



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Egészségügyi mérnök MSc

Thuróczy Bertalan

**ÉLETTANI PARAMÉTEREKET MONITOROZÓ, VISELHETŐ  
ORVOSTECHNIKAI ESZKÖZ**

KONZULENSEK

DR. VARGA PÁL,  
SÁRKÖZY PÉTER

BUDAPEST, 2019

# Tartalomjegyzék

*Kivonat*

*Abstract*

1.	Bevezetés és motiváció .....	6
1.1.	A Raynaud-szindróma.....	6
1.2.	A Raynaud-jelenség és a stressz kapcsolata .....	7
1.3.	A Raynaud-jelenség élettani folyamatai.....	8
1.4.	A mért adatok felhasználásának célja .....	9
1.5.	A projekt általánosított célkitűzései .....	10
2.	Rendszerterv.....	12
3.	A felhasznált hardverelemek bemutatása.....	13
3.1.	Pulzoximéter.....	14
3.2.	ADXL345 gyorsulásérzékelő szenzor .....	15
3.3.	BMP280 hőmérsékletszenzor.....	16
3.4.	Bőrimpedancia mérés– GSR (Galvanic Skin Resistance) szenzor .....	16
3.5.	Wemos D1 Mini Pro .....	17
3.6.	SPIFFS – Serial Peripheral Interface Flash File System .....	17
3.7.	OLED kijelző .....	18
3.8.	A Wemos-hoz tartozó breakout board.....	18
3.9.	Raspberry PI.....	20
3.10.	A prototípus helye a kesztyűben .....	21
4.	A rendszer szoftver-elemei.....	21
4.1.	A Raspberry Pi-n futó szerverek: MQTT, Node-RED, InfluxDB, Grafana .....	22
4.2.	A Wemos D1 Mini Pro szoftvere .....	25
4.3.	Az SPIFFS használata.....	26
5.	A gyűjtött adatok elemzése.....	27
5.1.	Raynaud-jelenség megfigyelése rejtett Markov-modellel .....	27
5.2.	Raynaud-jelenség megfigyelése rejtett Markov modellel.....	28
5.3.	A modell felépítése a mért élettani paraméterek alapján .....	29
5.4.	A modell tanítása további mért értékek alapján.....	31
6.	Mérési eredmények .....	33
6.1.	A mért szenzoradatok .....	33
6.2.	Az eredmények számszerűsítése.....	35

6.3.	Az eredmények értelmezése Raynaud-jelenség tekintetében.....	37
6.4.	Kézremegés megfigyelés és stresszbecslés Parkinson-kóros betegen.....	38
7.	Továbbfejlesztési lehetőségek, jövőbeni célok.....	43
7.1.	Sclerodermás betegen alkalmazott gyógyszerek hatásainak monitorozása.....	43
7.2.	Parkinson-kór korai tünetének felismerése – az ujjak finomremegése.....	43
7.3.	Stresszbecslés „természetes körülmények között”.....	44
7.4.	Egyes autoimmun folyamatok korai felderítésének elősegítése.....	44
7.5.	Kitekintés.....	44
8.	Összefoglalás.....	46
	<i>Irodalomjegyzék.....</i>	<i>49</i>

## Kivonat

Jelen TDK dolgozat témája egy hordozható, viselhető orvostechikai eszköz, mely különböző élettani paraméterek monitorozására alkalmas. Egy fűthető kesztyűbe varrt szenzorrendszerből álló konfigurációról van szó. A mért paraméterek a véroxigén-szint, pulzus, bőrhőmérséklet és külső hőmérséklet, aktivitás, valamint a stressz-szint. Ezen paraméterek korrelálnak egy bizonyos autoimmun betegség, nevezetesen a Raynaud-szindróma esetében. Ez egy perifériás keringési rendellenesség, melynek során a hajszálerek olyannyira összeszűkülnek vagy elzáródnak különböző autoimmun folyamatok miatt, hogy azokba nem tud vér folyni. Ekkor oxigénhiányos állapot jelentkezik az érintett területeken, ami hosszú ideig fennállva akár sejtelhaláshoz is vezethet. Ezt megelőzendő, az élettani paramétereket monitorozó kesztyű a fűtési tulajdonságát kihasználva tud közbeavatkozni a keringés fenntartása érdekében. Mivel a jelenség nem csupán hőmérséklet, hanem stressz-szint-függő is, így a dolgozatban ismertetett módszer segítségével összefüggéseket lehet feltárni azzal kapcsolatban, hogy milyen körülmények között jelentkezik a jelenség, milyen gyakorisággal és súlyossággal. Ehhez egy valószínűség-számításon alapuló modellt használok fel, ami a mért élettani paraméterek alapján képes az összefüggések megállapítására.

Továbbá, az eszköznek diagnosztika felállítását támogató funkciója is van: Raynaud-szindrómás betegeknél a tünetek és a szervezetben a háttérben álló folyamatok különbözőek lehetnek, melyeket több vizsgálat elvégzésével lehet megállapítani. Létezik elsődleges és másodlagos Raynaud-betegség, melyek megkülönböztetésében ez a viselhető orvostechikai eszköz is támogató szerepet játszhat. Ezen felül - a kesztyű szenzorrendszere által megfigyelhető betegségek palettáját bővítve -, a bevarrt gyorsulásérzékelő képes az ujjak finomremegését is érzékelni, ami a Parkinson-kórnak lehet egy korai tünete. Ezen szenzor további tulajdonságát kihasználva, elesésetektárást is megvalósítottam a rendszerben. Ez a funkció szintén az idősebb korosztálynak nyújthat segítséget azáltal, hogy értesítést, riasztást küld a megadott hozzátartozónak. Így az időskori balesetek következményeinek csökkentésére is alkalmas.

Végezetül, a stressz-szint mérését is „ideális” körülmények közé helyezi az eszköz, hiszen természetes viszonyok között, akár a hétköznapi tevékenységek alatt képes monitorozni a viselőjének stressz állapotát. Ezáltal a *fehérköpenyes-szindróma* kiküszöbölhető, mely egyébként meghamisítaná a méréseket.

Az itt bemutatott, általam készített, viselhető orvostechikai eszköznek tehát számos felhasználása elképzelhető:

- Raynaud-szindrómások támogatása azáltal, hogy a mért élettani paraméterek alapján megelőzi a **Raynaud-jelenség** bekövetkezését a fűtési rendszer segítségével
- **elesést képes detektálni**, és értesítést küldeni
- **stressz-szint** mérésre alkalmas
- továbbfejlesztési célként pedig a **Parkinson-kór korai tünetének észlelését teszi lehetővé** az ujjremegés monitorozása által

A projekt célja nem csupán az eszköz elkészítése, hanem tágabb értelemben véve, a modern gondolkodású diagnosztikát elősegíteni kívánó szemléletmód kialakítása.

## Abstract

The aim of this thesis is to implement a wearable medical device in order to take measurements on physiological parameters. The device is a heated glove enhanced by sensors. The measured parameters are blood oxygen saturation, pulse, temperature of the skin and the environment, activity and stress-level. These parameters show correlation in certain autoimmune diseases, such as in the case of Raynaud's disease. This is a peripheral circulation anomaly in which capillaries contracts so excessively that blood flow is blocked in these areas, thus causing low oxygen level. If this state lasts too long, cell damage can occur as a consequence. The wearable device can prevent this by using the sensor information and with the help of the heating wires sawn inside. Raynaud's phenomenon is not only temperature dependent, but also based on stress-level. Thereby, we can find interrelation in the measured physiological parameters. These show how frequently and heavily is the phenomenon present and what are the circumstances that trigger it. In order to predict these values, I use a probability theory based algorithm which learns from the measured sensor data.

In addition, the aim of this device is to support decision making in diagnostics. In Raynaud's patients symptoms and the underlying conditions are diverse, which can be identified during several tests. We distinguish primary and secondary Raynaud's disease. To aid the process of this investigation, the device can play a supporting role. Furthermore, to expand the palette of application, a gyroscope is sawn into the glove. In this way, we can observe tremor of the little finger, which is an early symptom of Parkinson's disease. With the help of this sensor, falling detection is also implemented in the system. This function can be helpful for the elderly by sending alert to relatives in case of emergency, thus reducing the consequences of accidents.

Finally, stress-level can be measured in natural environmental condition, during everyday activity. In this way, for example, white coat syndrome doesn't tamper the results. Also, we can get information about general stress condition of the patient.

Applications of this medical device:

- help to prevent Raynaud's phenomenon severe peripheral circulation symptoms by preventing it to occur
- falling detection and sending alert in case of emergency
- monitoring of stress-level
- observing tremor of the little finger, which is an early symptom of Parkinson's disease.

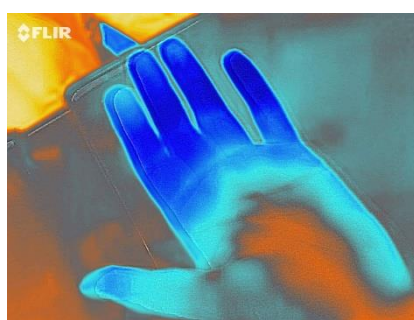
My aim with this project is not only to implement this wearable medical device, but also to boost application of modern technology in everyday healthcare.

# 1. Bevezetés és motiváció

Személyes motivációm az eszköz elkészítésében, hogy nálam is kialakult a Raynaud-szindróma nevezetű betegség. Az *1. ábra* a kezemről készült képet mutatja a jelenség fennállásakor, a *2. ábra* pedig egy infrakamerás felvétel, ami jól szemlélteti, mennyire nincs keringés a perifériás területeken. A *3. ábra* szintén infrakamerás felvétel, az egész szervezet hőmérséklet spektrumát figyelembe véve.



*1. ábra: Raynaud-szindróma*



*2. ábra: Infrakamerás felvétel Raynaud-jelenség fennállásakor*



*3. ábra: A test hőmérséklet spektruma Raynaud-szindróma*

A következőkben – a munkám háttérének pontosabb megértése érdekében - bemutatom a Raynaud-szindrómát, ennek kapcsolatát a stressz-szinttel és egyéb, mérhető élettani folyamatokkal. Munkám célja egy olyan viselhető mérőrendszer kialakítása, amely a kézen mérhető élettani paraméterek alapján segítsen az orvosi diagnosztikában. Ennek motivációjaként még a bevezető részeként bemutatom a méréseim célját és a mérőrendszer használatának kiterjesztésével elérhető lehetőségeket is.

## 1.1. A Raynaud-szindróma

A Raynaud-betegségnek [1] két típusa létezik: elsődleges és másodlagos. Az előbbinél primer Raynaud-betegségről van szó, ez maga az autoimmun betegség, amely a szervezetben jelen van. Utóbbi esetben pedig – ezt nevezik szekunder Raynaud-betegségnek – más autoimmun folyamat áll a háttérben, a szindróma pedig „csak” az elsődleges folyamat egy tünete.

Fontos különbség a két típus között, hogy míg primer esetben az érösszeszűkülések – és ennek látható jelei, az ujj-elfehéredések – szimmetrikusak, addig szekunder esetben aszimmetrikusak. Ez egy jó kiindulási pontját jelenti a két típus megkülönböztetésének. Ha nem annyira súlyosak a tünetek, akkor ránézésre nem tudjuk megállapítani, hogy a szimmetrikus vagy az aszimmetrikus jelenséggel van-e dolgunk.

Elsődleges Raynaud-betegségnél az erek falaiban nincsen károsodás, másodlagos esetben viszont az is számottevő, kiváltképp a perifériás területeken. A másodlagos Raynaud-betegség ezért intenzívebb tüneteket produkál, jobban látható és mérhető jelei vannak.

A véroxigén-szint értékek alapján azonban rögtön elkülöníthető a két típus, mivel a mutatott értékek között szignifikáns különbség: a másodlagos esetben erőteljesebb a véroxigén-szint csökkenése. Ez a módszer tehát egy hatékony, non-invazív módszere is lehet a primer/szekunder Raynaud-betegség megállapításának. A diagnózis felállításának elfogadott, invazív módja egyébként az, amikor immunológus szakorvos antitestek kimutatásával állapítja meg a betegséget, a vérkép alapján.

A Raynaud-betegség folyamatainak élettani hátterében kiemelkedő fontosságú szerepet játszik a szimpatikus idegrendszer túlzott válaszreakciója a stressz hatására. Mivel a hideg érzetet is egyfajta stressznek tekinthetjük a szervezet számára, fontos lehet a környezet és a bőr hőmérséklet-mérése is a non-invazív mérések korrelációjának vizsgálatakor.

Ezen felül a bőrhőmérséklet, külső hőmérséklet, aktivitás és stressz-szint alapján tudja az eszköz szabályozni a fűtést, így megakadályozva az ujjak oxigénhiányos állapotának fellépését. Ezt az állapotot azért fontos megelőzni, mert ha már ebbe kerülünk, akkor csak nagyon nehezen tud visszatérni a keringés. Több „házi praktika” is létezik a gyors tüneti kezelésre, mint például a forró vízzel való visszamelegítés, vagy a meleg helyiségbe való tartózkodás huzamosabb ideig. Erre persze általában nincs lehetőség minden egyes alkalommal, amikor a jelenség jelentkezik. Ráadásul, az ereknek sem tesz jót, ha hirtelen visszatágnak, és mintegy „visszaömlik” a vér beléjük. Ha ez a folyamat sokszor megtörténik, az hosszú távon az erek falait is károsítja. Legegészségesebb megoldás tehát, már magát a jelenség megjelenését a kezdeti állapotban „elkapni”, és a megfelelő hőmérsékleten tartással biztosítani az erek viszonylag állandó keresztmetszetét, és így a sejtek, szövetek vérellátását. Ezt a célt szolgálja a kesztyű szabályozható fűtése.

