



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
XXX Tanszék

Schmidt Máté

LEVEGŐ MINŐSÉGÉNEK MÉRÉSÉRE SZOLGÁLÓ ESZKÖZ FEJLESZTÉSE

KONZULENS

Dr. Vida Rolland

BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	5
Abstract.....	6
1 Bevezetés	7
2 A levegőt szennyező anyagok és mérési módszereik.....	8
2.1 A légszennyezés eredete	8
2.1.1 A szén-dioxidról (CO ₂) általánosságban.....	8
2.1.2 A szálló porról általánosságban	8
2.2 A légszennyezés élettani hatásai	9
2.3 Mérési megoldások és a különböző skálák a légszennyezés összehasonlításához	10
2.3.1 A US AQI skála	10
2.3.2 A CAQI skála.....	11
2.3.3 Az AQI értékek számítása	11
2.4 Szmog és szmogriadó	12
2.5 A magyarországi légszennyezettségi skála.....	13
3 A szennyezőket mérő eszközök	16
3.1 Az IKEA eszköze.....	16
3.1.1 Az eszköz felépítése.....	16
3.1.2 Az eszköz kritikája.....	17
3.2 Az eszköz kiegészítése.....	18
3.3 A IKEA legújabb eszköze.....	21
4 Saját eszköz fejlesztése	22
4.1 Eszközkomponensek.....	22
4.1.1 A mikrokontroller	22
4.1.2 A szenzorok	22
4.2 Összeszerelés	23
4.3 Kalibrálás	24
4.3.1 Sharp kalibrálás.....	24
4.3.2 MQ135 kalibrálás	27
4.4 A működés tesztelése.....	29
5 Kommunikáció a felhővel.....	30
5.1 Rádiós kommunikáció	30

5.2 A felhőszolgáltató és a kiépített felhőrendszer	30
6 Mérések és eredményeik	33
6.1 Mérési környezet.....	33
6.2 Szélerősség, szélirány, távolság a szennyezés forrásától.....	34
6.3 Ambiens porkoncentráció égetés hatására	39
6.4 Szén-dioxid és szálló por	40
7 Továbbfejlesztési lehetőségek	44
Irodalomjegyzék.....	45
Függelék.....	47

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Schmidt Máté**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2023. 06. 11.



.....
Schmidt Máté

Összefoglaló

Szakdolgozatom elkészítése során áttekintettem a különböző, levegő minőségét számszerűsítő módszereket. A meghatározás során több, levegőt szennyező komponens koncentrációját is mérik. A szennyező anyagok közül mélyebben a szálló porral és a szén-dioxiddal foglalkoztam, utána jártam ezen szennyezések eredetének is. Kitértem a szmog jelenségére és összehasonlítottam Kína és Magyarország légszennyezettségét. Kielemeztem Magyarország légszennyezettségi adatait, kitérve a Covid19-járvány hatására is. Kiválasztottam egy kereskedelmi forgalomban kapható, szálló port monitorozni képes eszközt, melynek működését kiegészítettem, hogy képes legyen egy felhőrendszerrel való kommunikálásra. Kifejlesztettem egy saját konstrukciót is, amely képes a porkoncentráció és a szén-dioxid szint megfigyelésére, a mért értékeket pedig feldolgozza és továbbítja a felhő irányába. A fejlesztés során áttekintettem több zajsűrítő megoldást is. A kifejlesztett eszköz működését mérések során validáltam. A méréseket több szempont szerint, kontrollált környezetben végeztem. Megfigyeltem a szélereősség, a szélirány, valamint a szennyezés forrásától való távolság kapcsolatát a szálló por koncentrációjával. Ezeken túl pedig vizsgáltam a szálló por és a szén-dioxid kapcsolatát és arányát az égés során fellépő szennyezés hatására. A mérések eredményeit grafikonon vizualizáltam, a grafikonok tartalmát kielemeztem, végül levontam az ok-okozati összefüggésekből származó tapasztalatokat. A mérések során felfedeztem a levegő minőségét leginkább befolyásoló tényezőket. Méréseim eredményei szerint a legfontosabb tényezők a szélereősség és a szennyezés forrásától való távolság, továbbá a szálló por könnyebben, míg a szén-dioxid nehezebben oszlik el.

Abstract

During the preparation of my thesis, I reviewed the different methods for quantifying air quality. The determination involves measuring the concentration of several air pollutants. Among these pollutants, I have focused in depth on particulate matter and carbon dioxide, and I have also investigated the origin of these pollutants. I also looked at the phenomenon of smog and compared air pollution in China and Hungary. I analysed air pollution data from Hungary, including the impact of the Covid19 epidemic. I have selected a commercially available device capable of monitoring particulate matter, and I have supplemented its operation to enable it to communicate with a cloud system. I also developed my own design that can monitor dust concentration and carbon dioxide levels, and process and transmit the measured values to the cloud. During the development I also reviewed several noise filtering solutions. The operation of the developed device was validated by measurements. The measurements were performed in a controlled environment according to several criteria. I observed the relationship of wind strength, wind direction and distance from the source of pollution with the concentration of particulate matter. In addition, I investigated the relationship and the ratio of particulate matter and carbon dioxide to the effect of combustion pollution. I visualised the results of the measurements on graphs, analysed the contents of the graphs and finally deduced the lessons learned from the causal relationships. During the measurements, I discovered the factors that most influence air quality. The results of my measurements show that the most important factors are wind strength and distance from the source of pollution, and that particulate matter is more easily dispersed while carbon dioxide is more difficult to disperse.

1 Bevezetés

Az első ipari forradalom 1769-es kezdete óta a levegő szennyezettsége nagymértékben megnőtt. Mindenhol jelen van, egyaránt érinti a világ fejlett és fejletlen régióit. Szervezetünkre gyakorolt hatása rendkívül káros, rengeteg betegség forrása lehet és évente több millióan halnak meg légszennyezettséghez köthető okok miatt [1].

Szerencsére a világ minden táján egyre nő az emberek érdeklődése a környezettudatosság felé, azonban ahhoz, hogy aktívan tenni tudjunk a levegő nagymértékű szennyezése ellen, azonosítanunk kell a szennyezések forrását, meg kell ismernünk a különböző szennyező anyagokat, valamint meg kell figyelnünk a szennyezett levegő életünkre gyakorolt hatását.

A feladatom egy olyan IoT (Internet of Things, Dolgok Internete) eszköz fejlesztése, amely méri a levegő minőségét, valamint ezeket az értékeket a felhasználó számára érthető módon közölni is képes. A kifejlesztett készüléket összehasonlítom egy kereskedelmi forgalomban is kapható társával. A két eszközt kontrollált környezetben részletes teszteknek vetem alá, mérési eredményeiket pedig összehasonlítom és kielemezem.

Az IoT a légszennyezés problémáját megoldani nem tudja, de egy olyan eszközt adhat a kezünkbe, amellyel könnyebben megérthetjük az ok-okozati összefüggéseket és segíthet megoldásokat keresni, ezáltal növelve a tudatosságot a témakörben. Az IoT berendezések segíthetnek a légszennyezés forrásainak felkutatásában, légszennyezettségi adatok gyűjtésével pedig támogatják a kutatókat a szennyezés hatásainak mélyebb megértésében és az egészségügyi következmények vizsgálatában.

2 A levegőt szennyező anyagok és mérési módszereik

A levegő összetétele a következő: 78,08% nitrogén, 20,95% oxigén, 0,93% argon, a fennmaradó részt pedig egyéb gázok, illetve részecskék teszik ki, például szén-dioxid, metán, ózon, kén -és szénszármazékok vagy szálló por [2]. Az egészségre legkárosabb szennyezőanyagok ebből a fennmaradó részből kerülnek ki.

2.1 A légszennyezés eredete

A légszennyezés hátterében több tényező is áll, de legtöbb esetben visszavezethető emberi tevékenységekre. Szennyezik a levegőt a belsőégésű motorral felszerelt autók, télen a házak fűtése, de egyes esetekben (pl. szénerőművek használatakor) az áram előállítása is [3]. Szakdolgozatomban két szennyező anyaggal foglalkozom részletesen: a szén-dioxiddal és a szálló porral.

2.1.1 A szén-dioxidról (CO₂) általánosságban

A szén-dioxid kulcsfontosságú lehet többek között a fotoszintézis során, azonban magas koncentrációban előjönnek negatív aspektusai is. Üvegházhatású gáz, vagyis a légkörbe kerülve visszaveri a felszínre azokat az elektromágneses sugarakat, amelyeket a földfelszín nem képes elnyelni, ezáltal emelve a Föld átlaghőmérsékletét. Tiszta levegőben a szén-dioxid aránya megközelítőleg 0.04%, ami 404 ppm-nek (parts per million, részecskék száma egymillióból) felel meg. Ez az érték az elmúlt évszázad során közel megduplázódott.

A légkörbe elsősorban a szén, illetve egyéb széntartalmú anyagok égetésének melléktermékeként kerül. Ide tartoznak többek között a szénerőművek, illetve olyan típusú járművek, amelyek kőolaj alapú üzemanyaggal (benzin, dízel, kerozin) működnek.

2.1.2 A szálló porról általánosságban

A szálló port (Particulate Matter, PM) a levegőben lévő részecskék átmérője szerint csoportosíthatjuk, amely értéket mikrométerben (µm) adjuk meg. A szálló por kategóriájába tartozik minden olyan szennyező részecske, amely nem halad meg egy meghatározott méretet. A 100 µm-nél nem nagyobb részecskék már bejuthatnak a

szervezetbe légzés útján, ezek nagy része azonban nem jut le a tüdőbe. A $10\text{ }\mu\text{m}$ átmérőnél kisebb részecskék (PM_{10}) már képesek átjutni a garaton. Az emberi légzőszervrendszerre legkárosabban ható szennyezők a $2,5\text{ }\mu\text{m}$ alatti csoportba tartozó részecskék ($\text{PM}_{2,5}$).

Ilyen jellegű szennyező anyagok elsősorban emberi tevékenységek során keletkeznek. Fő forrásnak a szilárd tüzelőanyagok (pl. szén) illetve a belsőégésű motorok tekinthetők. Belsőégésű motorok közül kiemelkednek a dízelmotorok, amelyek üzemanyagának tökéletlen égése során keletkező korom a levegőbe távozik.

Szálló por keletkezik természetes úton is: természeti katasztrófák során, mint például egy vulkánkitörés, de az Afrikából érkező sivatagi por is tartalmaz a már veszélyes kategóriába tartozó, kis átmérőjű részecskéket.

2.2 A légszennyezés élettani hatásai

A WHO (World Health Organization, Egészségügyi Világszervezet) elemzése szerint a Föld népességének 99%-a egészségre káros levegőt lélegez be és évente 7 millió ember hal meg légszennyezéshez visszavezethető okok miatt [3].

Szén-dioxid esetében eddig úgy tartották, hogy 5000 ppm alatti koncentrációban nem okoz jelentős egészségügyi problémát, azonban egy új kutatás szerint már 1000 ppm koncentráció is súlyos megbetegesekhez vezethet [4]. Növeli a stressz szintjét, vesebetegségek forrása lehet és már egy kis koncentráció-emelkedés is előidézhethet fejfájást és hányingert.

Szálló por esetén a $2,5\text{ }\mu\text{m}$ átmérőnél kisebb szemcsék a legveszélyesebbek, mivel ezek képesek bejutni a tüdőbe, ahonnan nem, vagy csak nagyon nehezen ürülnek ki. Megtapadnak a légúti nyálkahártyákra, ezáltal növelve az olyan légzőszervi megbetegedések esélyét, mint amilyen az asztma. Már kis koncentrációban is irritálhatják a szem kötőhártyáját és a légzőszervek nyálkahártyáját.

Ezen hatások miatt természetes igényként merül fel, hogy megismerjük és nyomon követhessük a levegő szennyezettségének mértékét, mind beltéren, mind kültéren.

2.3 Mérési megoldások és a különböző skálák a légszennyezés összehasonlításához

A levegő minőségének meghatározásához számos módszert dolgoztak ki. Az egyik ilyen módszer egy levegőminőségi indexet határoz meg, amelynek célja, hogy bármely ember számára közérthető formában, számszerűsítve megmondja, mennyire szennyezett az adott pillanatban és adott területen a levegő minősége. Ehhez a légkörben fellelhető több összetevő, vagyis szennyező anyag arányát vizsgálják (szálló por, szén-dioxid, ózon, nitrogén-dioxid stb.).

A levegőminőségi index számítása országonként eltérő. Mindegyik módszer saját veszélyességi szintet, mérési intervallumot és szennyező koncentrációt határoz meg. Két elterjedt változat létezik. Az egyik a US AQI (United States Air Quality Index, vagyis Levegőminőségi Index), amely az Amerikai Egyesült Államok hatóságai által kifejlesztett mérési módszer [5]. A másik a CAQI (Common Air Quality Index, tehát Általános Levegőminőségi Index), amelyet európai országok alkalmaznak [6].

2.3.1 A US AQI skála

A US AQI egy 0-tól 500-ig terjedő skála, amelyen belül 6 csoportot különböztetünk meg, 50 egységnyi léptékkel. Minél kisebb a szám, annál tisztább a levegő. A 2.1. ábrán látható a levegő minősége AQI intervallummal és színekkel kifejezve. 50-es indexérték alatt a levegő tisztának mondható, míg 300-as érték felett már rendkívül veszélyes. Mindegyik csoporthoz tartozik egy veszélyességi érték, amit általában színekkel is jeleznek.

