n.d.).
<https://www.erlang.org/>
- [94] Vámos Péter. (2026). *vernemq-enrich-msg* GitHub.
<https://github.com/pvamos/vernemq-enrich-msg>
- [95] Apache Kafka. (n.d.). *Kafka Connect User Guide; Kafka Connect Overview*.
<https://kafka.apache.org/42/kafka-connect/user-guide/> ; <https://kafka.apache.org/42/kafka-connect/overview/>
- [96] Confluent Documentation. (n.d.). *Kafka Connect Single Message Transform Reference; Create Custom Kafka Connect Single Message Transforms*.
<https://docs.confluent.io/kafka-connectors/transforms/current/overview.html> ;
<https://docs.confluent.io/platform/current/connect/transforms/custom.html>
- [97] Vámos Péter. (2026). *envsensor-kafka-smt* GitHub.
<https://github.com/pvamos/envsensor-kafka-smt>
- [98] Vámos Péter. (2026). *kafka-connect-image* GitHub.
<https://github.com/pvamos/kafka-connect-image>
- [99] IBM. (n.d.). *What Is Java?*
<https://www.ibm.com/think/topics/java>
- [100] Oracle. (n.d.). *JDK 26 Documentation*.
<https://docs.oracle.com/en/java/javase/26/>
- [101] ClickHouse Docs. (n.d.). *Kafka Table Engine*.
<https://clickhouse.com/docs/engines/table-engines/integrations/kafka>
- [102] ClickHouse Docs. (n.d.). *Materialized Views*.
<https://clickhouse.com/docs/materialized-views>
- [103] Grafana Documentation. (n.d.). *Dashboards*.
<https://grafana.com/docs/grafana/latest/visualizations/dashboards/>
- [104] Grafana Documentation. (n.d.). *Time Series Visualization*.
<https://grafana.com/docs/grafana/latest/visualizations/panels-visualizations/visualizations/time-series/>
- [105] Strimzi. (n.d.). *Deploying and Managing Kafka Connect; KafkaConnector Resources és Egyedi Plugin-Image Támogatás*.
<https://strimzi.io/docs/operators/0.35.0/full/deploying>
- [106] Apache Kafka. (n.d.). *Apache Kafka*. <https://kafka.apache.org/intro/>

9. Az illusztrációk forrásai

Fig. 1. Galilei thermoszkóp, 1592

Chatsam. (2014). *Musée des Arts et Métiers thermoscope de galilée 1592*.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mus%C3%A9_des_Arts_et_M%C3%A9tiers_thermoscope_de_galil%C3%A9e_1592.JPG

Fig. 2. eredeti Fahrenheit hőmérő

Christie's. (2012). *A signed Fahrenheit thermometer scale, Daniel Gabriel Fahrenheit (1686-1736)*. <https://www.christies.com/en/lot/lot-5605293>

Fig. 3. kézi szivattyú

Savree. (n.d.). *Hand pumps (how a hand pump works)*.

<https://savree.com/en/encyclopedia/hand-pump>

Fig. 4. Torricelli kísérlete

PhysicsMax. (n.d.). *Torricelli's experiment: Simple barometer*.

<https://physicsmax.com/torricellis-experiment-simple-barometer-6189>

Fig. 5. Stevenson ház

Australian Government Bureau of Meteorology. (n.d.). *Observation of air temperature*.

<https://www.bom.gov.au/climate/cdo/about/airtemp-measure.shtml>

Fig. 6. barográf vagy légnyomásíró

Portillo, G. (n.d.). *Barográf*. Meteorología en Red.