## 1.2. A Raynaud-jelenség és a stressz kapcsolata

A Raynaud-jelenség kedvező hőmérsékleti viszonyok mellett is megnyilvánul, mivel általánosan függ a stressz-szinttől [2]. Ez azt jelenti, hogy akár szobahőmérsékleten – vagy még melegebb környezetben – stresszes állapotban is képesek az erek olyannyira összeszűkülni, hogy azokba már nem tud vér folyni. Ennek érdekében egy bőrimpedancia mérésen alapuló stressz-szint becslő szenzor is implementálásra került az eszközben. Ezen terület érdekessége továbbá, hogy a stressz-szint mérés önmagában is egy kutatási területként van jelen, hiszen természetes körülmények közé helyezi a folyamatot: ha valaki tudja, hogy rajta éppen stressz-szintet mérnek, akkor alpból idegesebb lesz. Ráadásul, az egész folyamat általában nem hétköznapi körülmények között történik, hanem orvosi megfigyelés mellett, ami tovább emeli a stressz szintet. Gondolok itt a vérnyomás mérés és a fehérvérsejtes szindróma kapcsolatára. A kesztyű hétköznapi körülmények között tudja végezni a mérést.

Az autoimmun betegségek legfőbb forrása a bélrendszer helytelen működésében keresendő. A tünetek csupán ezeknek a „belső forrásoknak” a megnyilvánulásai. A projekt értelmezésében, célkitűzéseiben tehát még egy absztrakciós szintet lépve, annak célja egy olyan folyamat megismerése az emberi szervezetben, amely a bélrendszerből indul, és a

látható tünetek, a mérhető paraméterek visszavezethetők ezekre a betegségekre. Tehát egy külső, monitorozható paraméterhalmaz felől közelítem meg a problémát, ami egészen a bélrendszer, az idegrendszer és az autoimmunitás szoros kapcsolata felé konvergál. Ezen összefüggéseket a [2] tanulmány is alátámasztja, melynek lényege a következő: a különböző vazóaktív (erekre ható) anyagok az endotél sejtben NO (nitrogén-monoxid), illetve prosztaciklin elválasztást indukál. (A prosztaciklinek a prosztaglandin származéka, hatékony helyi értágító hatásuk van. Szerepük többek között, hogy összehúzódásra vagy elernyedésre bírják a simaizomszöveteket.) Bizonyos anyagok felszabadulása (pl.: szerotonin, noradrenalin) vazokonstriktiót okozna, de az endotél sejtekből felszabaduló relaxáló anyagok (NO, prosztaciklin) ezt a hatást csökkentik, elfedik, vagy felül is múlják.

A szerotonin 90%-át a gyomor-bél rendszer állítja elő. Bizonyítottan kapcsolatban áll az idegességgel és depresszióval. Ezen tény ismeretében hozható összefüggésbe az érzelmi állapot által kiváltott Raynaud-jelenséggel. A prosztaciklin intravénás adagolása időleges tüneti kezelést jelent a Raynaud-szindróma okozta perifériás érösszehúzódások ellen.

### 1.3. A Raynaud-jelenség élettani folyamatai

*A folyamatok áttekintése előtt álljon itt egy rövid összefoglaló arról, hogy feltételezhetően milyen folyamatok játszódhatnak le egy-egy „Raynaud-támadáskor” a szervezetben.*

A nitrogén-monoxid-szintáz (NOS) nitrogén-monoxid (NO) L-argininből való szintézisét végzi. Az NO az endotheliumban termelődik, ami az erek sima izomszöveibe diffundálva ellazítja azokat, ezáltal növelik az erek keresztmetszetét (vazodilációt okoz). (Az endothelium a vérerek és nyirokerek belső falának rétege.) Nem megfelelő összehúzódásának/elernyedésének legfőbb oka a nitrogén-monoxid csökkenése, amit több tényező is kiválthat.

Egyrészt, az ADMA (asszimmetrikus dimetilarginin) jelenléte gátolja az NOS aktivitását, így az NO termelődését, és így az erek elernyedését. Az ADMA az endothelium diszfunkciójának egyik markere. Egy tanulmányban [3] 40 elsődleges vagy másodlagos Raynaud-betegségben szenvedő alanyt vizsgáltak. Vérmintákból (szérumból) megállapították, hogy a másodlagos Raynaud-nál magasabb az ADMA és ET-1 (endothelin-1) értéke.

Egy másik kiváltó tényező az oxidatív stressz jelenlétében felszaporodó szabadgyökök által blokkolt NO aktivitás. Az oxidatív stressz a szabadgyökök túlzott képződésével van kapcsolatban. Szabadgyököknek nevezzük az olyan atomokat, vagy molekulákat, melyek egy vagy több párosítatlan vegyértékelektronnal rendelkeznek, így fokozott reakcióképességük van. Ez azt jelenti, hogy rövid időn – és távon – belül elektront próbálnak szerezni annak érdekében, hogy a külső héjuk telítetté váljon. A folyamat következtében károsítják annak a molekulának, fehérjének, nukleinsavnak a szerkezetét, amelytől az elektront felvették. A DNS-ben is kárt tud tenni, így daganatképződést is okozhat. (Ezen károsító folyamatok elkerülése érdekében ajánlott minél több antioxidáns tartalmú étel fogyasztása, mint például A-,C-,E-vitaminban gazdag ételek, telítetlen zsírsavak (pl.: omega-3 zsírsavak), stb. ) A szervezet megfelelő működésének egyik alap feltétele az antioxidáns-szabadgyök egyensúly fenntartása. Antioxidánsok azok a vegyületek, melyek az oxidációt késleltetik vagy gátolják. Késleltetni tudják azáltal, hogy az oxidációt gyorsító katalizátorok működését akadályozzák.



Közvetlen gátló hatásukat pedig úgy tudják kifejezni, hogy önmaguk is oxidálhatóak, ezáltal mintegy „megvédik” a szervezet többi molekuláját az oxidációtól.

A szabadgyököket a szervezet a saját maga által termelt antioxidánsokkal tudja semlegesíteni. Ha azonban túlzott mennyiségű szabad gyök van a szervezetben, akkor az már nem képes az egyensúlyt fenntartani. Az élő sejtek energiatermelő központjaiban, a mitokondriumokban ATP termelődésekor természetes módon is keletkeznek szabadgyökök. Ezért például intenzív testmozgás/izommunka hatására még több szabadgyök keletkezik, melyek az NO-val interferálva előidézhetik a jelenséget Raynaud-betegeknél.

Érdekes kérdés tehát, hogy melyik tényező felé billenhet el a mérleg: a testmozgás által beindított vérkeringés megakadályozza-e a jelenség fellépését, vagy épp ellenkezőleg, az intenzív testmozgás során termelődő szabadgyökök megakadályozzák a NO vazodilációs hatását azáltal, hogy oxidálják azokat, így a Raynaud-betegség bizonyos típusánál még súlyosabb tünetet produkál az illető?

A paradoxon feloldása, miszerint a fizikai aktivitás szabadgyök termeléssel jár - hiszen a megnövekedett oxigén felvétel miatt több gyök keletkezik -, hogy ilyenkor a szervezetnek az antioxidáns termelő enzimaktivitása is növekszik. Ezek közül a legfontosabbak a SOD (szuperoxid diszmutáz), CAT (kataláz), GPX (glutation peroxidáz). Egy kísérletben sprinterek és maratonfutók SOD aktivitását mérték a terhelést követően. Ezen enzim emelkedett aktivitása a sprintereknél közvetlenül a terhelés után, maratonfutóknál a terhelést követő 24-48 órában jelentkezett [4]. Tehát az oxidáns és antioxidáns (redox) egyensúly nem bomlik meg. (Egyébként rendszeres mozgás hatására a DNS javító enzimek hatékonysága is nő, csökkentve a DNS oxidatív módosulásait és az ezekből adódó mutációk mértékét.) A lényeg tehát, hogy a rendszeres testmozgás serkenti az antioxidáns termelő enzimek aktivitását, ezáltal fokozottabb védelmet biztosít az oxidatív stresszel szemben [3] [4].

Saját tapasztalat szerint, alacsony intenzitásig (egzaktabban megfogalmazva, aerob testmozgás közben, ahol a pulzusszám nem éri el a maximális pulzus 70%-át) a testmozgás vérkeringés serkentő hatása dominál. Ekkor nem jelentkezik a jelenség, még „hidegben” (<20 °C) sem. Egy bizonyos intenzitás felett (anaerob körülmények között, a maximális pulzus 70%-nál nagyobb szívfrekvencián) azonban az oxidatív stressz hatására jelentkezik a Raynaud-jelenség, szinte hőmérséklettől függetlenül. Az ilyen körülmények közötti vizsgálódást is lehetővé teszi a projektben elkészített „mérőkesztyű” – a testmozgás intenzitásától kezdve, a pulzusszámon át, a véroxigén-szintig minden releváns élettani paramétert meg tudunk figyelni általa.

#### 1.4. A mért adatok felhasználásának célja

Az általam javasolt, tervezett és prototípusként megvalósított rendszer egy kesztyűbe varrt, tehát kézen viselhető orvostechikai eszköz. Az eszköz hardvere szenzorokból, vezérlő, kommunikációs és visszajelző egységekből áll, míg szoftvere adatgyűjtő, adatfeldolgozó, adattároló, és megjelenítő alkalmazásokból. A rendszer rutinszerű működése során a szenzorok által mért adatokat a hardver-vezérlő elő-feldolgozza, majd eljuttatja a szoftveres alkalmazásokhoz. Ennek a folyamatnak az elemei, valamint a működést megvalósító hardveres és szoftveres komponensek mind bemutatásra kerülnek a dolgozatban.

A szenzorok mérései alapján egy valószínűségi modellel, jelen alkalmazásban rejtett Markov modellel elemzem az adatokat, és keresek összefüggéseket a mért élettani paraméterek között. A felmerülő kérdések: mikor, milyen körülmények között jelentkezik a Raynaud-jelenség? Hidegben/melegben, stresszes/nyugodt állapotban, aktív/passzív tevékenységet végezve? Az algoritmus a mért paraméterek alapján tanul gépi tanulás módszerével, és egyre pontosabb válaszokat ad a fent említett kérdésekre. Általa személyre szabottan meg lehet állapítani azt a stressz-szintet, vagy hőmérsékletet, vagy akár a kettő kombinációját, ahol a szervezet eléri azt a „küszöbszintet”, ahonnan beindul a kóros, túlzott érösszehúzóadás.

A projekt egy későbbi vizsgálódáshoz is eszközt biztosíthat a kesztyű révén: korábbi kutatásokba Raynaud-szindrómásokat vontak be vizsgálódásokba [2]. Az egyikben például a megfigyelt betegekről és környezetükről paramétereket jegyeztek fel, vércépükből különböző markerek koncentrációját mérték (ADMA, ET-1, LDL, stb.). A hőmérsékletéről, stressz-állapotukról, a Raynaud-jelenség gyakoriságáról, súlyosságáról pedig a vizsgálatban részt vevőknek kellett nyilatkozniuk naplózás formájában, illetve különböző pontozási rendszert alkalmazva nyilatkoztak arról is, milyen súlyosságú volt a Raynaud támadás, amikor előfordult. Ezeket a módszereket egy ilyen mérőrendszerrel ki lehetne váltani, modernebb körülmények között lehetne egy ilyen tanulmányt elvégezni. Talán az eredmények is pontosabbak lennének, hiszen nem egyéni belátás alapján pontoznánk a jelenség súlyosságát, hanem egzakt, mért értékek alapján.

Egy másik tanulmányban [6] a részt vevő alanyok antibiotikumos kezelést kaptak a *Helicobacter Pylori* nevezetű baktérium ellen, melyről gyanították, hogy szorosán összefügg az elsődleges Raynaud-szindrómával. Először felmérték a betegek állapotát hasonló módon, mint az előző bekezdésben említett [2] tanulmányban, majd ismét megfigyelték a paramétereket. Ezt a fajta megfigyelést válthatná ki az eszköz egy ehhez hasonló tanulmányban. Nehéz folyamatosan a hőmérsékletet figyelni, a stressz-szintünket egzakt módon megállapítani, vagy akár a tünetek súlyosságát érzékelni. Mindezekre megoldást jelenthet egy kesztyűbe épített (varrt) hőmérséklet mérő, stresszbecslő, pulzoximéter. A projekt célja tehát éppen egy ilyen viselhető eszköz elkészítése, akár a fent említett vizsgálódások megtámogatása céljából.

Az elkészült eszköz felhasználási területei tehát egészen általánossá válnak az általa mérhető élettani paraméterek alapján: nem csak a Raynaud-betegeket érinti a perifériás keringési rendellenesség, hanem a dohányosoktól kezdve, a cukorbetegeken át, a vérnyomás problémákkal küszködőkig mindenkit. Az autoimmunitás jelensége pedig egyre inkább előtérbe kerül a szervezet megbetegedéseit tekintve. Továbbá, a Parkinson-kór is „képbe kerül” a fent leírtakra hivatkozva, az elesésetektáló funkció is nagy segítséget nyújthat az idősebb korosztálynak, és a Raynaud-szindrómával kapcsolatos orvosi esettanulmányok támogatására is alkalmas lehet az eszköz.

## 1.5. A projekt általánosított célkitűzései

A bevezetés lezárásaképpen engedtessek meg egy egészen filozófiai síkba emelt gondolat, melyet a személyes motivációkból elkészített eszköz ihletett: a projekttel a

célkitűzésem - azon felül, hogy egy élettani paramétereket monitorozó, és a mért adatokat elemző, diagnosztikát támogató eszköz elkészüljön -, hogy az orvos-beteg gondolkodásmódját és kapcsolatát a modern világba emelje.

Példaképpen, az előző fejezetben említett *Helicobacter pylori* [6] vizsgálat kapcsán tárgyalt naplózási folyamat a vizsgálatban részt vevő alanyok részéről a mai kor technológiáit tekintve elavultnak tekinthető. Nem is beszélve az eredmények minőségének és mennyiségének nagyságrendbeli növekedéséről, melyekből a szakorvosnak is könnyebb dolga van felállítani egy biztosabb diagnózist. Ekkora mennyiségű adatot a hagyományos módszerekkel nem lehetne gyűjteni. Ráadásul, ebben az esetben a mért adatok nem is egyéni belátás alapján kerülnek feljegyzésre, hanem egészen egzaktul meghatározott tartományok figyelembevételével.