Air Quality Index (AQI) Values	Levels of Health Concern	Colors
0 to 50	Good	Green
51 to 100	Moderate	Yellow
101 to 150	Unhealthy for Sensitive Groups	Orange
151 to 200	Unhealthy	Red
201 to 300	Very Unhealthy	Purple
301 to 500	Hazardous	Maroon

2.1. ábra: AQI veszélyességi szintek meghatározása

A határok megszabásához alapvetően 5 szennyező tényező koncentrációját figyelik: szálló por (PM₁₀ és PM_{2,5} együtt), ózon (O₃), szén-monoxid (CO), kén-dioxid (SO₂) és nitrogén-dioxid (NO₂). A szennyezési tényezők mértékegysége a µg/m³. Az AQI értéket ezek alapján számolják ki, az 2.3.3. alfejezetben leírtak szerint.

2.3.2 A CAQI skála

A CAQI skála 0-tól 100-ig terjed, ezen belül 5 veszélyességi csoportot azonosít, a lépték 25 egység. A levegő kiváló minőségű, ha a CAQI értéke nem haladja meg a 25 egységet és súlyosan mérgező, ha meghaladja a 100-at.

Qualitative name	Index or sub-index	Pollutant (hourly) concentration			
		NO ₂ µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	O ₃ µg/m ³	PM _{2,5} (optional) µg/m ³
Very low	0–25	0–50	0–25	0–60	0–15
Low	25–50	50–100	25–50	60–120	15–30
Medium	50–75	100–200	50–90	120–180	30–55
High	75–100	200–400	90–180	180–240	55–110
Very high	>100	>400	>180	>240	>110

2.2. ábra: CAQI veszélyességi szintek és szennyezők koncentrációjának kapcsolata

Az index kiszámításához 4 szennyező tényező koncentrációját mérik: nitrogén-dioxid (NO₂), ózon (O₃), PM₁₀-es és PM_{2,5}-es szálló por. A mérés értéke az óránkénti átlagos koncentráció, mértékegysége pedig a µm/m³.

2.3.3 Az AQI értékek számítása

AQI értékeket minden szennyező tényező esetén külön meg kell határozni, majd ezeket az értékeket összevetni. Erre azért van szükség, mert különböző szennyezők koncentrációja eltérő a levegőben, és ezek között nem lehet lineáris egyenlőséget húzni, így a koncentrációkat összehasonlítható értékke kell alakítani. A hivatalos mérési eredmények meghatározásakor általában 24 órányi mérés átlagos értékét közlik.

Az adott szennyezőhöz tartozó index érték az alábbi képlettel számolható ki [7]:

$$I_{\text{szennyező}} = \frac{I_{\text{magas}} - I_{\text{alacsony}}}{C_{\text{magas}} - C_{\text{alacsony}}} \times (C_{\text{szennyező}} - C_{\text{alacsony}}) + I_{\text{alacsony}}$$

ahol $I_{\text{szennyező}}$ a kiszámítandó index érték, $C_{\text{szennyező}}$ a szennyező átlagos koncentrációja a levegőben, C_{magas} és C_{alacsony} a szennyező koncentrációjának határértékei a mérés során ($C_{\text{alacsony}} \leq C$, $C_{\text{magas}} \geq C$), I_{magas} a C_{magas} -hoz tartozó indexhatár és I_{alacsony}

a C_{alacsony} -nak megfelelő indexhatár. A határértékek az adott AQI módszer által meghatározott csoportok határai.

Abban az esetben, ha egy mérési helyen több szennyezőt is figyelnek, az EPA (U.S Environmental Protection Agency, Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége) irányelve szerint a levegő általános AQI értéke a legmagasabb koncentrációjú szennyező indexértékével egyezik meg.

2.4 Szmog és szmogriadó

A szmog a légszennyezés egy olyan típusa, amely szálló por (elsősorban füst) és köd keverékéből áll, Neve is ezen két szó összetétele („smoke” és „fog”) [8]. Elsősorban nagy ipari tevékenységgel és sűrű népességgel rendelkező városi területeken fordul elő. Két fő típusát különböztetjük meg: klasszikus szmog és fotokémiai szmog. Klasszikus szmog elsősorban fosszilis tüzelőanyagok elégetésével alakul ki. Égés során olyan anyagok keletkeznek, mint a szálló por és a kén-dioxid, majd ezek a légkörbe jutva egyesülnek a vízgőzzel, így kialakítva a sűrű, ködös keveréket. Fotokémiai szmogot a különböző szennyező anyagok (elsősorban kipufogógáz) és a napfény reakciója hoz létre. Mivel nagyobb városokban több az autó, emiatt ott a leggyakoribb. Amikor a szennyező anyagok reakcióba lépnek a napfénnel, másodlagos szennyezőanyagok keletkeznek, például ózon. Ezek a másodlagos szennyezők adják a szmog jellegzetes színét és szagát.

A szmog mérséklése érdekében a kormányok, önkormányzatok és a környezetvédelmi ügynökségek különböző előírásokat hoznak létre. Ezek közé tartoznak az ipari kibocsátásokra és a járművek kibocsátására vonatkozó normák meghatározása, valamint intézkedéseket tesznek a tisztább energiaforrások támogatására. Emellett gyakran a légszennyezés csökkentésére és a fenntartható közlekedési módszerek alkalmazására irányuló figyelemfelkeltő kampányokat is végrehajtanak.

Köztudott, hogy Kína nagyvárosainak levegőminősége rossz. A szálló por mértéke gyakran eléri a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, 2012-ben az átlagos koncentráció Pekingben $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ volt [9], ami a CAQI által meghatározott alacsony határérték közel tízszerese. Ez a CAQI skála szerint közepes légszennyezésnek minősül, hosszabb kitettség esetén több betegség forrása lehet. Összehasonlításképp, Budapest átlagos $\text{PM}_{2,5}$ koncentrációja $14,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ez a CAQI skála által meghatározott alacsony kategóriába esik.

A kínai légszennyezés mértéke folyamatosan csökken [] elsősorban kormányzati közbenjárásra, de a kínai lakosság is felismerte a helyzet súlyosságát, és aktívan tesznek a tisztább levegőért [10]. A szmog kifejezés elterjedté vált, rendszeresen jelentik a szmoghelyzetet a hagyományos időjárás-jelentések mellett.

A szmog Budapesten is okoz problémákat. A szmogriadónak két fokozata van: tájékoztatási és riasztási fokozat [11]. Tájékoztatási fokozatot abban az esetben rendel el a főpolgármester, ha a szálló por koncentrációja három fővárosi mérőállomáson egyszerre meghaladja a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, ekkor arra kéri a lakosságot, hogy mérsékeljék az autók és a szilárd tüzelésű berendezések használatát. Riasztási fokozatot akkor rendelnek el, ha 3 fővárosi mérőállomáson két egymást követő napon a szálló por koncentráció meghaladja a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, valamint az előrejelzés nem mutat javulást. Ebben az esetben a járművekre forgalomkorlátozásokat vezetnek be (a jármű környezetvédelmi besorolása alapján), valamint kötelezően csökkenteniük kell a kibocsátást a szilárdtüzelésű berendezéseket alkalmazóknak. A világon mindenhol eltérő a megszokott levegőminőség. Ahogy az látható, az itthon különösen magasnak minősülő szennyezési értékek, melyek miatt korlátozásokat kell bevezetni, még mindig nem érik el a pekingi átlagos légszennyezettségi mértéket.

2.5 A magyarországi légszennyezettségi skála

Magyarországon az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) végzi a levegő minőségének ellenőrzését. 58 állandó és 2 mozgó mérőállomás található az ország területén. Ezeken a helyeken a magyar levegőminőségi index által meghatározott szennyező anyagokat mérik [12].

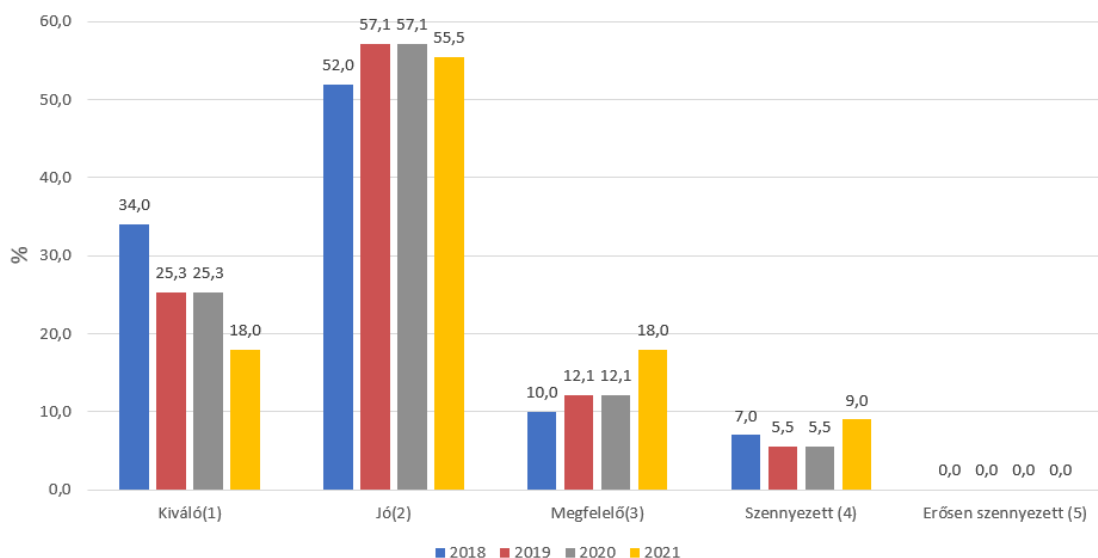
Szennyezőanyagok koncentrációja*						
	Kiváló	Jó	Megfelelő	Szennyezett	Erősen szennyezett	Rendkívül szennyezett
Benzol	0-4	4-8	8-10	10-20	20-30	30-50
CO	0-4000	4000-8000	8000-10000	10000-20000	20000-30000	30000-50000
PM_{2,5}	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800
PM₁₀	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	150-1200
NO₂	0-40	40-90	90-120	120-230	230-340	340-1000
O₃	0-50	50-100	100-130	130-240	240-380	380-800
SO₂	0-100	100-200	200-350	350-500	500-750	750-1250

*(a szennyezőanyagok koncentrációja [µg/m³] alapján)

3.3. ábra: Szennyező anyagok magyarországi határértékei

Az általános anyagokon (PM₁₀ és PM_{2,5}, ózon, szén-monoxid, nitrogén-dioxid, kén-dioxid) túl benzol (C₆H₆) koncentrációt is mérnek. Határértékekben szigorúbb, mint a CAQI által meghatározott értékek, benzol esetében pedig a skála 0-tól 50 µg/m³-ig terjed (1.3. ábra). Hat csoportot határoznak meg, mely a kiválótól a rendkívül szennyezettig terjed. Szakdolgozatom során ennek a táblázatnak a határértékeit használtam fel.

A légszennyezettség mértéke Magyarországon folyamatosan romlik. Tíz éves trendeket figyelve elmondható, hogy a szálló por koncentrációja csökken, azonban a nitrogén-dioxid koncentrációja megemelkedett egy mérőpont kivételével az összes helyszínen [13]. A jelenség mögött a közúti forgalom növekedése állhat, mivel nitrogén-dioxid elsősorban közlekedési tevékenységek nyomán keletkezik. A szálló por csökkenését a megújuló erőforrások (elsősorban napelem) térnyerése, valamint az elektromos járművek elterjedése segítheti. Sajnos a környezetkímélő megoldások terjedésének üteme nem elég gyors, ahogy az a következő ábrán is látható.



2.4. ábra: 2018., 2019. [14], 2020. és 2021. [13] évi magyarországi átlagos légszennyezettség összehasonlítása index kategóriánként

A 2.4. ábrán Magyarország átlagos légszennyezettségének százalékos megoszlása látható index kategóriánként 2018 és 2021 között. Összességében elmondható, hogy habár a légszennyezettség mértéke évről évre nő, a levegő minősége még mindig többnyire a „jó” kategóriába esik. A tendenciában látható a 2020-ban kiobbant COVID19 járvány hatása. Ekkor a kijárási korlátozások nyomán jelentősen lecsökkent a közúti forgalom és a repülőjáratok száma, azonban a levegő szennyezettségének mértéke még így is csak stagnált. A korlátozások döntő többsége 2021-ben megszűnt, amely látható az az évi átlagos levegőminőségen is.

3 A szennyezőket mérő eszközök

A levegő minőségének ismerete a háztartásokban is fontos, különösen, ha a ház vagy lakás egy forgalmasabb területen helyezkedik el: otthoni környezetben monitorozzák a levegő minőségét, és arról tájékoztatást adnak az ottlakóknak. Kereskedelmi forgalomban kapható számos olyan eszköz, amely képes egy bizonyos komponens, vagy az AQI skálák által meghatározott tényezők mindegyikének koncentrációját mérni. Fellelhetőek egyszerűbb eszközök, melyek értékeket nem közölnek, csak akkor jeleznek, amikor a szennyező anyag átlép egy bizonyos határt. Ezen az elven működnek például a szén-monoxid jelzők is. Kaphatóak továbbá teljes időjárás állomások is, ezek a berendezések több komponens koncentrációját is figyelik, az eredményeket pedig egy kijelzőn, vagy applikáció diagrammján jelenítik meg.

3.1 Az IKEA eszköze

Az IKEA svéd lakberendezési cég is kínál a levegő minőségét mérni képes terméket, amely a VINDRIKTNING (vagyis szélirány) nevet viseli. Megvizsgáltam ennek az eszköznek a felépítését és működési elvét, valamint az eredményeket felhasználtam a saját eszközöm által mért eredmények összehasonlításához.

3.1.1 Az eszköz felépítése

Az eszköz legfontosabb eleme a Cubic PM1006K porszenzor [15], ami optikai elven működik: rendelkezik egy infravörös fény kibocsátására képes LED-del¹ és egy optoelektronikus szenzorral. Ez utóbbi érzékelni képes a porszemcséken megtört fényt, aminek intenzitásából kiszámolható a szálló por koncentrációja. A szenzor belsejébe egy ventilátor juttatja a levegőt. Adatlapja szerint 0 és 1000 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (PM₁₀) átmérő közötti részecskék érzékelésére képes [16]. A szenzor nem képes különbséget tenni a detektált részecskék mérete között, így a mért értékbe beleszámít az összes átmérőjű porszem PM₁₀-ig. Működési elvéből fakadóan a valós koncentrációhoz képest 20 %-os hibaarányal (20 $\mu\text{m}/\text{m}^3$) érzékeli a koncentrációt, mind pozitív, mind negatív irányban.