<https://www.meteorologiaenred.com/hu/barogr%C3%A1f.html>

Fig. 7. MEMS kapacitív páratartalom szenzor működési elve

Hong, S.-W., Kim, Y.-M., & Yoon, Y.-C. (2019). *The interdigitated-type capacitive humidity sensor using the thermoset polyimide*. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 20(6), 604–609. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.6.604>

<https://koreascience.or.kr/article/JAKO201922850163976.page>

Fig. 8. Saussure hajszál-hygrométere

StormGeo. (2019, February 11). *Can animals predict the weather?*

<https://stormgeo.com/insights/can-animals-predict-the-weather>

Fig. 9. a növények párologtatása

Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2005). *Biology* (7th ed., p. 757). Pearson.

Fig. 10. WMO Integrated Global Observing System (WIGOS)

MetService. (2010). *WMO 60th anniversary*.

<https://blog.metservice.com/WMO-60th-anniversary>

Fig. 11. a megvalósított szenzorhálózat

gpai.app STEM Visualizer „Diagram AI for technical diagrams”-al készítettem

Fig. 12. Bosch BME280 külső nézete

Bosch Sensortec. (n.d.). *BME280 datasheet*.

<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>

Fig. 13. Bosch BME280 szerkezete pásztázó elektronmikroszkóppal

41J. (2016, October 19). *Throwing the BME280 combined pressure/humidity sensor in a SEM*.

<https://41j.com/blog/2016/10/throwing-the-bme280-combined-pressurehumidity-sensor-in-a-sem/>

Fig. 14. SHT40 szenzor modul

Sensirion. (n.d.). *Datasheet – SHT4x*.

https://sensirion.com/media/documents/33FD6951/67EB9032/HT_DS_Datasheet_SHT4x_5.pdf