Egyrészt, ezt a régimódi gondolkodásmódot hivatott felváltani a projekt. Másrészt pedig, visszatérve az orvos-beteg kapcsolatához, szintén egy igen régimódi világot élünk e tekintetben: a betegek órákon keresztül várnak, hogy bejussanak a szakorvosi rendelésre. Számos papírmunkával, receptfelírással, feleslegesen elvesztegetett idővel zajlik az egész folyamat. Manapság mindent próbálunk már online intézni, minél kevesebb várakozási idővel, minél hatékonyabban. Miért ne éppen az egyik ilyen legfontosabb területen – az egészségügyben - tegyünk előrelépéseket az ügy érdekében? Bekapcsolva a gondolatmenetbe a projekt által szolgáltatott témérdek információ rendelkezésre állását az alanyról/betegről, miért ne használnánk ki ezeket a betegben lejátszódó folyamatok megismerésében? (Gondoljunk itt például a stressz-szint és a Raynaud-jelenség, autoimmunitás, a vegetatív idegrendszer kapcsolatára. Természetes körülmények között teszi lehetővé a beteg megfigyelését, annak szervezetének a különböző behatásokra, élethelyzetekre adott válaszával összekötve. Az orvos pedig elemezheti a mért paramétereket, és az alapján további információkat kaphat a beteg mindennapi állapotáról. Erre hagyományos módszerekkel a jelenlegi betegszám és orvosok számának egymáshoz viszonyított arányát tekintve esély sincs. Manapság az orvosnak néhány perce jut egy-egy betegre, annyian vannak, annyian vagyunk.

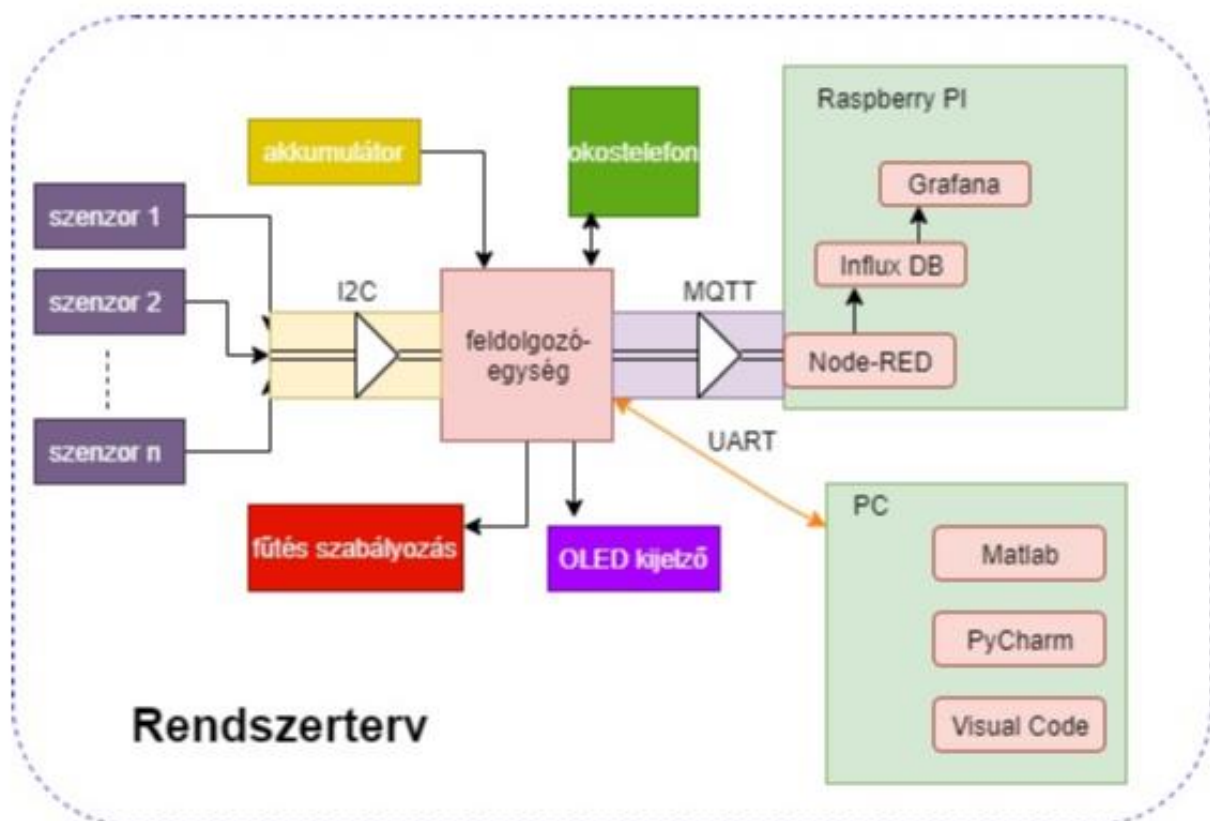
Mіндеzen felül, az eszközt párhuzamba lehet vonni a 24-órás EKG-készülék alkalmazásával: egy-egy gyors, ambuláns vizsgálat alatt lehet, hogy éppen nem jelentkeznek a tünetek. A Raynaud-szindrómánál ez kiváltképp igaz. Így, ha egy ilyen állapotban kerül vizsgálatra a beteg, akkor azok semmi eltérést nem fognak mutatni a normál értékekhez képest. Az EKG készülék analógiáját tekintve, a kesztyű által mért paraméterek is ezt a célt szolgálják: huzamosabb ideig figyelik meg a viselőjének hogyan alakul az állapota. Ha nem is ezekből az adatokból állít fel diagnózist az orvos, mégis, a diagnózis felállításában segítséget nyújthat. Legalábbis a beteg általános állapotáról tájékoztatást adhat.

Ez persze szintén nem jelent megoldást a betegségekre, csak a már kialakult tünetek kezelésére. A háttérben lévő okokat fel kell deríteni, és a betegségeket megelőzni lenne szükséges, nem pedig kezelni. (Gondoljunk az ujjak finomremegésére, a Parkinson-kór korai tünetére, vagy a másodlagos Raynaud-jelenségre, ami autoimmun betegség jelenlétére utal a szervezetben). Ezt a gondolatot is szem előtt tartva, a dolgozatban több helyen kitérek a kesztyű által mért élettani paraméterek és az autoimmun betegségek kapcsolatára.

## 2. Rendszerterv

A megvalósítandó rendszer blokkvázlatának (4. ábra) segítségével átlátható a működés: különböző szenzorok adatait gyűjti egy központi feldolgozó egység, amely ezek alapján többféle funkciót is ellát. Ezek a funkciók: a fűtés szabályozása, egy külső szerverrel való kommunikáció, illetve vezérlési adatok fogadása Android-alapú telefonról. Az azonnali visszajelzés érdekében egy OLED típusú kijelző is bekerült a rendszerbe. Ez lehetővé teszi, hogy a mért adatokat ne csak a szerverhez kapcsolódva érhesük el. Az adatgyűjtés másik módja, ha soros kommunikációs protokollon (UART-on) keresztül férünk hozzá eszközünkhöz. Ebben az esetben könnyedén exportálhatjuk az információkat akár Matlab-on keresztül, akár python script-alapú jelfeldolgozás céljából. A Visual Code nevezetű szoftver kényelmes hozzáférést biztosít mindehhez és egy jó alternatív megoldásnak bizonyult a szintén széles körben használt PuTTY interfész mellett.

A feldolgozó egység kommunikációját mindenképp vezeték-nélküli is kellett tervezni, hiszen mindez egy hordozható eszközbe kerül integrálásra. Emiatt egy WiFi-n keresztüli elérhetőség került a rendszerbe, melynek alkalmazás-rétegbeli kommunikációs protokollja az MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Ez a WiFi-alapú megoldás a Bluetooth-al ellentétben kevésbé energiatakarékos, viszont az adatok hatékony eljuttatása a Raspberry Pi-n futó szerverre ezt a megoldást igényelte. A későbbiekben számításba lehet venni a Bluetooth-alapú megoldást is: ezen keresztül kommunikálhatunk az okostelefonunkkal, ami egy MQTT kliens segítségével továbbítja az adatokat.



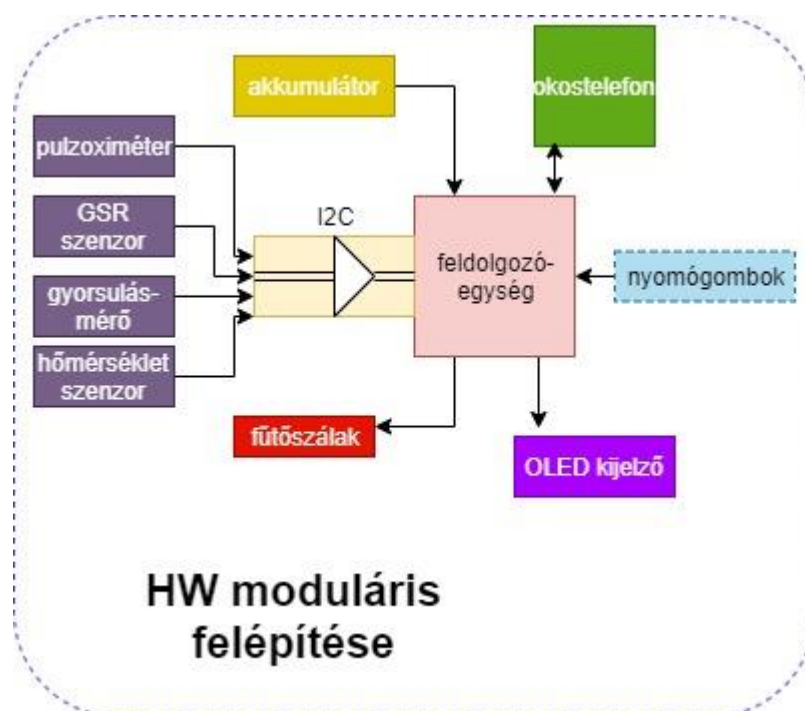
4. ábra A rendszer blokkvázlata

Miután az adatokat MQTT-n fogadja a Raspberry PI eszközünkön futó Node-Red szerver, azon további feldolgozást végezhetünk. Ezekről a lépésekről a szoftver megvalósításával kapcsolatos fejezetekben lesz szó. A Node-Red szerver a már feldolgozott mérési információkat egy adatbázisba (*Influx DB*) menti, ahonnan el tudja érni azokat a *Grafana* nevezetű megjelenítő szoftver is.

A Node-Red, InfluxDB, Grafana hármas tehát egy Raspberry PI eszközön futó konfiguráció, melynek feladatai az adatok fogadása, további feldolgozása, az eredmények tárolása és megjelenítése. A Matlab, Pycharm, Visual Code szoftvercsomagok segítségével készített megoldásaim az eredmények felhasználói végberendezésen történő megjelenítését és magát a jelfeldolgozást teszik lehetővé.

### 3. A felhasznált hardverelemek bemutatása

Mielőtt a konkrét hardverelemek ismertetésére rátérnék, a jobb átláthatóság kedvéért álljon itt egy összefoglaló ábra (5. ábra) azok moduláris felépítéséről:



5. ábra A realizálandó hardver-rendszer moduláris felépítése

Az előző fejezet blokkvázlata alapján láthatjuk, hogy a hardverelemek elsődleges funkciója az adatgyűjtés – élettani paraméterek monitorozása a cél, lehetőleg minél több információ gyűjtésével. Ennek érdekében került a rendszerbe egy pulzoximéter, amely egyszerre három paramétert is képes mérni: a vér-oxigén szintet, a szívfrekvenciát és a bőrhőmérsékletet. A GSR (**G**alvanic **S**kin **R**esistance) szenzor segítségével a bőrimpedanciát

mérhetjük, melynek változásából stressz-szint becslést végezhetünk. Ennek relevanciájáról a későbbiekben is lesz szó. A gyorsulásmérő adataiból egyrészt aktivitást számolhatunk, másrészt pedig egy fontos élettani paraméter monitorozására is alkalmas: a kéz, kiváltképp az ujjak finomremegése figyelhető meg általa. A bőrhőmérsékleten felül a környezeti hőmérséklet is fontos befolyásoló tényező a mérések kiértékelésekor, így egy ilyen szenzor is bekerült a rendszerbe. Az imént említett szenzorok mind I2C kommunikációs vonalakon keresztül vannak a központi egységhez csatlakoztatva.

Külön említést igényel a nyomógombok hasznossága és fontossága a hardvertervben: a mérések egyik célja egy kóros perifériás keringési állapot megfigyelése, és a feldolgozott adatok alapján ennek megelőzése. A felhasználó visszajelzése fontos abból a szempontból, hogy a később ismertetendő tanuló algoritmusnak további információt biztosítsunk. Mivel a végcél az, hogy a jelenség előfordulását megakadályozzuk, és ne csak akkor avatkozzunk be, amikor az már megtörtént, szükséges tudnunk, hogy fennállnak-e az ehhez vezető körülmények. A felhasználó jelzésével tehát a későbbi kiértékelést tehetjük megbízhatóbbá és pontosabbá. Ezen felül a nyomógombok funkciója a manuális fűtésszabályozás is.

Az általános áttekintés után következzen a konkrét felhasznált és beépített elemek bemutatása.