¹ Light Emitting Diode, vagyis Fénykibocsátó Dióda

A szenzor értékeit ezután egy PCB (Printed Circuit Board, Nyomtatott Áramkör) lapka fogadja, majd dolgozza fel. A levegő minőségét három kategóriába sorolja: 0-35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ között jó/alacsony, 36 és 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. OK/közepes, 86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fölött pedig szennyezett/magas értéket jelez. A meghatározott kategóriát az eszköz előlapjára szerelt LED-ekkel szemlélteti: a meghatározott értéknek megfelelően zöld, sárga és piros színekkel.

3.1.2 Az eszköz kritikája

Bár az eszköz által használt szenzor viszonylag magas hibaarányal dolgozik, ez önmagában nem jelent nagy problémát, mivel a hasonló, olcsóbb eszközökbe szánt szenzorok mindegyike kisebb-nagyobb hibával képes érzékelni a detektálni kívánt attribútum értékét. A probléma legfőképp a határértékek megszabásánál jelentkezik. Ahogy a 3.1-es ábrán látható, a megszabott határértékek bőven túlmutatnak a Magyarországon alkalmazott AQI által megszabott határértékeken.

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM2,5 kategória határok	IKEA VINDRIKTNING
0	Kiváló	Jó
10		
11		
20	Jó	
21	Megfelelő	
25		
26		
35	Szennyezett	Közepes
36		
50		
51	Erősen szennyezett	
75		
76	Rendkívül szennyezett	
85		
86		
800		

3.1. ábra: Az IKEA eszköze által megszabott határértékek a magyarországi AQI skála határértékeivel összehasonlítva.

Az ábrán látható a magyarországi AQI skála PM2,5 részecskékre vonatkozó határértékei az IKEA eszköze által megszabott határértékekkel összehasonlítva. A VINDRIKTNING által megszabott jó/közepes levegőminőségi határ a Magyarországon elfogadott AQI skála szerint már bőven a szennyezett kategóriába tartozik. Hasonlóan, a közepes/szennyezett határ a magyarországi skála „Rendkívül szennyezett” kategóriájának alsó határértékétől 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -rel magasabban található. Ebből

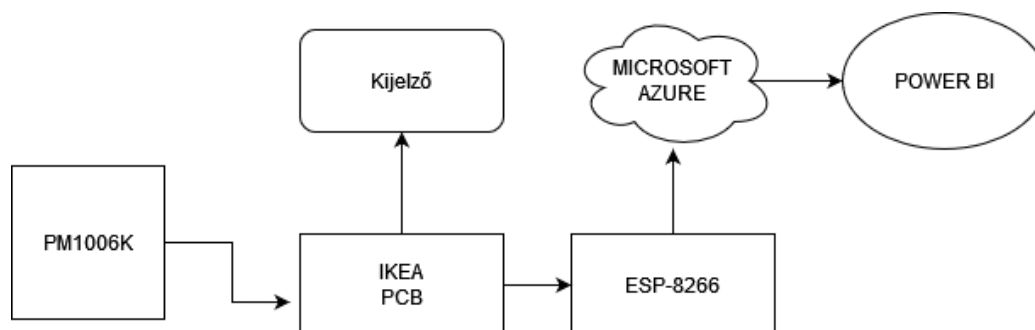
egyértelműen következik az a probléma, hogy egy szobában elhelyezve az eszköz hiába jelez zöld, vagyis jó levegőminőséget, a valóságban ez bőven meghaladhatja a skála által meghatározott egészséges határértéket.

További problémát okoz, hogy az IKEA hiába hirdeti PM_{2,5} koncentrációt mérő egységként az eszközt, ez csak félig igaz, ugyanis a Cubic PM1006K szenzor nem képes különbséget tenni a porszemek átmérője között, így legfeljebb közelíteni tudjuk a valós PM_{2,5} koncentrációt.

3.2 Az eszköz kiegészítése

Ahhoz, hogy ne csak egy három állapotú kimenet legyen, hanem a mért értékek láthatóak legyenek, ki kell egészíteni, fel kell „okosítani” az eszközt. Annak képesnek kell lennie tehát a mért adatok kinyerésére, valamint ezek továbbítására is a felhőrendszer irányába ahhoz, hogy később összehasonlítható legyen más eszközök méréseivel.

Ehhez szétszerelt állapotban a PCB (Printed Circuit Board, Nyomtatott Áramkör) lapkához forrasztottam három vezetékét: egy tápot, egy földet és egy olyan vezetékét, amin a lapka által már feldolgozott szenzorértékek érkeznek.



3.2 ábra: A kiegészített eszköz és kommunikáció a felhővel

Így a szenzor, a lapka és az állapotjelző mellé beiktatható egy negyedik szereplő is, egy saját mikrokontroller. A mikrokontroller egy lapkára szerelt, alacsony fogyasztású és kis teljesítményű számítógép. Az adatkinyerési feladatra ez tökéletes, ugyanis kis helyen elfér (praktikusan az eszköz saját házában), és kevés áramot fogyaszt. A választott mikrokontroller egy ESP-8266-os volt [17].

Mivel a gyártó a levegő minőségének besorolási határértékein kívül nem tett közzé dokumentációt az eszköz működéséről, például a mérések menetéről, így szükséges volt a működési elvének visszafejtése. A vezetéken egy folyamatos adatfolyam érkezik, mely a 2.2 ábrán látható mintát követi.

22	17	11	0	0
0	73	0	0	5
56	0	0	3	169
2	0	0	14	140

3.3. ábra: Az IKEA VINDRIKTNING adatfolyamának egy blokkja

Az adatfolyam egész értékekből áll, és blokkokra bontható: minden blokk húsz értékből áll. Tapasztalati úton megállapítható, hogy a blokk első három értéke a fejléc (22, 17, 11), ami jelzi, hogy új blokk érkezett. Az ezt követő tizenhét értékből számunkra a hetedik érdekes, ugyanis a levegő szennyezettségének mesterséges manipulálásával megállapítható, hogy ez az érték jelzi a PM_{2,5} koncentrációt. A szennyező anyagot (például füstöt) bejuttatva a szenzor belsejébe az érték megemelkedik, és amint eléri a 36-os értéket, a LED kijelzés színe átvált zöldről sárgára, valamint 86-os értéknél pirosra. A példában a levegő PM_{2,5} koncentrációja 73 µg/m³. A blokk többi értéke nem mutatott egyértelmű korrelációt a levegő minőségének változásával. Az értékek visszafejtése további munkát igényelne, azonban nincs is szükségünk rájuk, mivel elegendő a szálló por koncentrációjának mértéke.

A szenzor által mért értékeket lehet mesterségesen manipulálni: a LED és az érzékelő közé helyezett kellő méretű tömör tárgyat 100%-os porkoncentrációnak érzékel. Tehát például egy ceruzát a szenzorban elhelyezve megkapható, hogy az eszköz által mérhető maximális koncentráció értéke 255 µg/m³. A folyamatosan érkező adatfolyamból a megfelelő érték az alábbi csúszó-ablakos módszerrel nyerhető ki:

```
int bufferCount = 0;
int buffer[20];

int value = mySerial.read();
buffer[bufferCount++] = value;

if(bufferCount == 19) {
    bufferCount = 0;

    if (buffer[0] == 22 && buffer[1] == 17 && buffer[2] == 11) {
        Serial.println(buffer[6]);
        memset(buffer, 0, sizeof(buffer));
    }
    else {
        for (int i = 1; i < 20; i++) {
            buffer[i-1] = buffer[i];
        }
    }
}
}
```

Szükség van egy 20 elemű pufferre, ahova a mikrokontroller kimentti az összes értéket, ami az eszközről érkezik. Ezen kívül kell egy számláló, ami figyeli, hogy 20 érték érkezett-e már a pufferbe. Ezután szükséges egy vizsgálat, amely megmutatja, hogy az első 3 érték megegyezik-e a fejléc értékeivel. Amennyiben ez igaz visszatérési értéket ad, kiválasztja a puffer 7. elemét, ami a szenzor által mért PM_{2,5} koncentráció. Ha a puffer első három eleme nem a fejléc értékeit adja vissza, a puffer értékeit egyel eltoljuk, helyet adva a következő iterációban érkező értéknek.

Mivel az eszköz PPM értékekkel dolgozik, ezeket át kell konvertálni AQI értékekre. Ehhez az 2.3.3 alfejezetben definiált képletet használtam:

```
float pm25_Clow[] = {0, 10, 20, 25, 50, 75};
float pm25_Chigh[] = {9.9, 19.9, 24.9, 49.9, 74.9, 800};

int aqi_Ilow[] = {0, 26, 51, 76, 101, 301};
int aqi_Ihigh[] = {25, 50, 75, 100, 300, 500};

int I = 0;
int C = 0;

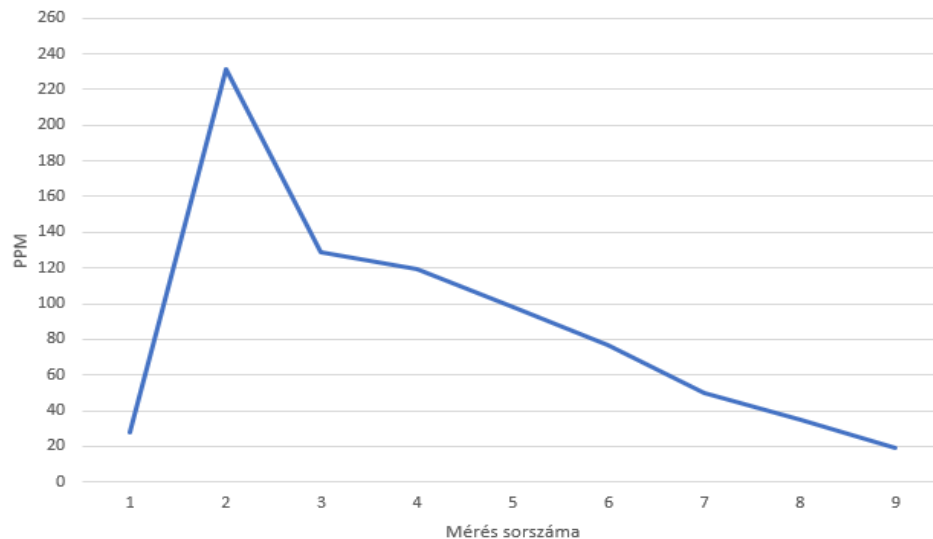
for (int i = 0; i < 6; i++) {
    if (C >= pm25_Clow[i] && C <= pm25_Chigh[i]) {
        I = (aqi_Ihigh[i] - aqi_Ilow[i]) / (pm25_Chigh[i] - pm25_Clow[i])
            * (C - pm25_Clow[i]) + aqi_Ilow[i];

        Serial.print("PM2.5 AQI: ");
        Serial.println(I);

        break;
    }
}
```

Itt először definiálni kell 4 tömböt: kettőt a választott AQI szabványban meghatározott (jelen esetben szálló por koncentrációhoz tartozó) csoportok alsó, illetve felső értékeivel, kettőt pedig ugyanezen csoportokhoz tartozó indexértékek alsó és felső értékeivel. Az általam választott szabvány a CAQI Magyarországon használt verziója volt. Az AQI értékek számítását egy ciklusban lehet megoldani. A feltételben megvizsgáljuk, hogy a mért PPM érték melyik csoport határértékei közé esik. Amennyiben megtaláltuk, a képlettel kiszámítható a koncentrációhoz tartozó AQI érték.

Az eszköz a bekapcsolás után nem a pontos mértékekkel kezd. Először mér egy alacsonyabb (30 körüli) értéket, majd egy magasat (200 feletti), ezután pár lépésben beállítja saját magát a valós porkoncentrációra, ahogy az a 2.3-as ábrán látható.



3.4 ábra: Az IKEA VINDRIKTNING adaptivitása

Az ábrán szépen kirajzolódik az eszköz működési módja: nem mindig az aktuális értékeket mutatja, van benne egy erőteljes zajszűrő algoritmus, amely miatt több lépés után tud csak beállni a valós értékekre.

3.3 A IKEA legújabb eszköze

A felhasználói visszajelzések alapján a gyártó is rájött, hogy a VINDRIKTNING-nek vannak hiányosságai. Emiatt kifejlesztettek egy újabb eszközt, amely a VINDSTYRKA (szélerősség) nevet kapta [18]. Az alapja ugyanaz a szenzor, azonban kiegészítették egy hőmérséklet- és páratartalom érzékelővel, valamint egy kijelzővel, amely megjeleníti a konkrét mért értékeket is, nem csak egy színkódolt általános állapotot. . Változtattak a határértékeken is, azonban sajnos nem a megfelelő irányban. A zöld levegőminőség határértékei maradtak a régiek, a sárgáé azonban a 85-ös maximumról $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -re emelkedett, az efölötti értékek pedig piros kategóriába esnek. Az eredeti eszköz értékei sem feleltek meg a WHO által közölt ajánlásoknak, az újak pedig még inkább hamis érzetet keltenek a levegő minőségével kapcsolatban egy olyan ember számára, akinek a számszerű értékek nem mondanak sokat.

4 Saját eszköz fejlesztése

A feladatom következő lépése egy saját levegőminőséget mérni képes eszköz fejlesztése volt. Az eszköz elvárt működése szerint képes a levegőt egy indexértékkel jellemezni, amit további elemzések céljából elküld rádiós kommunikációs csatornán keresztül valamely felhőrendszernek. Az eszköznek képesnek kell lennie mérni a levegő szálló por koncentrációját, valamint szén-dioxid értékét. A mért értékekből az 1.3-as fejezetben ismertetett módon előállít egy indexértéket, amellyel a levegő minőségét lehet jellemezni.