Fig. 15. a Kubernetes cluster nodejai

kubectl paranccsal listáztam ki, saját telepítésű rendszerből

Fig. 16. a Longhorn kötetek listája

Longhorn UI-al jelenítettem meg, saját telepítésű rendszerből

Fig. 17. a használt Kubernetes erőforrások

Headlamp UI-al jelenítettem meg, saját telepítésű rendszerből

Fig. 18. a VerneMQ Erlang plugin adatfeldolgozása

gpai.app STEM Visualizer „Diagram AI for technical diagrams”-al készítettem

Fig. 19. Kafka üzenetek

Kafbat UI-val jelenítettem meg, saját mérési forrásadatból

Fig. 20. az „envsensor.readings” ClickHouse DB adatbázis tábla szerkezete

gpai.app STEM Visualizer „Diagram AI for technical diagrams”-al készítettem

Fig. 21. beltéri szenzor-végpont

saját készítésű fénykép

Fig. 22. kültéri szenzor-végpont

saját készítésű fénykép

Fig. 23. ClickHouse lekérdezés: hőmérséklet eltérés eloszlás

saját készítésű adatbázis-lekérdezés

Fig. 24. grafikon: hőmérséklet eltérés eloszlás

saját készítésű Libre Office Writer grafikon, saját mérési forrásadatból

Fig. 25. ClickHouse lekérdezés: hőmérséklet eltérés hőmérséklet függése

saját készítésű adatbázis-lekérdezés

Fig. 26. grafikon: a hőmérséklet eltérés hőmérséklet függése

saját készítésű Libre Office Writer grafikon, saját mérési forrásadatból

Fig. 27. ClickHouse lekérdezés: ESP32 hőmérséklet szenzor értékelése

saját készítésű adatbázis-lekérdezés

Fig. 28. grafikon: ESP32 hőmérséklet szenzor értékelése

saját készítésű Libre Office Writer grafikon, saját mérési forrásadatból

Fig. 29. ClickHouse lekérdezés: páratartalom eltérés eloszlás

saját készítésű adatbázis-lekérdezés

Fig. 30. grafikon: páratartalom eltérés eloszlás

saját készítésű Libre Office Writer grafikon, saját mérési forrásadatból

Fig. 31. idősor: 7 napnyi szabadtéri mérés együtt megjelenítve

Grafana dashboard-al jelenítettem meg, saját mérési forrásadatból

Fig. 32. idősor: reggeli konyhai tevékenység

Grafana dashboard-al jelenítettem meg, saját mérési forrásadatból

Fig. 33. idősor: fürdőszoba használat

Grafana dashboard-al jelenítettem meg, saját mérési forrásadatból

10. Felhasznált irodalom

1. Albert-László Barbási. (2003). *Behálózva*. Magyar Könyvklub.
2. Analog Devices. (n.d.). *IC Temperature Sensors Find the Hot Spots*.
<https://www.analog.com/en/resources/design-notes/ic-temperature-sensors-find-the-hot-spots.html>
3. Ansible Community Documentation. (n.d.). *Ansible Playbooks*.
https://docs.ansible.com/projects/ansible/latest/playbook_guide/playbooks_intro.html
4. Apache Kafka. (n.d.). *Kafka Connect User Guide; Kafka Connect Overview*.
<https://kafka.apache.org/42/kafka-connect/user-guide/> ; <https://kafka.apache.org/42/kafka-connect/overview/>
5. ASHRAE. (n.d.). *Standards 62.1 & 62.2*.
<https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>
6. ASPRAY, William. (2004). *Neumann János és a modern számítástechnika kezdetei*. Vince Kiadó.
7. Sir David Attenborough. (2020). *Egy élet a bolygónkon*. Park Kiadó.
8. *Automatizálási lexikon*. (1986). Műszaki Könyvkiadó.
9. Avduevsky, V. S., et al. (1971). *Soft Landing of Venera 7 on the Venus Surface and Preliminary Results of Investigations of the Venus Atmosphere*. Journal of the Atmospheric Sciences.
https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/28/2/1520-0469_1971_028_0263_slovot_2_0_co_2.xml
10. Bartholy Judit & Pongrácz Rita (szerk.). (2013). *Klimaváltozás*. Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/05/Klimavaltozas_READER.pdf
11. Bartholy Judit, Mészáros Róbert, Geresdi István, Matyasovszky István, Pongrácz Rita, & Weidinger Tamás. (2013). *Meteorológiai alapismeretek*. Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/05/Meteorologiai_alapismeretek_READER.pdf
12. Benkő Tiborné, Benkő Tibor, Tóth Bertalan. (2001). *Programozunk C nyelven*. ComputerBooks Kiadó
13. Betsy Beyer, Chris Jones, Jennifer Petoff, Niall Richard Murphy. (2016). *Site Reliability Engineering*. O'Reilly.
14. Bosch Sensortec. (n.d.). *BME280 Datasheet*.
<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>
15. Brown, P. (2014). *Basics of Evaporation and Evapotranspiration. Backyards & Beyond*. University of Arizona Cooperative Extension.
<https://cales.arizona.edu/backyards/sites/cales.arizona.edu.backyards/files/14summer.pdf>
16. Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2005). *Biology (7th ed.)*. Pearson.
17. ClickHouse Docs. (n.d.). *Kafka Table Engine*.
<https://clickhouse.com/docs/engines/table-engines/integrations/kafka>
18. ClickHouse Docs. (n.d.). *Materialized Views*.
<https://clickhouse.com/docs/materialized-views>
19. Tobias Kramer, Veronica Garcia-Hansen, Sara Omrani. (2023). *climateBOX: A Low-Cost and Open-Source Monitoring Device for Personal Thermal Comfort Evaluation*. Energy