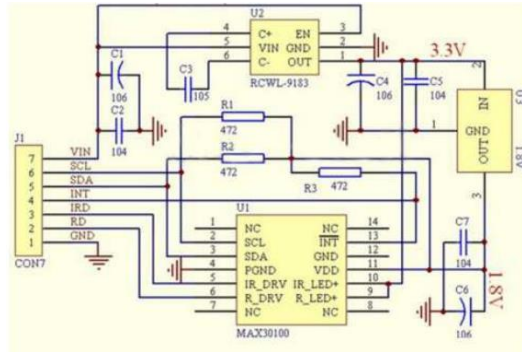
### 3.1. Pulzoximéter

Mindkét kesztyű mutatóujjába egy-egy MAX30100 típusú (6. ábra, 7. ábra), reflexiós elven működő véroxigén-szint mérő van bevarrva. A szenzor I2C protokollon (SCL, SDA, VIN, GND vonalak) keresztül kommunikál jelen felhasználásban a Wemos D1 Mini Pro-val, mint master eszközzel.

Mivel a kesztyű kellően rá tudja szorítani az ujjat a szenzorra, és környezeti fény szűrésére is alkalmas, ezért viszonylag pontos információk olvashatóak ki belőle. Ezeket az adatokat egy, az orvosi gyakorlatban is felhasznált, újra csiptethető pulzoximéterrel is ellenőriztem egy-egy mérés során; szignifikáns eltérést nem találtam. Mindemellett ha az eszközön elmozdul az ujjunk mérés közben, akkor gyakran mérhetünk hibás, kiugró értékeket. Ezt szoftveresen, szűrő/átlagoló algoritmusokkal lehet kompenzálni.



6. ábra MAX30100 típusú pulzoximéter önálló chipként és a hozzá tartozó áramkör



7. ábra: A pulzoximéter modul kapcsolási rajza

A modell főbb, jellegzetes paramétereit: 16 bites szigma-delta AD-átalakítót, beépített 50/60 Hz-es hálózati zajszűrőt tartalmaz. Emellett hőmérséklet-szenzor is van integrálva a chip-be, így a bőrhőmérséklet mérésére is alkalmas az eszköz. Adattárolása FIFO szervezésű, egyidejűleg 16 mérésről tud információt tárolni. A FIFO telítődése után a 0. pozíciótól elkezd felülírni a korábbi méréseket. Az ebből eredő hibák kiküszöbölésére ezért megfelelő időközönként ki kell olvasni annak tartalmát. Ehhez a típushoz implementált C++ függvénykönyvtár csak megfelelő kiolvasási sebesség mellett funkcionál megfelelően. Ez bővebben a szoftver részletezésénél kerül bemutatásra.

### 3.2. ADXL345 gyorsulásérzékelő szenzor

Ennek a szenzornak a jelentősége már a bemutató részben is részletezésre került, itt csak feleleveníteném ezeket: egyrészt az ujjak finomremegésének megfigyelését biztosítja, másrészt elesés-detektáló funkcióval is rendelkezik (egy megszakítás (interrupt) érkezik elesés detektálásakor), harmadrészt pedig az aktivitás számolható általa: az x,y,z koordinátákból számított  $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  vektor eltérése az egység 'g' vektortól megadja, ha mozgásban volt az eszköz viselője. Az szenzort a 8. ábrán láthatjuk:



8. ábra: ADXL345 gyorsulásérzékelő szenzor

### 3.3. BMP280 hőmérsékletszenzor

A Raynaud-jelenségnél egy meghatározó tényező a stressz-szint mellett a környezeti hőmérséklet is. Ezt egy BMP280 típusú (9. ábra) hőmérséklet szenzor segítségével mérem. Az eszköz I2C kommunikációs protokollt használ, így a bemutatott MAX30100-as pulzoximéter SCL, SDA, VIN, GND vonalaihoz (vezetékeihez) csatlakoztatható ennek a modulnak a vonalai is.



9. ábra BMP280 hőmérséklet szenzor

### 3.4. Bőrimpedancia mérés– GSR (Galvanic Skin Resistance) szenzor

A mérés alapjául a kesztyű két ujjába varrt bőrimpedancia-változást érzékelő szenzor szolgál. A bőr vezetőképességét méri, amely a vegetatív idegrendszeri működéssel és az érzelmi állapottal hozható összefüggésbe, így stressz-szint becslésre alkalmas. A szenzor nagyon érzékeny, hiszen a bőr vezetőképessége csak  $\mu\text{S}$  tartományban változik. Ez a változás jól érzékelhető a tenyér felületén, vagy az ujjakon. (Ezeken a területeken 200-600 izzadságmirigy is található négyzetcentiméterenként.) Legpraktikusabb megoldásként - annak érdekében, hogy a szenzoron való „csúszkálást” elkerüljük - a kesztyű két ujjába lett rögzítve a két elektróda.

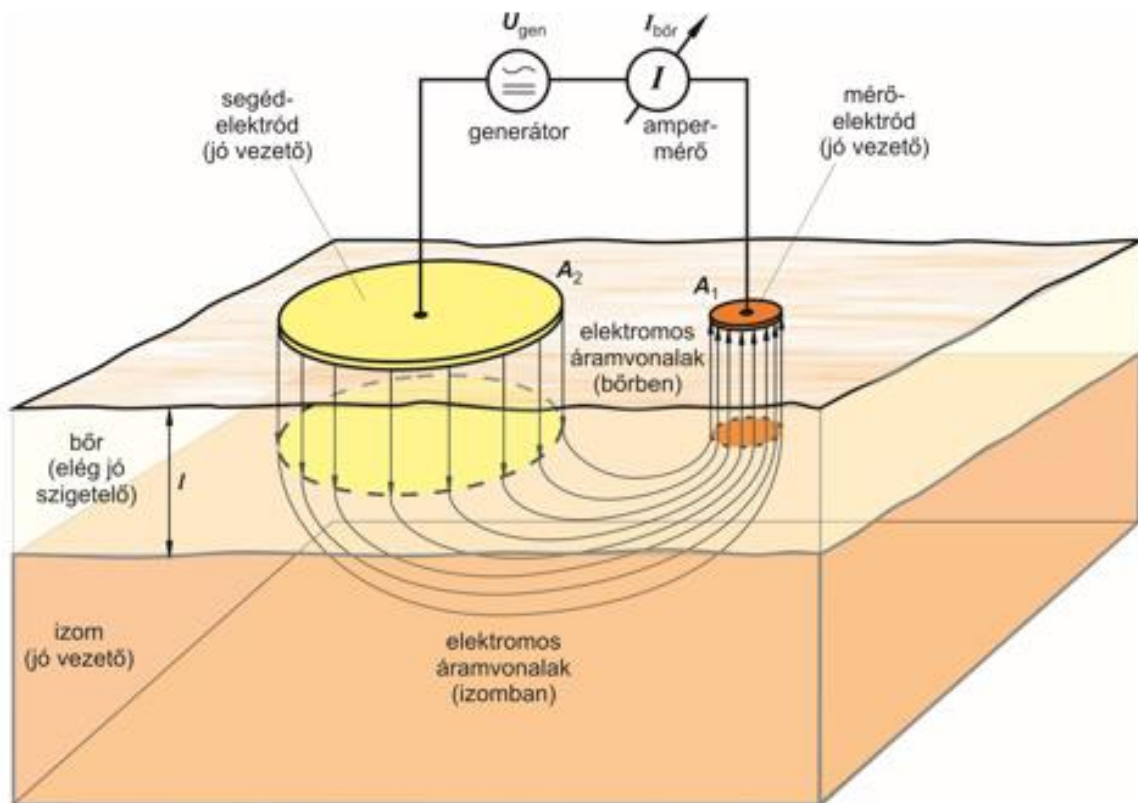
A 10. ábrán látható szenzor került beépítésre:



10. ábra: GSR szenzor



A bőrimpedancia mérés alapelvét a 11. ábra szemlélteti.



11. ábra: Bőrimpedancia mérés alapelve - forrás: <http://biofiz.semmelweis.hu>

### 3.5. Wemos D1 Mini Pro

A rendszer központi feldolgozó egysége a Wemos D1 Mini Pro mikrokontroller, amely egy ESP8266os wifi chip-et tartalmaz. Ennek segítségével az adatokat felküldhetjük a feldolgozó egységhez, ami lehet akár egy felhőben futó alkalmazás, vagy egy Raspberry PI-n futó szerver (NodeRED) is. Erről a szoftverek bemutatása fejezetben részletesen is szó lesz. Mindemellett lehetővé válik az andoridos készülékről való irányíthatóság is: akár telefonon keresztül is szabályozhatjuk a kesztyű fűtését, valós időben nézhetjük a mért értékekből kirajzolt grafikonok alakulását. Emellett a kesztyű egyik fontos funkciójában, az elesés-detektálás által kiváltott értesítés (e-mail üzenet) elküldésében is szerepet játszik a Wemos D1 Mini Pro, hiszen ez idézi elő (triggereli) az értesítés-küldését.

### 3.6. SPIFFS – Serial Peripheral Interface Flash File System

A chip 16 MB-os flash memóriát tartalmaz, amely alkalmas a mért értékek tárolására és megőrzésére. Így hálózati kapcsolat nélkül sem vesznek el az adatok – a tárolási kapacitás mértékén belül. Amennyiben rendelkezésre áll a vezeték nélküli hálózati kapcsolat, akkor a SPIFFS teljes tartalma feltöltésre kerül a NodeRED szerverre MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protokoll segítségével.

### 3.7. OLED kijelző

A 12. ábrán látható modul a Wemos D1-hez kapható kiegészítő áramkörként lett a rendszerhez csatlakoztatva.



12. ábra: Wemos D1 Mini OLED kiegészítő áramkör

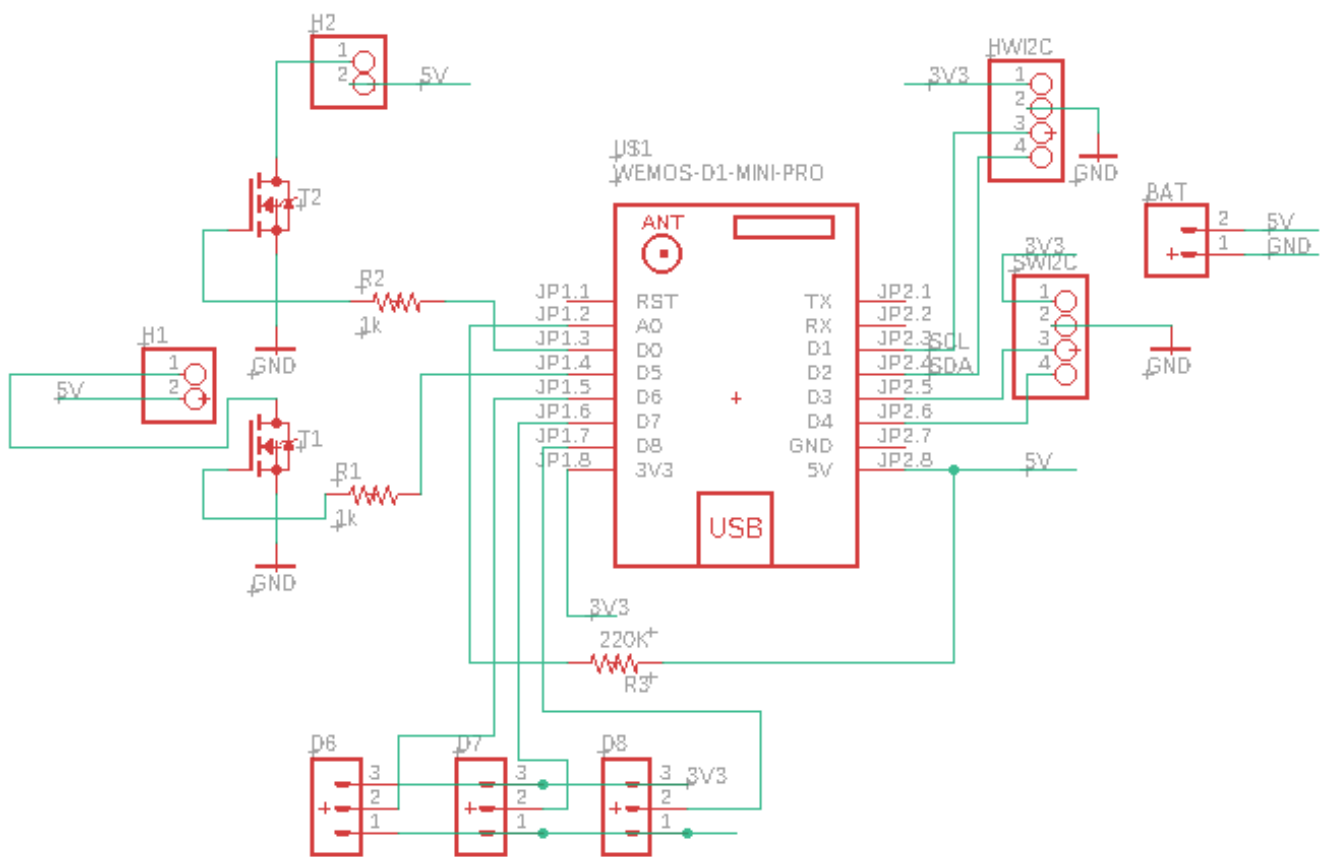
Feladata, hogy azonnali visszajelzést biztosítson a felhasználónak a legfontosabb mért paramétereikről, mint például véroxigén szint vagy a stressz-szint. Így könnyebben tudja figyelni a kesztyű viselője azt a folyamatot, amikor jelentkezik nála a Raynaud-jelenség. A felhasználó ennek segítségével jobban megismerheti (számszerűen is) azokat az értékeket, amik az adott körülmények között kiváltják a jelenséget. Ezáltal a későbbiekben egy pontosabb analízis alá lehet vetni mind a mért értékeket, mind pedig a felhasználó saját tapasztalatait. A kettő kombinációjából tehetünk szert olyan ismeretekre, amik egyébként rejtve maradnának: próbáljuk megfejteni, milyen hatások (alacsony hőmérséklet, stresszes állapot, inaktivitás, stb.) indukálják a Raynaud-jelenséget.

Ehhez a mért adatokon túl szükség van a felhasználó visszajelzésére is. Ezt segíti a kijelző két nyomógombja is, melynek segítségével visszajelzést adhat a felhasználó az állapotáról. Emellett a manuális fűtés szabályozás is történhet ezen keresztül.