4.1 Eszközkomponensek

4.1.1 A mikrokontroller

Az eszköz alapjául egy ESP-32-es mikrokontrollert választottam [19]. Ez az eszköz rendelkezik egy beépített WiFi modullal, 5 és 3,3 V-os lábbal és több ADC átalakítóval (analog-digital converter, vagyis analóg-digitális átalakító) felszerelt lábbal is, szemben az ESP-8266-tal. Erre azért volt szükség, mivel mindkét általam használt szenzor analóg értékeket küld tovább, és az IKEA eszközénél használt ESP-8266 csak egy ilyen lábbal rendelkezik. A fejlesztés során, amikor a szenzorokat külön kezeltem, itt is használtam ESP8266-os mikrokontrollert.

4.1.2 A szenzorok

Az eszköz fő komponense egy Sharp GP2Y1010AU0F jelzésű szálló por és füst érzékelésre képes szenzor [20]. Az IKEA által használt Cubic PM1006K-hoz hasonló módon, optikai elven működik. A részecskék, a levegővel együtt, egy bemeneti nyíláson keresztül érkezik a szenzor belsejébe, ahol infravörös fénnel megvilágítják a levegőben lévő részecskéket, majd a fény szóródásából keletkezik egy feszültségérték, a por koncentrációjával egyenes arányban növekedve.

Ezt a szenzort gyakran használják légszennyezettség mérő eszközökben, illetve légtisztító berendezésekben. Könnyű vele dolgozni, azonban nem mér tökéletes pontossággal. Adatlapja szerint az átlagos eltérés 20% lehet mind pozitív, mind negatív irányban. Ezen tulajdonsága miatt a szenzor nem alkalmazható olyan helyeken, ahol

mindenkor pontos értékeket kell mérni, de otthoni környezetben, vagy légszennyezésre nem érzékeny helyeken alkalmazható.

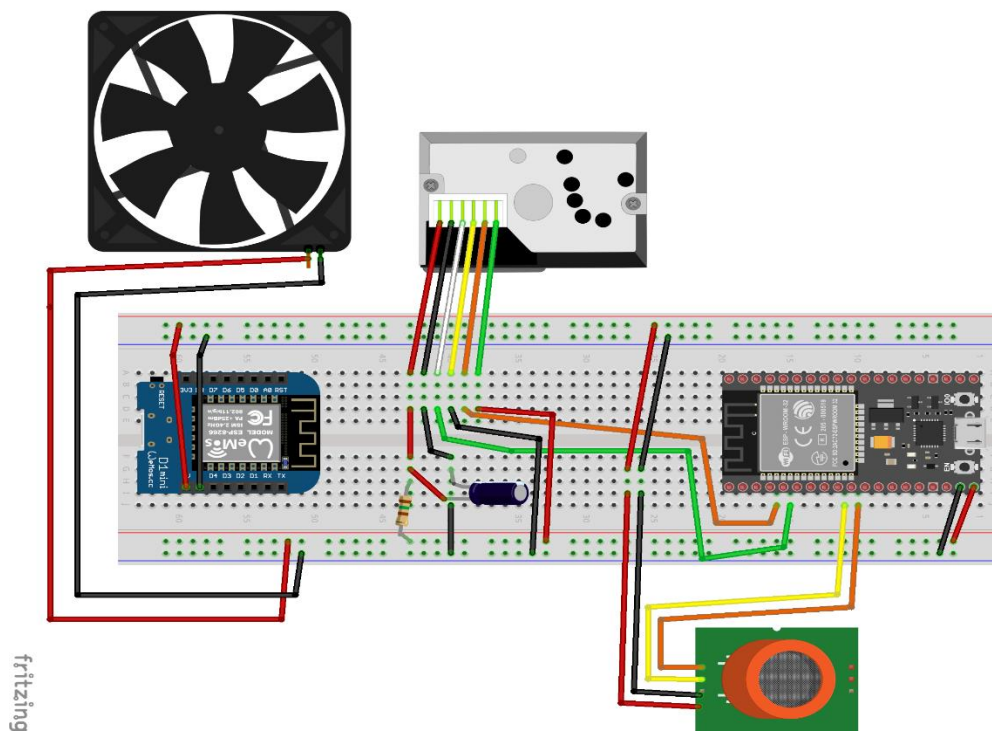
Az AQI értékek mérésekor több szennyező koncentrációját is figyelembe veszik. Ahhoz, hogy valamivel pontosabb képet kapjak a levegő minőségéről, szükség volt egy másik komponens mérésére képes szenzorra is. Ehhez egy MQ-135-ös gázszenzort használtam [21]. Ezt a szenzort gyakran alkalmazzák irodákba, otthonokba szánt eszközökben, könnyű kezelhetősége és széles felhasználási köre miatt: képes érzékelni többek között benzol, alkohol, nitrogén-oxidok és szén-dioxid koncentrációt is.

Az MQ-135 gázszenzor egy fűtött katalitikus égési cellát tartalmaz, amelynek a feladata az, hogy a reagáló gázokat elektrokémiai folyamatok révén érzékelje. A szenzorban található érzékelő anyag az ón-dioxid (SnO_2). Amikor a célgázok érintkeznek az érzékelő anyaggal, oxidálódnak, ennek nyomán pedig megváltozik a szenzor ellenállása. A szenzor gázdetektálása ezen az ellenállásváltozáson alapul. Az érzékelőt árammal fűtik, amely miatt nagy az energiaigénye, ezáltal külön tápegységre szorul. Az MQ-135 szenzorhoz általában egy előerősítő és analóg-digitális átalakító áramkört használnak, hogy a szenzor jeleit feldolgozzák és digitális formátumban továbbítsák, amely lehetővé teszi a gázkoncentráció értékének meghatározását és az adatok további feldolgozását. Egy ilyen szenzormodult használtam fel én is. A szenzor a Sharp porszenzorhoz hasonlóan nem tesz különbséget a detektált gázok között. Amennyiben az érzékelő réteg olyan gázzal találkozik, amelyet detektálni képes, a szenzor feszültségértéke megváltozik. Kalibrálással azonban érzékenyíteni lehet a szenzort egy adott gázra.

4.2 Összeszerelés

Az eszköz komponenseit egy próbapanelen helyeztem el. Ahhoz, hogy a Sharp porszenzor megfelelő értékeket mérjen, az adatlap szerint szükség van egy 220 μF -os kondenzátorra és egy 150 ohm-os ellenállásra, melyeket a szenzor fényérzékelőjéhez kell kötni. A LED-nek külön tápellátása van, illetve külön vezetéken lehet változtatni az állapotát. Az MQ-135 gázszenzornak négy lába van: tápellátás, föld, digitális kimenet, illetve analóg kimenet. A szenzormodulon elhelyezett potméterrel beállítható egy érzékenység, amire a digitális kimeneten 0 vagy 1 értéket kapunk a mért érték és a határérték viszonyától függően. A konkrét értékek a szenzormodul analóg lábán érkeznek, értékük 0 és 1024 között mozog. Az MQ-135 tápellátását egy második

mikrokontroller látja el, mivel a szenzor hevítéséhez sok áramra van szükség. Az eszközt kiegészítettem egy kisméretű ventilátorral is, amelyet a Sharp porszenzor aljára helyeztem el, és a bemeneti nyíláson keresztül levegőt juttat a szenzorba, ezáltal gyorsabban és pontosabban képes reagálni a környezeti változásokra. Az összeszerelt eszköz kapcsolási ábrája a 4.1-es ábrán látható:



4.1 ábra: Az eszközkomponensek összeszerelve

4.3 Kalibrálás

4.3.1 Sharp kalibrálás

A kalibráció első lépése a teljesen tiszta levegőre adott feszültségérték meghatározása. Erre azért van szükség, mert a teljesen tiszta levegőre nem nulla volt feszültséget adnak a szenzorok, van egy ambiens feszültségérték, amivel számolni kell. Ez a " V_0 " érték minden szenzor esetén más. Meghatározásához egy hermetikusan lezárt dobozt használtam, ahol eleve tiszta levegőben hagytam leülepedni a port, így meghatározva az ambiens feszültségértéket, ami 0,123 V. Érdekesség, hogy egy tanulmányban [22] alkalmazott három szenzor mindegyike 0,8 V körüli ambiens

feszültségértéket adott. Ennek több okát is látom: az egyik, hogy más szériához tartoznak, mint az általam használt szenzor, így más komponensek is kerültek bele, amik befolyással vannak a működésére. A másik, hogy a szenzorok öregedésével a mérési képességük is változik. Mivel az én általam használt szenzor régebbi, ezért jóval kisebb feszültségértéket képes mérni. Emiatt a hasonló típusú szenzorokat időről-időre újra kell kalibrálni a pontosság fenntartásának érdekében.

Második lépésként szükségem volt az IKEA szenzora által mérhető legmagasabb PPM értékre: $255 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ezt követően a két értékből, valamint a pillanatnyi feszültségértékből kiszámítható a Sharp porszenzor által mért PPM érték., meghatározása a következő:

$$PPM_{\text{szálló por}} = \frac{(\text{mért feszültség} - \text{ambiens feszültség}) * 255}{5 - \text{ambiens feszültség}}$$

Ezt azért tehetem meg így, mert a két szenzor karakterisztikája szinte azonos: a porkoncentrációval lineárisan nő a feszültségérték is. Így a saját eszközőm által mért adatokat viszonyíthatom az IKEA eszközéhez, ez a viszonyítási pont pedig a maximális mért érték lesz: az IKEA eszköze által mérhető maximális érték a saját eszközőmben megfeleltethető a maximális 5 voltoknak. A mért feszültségből kivonva az ambiens feszültséget, megkapható a valódi feszültségérték. Az ambiens feszültséget a maximális 5 voltos feszültségből is le kell vonni. Így a korrigált, valódi feszültség és a maximális feszültség arányából, valamint az IKEA eszközőnek maximális mérhető PPM értékéből keresztszorozattal állítható elő a saját eszközőm által mért porkoncentráció $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mértékegységgel.

Az eszköz 0,5 másodpercenként mér adatokat, amelyeket egy 10 elemű tömbben helyez el, végül a tömbben tárolt adatokból meghatározza a porkoncentrációt, tehát az eszköz 5 másodpercenként küld mérési adatokat. Kezdetben kiszámolta a tömbben elhelyezett mérési adatok átlagát és mediánját, azonban ezek az értékek nem bizonyultak elég pontosnak, a zaj szintje túl magas volt az adathalmazban. Természetesen a két érték, vagyis az IKEA által és a saját eszközőm által mért érték nem minden esetben lesz azonos. A nagyobb porszemek eltolhatják az eredményeket, amik zajként kiugró értékeket generálnak. Ezek miatt a mért értékek átlagolása és a medián számítása nem eredményezi a valóshoz legközelebbi értékeket.

A pontosság növeléséhez először a medián alapú szűrés módszerét választottam. Ennek lényege, hogy kiszámítjuk a mért értékek mediánját, majd meghatározunk egy

hibahatárt, jellemzően a medián értéktől való százalékos eltérést. Ezután végig megyünk a mért értékeken, és csak azokat használjuk fel, melyek a hiba két szélsőértéke közé esnek. Végül vesszük a szűrt értékek átlagát, amely így az ezzel a módszerrel elérhető legpontosabb eredményt adja. A hibahatár itt a „nyers” medián 75%-os sugara volt: minden, ami a mért mediántól több, mint 75%-ban eltér, törlésre kerül az adatkészletből.

Megvizsgáltam egy másik zajszűrő algoritmust is: a csúszó átlag számításának módszerét. A módszer lényege, hogy az értékek átlagát egy meghatározott időablakon belül számítjuk, és ezt az átlagot az időablakon végig haladva folyamatosan frissítjük. Az időablak itt a mérések számát jelenti: minél nagyobb az ablak mérete, annál simább lesz a csúszó átlagokból felrajzolható görbe. Az ablak mérete 10, az előző mérésekkel módszerekkel összhangban. Új mért érték érkezésekor az ablakot egyel előre csúsztatjuk: az adathalmazból kivesszük a legutolsó értéket és hozzáadjuk a legújabbat, végül újraszámoljuk az átlagot. A csúszó átlag számítását a következő algoritmus végzi:

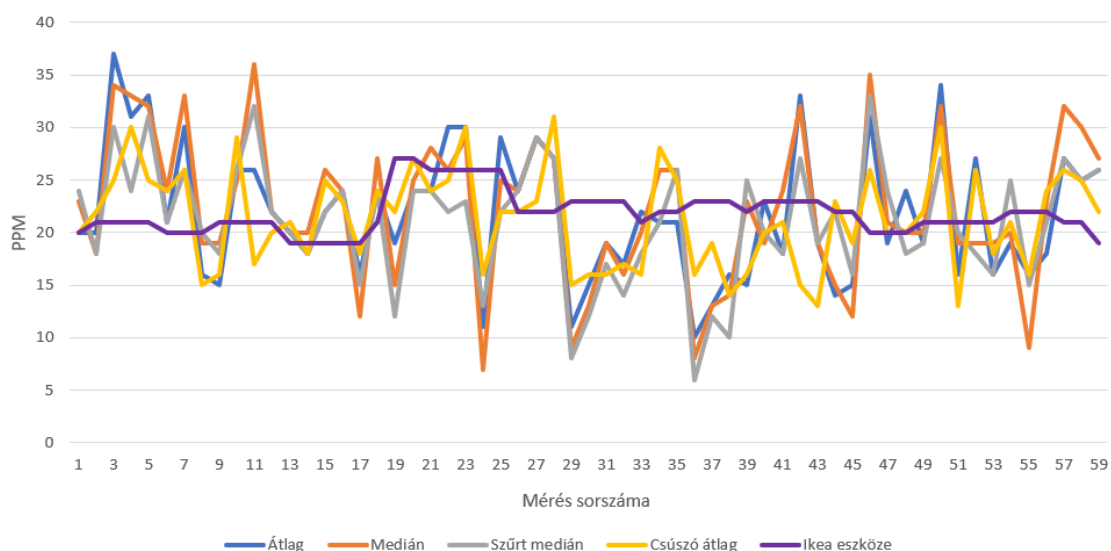
```
int buffSize = 10;
int buffMovingAverage[buffSize];
int sum_moving_average = 0;
int idx = 0;
int num_values = 0;

int MovingAverage(int value) {
    sum_moving_average += value;

    if(num_values == buffSize) sum_moving_average -= buffMovingAverage[idx];
    buffMovingAverage[idx] = value;
    if(num_values < buffSize) num_values++;
    idx++;
    if (idx >= buffSize) idx = 0;

    return sum_moving_average / buffSize;
}
```

A különböző mérési módszerek, vagyis a korrigálatlan átlag és medián, valamint a medián által korrigált átlag és csúszó átlag eredményei a 4.2. ábrán látható, kiegészítve az IKEA eszközének referenciaértékeivel. A legpontosabb eredményeket a csúszó átlag alkalmazásával kaptam, így a mérések során ezt a módszert használtam.