and Buildings.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778823000609>

20. Confluent Documentation. (n.d.). *Kafka Connect Single Message Transform Reference; Create Custom Kafka Connect Single Message Transforms*.
<https://docs.confluent.io/kafka-connectors/transforms/current/overview.html> ;
<https://docs.confluent.io/platform/current/connect/transforms/custom.html>
21. Thomas Parkinson, Alex Parkinson, Richard de Dear. (2019). *Continuous IEQ Monitoring System: Performance Specifications and Thermal Comfort Classification*. Building and Environment.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318307522>
22. Copernicus Climate Data Store. (n.d.). *Complete ERA5 Global Atmospheric Reanalysis*.
<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-complete>
23. Cross Compiling with CMake. (n.d.).
<https://cmake.org/cmake/help/book/mastering-cmake/chapter/Cross%20Compiling%20With%20CMake.html>
24. Sachit Mahajan. (2022). *Design and Development of an Open-Source Framework for Citizen-Centric Environmental Monitoring and Data Analysis*. Scientific Reports.
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-18700-z>
25. Domokos Endre. (2014). *Környezetvédelmi monitoring*. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Tudástár, XXV. kötet.
<https://tudastar.mk.uni-pannon.hu/anyagok/25-Monitoring.pdf>
26. Domokos Endre & Pokol György. (2012). *Környezeti analitika*. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Tudástár, 5. kötet.
https://tudastar.mk.uni-pannon.hu/anyagok/05-Kornyezeti_analitika.pdf
27. Dunkel Zoltán. (2018). *A meteorológiai műszerek fejlődése a „kezdetektől” a közelmúltig (Előszó a modern műszerekhez)*. Légkör, 63(4), 156.
<http://www.mettars.hu/wp-content/uploads/2019/05/3072eb909b287766294687f1af81b0f3-legkor-2018-4.pdf>
28. A. Martín-Garín, J.A. Millán-García, A. Bañari, J. Millán-Medel, J.M. Sala-Lizarraga (n.d.). *Environmental Monitoring System Based on an Open Source Platform and the Internet of Things for a Building Energy Retrofit*. Energy and Buildings.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517300729>
29. Erlang. (n.d.).
<https://www.erlang.org/>
30. Erényi István, Dr. Vajda Ferenc. (1983). *Mikroprocesszoros rendszerek fejlesztése*. Műszaki Könyvkiadó.
31. Espressif Systems. (n.d.). *ESP32-C3 Series Datasheet*.
https://www.espressif.com/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf
32. Espressif Systems. (n.d.). *ESP-IDF Programming Guide / API Reference for ESP32-C3 (sleep modes, temperature sensor, MQTT/TLS support)*.
<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32c3/api-reference/index.html>
33. European Commission. (n.d.). *EU Air Quality Standards*.
https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en
34. European Environment Agency. (n.d.). *Universal Thermal Climate Index (UTCI), 1979–2020*.
<https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/indicators/thermal-comfort-indices-universal-thermal-climate-index-1979-2019>