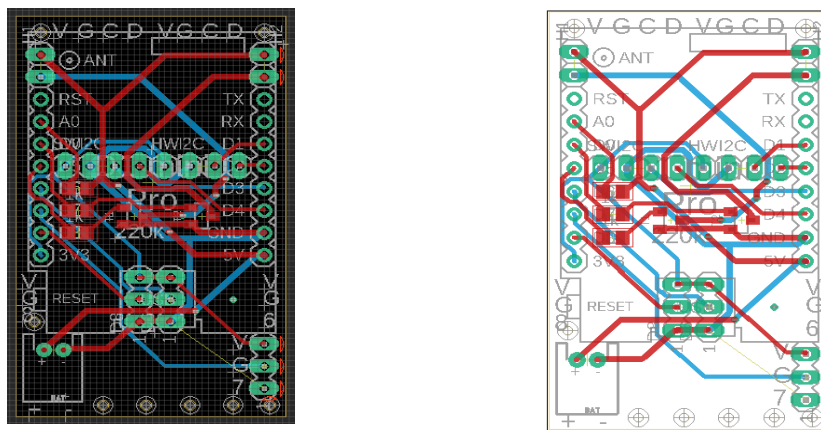
### 3.8. A Wemos-hoz tartozó breakout board

A kesztyűbe bevarrandó eszközöknél fontos szempont, hogy a lehető legkisebb méretűek legyenek. A szenzoroknál ez nem jelent gondot, viszont a WiFi-s kommunikációért felelős modul, a kiegészítő áramköri elemekkel és a kijelzővel együtt már nagyobb helyet foglal, így a kesztyű viselőjének kellemetlenséget okozna. Ezt elkerülendő, hétköznapi használatra alkalmas szenzorrendszer kialakítása a cél a kesztyűn belül.

Az előző bekezdésben említett kiegészítő áramköri elemek néhány tranzisztort és ellenállást, valamint kivezetett csatlakozási pontokat jelentenek: a fűtés vezérléséhez szükséges FET-eket (IRLML2502TRPBF) és ehhez tartozó ellenállásokat ( $1k\Omega$ ), a fűtőszálak csatlakozási pontjait, valamint az I2C kivezetéseket (13. ábra, 14. ábra). Ez utóbbi kivezetésből a Wemos D1 Mini Pro hardveres I2C interfésze kerül elsősorban felhasználásra, de gondolva a későbbi továbbfejlesztésre - a szenzorrendszer bővítésére - szoftveres I2C busz kialakítására is alkalmas vonalak kerültek kivezetésre (D3 és D4 lábak az SCL/SDA vonalaknak). Emellett az alap-panel eddig ki nem használt lábai (D6, D7, D8) is helyet kaptak az áramkör által biztosított kivezetések között – szintén a későbbi rendszerbővítést szem előtt tartva.



13. ábra: A breakout board áramköri elemeinek kapcsolási rajza



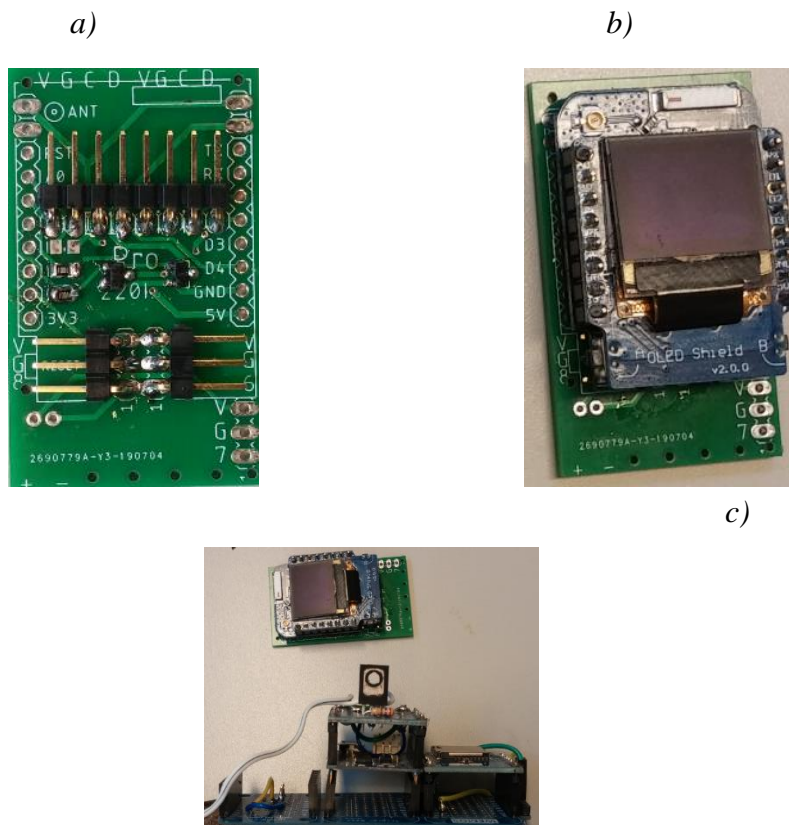
14. ábra: A breakout board áramkör rétegei, kivezetései

Az akkumulátor töltöttségét az A0 analóg bemeneten keresztül figyelhetjük, a megfelelő feszültségosztó ellenállás (220kΩ) beiktatásával. Ez csak a bal oldali kesztyűben kerül ténylegesen beforrasztásra, a jobb oldali A0-ra a bőrimpedancia-mérő (GSR) szenzor kimenete csatlakozik.

A fűtés szabályozása a tranzisztorok révén valósul meg oly módon, hogy ezeket pulzusszélesség modulációval (PWM – pulse width modulation) vezérelve állíthatjuk a fűtőszálakon átengedett áram időbeni változtatásával (a kitöltési tényező változtatásával).

A méretbeli csökkenés összehasonlítását a 15. ábra hivatott szemléltetni.

*Megj.: A szélek mentén további lyukak kerültek elhelyezésre, a kesztyűbe való bevarrhatóságot biztosítva ezáltal.*



15. ábra: Az elkészült áramkör: a) a beforrasztott áramköri elemekkel, b) a Wemos D1 Mini Pro-val és a hozzá tartozó OLED kijelzővel, c) Jelentős méretcsökkenést értem el a prototípus áramkörhöz képest

### 3.9. Raspberry PI

A Raspberry PI-n futnak a szerverek: MQTT brókerként fogadja és továbbítja az üzeneteket a Node-RED szerver felé. Innen feldolgozás után egy adatbázisba (InfluxDB) kerülnek mentésre az adatok. A megjelenítésben a Grafana nevezetű szoftver játszik szerepet, amely SQL lekérdezéssel az adatbázisból éri el az információkat. A részletes működésükről a következő részben lesz szó.

### 3.10. A prototípus helye a kesztyűben

A prototípus jelenlegi állapotát mutatja a 16. ábra:

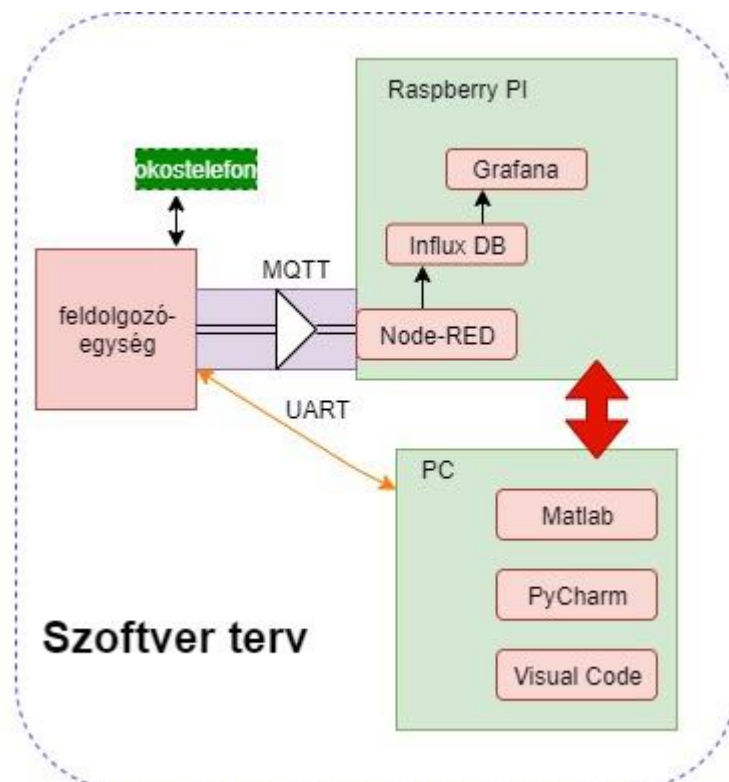


16. ábra: Az elkészült hardver-prototípus, a kesztyűbe varrva

## 4. A rendszer szoftver-elemei

Mielőtt az egyes szoftverkomponensek bemutatásra kerülnek, vizsgáljuk meg a 17. ábrán látható áttekintést: a hardverelemek ismertetésénél részletezett feldolgozó egység MQTT protokollon küldi az információt a szerver irányába. A szerver egy Raspberry Pi eszközön futó Node-RED nevezetű alkalmazás, amely összeköttetésben áll egy adatbázissal (InfluxDB). Ezt az adatbázist elérve a Grafana képes megjeleníteni a mért adatokat. Ennek menetéiről a későbbiekben lesz szó. A Node-RED kezelő felületéhez, illetve a Grafana megjelenítő felületéhez okostelefonról is csatlakozhatunk, ezáltal lehetőség nyílik az eszközünk telefonról történő vezérlésére, valamint a mért adatok áttekintésére is.

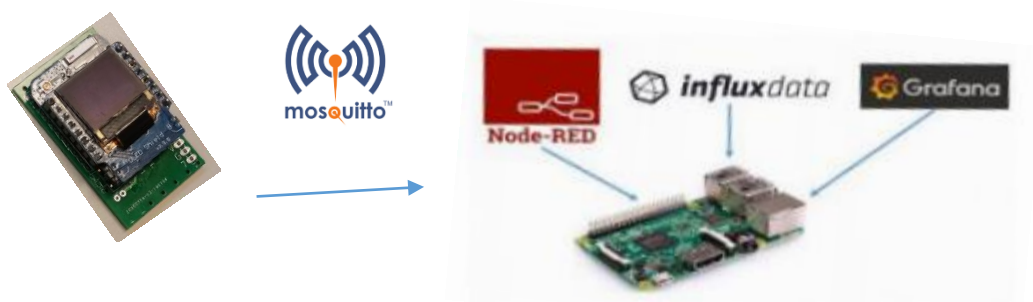
A Visual Code platformon keresztül hozzáférhetünk a feldolgozó egységben tárolt mérési adatokhoz, UART-alapú kommunikáción keresztül. Az adatelemzés és kiértékelés nagy részét a PyCharm fejlesztői környezetben végeztem, python-alapú könyvtárak felhasználásával. A Matlab további funkciókat biztosít mindezek bővítéséhez.



17. ábra: A megvalósítandó szoftver blokkvázlata

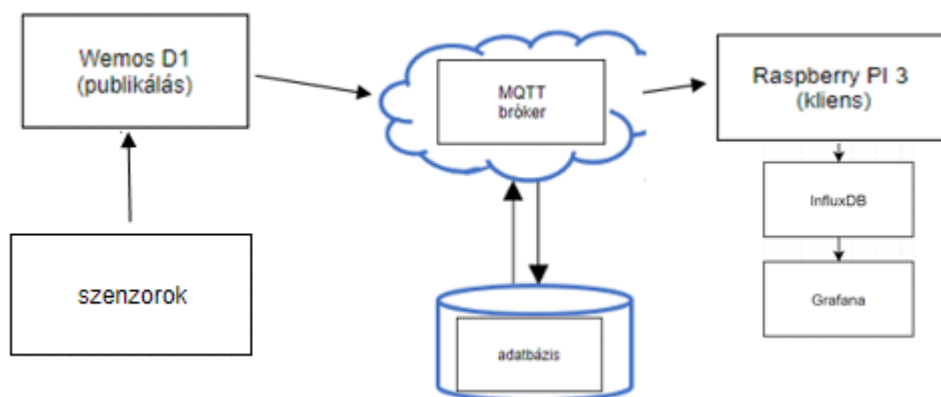
#### 4.1. A Raspberry Pi-n futó szerverek: MQTT, Node-RED, InfluxDB, Grafana

A kommunikáció folyamata tehát a 18. ábra alapján a következő. A szenzorok által az emberi perifériás területeken mért élettani paraméterek feldolgozásra kerülnek, majd MQTT protokollon keresztül továbbítódnak a szerver felé, amely tehát a Raspberry Pi-n futó NodeRED-et jelenti. Ez fogadja az adatokat, és további formázásokat végez rajta, így lehetővé válik az InfluxDB nevezetű adatbázisba menteni azokat. Innen tudja a Grafana szoftver kiolvasni az értékeket, és megjeleníteni azokat.



18. ábra: A szenzorok és szerverek közötti kommunikáció áttekintése

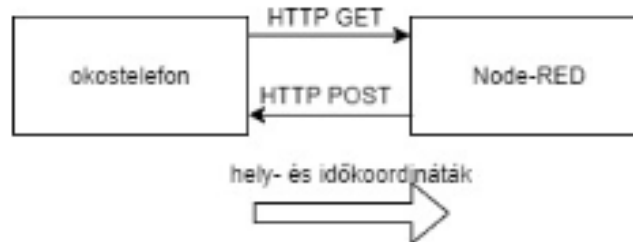
A Node-RED feladata, hogy fogadja a beérkező szenzorinformációkat. Ezt oly módon tudja megtenni, hogy MQTT kliensek a megadott témákra feliratkozva várják az adatokat az MQTT brókertől (19. ábra). A Node-RED egy webböngésző alapú szolgáltatás, amely grafikus felületével megkönnyíti a fejlesztési folyamatot. JavaScript nyelven lehet a beépített node-okon (csomópontokon) túl saját függvényeket is implementálni. Ezen függvények segítségével valósul meg a rendszerben az egyes szenzorinformációk konzisztens tárolása, feldolgozása és továbbítása.