4.2. ábra: Az eszköz által detektált porkoncentráció összehasonlítása különböző mérési módszerekkel

A szenzor pontossága tovább növelhető, amennyiben az adatlap által meghatározott ellenállástól és kondenzátortól eltérőt alkalmazunk [22]: 470 μF fölötti kapacitású kondenzátorok használatával a LED fényessége eléri a maximumát.

Ezen kívül alkalmazhatók különböző áteresztő képességű fizikai szűrők, melyek nem engednek át bizonyos méretnél nagyobb porszemeket.

4.3.2 MQ135 kalibrálás

Mivel a szén-dioxid nem tartozik a különböző AQI skálák által megfigyelt szennyezők közé, meg kellett határoznom egy saját skálát, ami alapján a detektál értékeket átválthatom indexértékekre. A határértékek az alábbi 4.3. ábrán láthatóak. A magyarországi AQI skála csoportjait használtam fel, a „kiváló” csoport felső határértéke 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, „jó” levegőminőségről 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -ig beszélhetünk. Ezt követően a „szennyezett” csoport felső határértékéig 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ léptéket használtam.

Szén-dioxid $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Kategória
0	Kiváló
400	
401	Jó
1000	
1001	Megfelelő
1500	
1501	Szennyezett
2000	
2001	Erősen szennyezett
5000	
5001	Rendkívül szennyezett
10000	

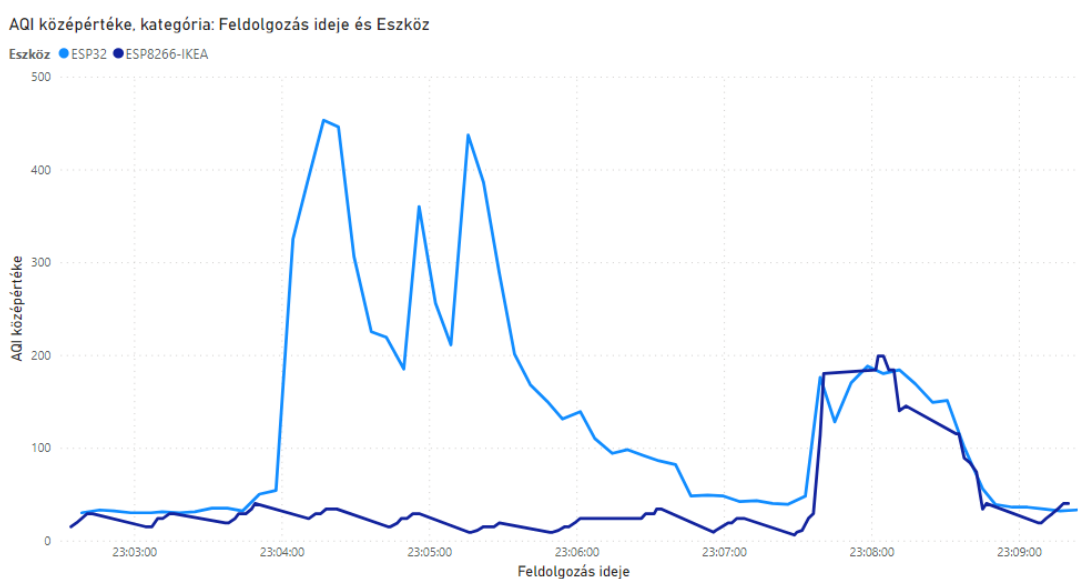
4.3. ábra: Az AQI értékek számításához meghatározott szén-dioxid koncentráció határértékei

A kalibrálás folyamata hasonló a porszenzoréhoz. A legfőbb különbség, hogy itt nem teljesen tiszta levegőhöz határozzuk meg az ambiens feszültséget, hanem egyszerűen a tiszta levegőn, atmoszférikus szén-dioxid szinten hevíteni kell a szenzort legalább 48 órán keresztül. Erre hevítési fázisra a szenzor működési elve miatt van szükség. A kalibráláshoz segítségül vettem egy külső könyvtárat, amely a hevítési fázist követően meghatározza a zéró szén-dioxid szintet, amiből később számítani lehet a valódi szén-dioxid koncentrációt. Itt is ki kell emelnem, hogy a szenzor nem képes különbséget tenni az általa detektálható gázok között, azonban kalibrálás során érzékenyíteni lehet a mérni kívánt gáz koncentrációjára.

A szén-dioxid koncentrációjának meghatározásához a szálló por koncentrációjánál is használt csúszó átlagos megoldást alkalmaztam. Sajnos nem rendelkezem olyan eszközzel, amely képes hitelesített szén-dioxid szintet meghatározni, így a 6. fejezetben elvégzett mérések során a tendenciákat részesítettem előnyben a konkrét mért értékekkel szemben.

4.4 A működés tesztelése

Az véglegesített eszköz működésének teszteléséhez szükségem volt külön az IKEA eszközének referenciaértékeire. Két eset vizsgálatára volt szükség: az eszköz megfelelően reagál-e a porkoncentráció növekedésére, tehát a mért adatok korrelálnak-e a VINDRIKTNING által detektált koncentrációval, illetve az eszköz megfelelően reagál-e a levegő szén-dioxid koncentrációjának emelkedésére, vagyis, hogy a két szennyező közül a magasabb indexértékű szennyezőhöz tartozó AQI értéket küldi-e tovább. Ez utóbbi esethez referenciaértékek nem álltak rendelkezésemre, mivel nem rendelkezttem a szén-dioxid szintet mérni képes egyéb eszközzel.



4.4. ábra: Az eszköz működésének tesztelése

Az ábráról leolvasható, hogy a teszt elején a szoba levegőjének általános levegőminőségét leginkább a szén-dioxid szintje határozta meg. Az MQ-135 szenzor érzékelőjére közvetlen közletről magas koncentrációjú szén-dioxidot juttatva a saját szenzorom által számított AQI érték jelentősen megemelkedett. Ezt követően a levegőbe szálló port engedve mindkét eszköz által detektált AQI érték megemelkedett, az értékek korreláltak. Az eszköz működésének részletesebb elemzése a 7. fejezetben olvasható.

5 Kommunikáció a felhővel

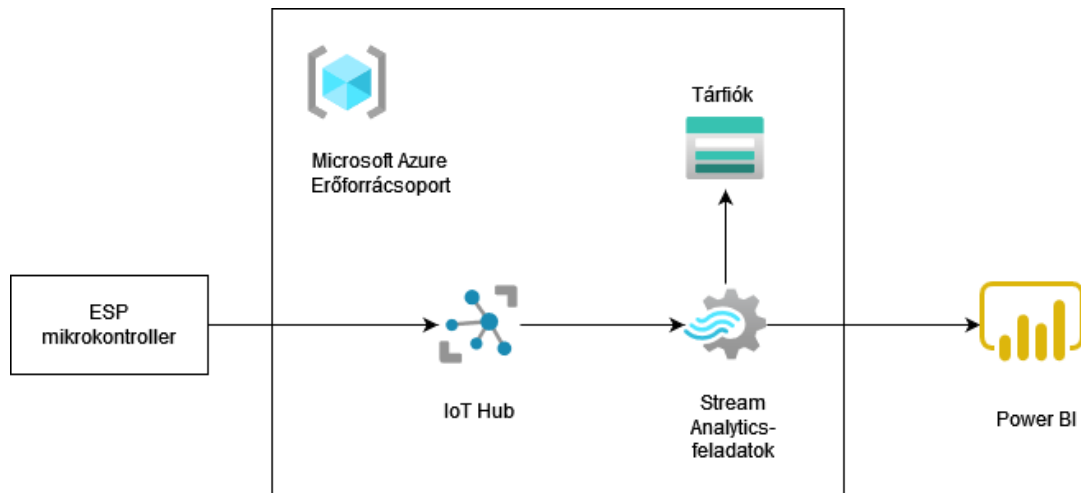
5.1 Rádiós kommunikáció

Ahhoz, hogy a mért adatokat könnyen össze tudjuk hasonlítani, szükség van egy platformra, ahol minden mért érték megjelenik, szükség esetén pedig elemzéseket is végrehajthatunk. Erre használhatunk egy felhőplatformot. A mért értékek közléséhez szükség van egy kommunikációs csatornára. Ehhez a WiFi szabványt használtam. Az általam alkalmazott ESP mikrokontrollerek mindegyike rendelkezik beépített WiFi modullal, melyek a 802.11b/g/n szabványt követik, tehát megfelelő körülmények között elérhetik a 600 Mb/s átviteli sebességet. Ez bőven több, mint elegendő, ugyanis csak szöveges üzenetek közvetítésére van szükség.

A mikrokontroller WiFi moduljának használatához szükség van egy segédkönyvtárra, ami mikrokontrollerenként eltérő, használatuk azonban azonos. Definiálni kell a WiFi hálózat azonosítóját és jelszavát, ezt követően pedig egy titkosított csatornán már elérhető az eszköz, lekérdezhetjük többek között az IPv4-es címét is.

5.2 A felhőszolgáltató és a kiépített felhőrendszer

Felhőszolgáltatásnak egy olyan platformot választottam, amellyel már foglalkoztam egyetemi tanulmányaim során, ez a Microsoft Azure [23]. Széles körben elterjedt felhőplatform, IoT megoldásokon kívül több szolgáltatást is nyújt: mesterséges intelligencia, analitika, adatbázisok, hálózati megoldások.



5.1 ábra: A felhőrendszer komponensei

A kommunikáció MQTT (Message Queue Telemetry Transport) protokollal történik, ami egy publish-subscribe alapú, machine-to-machine (M2M) üzenetküldő protokoll. Előnye, hogy könnyűsúlyú, vagyis nem szállít túl sok adatot, így olyan helyeken is használható, ahol limitáltan áll rendelkezésre sávszélesség. A küldött üzeneteket topikokba, témakörökbe lehet rendezni, és ezekre a topikokra fel lehet iratkozni. Az eszköz először egy MQTT brókerrel kommunikál, ami egy központi szerverként funkcionál az eszköz és a vizualizációra szolgáló megoldás között. Ezt a szerepet a Microsoft Azure IoT Hub szolgáltatása látja el. Itt létre kell hozni úgynevezett eszközöket, amelyek logikai egységet alkotnak, illetve a fő topikot adják: ESP32 a saját eszközömnak és ESP8266-IKEA az IKEA eszközének. Az üzeneteket JSON struktúrába rendezve küldhetjük el a felhőnek. Egy ilyen struktúrát az alábbi módon lehet felépíteni:

```

sprintf(message, "{\"deviceID\":\"%s\", \"messageID\":%d, \"PPM\":%d, \"AQI\":%d}", IOT_CONFIG_DEVICE_ID, messageID++, C, I);

```

Az üzenet tartalmazza az üzenetet küldő eszköz azonosítóját, az üzenet sorszámát, a mért PPM értéket és a hozzá tartozó AQI értéket, amelyek egyben topikokat is alkotnak az MQTT protokoll számára. Ezek összessége alkotja a JSON üzenet törzsét, a törzsön kívül pedig elküldésre kerül az üzenet időpontja, illetve opcionálisan egyéb paraméterek is, melyek az Azure működése szempontjából fontosak lehetnek:

```

{
  "body": {
    "deviceID": "ESP8266-IKEA",
    "messageID": 109,
    "PPM": 34,
    "AQI": 168
  },
}

```

```
"enqueuedTime": "Mon Jun 05 2023 15:57:43 GMT+0200 (közép-európai  
nyári idő)",  
"properties": {}  
}
```

Az IoT Hub a beérkezett JSON csomagot továbbküldi a Stream-Analytics feladatok szolgáltatásnak. Az SA feladata az, hogy szétossza a beérkezett információt a többi komponens között. SQL lekérdezésekkel megadható, hogy melyik bemenetéről melyik kimenetére milyen adatokat továbbítson. Egybemenetünk (az IoT Hub), illetve két kimenetünk (Tárfiók és Power BI) van. Itt két lekérdezést készítettem el: az első minden beérkező adatot továbbít a tárfióknak, a második az eszköz azonosítóját, a feldolgozás idejét, a PPM értéket, valamint a levegő indexértékét továbbítja a Power BI felé.

A Tárfiók feladata, hogy minden beérkező adatot mentsen el, hogy később könnyen visszahívhatóak legyenek az eredmények, illetve további elemzéseket lehessen elvégezni rajtuk. A beérkező adatokat év/hónap/nap/óra struktúrában tárolja el.