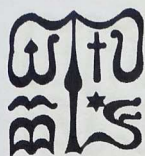
35. EUR-Lex. (2008). *Az Európai Parlament és a Tanács 2008/50/EK irányelve (2008. május 21.) a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról.*
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:32008L0050>
36. EUR-Lex. (1989). *Council Directive 89/654/EEC of 30 November 1989 Concerning the Minimum Safety and Health Requirements for the Workplace.*
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31989L0654>
37. EUR-Lex. (2024). *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (recast).*
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024L1275>
38. Feynman, Richard P. (2002). *A felfedezés öröme.* Akkord Kiadó
39. FreeRTOS. (n.d.). *Real-Time Operating System for Microcontrollers and Small Microprocessors.*
<https://www.freertos.org/>
40. GCC, the GNU Compiler Collection. (n.d.).
<https://gcc.gnu.org/>
41. GNU Bash. (n.d.).
<https://www.gnu.org/software/bash/>
42. Grafana Documentation. (n.d.). *Dashboards.*
<https://grafana.com/docs/grafana/latest/visualizations/dashboards/>
43. Grafana Documentation. (n.d.). *Time Series Visualization.*
<https://grafana.com/docs/grafana/latest/visualizations/panels-visualizations/visualizations/time-series/>
44. Gyöngyösi András Zénó & Weidinger Tamás (szerk.). (2013). *Alkalmazott számszerű előrejelzés: Numerikus időjárási és csatolt modellek a gyakorlatban.* Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/04/Alkalmazott_szamszeru_elorejelzes_READER.pdf
45. Györfi László, Györi Sándor, Vajda István. (2000). *Információ- és kódelmélet.* Typotex Kiadó.
46. Günter D. Roth. (n.d.). *Meteorológiáról mindenkinek: Általános időjárási helyzetek, időjárás-előrejelzés, időjárási jelenségek.* Magyar Könyvklub.
47. HAProxy Technologies. (n.d.). *Enable the PROXY Protocol.*
<https://www.haproxy.com/documentation/haproxy-configuration-tutorials/proxying-essentials/client-ip-preservation/enable-proxy-protocol/>
48. HAProxy Technologies. (n.d.). *HAProxy Runtime API; Commit SSL Cert.*
<https://www.haproxy.com/documentation/haproxy-runtime-api/>
49. Helm Project. (n.d.). *Charts.*
<https://helm.sh/docs/topics/charts/>
50. Hevesi Imre. (1998). *Elektromosságtan.* Nemzeti Tankönyvkiadó.
51. HungaroMet. (n.d.). *A SIGMET, GAMET, TAF, METAR táviratokban, a szignifikáns térképeken és a regionális előrejelzésben használt leggyakoribb rövidítések jegyzéke.*
https://aviation.met.hu/download.php?fn=repmet_roviditesek.pdf
52. HungaroMet. (n.d.). *Adatasszimiláció.*
<https://www.met.hu/rolunk/tevekenysegek/idojarasmodellezes/adatasszimilacio/index.php>

53. HungaroMet. (n.d.). *Repülőtéri észlelések kódleírása – METAR – Repülési rendszeres időjárás-jelentő távirat.*
https://aviation.met.hu/download.php?fn=METAR_SPECI_leiras.pdf
54. Hupucz J. (n.d.). *Precíziós öntözés és vízgazdálkodás.*
https://eta.bibl.u-szeged.hu/5329/9/EFOP343_AP6MGK_Preciziosontozes_olasolecke_Hupucz_9_20210312.pdf
55. IBM. (n.d.). *What Is Java?*
<https://www.ibm.com/think/topics/java>
56. James Burke. (n.d.). *Biliárdeffektus.* Alexandra Kiadó.
57. James W. Coffron. (1984). *Mikroprocesszoros rendszerek hibakeresése.* Műszaki Könyvkiadó.
58. John D. Barrow. (1994). *A fizika világképe.* Akadémiai Kiadó.
59. Kernighan, B. W., & Ritchie, D. M. (1985). *A C programozási nyelv.* Műszaki Könyvkiadó.
60. Lindgrén, S., Neumann, J. (1980, December). *Great Historical Events That Were Significantly Affected by the Weather.* Bulletin of the American Meteorological Society, 61(12), 1570–1583.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1980\)061%3C1570:GHETWS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1980)061%3C1570:GHETWS%3E2.0.CO;2);
https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/61/12/1520-0477_1980_061_1570_ghetws_2_0_co_2.xml
61. Longhorn Storage. (n.d.).
<https://longhorn.io/>
62. *Low-Cost Sensor Systems and IoT Technologies for Indoor Air Quality Monitoring: Instrumentation, Models, Implementation, and Perspectives for Validation.* (n.d.).
<https://www.mdpi.com/1424-8220/25/24/7567>
63. Mészáros Róbert. (2013). *Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek.* Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereader.hu/media/2014/05/Meteorologiai_muszerek_READER.pdf
64. Morvai Krisztián. (2010). *Az árnyékolók hatása a léghőmérséklet-mérések és a hosszú távú adatsorok megbízhatóságára.*
https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MorvaiKrisztian_2010.pdf
65. MQTT. (n.d.). *The Standard for IoT Messaging.*
<https://mqtt.org/>
66. *Műszaki lexikon (3 kötetes).* (1974). Akadémiai Kiadó.
67. Nicholas Zambetti, Karl Söderby, Jacob Hylén. (2025, September 30). *Inter-Integrated Circuit (I2C) Protocol.*
<https://docs.arduino.cc/learn/communication/wire/>
68. NIST. (n.d.). *Metrological Traceability: Frequently Asked Questions and NIST Policy.*
<https://www.nist.gov/metrology/metrological-traceability>
69. Open Source Initiative. (n.d.). *The MIT License.*
<https://opensource.org/license/mit>
70. Oracle. (n.d.). *JDK 26 Documentation.*
<https://docs.oracle.com/en/java/javase/26/>
71. Peter Winkler. (2023). *The Early Meteorological Network of the Societas Meteorologica Palatina (1781–1792): Foundation, Organization, and Reception.*
<https://www.vliz.be/imisdocs/publications/391849.pdf>