19. ábra: Az MQTT protokoll működése – publikálás, bróker, kliens elrendezés

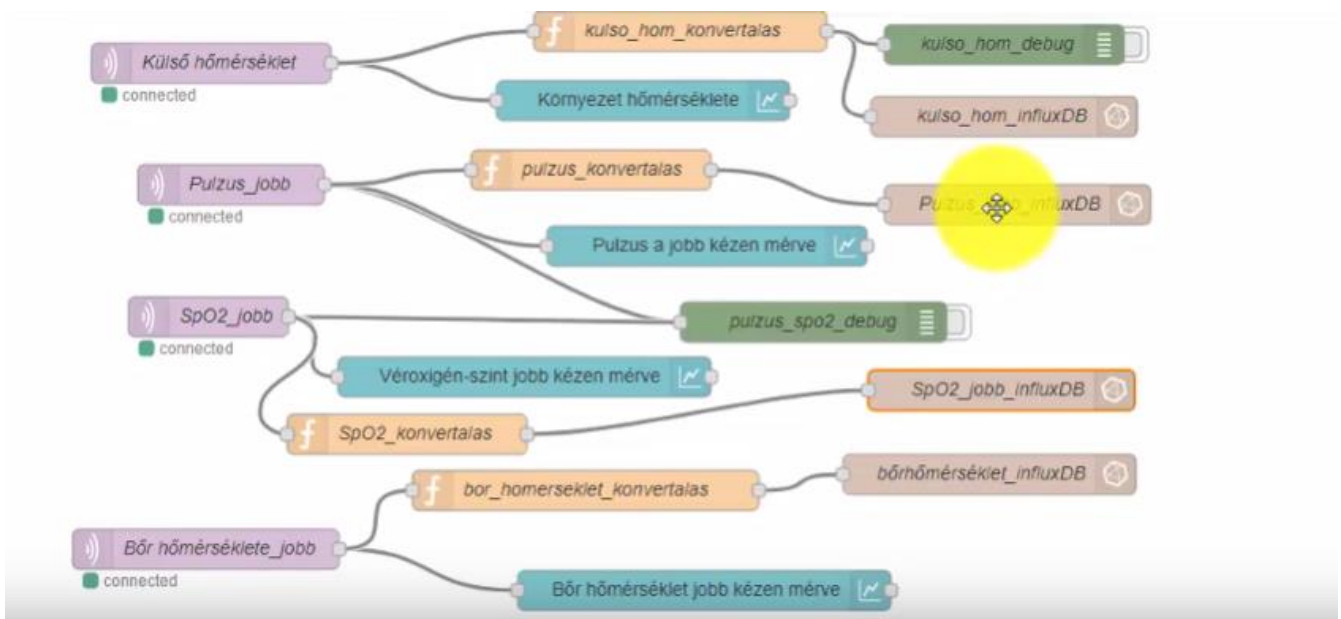
A gyorsulásérzékelő segítségével megvalósított elesés-detektáláshoz egy csomópont-struktúra (flow) került implementálásra. Ez figyelembe veszi azt is, hogy engedélyezte-e a

felhasználó ezt az üzemmódot, illetve, hogy érkezett-e nyugtázás az elesés detektálás után (ekkor nem küld e-mailes értesítőt a szervert). A konfiguráció során megadhatjuk, mekkora legyen az az idő-intervallum, amely után a vészhelyzet-jelzés elküldődik. Ha a vészjelzésre okot adnak a körülmények (engedélyezve van ez a funkció, és nem érkezett nyugtázás), akkor a megfelelő kommunikáció lebonyolításával (HTTP GET kérések által) a hely-koordináták és a pontos időpont is lekérdezésre kerül a felhasználó telefonjáról, és az elküldendő e-mail törzsébe belekerülnek ezek az információk is. A folyamatot a 20. ábra szemlélteti.



20. ábra: Az okostelefon és a Node-RED szervertől a kommunikációja HTTP protokoll segítségével

A feliratkozásokat a 21. ábrán látható node-ok végzik. A konvertáló függvények arra szolgálnak, hogy a beérkezett json stringből kiolvassa az értékeket, átkonvertálják azokat számmá. Így már lehet menteni az adatokat az InfluxDB adatbázisba.



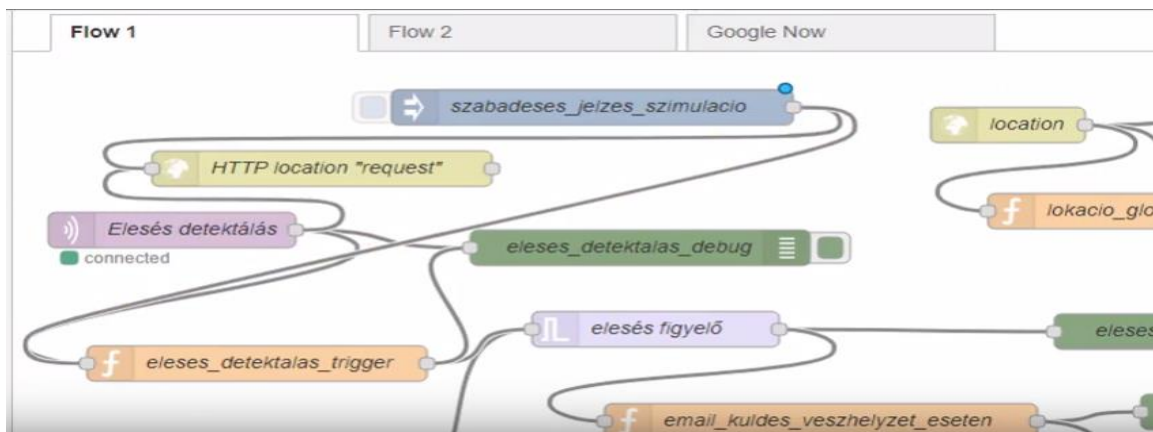
21. ábra: A szenzorinformációkat fogadó és feldolgozó, majd továbbító csomópontok

A kimenetek összeköttetésben vannak az InfluxDB szerverrel, és ebből kiolvastva a Grafana nevezetű szoftver képes megjeleníteni az élettani paraméterek görbéit a 22. ábra szerint.



22. ábra: A Grafana felülete – működés közben

Az elesés-detektálást az alábbi flow (23. ábra) valósítja meg:



23. ábra: elesés detektálás folyamata Node-RED-ben

Az „elesés figyelő” node aktív állapotú lesz (triggerelődik) abban a pillanatban, hogy érkezik az elesés figyelmeztetés. Azonban van lehetőség arra is, hogy egy nyugtázó gombbal a felhasználó megakadályozza az e-mailes értesítő elküldését. Erre beállítható időkorlátot adhatunk meg.



## 4.2. A Wemos D1 Mini Pro szoftvere

A pulzoximéterhez rendelkezésre álló függvénykönyvtárak nem működtek megfelelően a fent részletezett szoftverarchitektúrában, mert azok úgy lettek implementálva, hogy adott időközönként ki kell olvasni a 16 byte-os FIFO adatait annak érdekében, hogy azokból konzisztens pulzusszámot és véroxigén-szintet tudjunk számítani. A megfelelő időközönkénti kiolvasás nem tud megvalósulni a többi szenzortól érkező adatok feldolgozása miatt, illetve az MQTT protokollon keresztüli kommunikáció is hosszabb-rövidebb ideig blokkolja a program futását.

Ha a pulzoximéter FIFO-jából történő kiolvasások között a függvénykönyvtárban meghatározott időintervallumoknál több telik el, akkor teljesen fals információt kapunk ezekre az értékekre. Jelen alkalmazásban pedig a wifis kommunikációt megvalósító függvényhívások sok késleltetést visznek a rendszerbe, valamint el kell még végezni a többi szenzoradat kiolvasását, feldolgozását és továbbítását is. Habár a MAX30100 adatlapja szerint, ha a FIFO megtelik, elkezd felülírni a 0. címtől kezdve az adatokat, tehát nem lép fel inkonzisztencia akkor sem, ha túlsordul a 16 byte-os tároló, és elkezd felülírni a 0. értéktől a FIFO soron következő elemeit. Nem is ez okozza a gondot, hanem magában a függvénykönyvtárban implementált metódusok: ezeknek kell adott időközönként meghívódnia, hogy megfelelő értéket biztosítsanak a pulzusra és a véroxigén-szintre egyaránt.

Erre a problémára megoldás lehet, hogy megszakítások (interruptok) segítségével adott időközönként kiolvassuk a FIFO értékeit. Ekkor viszont, ha a megszakítás éppen egy MQTT üzenet küldésekor érkezik, akkor esetleges adattovábbítási problémák léphetnek fel. Ezért ez az ötlet elvetendő. Másik megoldás lehet, hogy a szenzor mintavételezési frekvenciáját csökkentve, tudjuk növelni az az időintervallumot, ami rendelkezésre áll addig, amíg az új adatokat ki kellene olvasni. Ezzel a megoldással az volt a gond, hogy még a legnagyobb mintavételi időköz alkalmazásakor sem volt elegendő „köztes idő” a többi feladat végrehajtásához, így továbbra sem kaptam konzisztens értékeket a kiolvasás után. Végző megoldásként az alábbi kódrészlettel az I2C interfészen keresztül a MAX30100-as áramkör konfigurációs regiszterének megfelelő bitjének 1-be való állításával el lehet érni, hogy az áramkör „kinullázza” önmagát, így felszabadítva a FIFO-t is, és előről kezdve annak feltöltését, most már megfelelő értékeket adjon.

I2C interfészen keresztül végzett regiszterírás a MAX30100 pulzoximéterben:

```
uint8_t modeConfig ;  
modeConfig |= (1 << 6);  
Wire.beginTransmission(0x57);  
Wire.write(0x06);  
Wire.write(modeConfig);  
Wire.endTransmission();
```

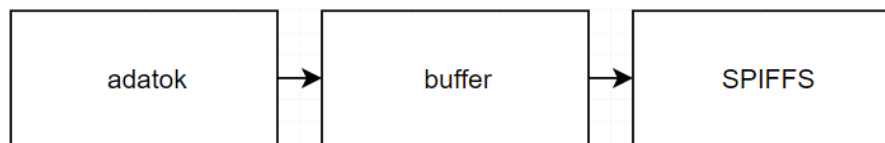
Az alacsony szintű kezelésem felül a többi szenzorhoz, és kiegészítő áramkörhöz tartozó függvénykönyvtárakat fel tudtam használni, ami nagyban megkönnyítette és

felgyorsította a fejlesztési folyamatot. Az alábbi függvényhívások például a jobb oldali kesztyűben mért véroxigén-szint információkat továbbítják MQTT protokollon keresztül a megadott témában a Raspberry-n futó bróker felé.

A bróker továbbítja ezt az üzenetet mindegyik kliensnek, akik ebben a témában fel vannak iratkozva. Ez jelen esetben a „szenzorok/spo2\_jobb” nevezetű topic. Ugyanezt a műveletsort kell elvégezni az összes szenzornál, különböző témákat alkalmazva.

#### 4.3. Az SPIFFS használata

Egy korábbi prototípusban egy SD kártya segítségével tároltam a mért adatokat. A fizikai méret csökkentése érdekében ez azonban elhagyható a rendszerből, hiszen a Wemos D1 Mini Pro 16 MB méretű memóriával (Serial Peripheral Interface Flash File System, SPIFFS) rendelkezik. A SPIFFS használata, a mért adatok tárolása a következőképpen lett implementálva. Az adatokat a mérések során egy változtatható méretű bufferbe menti a rendszer, majd az adatokat a buffer megtelése előtt az SPIFFS-be továbbítunk tárolásra (24. ábra). Ennek előnye, hogy nem kell minden egyes alkalommal megnyitni, írni, majd bezárni a fájlrendszert. Egyrészt a SPIFFS írási száma korlátos, másrészt a fájlműveletek – megnyitás, írás, bezárás – nagy overhead-el rendelkeznek, így csak feleslegesen lassítanak a rendszer működését.



24. ábra: Ha a buffer megtelik a mérési adatokkal, akkor a SPIFFS-be kerülnek mentésre

Az adatok SPIFFS-ből történő kiolvasásának és a Raspberry-n futó InfluxDB adatbázisba történő tárolásának menete a következő: első körben, egy flaggel (*first\_spiffs\_read*) jelzem, hogy a korábbi mért adatok, melyek már a SPIFFS-ben vannak tárolva, elmentésre kerültek-e, mielőtt egy újabb mérési folyamattal felülírnánk azokat. (Egész pontosan az első kiolvasás után a SPIFFS-t formázom, így helyet felszabadítva az újabb mérések adatainak.)

Amennyiben van hálózati kapcsolatunk (jelen esetben WiFi), az adatok MQTT protokollon keresztül a Node-RED szerver megfelelő csomópontjaiba érkeznek meg JSON formátumban. Erre azért van szükség, mert így konzisztensen, meghatározott struktúrában tudom az adatokat továbbítani, és az adatbázis megfelelő tábláiban tárolni.

Már a SPIFFS-be írás során érdemes figyelni arra, hogy megfelelő formátumban kerüljenek eltárolásra a szenzorinformációk. Ezzel saját dolgunkat könnyítjük meg, hiszen a NodeRED-ben JSON formátumú stringeket egyszerűen tudunk kezelni. A parse-olás után az InfluxDB adatbázisba kerülnek az egyes adatok. A szerver automatikusan végzi az adatbázis új tábláinak létrehozását és feltöltését, ezt külön manuálisan nem kell megtennünk. Ez abban

az esetben működik így, ha a megfelelő topicon beérkezett MQTT üzenet JSON formátumú string-ként érkezett. A 'key-value' párok alapján a 'key' mező jelenti az adatbázis új oszlopait, és értékeit értelemszerűen a 'value' mező alapján tölti fel a rendszer.