A Microsoft Power Business Intelligence (Power BI, Üzleti Intelligencia) egy adatkezelési és feldolgozási platform. Használatával lehetőség van adatok gyűjtésére, feldolgozására, vizualizációjára gyorsan és hatékonyan. A Stream Analytics szolgáltatással összekötve több eszközről érkező adatok valós idejű megjelenítésére is képes, de a JSON struktúrában elmentett méréseket később be is lehet tölteni. A mérések során használtam mindkét lehetőséget: a valós idejű megjelenítéssel ellenőriztem a mérések alatt az eszközöket (mérnek-e, megszakadt-e a kapcsolat stb.), majd a mentett adatokat beolvastva elemeztem az eredményeket.

Az egész felhőrendszert összefogja az erőforráscsoport, ami a felhőplatform logikai csoportosítási egysége. Az Azure lehetővé teszi, hogy erőforráscsoportonként különböző szabályokat, konfigurációkat alkalmazzunk. Ez megkönnyíti az erőforrások kezelését, skálázhatóságát, valamint a biztonságot is növeli, például külön tűzfal felkonfigurálásával.

6 Mérések és eredményeik

6.1 Mérési környezet

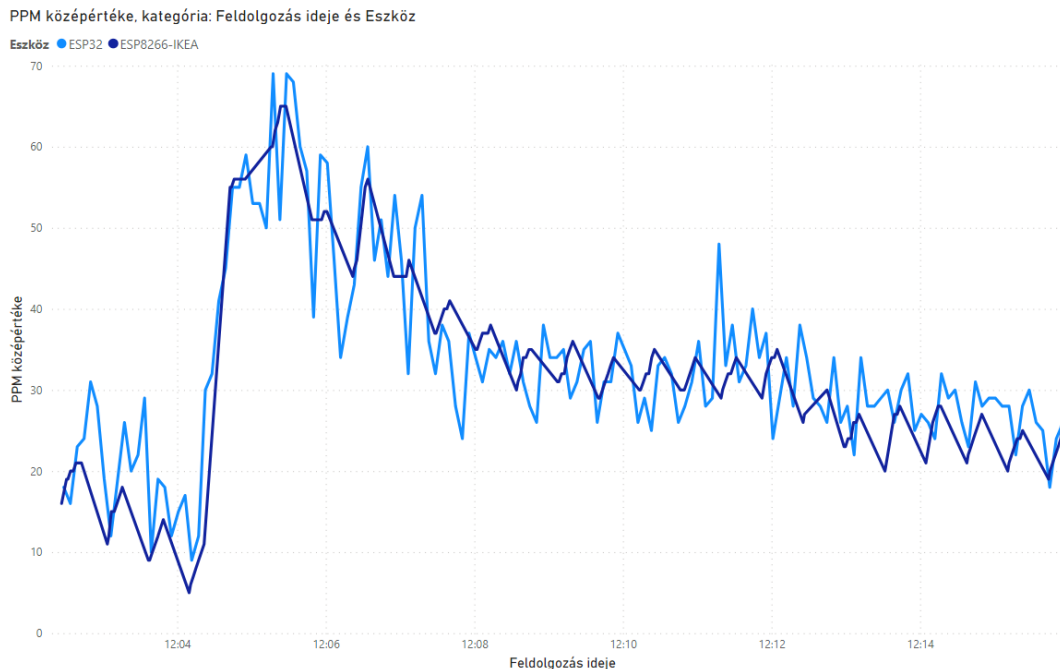
Az eszköz teszteléséhez szükség volt egy olyan környezetre háztartáson belül, ahol kontrollált módon lehet légszennyezést generálni, illetve légmozgást szimulálni. Légmozgást egy egyszerű, három erősségi fokozatú ventilátorral lehet kelteni. Légszennyezést többféle módon lehet előállítani otthoni környezetben. Vízgőz keletkezésekor, illetve párologtató használatakor létrejönnek $2,5\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjű, illetve annál kisebb részecskék is, amelyek a használt, optikai elven működő porszenzort „át tudják verni”, ezeket porszemcsékként érzékeli. Egy másik módszer az égés során keletkező füst mérése, mivel égés során keletkeznek „megfelelő” méretű részecskék. Égés során $\text{PM}_{2,5}$ részecskéket generál például egy gyertya vagy egy füstölő is. Ezen kívül létrejön szén-dioxid is, amivel az MQ135 szenzort is lehet tesztelni.

A mérések során a szoba ablakait zárva tartottam, hogy a levegő mozgására csak a ventilátor legyen hatással. A saját eszközőm szenzorait teszteltem külön-külön is és egyben is. Porkoncentráció mérésekor referenciaértéknek minden esetben felhasználtam az IKEA VINDRIKTNING eredményeit.

A szenzorok által mért értékekre befolyással lehet a szobában lévő levegő ambiens por- vagy szén-dioxid koncentrációja, így előfordulhat, hogy a szennyezés forrásától ugyanolyan távolságban elhelyezett szenzor két különböző mérés során más-más értékeket közöl. Ezen okból kifolyólag a mérések során a konkrét értékek mellett elsősorban a tendenciákat figyeltem meg. Minden típusú mérést háromszor végeztem el, és a három adatkészlet közül kiválasztottam a legrepresentatívabbat. A mérések során minden esetben az adott szennyező koncentrációjának időbeni változását vizsgáltam, a grafikonokon mindkét eszköz mérése párhuzamosan jelenik meg. A grafikonok sötétkék vonala az IKEA VINDRIKTNING eszközének mérési eredményeit, a világoskék vonala pedig a saját eszközőm mérésének eredményeit mutatja.

6.2 Szélerősség, szélirány, távolság a szennyezés forrásától

Az első mérés során megvizsgáltam, hogy milyen hatással van a szélerősség a detektált porkoncentrációra. A ventilátor 3 sebességi fokozattal rendelkezik, amelyeket két percenként állítottam, egyes fokozatról indulva. A teljes mérés 15 percen keresztül tartott, a két eszközt egymás mellett helyeztem el, a szenzorok és a füstölő közötti távolság 60 centiméter volt. A tendenciák a 6.1. ábrán láthatók:

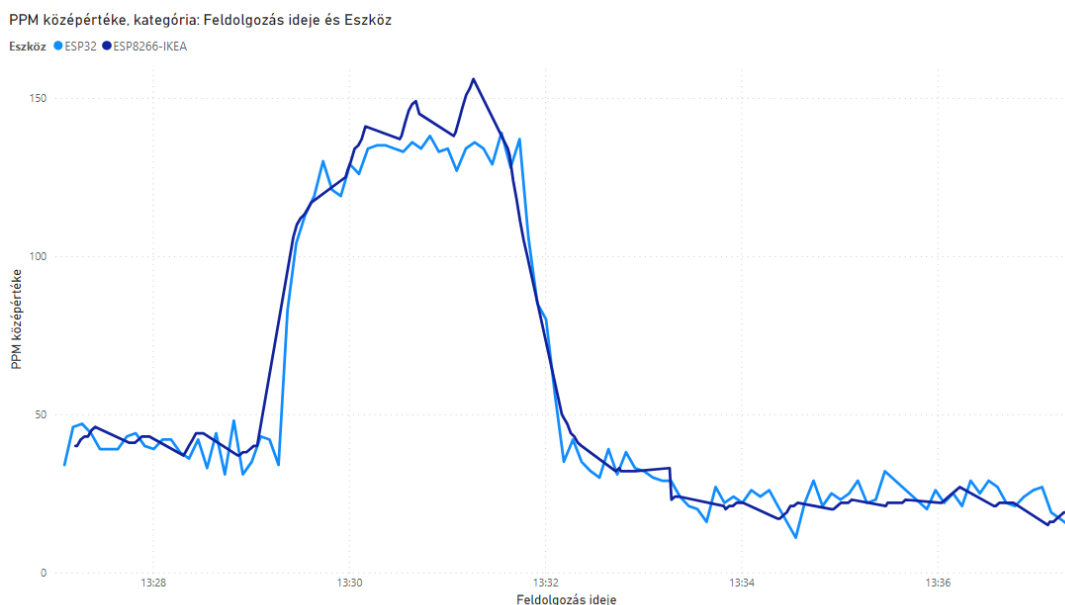


6.1. ábra: Szélerősség

A mérés előtt megmértem az ambiens porkoncentrációt, amely 20 és 30 ppm körül mozgott, attól függően, hogy melyik eszköz eredményeit vizsgáljuk (a saját eszközöm eredményei ambiens mérésnél jellemzően magasabbak). A füstölő meggyújtása után a ventilátort egyes fokozatra állítottam. A két berendezés ekkor 45 és 68 (átlagosan 56) ppm közötti koncentrációt érzékelt. 12:07-kor átállítottam a ventilátort kettes sebességi fokozatra. A grafikonon látható, hogy a detektált koncentráció ekkor csökkenésnek indult. Az átlagos pormennyiség 34 ppm volt, ami körülbelül 35%-os csökkenést jelent. 12:12-kor a ventilátor sebességi fokozatát a maximális hármas erősségre állítottam. A porkoncentráció itt is csökkent, azonban a csökkenés mértéke alacsonyabb volt: a második fokozat eredményeihez képest 29%, míg az első fokozathoz képest 56%-os csökkenés volt tapasztalható. Megfigyelhető továbbá, hogy a két eszköz detektált értékei itt jobban elválnak egymástól: az átlagos eltérés 6 ppm volt, a magasabb értékeket a saját

eszközöm mérte. Az ok valószínűleg a két szenzor közötti eltérésből fakad: tapasztalataim szerint az IKEA eszközének Cubic PM1006K szenzora pontosabb eredményeket ad.

A két szenzor közötti különbség megfigyelhető a szélirány vizsgálatának eredményein is. A mérés során a szélirány és az eszköz-füstölő tengely által bezárt szöget növeltem 0° -tól 60° -ig, 15° -os lépésközzel. Az eredmények az alábbi diagrammon láthatók:



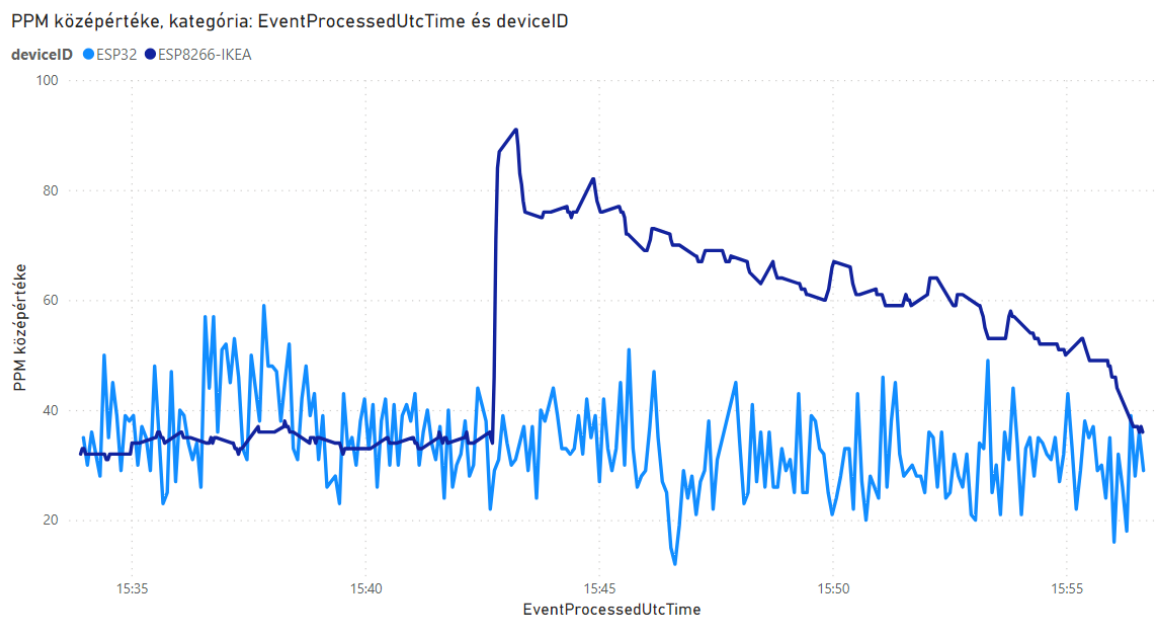
6.2. ábra: Szélirány hatása a detektált porkoncentrációra

A szennyező anyagot a levegőbe juttatva az eszközök által mért koncentráció hirtelen megugrott, néhol meghaladta a 150 ppm értéket is, ekkor a szélirány 0° -os szöget zárt be a szenzorokkal. 13:32-kor a szélirányt megváltoztattam 15° -kal, ami drasztikus hatással volt a detektált koncentrációra: a 140 ppm körül átlagérték lecsökkent 40 ppm körüli átlagértékre. 13:53-kor a bezárt újból megnöveltem a bezárt szöget 15° -kal 30° -ra. Az átlagos porkoncentráció ekkor 24 ppm-re csökkent. Ezt követően még kétszer növeltem a bezárt szöget, ezeknek azonban nem volt észlelhető hatása a porkoncentrációra. A mérésből levonható tapasztalat szerint a szélirány nagyon jelentős mértékben hat a levegő szennyezettségére: ha a szél a forrástól a mérőpont felé fúj, a detektált légszennyezés mértéke magas, azonban, ha az irány változik, a levegő minősége erőteljes javulásnak indul.

A mérés során megfigyelhető a két szenzor közötti másik lényeges különbség: magasabb porkoncentráció mellett a Sharp szenzora alul becsüli a Cubic szenzorát. Így a

két mérés eredményeit összegezve elmondható, hogy a Sharp szenzorának dinamikatarományja alacsonyabb, mint VINDRIKTNING által használt szenzoré: alacsonyabb porkoncentráció mellett az értékeket túl, míg magas koncentráció mellett az értékeket alul becsüli.