72. Pongrácz Rita, Bartholy Judit (szerk.). (2013). *Alkalmazott és városklimatológia*. Eötvös Loránd Tudományegyetem.
http://www.eltereadler.hu/media/2014/04/Alkalmazott_es_varosklimatologia_READER.pdf
73. Protocol Buffers Documentation. (n.d.). *Protocol Buffers Documentation*.
<https://protobuf.dev/>
74. Randy Cervený. (2023). *The History of the World Meteorological Organization*. *Weatherwise*, 76(2), 34–40.
<https://doi.org/10.1080/00431672.2023.2159222>;
<https://sci-net.xyz/10.1080/00431672.2023.2159222>
75. Reis Frigyes, Várfalvi János, Zöld András. (2007). *Az épületfizika alapjai*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építésmérnöki Kar, Műegyetemi Kiadó.
<https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/595895b0-1c12-4a5d-8f29-9c8a6379987b>
76. Sensirion. (n.d.). *Datasheet – SHT4x*.
https://sensirion.com/media/documents/33FD6951/67EB9032/HT_DS_Datasheet_SHT4x_5.pdf
77. Simonyi Károly. (1986). *A fizika kultúrtörténete a kezdetektől a huszadik század végéig*. Gondolat Kiadó.
78. Stewart, I. D., Oke, T. R. (2012). *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.
<https://journals.ametsoc.org/abstract/journals/bams/93/12/bams-d-11-00019.1.xml>
79. Strimzi. (n.d.). *Deploying and Managing Kafka Connect*.
<https://strimzi.io/docs/operators/0.35.0/full/deploying>
80. Szalai István. (2020). *Méréstechnika: Természettudományi alapoktól az ipari alkalmazásokig*. Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ.
<https://mk.uni-pannon.hu/images/Dokumentumok/jegyzetek/EFOP-3.4.3-16-2016-00009/M%C3%A9r%C3%A9stechnika.pdf>
81. Tatár József. (1992). *Nem villamos mennyiségek mérése villamos úton*. Műszaki Könyvkiadó.
82. Tóth Ágoston. (1929). *Bevezetés a Meteorológiába*. Szent István Társulat.
http://www.ppek.hu/facsimile/Toth_Agoston_Bevezetes_a_meteorologiaba_facsimile.pdf
83. Varga-Haszonits Zoltán, Varga Zoltán. (2006). *A makro- és mikroklima hatása a növénytermelésre (Fitoklimatológia)*. Nyugat-Magyarországi Egyetem.
84. Váradiné Szarka Angéla, Hegedűs János, Bátorfi Richárd, Unhauzer Attila. (2007). *Méréstechnika*. Széchenyi István Egyetem – Miskolci Egyetem.
https://moodle.jrobi.hu/BOCI/moodle/Merestechnika/Merestechnika_jegyzet.pdf
85. VerneMQ. (n.d.). *VerneMQ*. GitHub.
<https://github.com/vernemq/vernemq>
86. *Vízgazdálkodási lexikon*. (1970). Mezőgazdasági Kiadó.
87. Vuckovic, M., Schmidt, J. (2023). *On the Importance of Data Quality Assessment of Crowdsourced Meteorological Data*. *Sustainability*, 15(8), 6941.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6941>
88. William Aspray. (2004). *Neumann János és a modern számítástechnika kezdetei*. Vincze Kiadó.
89. WMO Community. (n.d.). *Observation Components of the Global Observing System*.
<https://community.wmo.int/observation-components-of-global-observing-system>