Innen a Grafana segítségével tudjuk kiolvasni az adatbázis oszlopait, értékeit. A szerverekre történő adatküldés mellett UART-on is kiolvashatjuk a tárolt adatokat, melyeken ezután kényelmesen tudunk algoritmusokat futtatni. Ha nincs hálózati (a prototípusnál: Wi-Fi) kapcsolatunk, akkor az InfluxDB-be történő mentés nem fog megvalósulni, ekkor csak UART-on tudjuk lementeni az adatokat.

## 5. A gyűjtött adatok elemzése

### 5.1. Raynaud-jelenség megfigyelése rejtett Markov-modellel

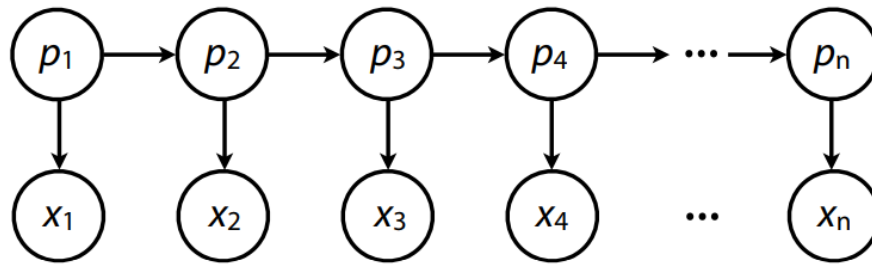
A szenzorrendszer által monitorozott élettani paraméterek összefüggenek egymással bizonyos folyamatok együttes vizsgálatakor.

A Raynaud-szindrómánál két kritikus tényező van a jelenség előfordulása szempontjából: a hőmérséklet és a stressz-szint. Egyrészt, egy bizonyos hőmérséklet alatt (súlyosabb esetben már szobahőmérséklet alatt!) *szinte biztos*, hogy jelentkezni fog a túlzott perifériás érösszeszűkülés. Másrészt, akár meleg környezetben is *jelentkezhet*, ha stressz éri a Raynaud-beteget. Sok függ tehát attól, hogy mekkora a stressz mértéke, és milyen környezeti hőmérséklet társul hozzá. A „szinte biztos” és „jelentkezhet” mértékét hivatott számszerűsíteni az eszköz. Ezt például valószínűség-számításon alapuló módszerekkel lehet megállapítani. Egy ilyen módszert, a rejtett Markov modellt és jelen projektbeli felhasználását mutatom be ebben a fejezetben.

Az algoritmus választásának alapja, hogy vannak megfigyelhető és nem megfigyelhető paramétereink (állapotaink). Jelen felhasználásban megfigyelhető paraméter minden, amit a beépített szenzorokkal mérni tudunk: pulzus, véroxigén-szint, bőrhőmérséklet, külső hőmérséklet, aktivitás és stressz-szint. A szenzorok által közvetlenül nem megfigyelhető állapot pedig az, hogy a Raynaud-jelenség éppen fennáll-e. Erre tudunk bizonyos valószínűséggel következtetni. Ezáltal egyénre szabottan ismerhetjük meg azt, hogy milyen gyakorisággal és súlyossággal jelentkeznek a tünetek, és ezek milyen körülmények között történnek meg. Az algoritmus annál pontosabb, minél több mérési adatot kap, minél „többet tud tanulni”. Ennek a folyamatnak a bemutatása következik.

Elöljáróban még érdemes megismerni néhány alapvető fogalmat a következőkben bemutatott rejtett Markov modellekhez [7]. Markov-láncnak nevezik azt a folyamatot, ahol egy adott állapot valószínűsége adott időpillanatban csak az azt megelőző állapot valószínűségétől függ. Ezt nevezik Markov-tulajdonságnak is. Ez a tulajdonság azt fejezi ki, hogy a jövő feltételesen független a múlttól, ismerve a jelen állapotot.

Rejtett Markov-modell esetén csak a megfigyelési sorozatot kapjuk meg, az aktuális állapotot nem ismerjük. A 25. ábra szemlélteti a rejtett Markov-modellek topologikus felépítését.



25. ábra: A rejtett Markov modell irányított gráfként való reprezentálása

Itt  $p$  jelöli a rejtett (nem megfigyelhető),  $x$  pedig a megfigyelt állapotokat.

A modell felépítésekor tetszőleges kezdeti valószínűségeket adhatunk meg az egyes átmeneteknek. A tanítás folyamán ezek az átmeneti valószínűségek igazodnak a mért adatok alapján. A tanító halmaz az a megfigyelési sorozat, ami alapján a modell értékeit változtatjuk. A „betanítás” során azokat az eredményeket „finomítgatja” az algoritmus, hogy milyen valószínűséggel követi egyik állapot a másikat. Ezt hívjuk állapotátmenetnek, és ehhez tartozik egy átmenet-valószínűségi mátrix, amely egy sztochasztikus mátrix – minden sorában az elemek összege 1. Ezen kívül egy megfigyelési mátrixot is definiál a modell, ami a megfigyelések valószínűségi eloszlását tartalmazza.

A megfigyelés kibocsátása után a modell egy másik állapotba léphet. Fontos, hogy ugyanabban az állapotban is maradhatunk, nem szükségszerű, hogy mindig állapotot váltsunk - amennyiben nem változtak a mért paraméterek, akkor nincs váltás. Jelen alkalmazásban ennek a valószínűsége nagy, hiszen nem változnak olyan gyorsan a megfigyelt értékek. Erre konkrét értékeket is látni fogunk az eredmények részletezésénél.

## 5.2. Raynaud-jelenség megfigyelése rejtett Markov modellel

A rejtett Markov-modell (RMM) tehát egy valószínűségi változókon alapuló modell, amely alkalmas folyamatosan változó állapotok vizsgálatára a rejtett (nem megfigyelhető) állapotok segítségével. A megfigyelhető állapotokat a szenzorinformációkból származtathatjuk. A nem megfigyelhető - a szenzorok által közvetlenül nem mérhető - állapot pedig maga a Raynaud-jelenség.

Az RMM egy többváltozós modell, ahol az események (feltételes) függetlenségét kihasználva tudjuk számításainkat egyszerűsíteni. Erre azért is van szükség, mert különben túlzott méretű eloszlás-táblázatokat kellene felvennünk, ami a számítási kapacitást figyelembe véve nem kivitelezhető a később ismertetett tanulási folyamat szempontjából.

Az RMM-ben elvégezhető operációk közül jelen alkalmazásban a legfontosabbak egyike az előrejelzés (*predicition*). Ez azt jelenti, hogy egy jövőbeni állapot eloszlását számítjuk ki az eddigi összes bizonyíték (mérési eredményekből kapott eloszlások) ismeretében. Ennek szerepe a Raynaud-betegségnél az, hogy a jelenség bekövetkeztét

megelőzni szükséges, nem pedig „tünetileg kezelni”. Gondoljunk itt arra a folyamatra, ami a bevezető részben került ismertetésre: sokkal nehezebb megszüntetni a tüneteket (fehér, lila, fekete ujjak, összeszűkültek erek, drasztikusan csökkent véroxigén-szint), mintsem megelőzni azokat. Ez az előrejelzési módszer tehát alkalmas ennek a problémának a kiküszöbölésére. Minél több mérést végeztünk, annál pontosabban tudja „megjósolni” az algoritmus, hogy mikor, milyen körülmények között fog fellépni a Raynaud-jelenség. Ezt iteratíván, a tanulási folyamat során pontosítja a módszer. Minél több mérési eredményt kap, annál pontosabb becslést ad.

A másik ilyen fontos operáció az RMM-ben a 'legvalószínűbb értelmezés (*most likely explanation*), amely a megfigyelések egy sorozatának ismeretében azt az állapotsorozatot találja meg, ami a leginkább valószínű, hogy az adott megfigyeléseket generálta. Ezáltal a Raynaud-jelenség előzményeit (az azt megelőző állapotokat) ismerhetjük meg. Így személyre szabottan felállítható egy olyan paraméterhalmaz, amely tartalmazza azokat az értékeket, amelyek esetén az egyes betegeknél a jelenség be fog következni. Nagyon változó, hogy kinél milyen körülmények hatására, mekkora stresszre, vagy milyen hideg hőmérsékletre jelentkezik. Ezeket a körülményeket (állapotokat) tudjuk számszerűsíteni, valószínűségeket rendelni hozzájuk. Összefoglalva tehát, magát a Raynaud-jelenséget nem tudjuk mérni (megfigyelni), de a hozzá szorosan kapcsolódó élettani paraméterek alakulását igen, és ezekből következtethetünk a jelenség súlyosságára, gyakoriságára, és bekövetkezésének körülményeire (hidegben/melegben, aktív/passzív állapotban, stresszes/nyugodt állapotban, stb.) Maga a Raynaud-jelenség tehát a rejtett állapotunk az RMM-ben.

### 5.3. A modell felépítése a mért élettani paraméterek alapján

A szenzoradatok alapján mindegyik paraméterből egy-egy normális eloszlású valószínűségi változó származtatható. Ennek első és második centrális momentuma várható érték és a szórás. A feldolgozandó információk *JSON* formátumban állnak rendelkezésre, az alábbi tartalommal:

*T* – időbélyeg (a mérés kezdete óta eltelt perceket adja meg),

*BPM* – szívfrekvencia (Beat Per Minute),

*SpO2* – véroxigén-szint,

*skin\_temp* – bőrhőmérséklet,

*outer\_temp* – környezeti hőmérséklet,

*xGyro\_value*, *yGyro\_value*, *zGyro\_value* - a gyorsulásérzékelő által mért adatok,

*GSR\_value* – a bőrimpedancia-mérő által mért adatok.

Erre példa egy valós mérésből:

```
{ "T": 0, "BPM": 45.28, "Spo2": 97.00, "skin_temp": 37.63, "outer_temp": 27.75, "xGyro_value": -4.79, "yGyro_value": -0.12, "zGyro_value": 40.13, "GSR_value": 346.00 }
```

A gyorsulásérzékelő értékeiből (x/y/zGyro\_value) számolható az aktivitás. A mért értékek felhasználásával különféle eszközökkel - például a *numpy* Python csomag függvényét (*norm.fit()*) felhasználva [8] - megkaphatjuk a standard normális eloszlás paramétereit. Ezekkel a paraméterekkel lehet inicializálni az állapotok eloszlását.

Vizsgálatom során összesen 16 állapotot vettem fel a mért paraméterek szerint. Az állapotok neveit a megfelelő paraméter angol nyelvű kezdőbetűiből származtatta,: **C**(cold), **W**(warm), **P**(passive), **A**(Active), **S**(Stressed), **R**(Relaxed), **L**(Low\_SpO2), **H**(High\_SpO2). Ezt az alapján választottam, hogy hideg, meleg, aktív, passzív, stresszes, nyugodt állapotról, valamint magas/alacsony oxigén ellátottságról van-e szó. Később látni fogjuk, hogy ez utóbbi paraméter fogja jelenteni azt, hogy jelen van-e a Raynaud-jelenség (alacsony véroxigén-szint) vagy nincs (magas véroxigén-szint).

A vastagon szedett rövidítések tehát még nem az állapotokat jelentik, hanem az ezekből alkotott 16 elemű állapottér építőelemei. Az állapotok felvételére egy példa:

**CSLA** – Cold, Stressed, Low\_SpO2, Active

(hideg környezet, stresszes állapot, alacsony véríxigén-szint, aktív állapot)

A további állapotok ez alapján már értelmezhetőek:

**CSLP, CSHA, CSHP, CRLA, CRLP, CRHA, CRHP, WSLP, WSHA, WSHP, WRLA, WRLP, WRHA, WRHP.**

*Megj.: A modell létrehozásához és tanításához a pomegranate.py Python csomagot használtam.*

Kódolástechnikai szempontból az állapotok felvételénél érdemes arra figyelni, hogy ha egyazon objektumként adjuk át a számított eloszlást (*IndependentComponentsDistribution()*) minden állapotnak, akkor ezek „összekötött” (angol terminológiával: *tied states*) állapotokat fognak eredményezni. Erre a függvénykönyvtárhoz tartozó dokumentációban [8] is felhívják a fejlesztők figyelmét, hiszen ekkor teljesen más eredményt kapunk, mintha különálló Python objektumokkal inicializáljuk az állapotokat. A jobb érthetőség kedvéért álljon itt egy példa erre:

```
d_BPM = NormalDistribution.from_samples(BPM)
d_SpO2 = NormalDistribution.from_samples(Spo2)

d = IndependentComponentsDistribution([d_BPM, d_SpO2])

s1 = State(IndependentComponentsDistribution(d, name='CSLA')
s2 = State(IndependentComponentsDistribution(d, name='CSLP')
```

Ebben az esetben tehát „összekötött” állapotokkal (*tied states*) dolgozunk, hiszen ugyanazt a Python objektumot adtuk át a konstruktornak. Ennek kiküszöböllésére, minden állapotot külön objektummal inicializálok:

```
s1 = State(IndependentComponentsDistribution([d_BPM, d_SpO2]), name='CSLA')
s2 = State(IndependentComponentsDistribution([d_BPM, d_SpO2]), name='CSLP')
```

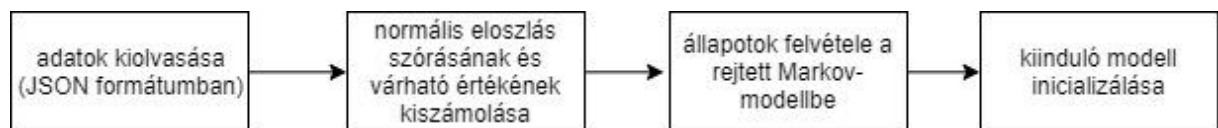
Következő lépésként a modellt kell inicializálni ezekkel az állapotokkal a megfelelő metódus meghívásával (*add\_states()*). Az állapotátmenetek kezdeti valószínűségeit célszerű

*for* ciklusban elvégezni, hiszen számos átmenetet kell megadni. (Ne feledjük, hogy az állapotokban maradhatunk is valamekkora valószínűséggel, ezért pl. CSLA állapotból CSLA állapotba – önmagába – is vezet él.) Ez esetünkben tehát két egymásba ágyazott *for* ciklust jelent, ahol minden állapotból minden másik állapotba vezet él, ha a gráfelméleti topológiát tekintjük:

```
for i in range(0, (len(states))):
    for j in range(0, (len(states))):
        model.add_transition(states[i], states[j], (1/len(states)))
```

Ahol *len(states)* az állapotok vektorának hosszát, az *add\_transition()* metódus pedig az összeköttetéseket jelöli.