Ezt követően megvizsgáltam, hogyan hat a detektált koncentrációra a szennyezés forrásától való távolság. Itt a két eszközt nem ugyanabba az irányba mozgattam: az előző mérések tapasztalatai alapján az IKEA eszköze pontosabban mér, így azt mozgattam a szennyezőhöz közelebb, saját eszközömet pedig távolabb.



6.3. ábra: A detektált porkoncentráció különböző mérési pontokon

A grafikonon két mérés eredményei láthatók. A mérés első fele 15:35-től tartott 15:42-ig, ekkor mindkét eszköz 70 centiméterre volt a füstölőtől. A füstölő mögött elhelyeztem a ventilátort, ami a két eszköz irányába fújta a levegőt, és ezáltal a füstöt. A legközelebbi értékek kinyerésének érdekében az IKEA eszközt eltávolítottam a házából. A második mérés 15:42-től tartott a mérés végéig, 15:57-ig. Ekkor a saját eszközömet elmozdítottam a füstölőtől 30 centiméterrel távolabb, az IKEA eszközt pedig közelebb helyeztem, szintén 30 centiméterrel.

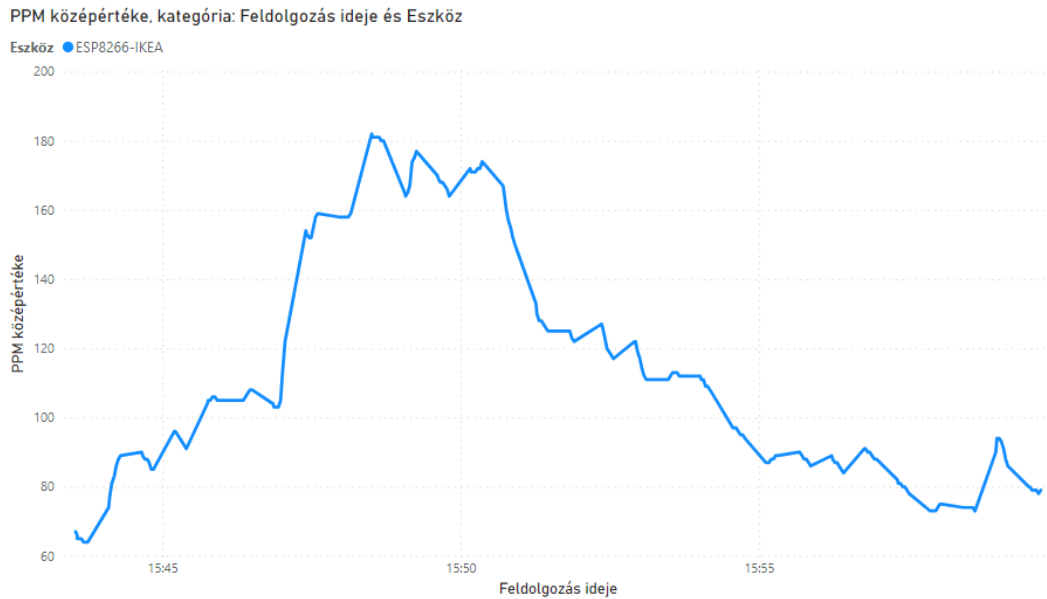
Az első, és egyben legszembetűnőbb dolog a két eszköz mért értékeinek fluktuációja, ami jóval magasabb volt az eddigi mérésekénél. Az IKEA eszköze alig ingadozik, míg az én eszközöm méréseinek kilengése igen magas. Ebben elsősorban az IKEA erőteljes zajszűrő algoritmusra játszhat közre, másodsorban pedig az általam használt

Sharp porszenzor pontatlansága és a változásokra adott gyors reakciója. A mérés első felében tapasztalható nagyobb eltérést valószínűleg egy beakadt porszem okozza, ami befolyással van a pontosságra.

A mérés második felében a két eszköz közötti távolság 60 centiméter. Az IKEA eszközének grafikonján egyértelműen látható a szennyezés eredetének közelsége. Az intuíciónak szerint minél közelebb vagyunk a szennyezés forrásához, annál szennyezettebb a levegő. Ezt igazolja a saját eszközöm mérése is, ami alacsonyabb átlagos értéket produkált, bár a kilengések mértéke megnőtt. Mivel messzebb van a forrástól és a ventilátortól, így a szél erőssége is csökken, kevesebb szennyező anyagot juttat a szenzorhoz. A mérést elvégeztem többször is, és minden esetben hasonló eredményeket tapasztaltam.

Az ábrán megfigyelhető még, hogy a VINDRIKTNING által mért koncentráció is fokozatosan csökken. A tapasztalat azt mutatja, hogy a füstölő füst mennyiségének eloszlása nem egyenletes, minél tovább ég, annál kevesebb füstöt termel, konstans szélviszonyok mellett.

Mivel az eddigi mérések során a szálló por koncentrációja nem egyenesen arányosan változott a távolsággal, elvégeztem egy mérést, ahol az IKEA eszközét a mérés során a füstölőtől különböző távolságokra helyeztem el. Az IKEA eszközére esett a választásom, mivel a benne található szenzor pontosabb eredményeket közöl, mint a saját eszközömben lévő Sharp porszenzor. A mérés eredménye az alábbi ábrán látható:



6.4. ábra: Az eszköz pozíciójának változtatása konstans szélviszonyok mellett

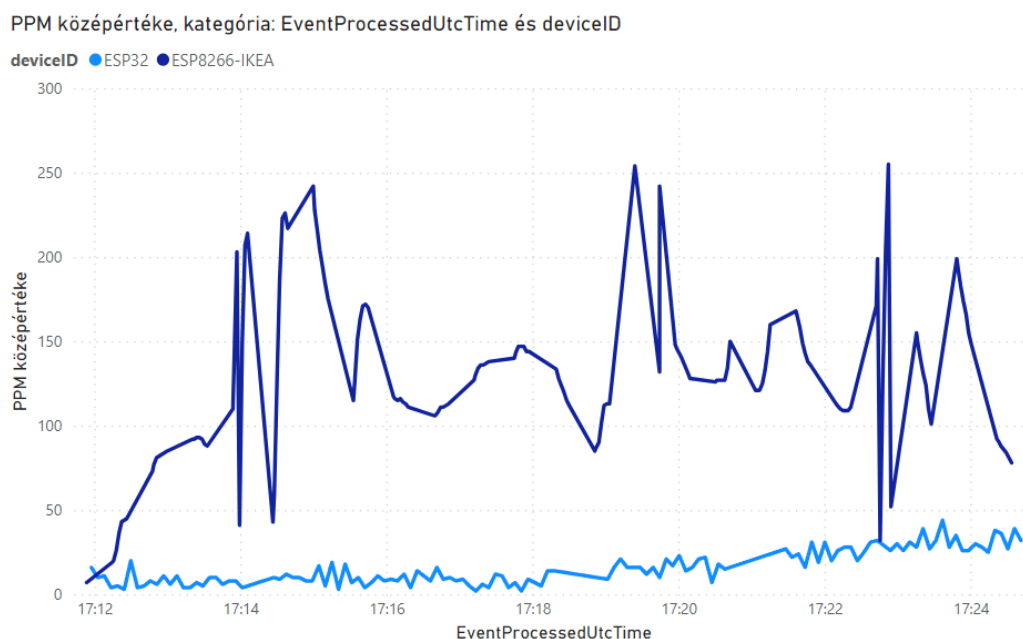
A kezdeti pozíció pontosan 50 centiméterre volt a füstölőtől. Ekkor a mért értékek körülbelül 85 és 110 ppm között ingadoztak. 15:47-kor áthelyeztem a füstölőt 30 centiméterrel közelebb a forráshoz (ekkor a távolság 20 centiméter). A mért értékek hirtelen megugrottak, 180 ppm fölé is mentek. Az eszközt 15:52-kor újból áthelyeztem, 20 centiméterrel távolabbra a füstölőtől, tehát ekkor 40 centiméter a távolság. A mért értékek nagyjából 30%-kal csökkentek, 120 ppm körüli átlagra. Azonban, ahogy az várható volt, magasabb mérési eredményeket produkáltak, mint a kiinduló állapotban, 50 centiméter távolságban. 15:55-kor áthelyeztem az eszközt utolsó előtti pozíciójába, 70 centiméterre a füstölőtől. Ekkor a porkoncentráció csökkent, de korántsem olyan mértékben, mint az előző esetben: már csak 19%-ot esett, a 90 ppm-es tartományra. Végül 15:57-kor áthelyeztem az eszközt 90 centiméter távolságra a forrástól. Az előző áthelyezéshez hasonlóan csökkentek az értékek, de még kisebb arányban, mindössze 15%-kal. Az eredmények alátámasztják az első mérések intuícióját, miszerint a csökkenés mértékét egy ellaposodó görbével lehet jellemezni: a csökkenés a távolság mértékével fordítottan arányos.

Az ábráról egy másik jelenség is leolvasható. A mérés legelején a ventilátor nem teljesen a szenzor irányába nézett, pár fokkal eltért a két pont által meghatározott egyenestől. A hibát korrigálva megemelkedett a szenzor által mért porkoncentráció, a két szélirány közötti különbség nagyjából 20 ppm volt. Ebből látható, hogy a szennyezésnek

való kitettségben fontos szerepet játszik a szélirány is, elég egy pár fokos eltérés is, hogy tisztább levegőhöz jussunk.

Egy mérőponton detektálható szálló por koncentrációját elsősorban a szél iránya határozza meg: kevés fokos eltérés is drasztikus levegőminőség-javulást eredményez. A koncentrációra második legbefolyásosabb tényező a szennyezés forrásától való távolság. A szálló por koncentrációjára legkevésbé kiható tényező a szél erőssége.

6.3 Ambiens porkoncentráció égetés hatására



6.5. ábra: A ventilátor a két eszköz között helyezkedik el

A mérés során a két eszköz közé helyeztem el a ventilátort úgy, hogy a VINDRIKTNING felé fújja a füstöt, ennek eredményeit a sötétkék vonal mutatja. Látható, hogy az eszköz által mért értékek között nagy a különbség. Ez valószínűsíthetően amiatt van, mert a füstölőt és a szenzort is közel helyeztem el a ventilátorhoz, ami így nagyobb szélereővel „támadta” a füstölőt, ezáltal az égés nem volt egyenletes, tehát a füst mennyisége is váltakozó volt. Két ponton tapasztalható nagymértékű kilengés: 17:14 és 17:23 körül. Mindkettőt az okozta, hogy megszakadt a kapcsolat a felhőrendszer és az IKEA eszköze között. Ilyenkor a Power BI úgy tekint az értékekre, mintha a hirtelen csökkenésnek indulnának, de mégsem egyből nullára helyezi azokat. Emellett a hirtelen és nagymértékű kilengés ellent mond a korábbi tapasztalatoknak, miszerint az eszköz egy alacsony és egy magas mérés után fokozatosan állítja be a közölt értékeket. Ez feltehetően

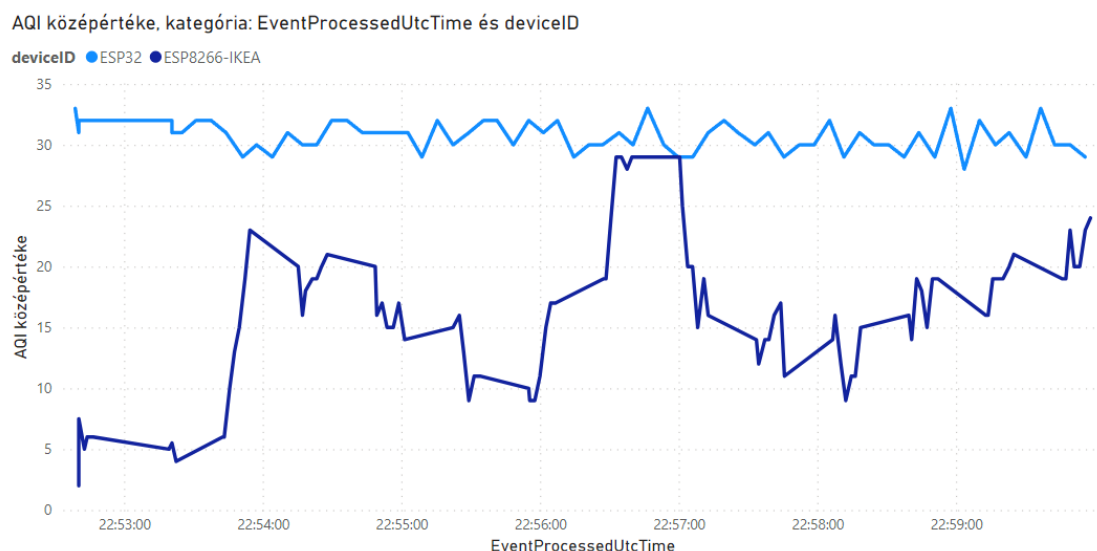
azért van, mert a szenzorba érkező pormennyiség időben nagymértékben változik, ami belezavar a valódi koncentráció meghatározásába.

A ventilátor mögött elhelyezett saját eszköz mérései között kisebb volt a fluktuáció, mivel ott gyakorlatilag a szobában lévő ambiens porkoncentrációt mérte. Azonban a mérés kezdete után nyolc perccel az átlagos koncentráció elkezdett emelkedni. A jelenség oka mögött az áll, hogy hiába nem ezen eszköz irányába fújt a szél, a zárt tér miatt a szoba ambiens porkoncentrációja a füstölő folyamatos égése miatt egy idő után megemelkedik, onnantól kezdve pedig nagyjából egyenletes növekedésnek indul.

6.4 Szén-dioxid és szálló por

Az eddigi mérések során csak a szálló por koncentrációját vizsgáltam. A következő grafikonokon azonban a por -és szén-dioxid koncentráció együtt szerepel, az AQI értékükkel összehasonlítva. A mérésekhez használtam füstöt (szén-dioxid és szálló por együtt), csak szén-dioxidot, illetve csak szálló port.