90. World Meteorological Organization. (2025). *Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume I – Measurement of Meteorological Variables (WMO-No. 8)*.
<https://library.wmo.int/records/item/41650-guide-to-instruments-and-methods-of-observation>
91. World Meteorological Organization. (n.d.). *Global Basic Observing Network (GBON)*.
<https://wmo.int/activities/global-basic-observing-network-gbon>
92. World Meteorological Organization. (n.d.). *Global Observing System (GOS)*.
<https://wmo.int/activities/global-observing-system-gos/global-observing-system-gos>
93. World Meteorological Organization. (n.d.). *History of IMO and WMO*.
<https://wmo.int/about-wmo/history-of-imo-and-wmo>
94. World Meteorological Organization. (n.d.). *WMO Integrated Global Observing System*.
<https://wmo.int/activities/wmo-integrated-global-observing-system-wigos/wmo-integrated-global-observing-system>
95. World Watch Institute. (1988). *A világ helyzete 1987/88-ban*. Árkádia Kiadó.

11. Nyilatkozatok



WESLEY JÁNOS LEKÉSZKÉPZŐ FŐISKOLA

John Wesley Theological College

TANULMÁNYI HIVATAL

Registrar's Office

EREDETISÉGI NYILATKOZAT SZAKDOLGOZAT

Alulírott: Vámos Péter

NEPTUN-kód: DV92WM

a Wesley János Lelkészképző Főiskola végzős hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom, és aláírással igazolom, hogy a

Környezeti paraméterek mérése a tudomány és technológia fejlődésének tükrében – egy skálázható szenzorhálózat megvalósításának tanulságai

című szakdolgozatom saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt.

Tudomásul veszem, hogy szakdolgozatomban plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát ismerem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén szakdolgozatom visszautasításra kerül.

Kijelentem továbbá, hogy szakdolgozatom egy példányban beadott nyomtatott, valamint elektronikus példányai szövegükben, tartalmukban és formailag is teljes mértékben megegyeznek.

Tudomásul veszem, hogy szakdolgozatomat a WJLF könyvtára a könyvtári szabályzatnak megfelelően fogja nyilvántartani és kezelni. Amennyiben úgy vélem, hogy a szakdolgozat tartalmának nyilvánosságra kerülése nekem, vagy bármely más személynek, illetve intézménynek hátrányt okozhat, szakvezetőmtől írásban kérhetem a dolgozat zárt anyagként kezelését.

Kelt: Budapest, 2026. április 13.

aláírás

1086 Budapest, Dankó utca 11. Tel.: 06-1 577-0500/108, 217

Levelezési cím: 1410 Budapest, Pf.: 200

E-mail: tanulmanyi@wjlf.hu

www.wesley.hu



NYILATKOZAT MI-RENDSZER HASZNÁLATÁRÓL¹

Alulírott Vámos Péter (név) DV92WM (Neptun kód), a WJLF Mesterséges Intelligencia szabályzatán és Etikai Kódexén alapuló etikai felelősségem tudatában kijelentem, hogy a Környezettan szak keretében készített írásművem saját, önálló munkám eredménye, teljesítéséhez generatív mesterségesintelligencia-rendszert/szolgáltatást az alábbiak szerint vettem igénybe.

Aláhúzással jelölje a megfelelő elemet vagy elemeket az alábbi listában!