Az első mérésnél nem alkalmaztam környezeti manipulációt, csak a normál értékek érdekeltek. Ehhez mindkét eszközt egymás mellett helyeztem el nyílt térben, nyitott ablak melletti légmozgással.

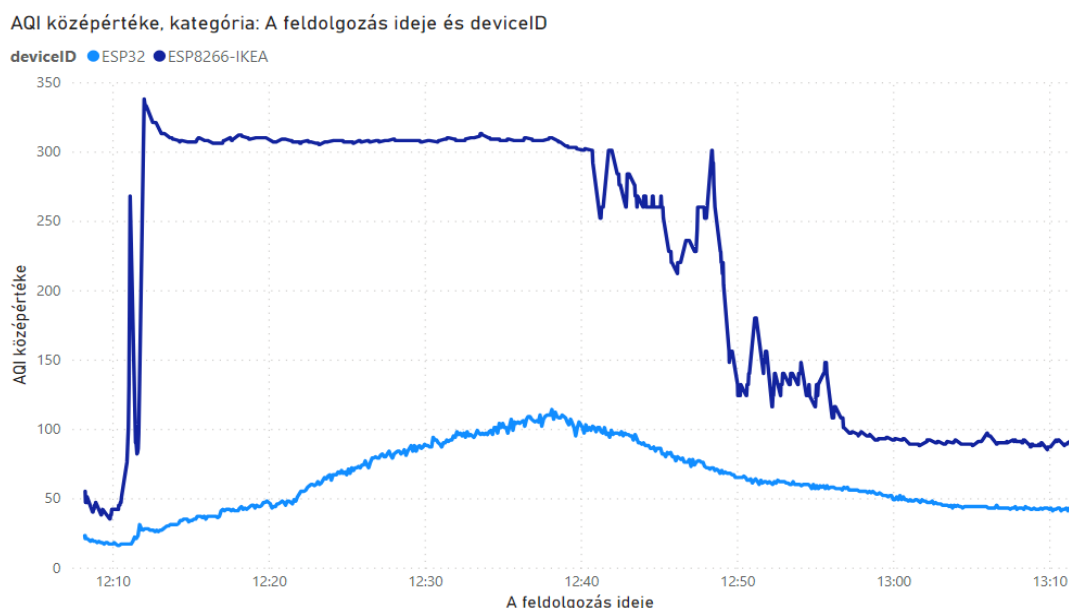


6.6. ábra: Szén-dioxid és szálló por ambiens mértéke

A legszembetűnőbb eredmény, hogy a saját eszközöm által mért AQI indexértékek kivétel nélkül magasabbak voltak, mint az IKEA VINDRIKTNING által mért értékek.

Ez csak úgy lehetséges, hogy a szoba levegőjének ambiens szén-dioxid értéke magasabb, mint a szálló por koncentrációja. Nem is kevéssel, az átlagos eltérés nagyjából 15 indexérték volt. A levegő szén-dioxid koncentrációja 480 és 550 ppm között váltakozott. Ez az érték magasabb, mint a kültéri levegő átlagos szén-dioxid szintje. Mivel a szoba ablaka egy forgalmasabb budapesti utcára nyílik, illetve a közelében egy gyorsforgalmi út is található, ez az eredmény nem meglepő. A járművekből származó károsanyag-kibocsátás miatt a forgalmasabb, sűrűbben lakott területeken mindig magasabb a légszennyezettség mértéke, mint a zöldebb, ritkábban lakott területeken. A porkoncentráció is folyamatosan változik, amit a légmozgás okoz. Érdekes megfigyelés, hogy amíg egy út mellett a szén-dioxid szint nagyjából állandó, a szálló por mennyisége változik. Ennek a jelenségnek két magyarázata lehet: az egyik, hogy a kipufogógázban nagyobb mennyiségben lelhető fel szén-dioxid, mint szálló-por, a másik, hogy a szén-dioxid nehezebben oszlik el, mint a szálló por. Mivel mind a kipufogógáz, mind a füst égéssel keletkezik, összetevőik között megtalálható a szálló-por és a szén-dioxid, ezáltal a kipufogógáz viselkedését a füstölővel tudom legjobban modellezni.

A problémához tartozó mérés az összes általam elvégzett mérés közül a legérdekesebb eredményeket produkálta. A méréshez felhasználtam a saját eszközőm gázszenzorát, valamint az IKEA eszközét. A mérés előtt alaposan kiszellőztettem, hogy a lehető legtisztább szintről indulhasson a teszt. Ekkor a levegő szén-dioxid koncentrációja 260 ppm körül mozgott, a szálló poré pedig 17 ppm volt. A két eszközt elhelyeztem egymás mellett, tőlük 60 centiméter távolságban pedig a füstölőt. A méréshez felhasználtam a ventilátort is, hogy a két szennyező koncentrációjának változása a lehető a legpontosabban megfigyelhető legyen. A két szennyező AQI értékeinek változása az alábbi ábrán látszanak, a teljes időtartam egy óra volt:



6.7. ábra: A szén-dioxid és a szálló por összefüggése égésből származó szennyezés hatására

12:10-kor elhelyeztem a füstölőt, ami egy robbanásszerű növekedést eredményezett a VINDRIKTNING által mért koncentrációban: 35-ös AQI értékről másfél perc alatt eléri a 335-ös indexértéket, amit a gyulladás pillanatában keletkező nagy mennyiségű füst okoz. Ezt követően szintén nagyjából másfél perc alatt beáll egy 310-es indexértékű átlagos porkoncentrációra, ami nagyjából 110 ppm-nek felel meg, ami 6,5-szeres növekedés a kezdeti állapothoz képest. Ezt a szintet a szennyezés megszűntetéséig tartja.

A szén-dioxid koncentrációjában nem volt kirobbanó emelkedés. Ehelyett szinte végig lineárisan emelkedett, 17-ről egészen 112-es AQI értékig. Az általam meghatározott szén-dioxid AQI határértékek miatt ez a két szám nem szemlélteti megfelelően a növekedést: a 260 ppm -es kezdeti koncentráció fél óra alatt elérte a 2170 ppm-es szintet, és minden bizonnyal tovább emelkedett volna. Ez közel 8,5-szeres emelkedés. A tesztet ezen a ponton meg kellett szakítanom, mivel a hosszabb időn keresztül tartó magas szén-dioxid koncentrációnak való kitettség miatt érzékelttem a 2.2. alfejezetben részletezett élettani hatásokat (fejfájás, szédülés).

A füstölő eltávolításával mindkét koncentráció azonnal csökkenésnek indult. Mindkét esetben egy ellaposodó görbe látható, 15 perc alatt elértek egy stagnáló szintet. A szálló por esetében ez 37 ppm körüli, míg a szén-dioxid esetében 840 ppm körüli értéket jelent. A porkoncentráció csökkenése érdekes alakult: nagyjából öt percenként csökkent nagyobb mértékben, platókat kialakítva, a platókon pedig akár 70 AQI értéknek

megfelelő kilengéseket is produkálva. Ebből látható, hogy a szálló por eloszlása a szennyezés megszűnésével nem egyenletes. A szén-dioxid esetében a csökkenés folyamatos, hasonlóan a növekedéshez.

A mérés utolsó tíz percében a detektált koncentrációk stagnáltak. Az eredményekből látszik, hogy a porkoncentráció a füstben kimondottan magas, viszont hamar képes eloszlani. A mérés végén detektált koncentráció a mérés elején detektált 217%-a, tehát a koncentráció több, mint duplájára nőtt. Ezzel szemben a szén-dioxid változásának aránya több, mint háromszoros, a mérés végén detektált koncentráció az eredeti 323%-a.

A mérések alapján levonható a következtetés, hogy a füstben a porkoncentráció magasabb, időben sokkal dinamikusabban változik, ellenben leülepedése könnyebb. A szén-dioxid aránya folyamatosan emelkedik, és habár a változás üteme lassú, sokkal nehezebben is oszlik el, ezáltal a szennyezés megszűnése után a hatása több ideig érezhető marad. Ezt leszámítva a levegőminőség szempontjából még mindig a szálló por a legszennyezőbb. Ennek oka az, hogy a magyarországi AQI határértékekre (helyesen) nagyon szigorú korlátok vonatkoznak. Emellett az is látszik, hogy az általam megszabott szén-dioxid határértékek megengedőek, azonban hivatalosan meghatározott korlátok hiányában maradtam ezen skálánál.

7 Továbbfejlesztési lehetőségek

Az eszköz legnagyobb hátránya a Sharp porszenzor. A mérések során nem bizonyult megfelelően pontosnak, bár a változásokra gyorsan reagált. Az optikai elven működő porszenzoroknál léteznek pontosabban mérő szenzorok, amelyek lézerfényt alkalmaznak a koncentráció meghatározásához, így a szálló por koncentrációja meghatározható komponensenként.

További kiegészítés lehet más gázszenzorok használata. Az AQI értékek meghatározásakor megfigyelnek a szén-dioxidnál veszélyesebb gázokat is, például szén-monoxidot és ózon-t. Több különböző típus elérhető, amik között található szén-monoxidot vagy ózont detektálni képes egység is. Működési elvük is hasonló az MQ-135-höz: egy reakciós réteg hevítésével, valamint a réteg és a detektálandó gáz érintkezésével változik a detektált feszültség. Ez a két gáz kimondottan mérgezőnek számít, megfigyelésük fontos egyaránt kültéren és beltéren is. Azonban pont veszélyességük miatt otthoni környezetben nem lehet biztonsággal kísérletezni velük. Ehhez mindenképpen laboratóriumi környezetre lenne szükség.

Az eszközt továbbá ki lehet egészíteni egy szélerősséget és szélirányt monitorozó szenzorral is. Ezzel a komponenssel meg lehet figyelni a szél sebességét és irányát, amely információkból akár a légszennyezés forrását is meg lehet határozni. Azonban ehhez szükség lenne egy időjárás álló ház tervezésére is, mivel a szükséges méréseket kültéren kellene elvégezni. Emellett a WiFi segítségével történő kommunikációt is le kell cserélni egy kültéren is működő megoldásra. Egy működő megoldás lehet a LoRaWAN (Long Range Vast Area Network, Nagy hatótávolságú széleskörű hálózat) használata, segítségével nagy hatótávon lehet adatokat továbbítani egy vevőegység felé.

Irodalomjegyzék

- [1] Cook, J., Oreskes, N., Doran, P.T., Anderegg, W.R.L., Verheggen, B., Maibach, E.W., Carlton, J.S., Lewandowsky, S., Skuce, A.G., Green, S.A., Nuccitelli, D., Jacobs, P., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R. and Rice, K. (2016). Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, [online] 11(4), p.048002, 1. oldal.
- [2] *Levegő összetétele*, <https://www.enfo.hu/node/3822>. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [3] *Air pollution*, https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [4] Jacobson, T.A., Kler, J.S., Hernke, M.T., Braun, R.K., Meyer, K.C. and Funk, W.E. (2019). Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*, 2(8), pp.691–701. doi:<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>. 2. oldal
- [5] *Air Quality Index (AQI) Basics*, <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/>. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [6] *Air Quality Index CAQI and AQI – Methods of Calculation*, <https://airly.org/en/air-quality-index-caqi-and-aqi-methods-of-calculation/>. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [7] *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*, <https://www.airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf>. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [8] *Smog*, <https://education.nationalgeographic.org/resource/smog/>. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [9] Matus, K., Nam, K.-M., Selin, N.E., Lamsal, L.N., Reilly, J.M. and Paltsev, S. (2012). Health damages from air pollution in China. *Global Environmental Change*, 22(1), pp.55–66. 3. oldal
- [10] Tilt, B. (2019). China’s air pollution crisis: Science and policy perspectives. *Environmental Science & Policy*, 92, pp.275–280. 4. oldal
- [11] *Szmogriadó*, <https://www.budapest13.hu/13kerulet/kornyezetvedelem/szmogriado/>. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [12] *A magyar levegőminőségi index*, <https://legszenneyezettseg.met.hu/levegominoseg/informacio/aq-index-tajekoztato>, Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [13] *2021. évi összesítő értékelés hazánk levegőminőségéről a manuális mérőhálózat adatai alapján*

- https://legszennyezettség.met.hu/storage/media/ertekelesek/2021_RIV%20ertekeles_v2.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [14] *2019. évi összesítő értékelés hazánk levegőminőségéről a manuális mérőhálózat adatai alapján*
https://legszennyezettség.met.hu/storage/media/ertekelesek/2019_RIV_ertekeles.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [15] *PM1006K adatlap,*
https://en.gassensor.com.cn/Product_files/Specifications/LED%20Particle%20Sensor%20PM1006K%20Specification.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [16] *Az IKEA VINDRIKTNING használati útmutatója,*
https://www.ikea.com/in/en/manuals/vindriktning-air-quality-sensor__AA-2275519-1-2.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [17] *ESP-8266 adatlap,*
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [18] *Az IKEA VINDSTYRKA használati útmutatója,*
https://www.ikea.com/cz/en/manuals/vindstyrka-air-quality-sensor-smart__AA-2351596-1-100.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [19] *ESP32 adatlap,*
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [20] *A Sharp GP2Y101AU0F adatlapja,*
https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_e.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [21] *Az MQ-135 adatlapja,* https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MQ-135_Hanwei.pdf. Utolsó letöltés: 2023.06.11
- [22] Thompson, J.E. (2021). Improved Measurement Performance for the Sharp GP2Y1010 Dust Sensor: Reduction of Noise. *Atmosphere*, 12(6), p.775. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos12060775>. 5. oldal
- [23] *What is Azure Internet of Things (IoT)?*, <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot/iot-introduction>. Utolsó letöltés: 2023.06.11

Függelék

Az elkészült forráskód: <https://github.com/mate212/szakdolgozat>

Az MQ-135 szenzorhoz használt könyvtár: <https://github.com/GeorgK/MQ135>