1) Nem használtam fel GMI rendszert vagy szolgáltatást.

2, Nyilatkozom arról, hogy az írásmű elkészítése során az alábbi MI-rendszereket használtam fel az alábbi célokra:

a) Szakirodalom kutatásához, válogatásához

a rendszer neve, verziója: ChatGPT (OpenAI), GPT-5.4 Thinking

b) Adatok előzetes elemzéséhez, értékeléséhez

a rendszer neve, verziója: _____

c) Számítógépes programkód írásához, fejlesztéséhez, ellenőrzéséhez

a rendszer neve, verziója: ChatGPT (OpenAI), GPT-5.4 Thinking

d) Szöveges tartalom stilisztikai és nyelvtani javításához, parafrázáláshoz

a rendszer neve, verziója: ChatGPT (OpenAI), GPT-5.4 Thinking

e) Képi vagy audiovizuális tartalom fejlesztéséhez, létrehozásához

a rendszer neve, verziója: ChatGPT (OpenAI), GPT-5.4 Thinking; gpai.app STEM Visualizer

f) Egyes szövegrészek fordításához (pl. magyar és idegen nyelv között)

a rendszer neve, verziója: _____

¹ SZABÁLYZAT a Wesley János Lelkészképző Főiskolán történő mesterséges intelligenciahasználatáról c. dokumentumának 3. melléklete



WESLEY JÁNOS LELKÉSZKÉPZŐ FŐISKOLA

John Wesley Theological College

TANULMÁNYI HIVATAL

Registrar's Office

g) Egyéb módon, éspedig: nagy terjedelmű forrásokból a releváns forrásrészek azonosítása; tematikus forrásrendezés; forrásjegyzetek készítése; logikai koherencia és következetesség ellenőrzése

a rendszer neve, verziója: ChatGPT (OpenAI), GPT-5.4 Thinking

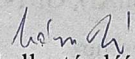
Pl. ChatGPT (OpenAI) Szakirodalmi források keresése, bevezető vázlatához

Pl. DeepL Translator Külföldi szakirodalmi források, egyes szövegrészek fordításához

Pl. Grammarly Saját írásaim stilisztikai és helyesírás javításához

Nyilatkozom továbbá, arról, hogy a felhasználás előtt tájékozódtam az alkalmazott MI rendszerek képességeiről és korlátaikról, és tudatában vagyok annak, hogy e mű szerzőjeként felelős vagyok az írásművemben foglalt valamennyi tartalomért.

Budapest, 2026 év április hó 13. nap


hallgató aláírása

A hallgató előre tájékoztatott az MI-rendszerek fent felsorolt használatáról.


oktató/~~témavezető~~ aláírása

1086 Budapest, Dankó utca 11. Tel.: 06-1 577-0500/108, 217

Levelezési cím: 1410 Budapest, Pf.: 200

E-mail: tanulmanyi@wjtf.hu

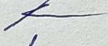
www.wesley.hu



KONZULTÁCIÓS ADATLAP
CONSULTATION SHEET

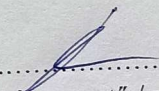
Hallgató / Student:

Neptun kód / Neptun code:

A konzultáció időpontjai / Dates of consultation	Konzulens aláírása / Signature of supervisor	Emlékeztető feljegyzések, javaslatok az elvégzendő feladatokra / Reminders, suggestions on tasks to be done
2025.06.03. 2025.17.21. 2026.04.07. 2026.06.14	   	SZAKDOLGOZAT TEMA KIDOLGOZÁSA TÉMAKÖRÖK FŐ KIDOLGOZÁSA MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA Végző diárok

A szakdolgozat / The thesis beadható/can be submitted – nem beadható/cannot be submitted
(A kívánt rész témavezető által aláhúzandó! Must be underlined by the supervisor!)

Kelt / Date: 2026.04.13


témavezető / supervisor