Végül a *model.bake()* metódussal felépítjük a modellünket. Ekkor a kezdeti paramétereket finomítva, megkapjuk az adott mérési sorokból számított átmeneti és megfigyelési valószínűségeket. Ezt a folyamatot szemlélteti a 26. ábra.



26. ábra: A Rejtett Markov Modell (RMM) felépítésének folyamata

#### 5.4. A modell tanítása további mért értékek alapján

A már felépült modellünket úgy tudjuk tanítani (az állapotátmenetek valószínűségeit pontosítani), hogy megfelelő szekvenciájú állapotokat adunk meg a *model.fit()* tanító metódusnak. Ez a függvény paraméterlistájában várja az általunk választott tanító algoritmust (Viterbi, Baum-Welch), és a tanító szekvenciát is.

Ez utóbbi első körben nem áll rendelkezésre, hiszen mi „csak” szenzoradatokat mérünk, nem pedig állapotokat. Ezeket az információkat kell lefordítani állapotokká. Ennek módszere, hogy meghatározott küszöbértékeket figyelembe véve eldöntjük, hogy az aktuális adat milyen állapotot felépítő egységnek felel meg. Emlékezzünk, az állapotot felépítő egységek: C (cold – hideg környezeti hőmérséklet), W (warm – meleg környezeti hőmérséklet), stb. Az egységekből úgy épülnek fel az állapotok, hogy az egymást kizáróak kivételével mindegyiket kombináljuk. Egymást kizáró építőegységek a hideg-meleg, stresszes-nyugodt, aktív-passzív, alacsony véroxigén-szint – magas véroxigén-szint egységek.

A mért értékek állapotokká való konvertálása nem jelent mást, mint a 16 felvett állapot neveinek – a *State()* konstruktorban megadott 'name' paraméterek - előállítását.

Ezt úgy tehetjük meg, hogy kijelölünk küszöbértékeket az állapotok-komplementer állapotok intervallumba sorolásához, szeparálásához. Például, ha a környezeti hőmérséklet kisebb, mint 20 fok, akkor az hideg (C) építőegységet eredményez, ha nagyobb, mint 20 fok,

akkor meleg (W) építőegységet eredményez az állapot nevében (sztringjében). Ugyanígy, ha a véroxigén-szint (SpO2) értéke 90%-nál kisebb, akkor az (L-low) értékre fordítódik, ha ennél nagyobb, akkor (H - high) értékre. Az aktivitásnál a korábban említett összefüggés segítségével ( $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ) kiszámítjuk az eredő vektort az x/y/zGyro\_value mért értékekből, majd ezt normalizálva, a 0-tól való eltérést figyeljük. Abszolút értékben 1-nél nagyobb eltérés aktivitást jelent (A), egyébként passzív (P). Végezetül, a bőrimpedancia mérés eredményét is két állapotba szeparáljuk: ha 350-nél kisebb az érték, akkor stresszes állapotról van szó (S), egyébként nyugodt (R) állapotról.

Ennek finomhangolására lehetőségünk van többféle módon is. Egyrészt hardveresen, a szenzoron lévő potenciométer segítségével állíthatjuk az érzékenységet, ekkor természetesen más küszöbértéket kell megadnunk. Másrészt pedig, a későbbi fejezetben részletezésre kerülő kísérlet segítségével validálhatjuk, hogy milyen értéktől számít egy átlag ember stresszesnek, vagy nyugodtnak. Ennek a validációs folyamatnak az eredményét felhasználva még pontosabb becsléseket adhatunk arra, hogy milyen körülmények között mekkora valószínűséggel fog jelentkezni a Raynaud-jelenség.

Miután az állapotok építőegységeit megismertük, tekintsük át, hogyan épül fel a 16 átmeneti állapot, melynek végén eljutunk a Raynaud-szindrómához. A végcél az, hogy megállapítsuk, hogy az egyes állapotok milyen hatással vannak a jelenség bekövetkeztére. Az építőegységekből úgy keletkeznek az állapotok - pontosabban az azokat reprezentáló sztringek -, hogy az intervallumba sorolás után a kapott kezdőbetűkből megkonstruáljuk azokat: például egy 19 fokos környezetben (C, < 20 fok) történő mérés, melynél az alany stressz szintje alacsony (R-relaxed, GSR értéke < 350), és passzív volt (P), valamint 88%-os véroxigén-szintet mértünk (L - low SpO2, <90%), akkor a felépített rejtett Markov modellbeli állapot: 'CRPL'.

Ezt minden mérési eredménynél lefuttatjuk, és megkapjuk az állapotszekvenciát, mellyel a már felépült kezdeti paraméterekkel rendelkező modellünket taníthatjuk. Minél több mérést végzünk, annál pontosabb eredményeket fog szolgáltatni a modell. A végcél pedig, hogy megállapítsuk, hogy milyen körülmények között, mekkora eséllyel fordul elő a Raynaud-jelenség. Minden állapotra kapunk egy valószínűséget, hogy az az adott állapot mennyire jellemzi a kesztyű viselőjét: például, ha valakinek hideg hatására gyakori a jelenség fennállása, akkor az eredmények között a 'C' (cold – hideg) építőelemmel rendelkező állapotok súlya nagyobb lesz, mint a többié. Ugyanígy, akinél például meleg környezetben, de stresszes körülmények között jelentkezik a jelenség, annál a 'W' (warm – meleg) és 'L' (low SpO2 – alacsony véroxigén-szint) építőelemeket tartalmazó állapotok súlya fog dominálni.

Az egész folyamatot úgy is felfoghatjuk, hogy a kesztyű viselőjének mért élettani paraméterei alapján egyénre szabottan tudunk összefüggéseket feltárni – mennyire súlyos a Raynaud-szindrómája, milyen gyakorisággal jelentkezik. Összehasonlítva a bal és jobb oldali kézen mért véroxigén-szinteket, arra is következtethetünk, hogy elsődleges (primer) vagy másodlagos (szekunder) Raynaud-betegségről van-e szó. Erről a bevezetőben volt részletesebben szó – emlékeztetőül annyit, hogy primer esetben maga a Raynaud-betegség az autoimmun folyamat a szervezetben, szekunder esetben pedig a betegség egy másik autoimmun betegségnek a „velejárója”. Ezáltal akár egy autoimmun folyamat jelenléte a szervezetben annak korai szakaszában is észrevehető.

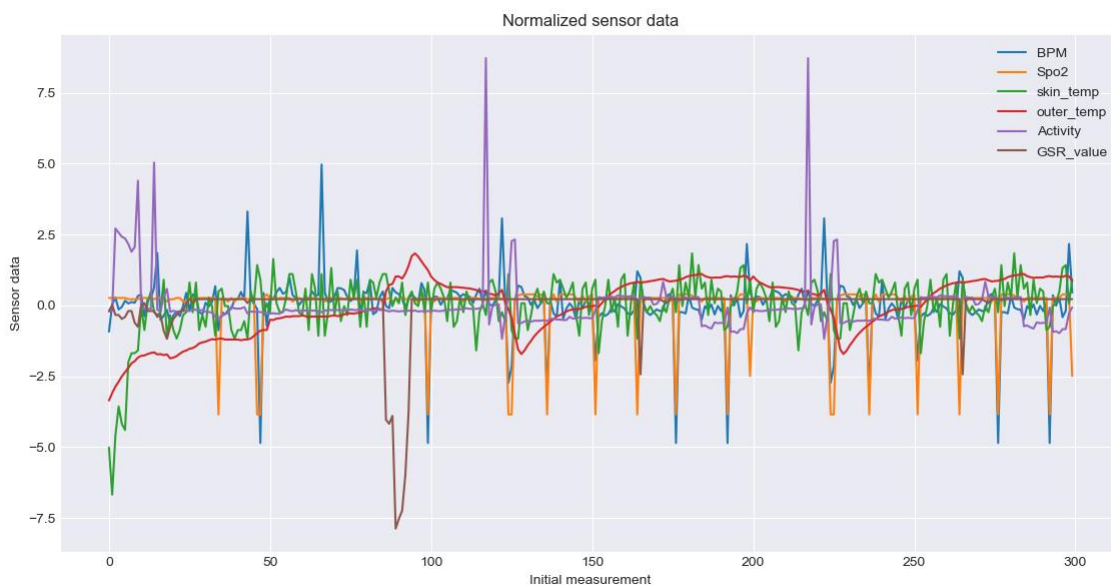


## 6. Mérési eredmények

### 6.1. A mért szenzoradatok

A korábbi fejezetekben ismertetésre kerültek az élettani paraméterek mérési eljárásai, a hozzájuk tartozó szenzorok részletes bemutatása, és az általuk mért értékek relevanciája a vizsgált paraméterek szempontjából. Ebben a részben egy összefoglaló képet adok a mérésekről. Az átláthatóság érdekében minden mérési eredmény normalizálva van, így egyszerre vizsgálhatjuk azokat. Első körben célszerű vizuálisan elemezni az adatokat, és megkeresni az összefüggéseket a mért élettani paraméterek között. Egy jellemző példa: ha a gyorsulásérzékelő nem jelez aktivitást, akkor nagy valószínűséggel csökkenni fog a szívfrekvencia (*BPM – beats per minute*) értéke. Hideg hatására (*outer\_temp jelöli a környezeti hőmérséklet alakulását*) pedig a véroxigén-szint csökkenése várható. Raynaud-betegnél végzett mérésnél ugyanez a jelenség figyelhető meg stressz-szint növekedés hatására is, hiszen a jelenség nem csupán hőmérséklet, hanem stressz-szint függő is. A két paraméter egyszerre történő változása még drasztikusabb véroxigén-szint esést eredményezhet, ha például a stressz-szint emelkedése és a környezeti hőmérséklet csökkenése egyszerre van jelen. Ekkor lép fel a Raynaud-jelenség.

A 27. ábrán látható egy koordináta rendszerben megjelenítve az összes mért paraméter.



27. ábra: Normalizált szenzoradatok

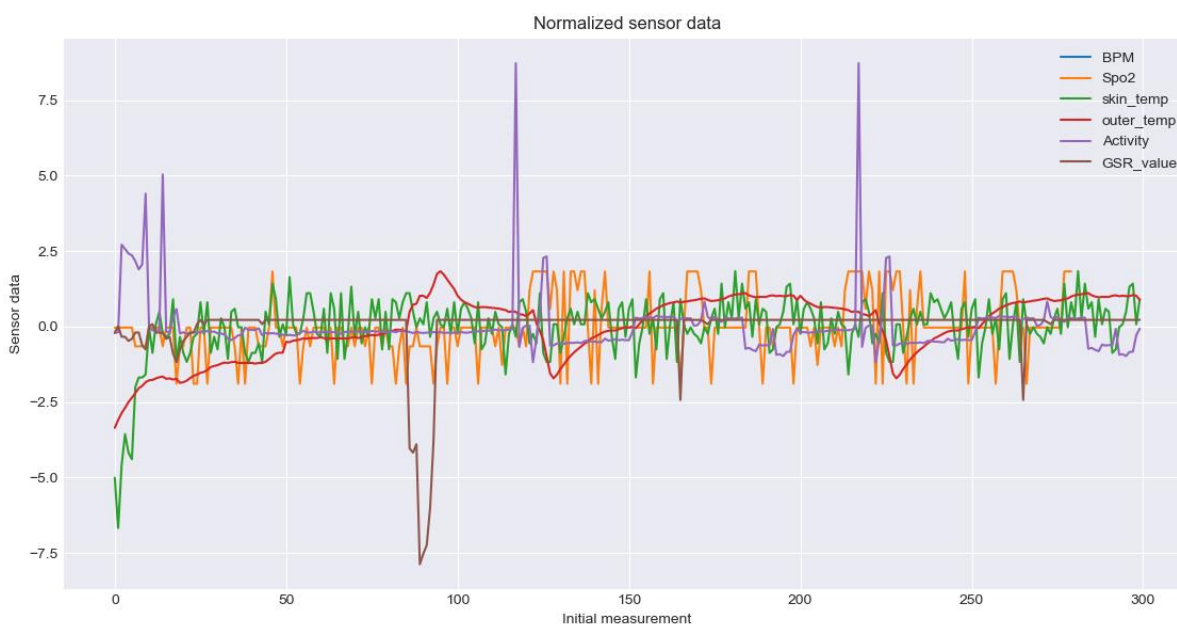
A jelek értelmezése:

- *BPM* – szívfrekvencia (kék)
- *SpO2* – véroxigén-szint (narancssárga)
- *skin\_temp* – bőrhőmérséklet (zöld)
- *outer\_temp* – környezeti hőmérséklet (piros)
- *activity* – aktivitás (lila)
- *GSR\_value* – bőrimpedancia mérés jele (barna)

Ezen paraméterek a korábban részletezett okok miatt szoros összefüggésben állnak Raynaud-jelenség fennállása esetén is: legfőbb mutató a véroxigén-szint, melyből látni lehet, ha a kesztyű viselőjének kórosan csökkent oxigéntelítettség lépett fel az ujjain. Ez együtt jár a bőrhőmérséklet csökkenésével, a perifériás keringés alulműködése miatt. Másik fontos paraméter a környezeti hőmérséklet, melynek csökkenése - akár már szobahőmérséklet alatt néhány fokkal - szintén előidézi a betegség tüneteit.

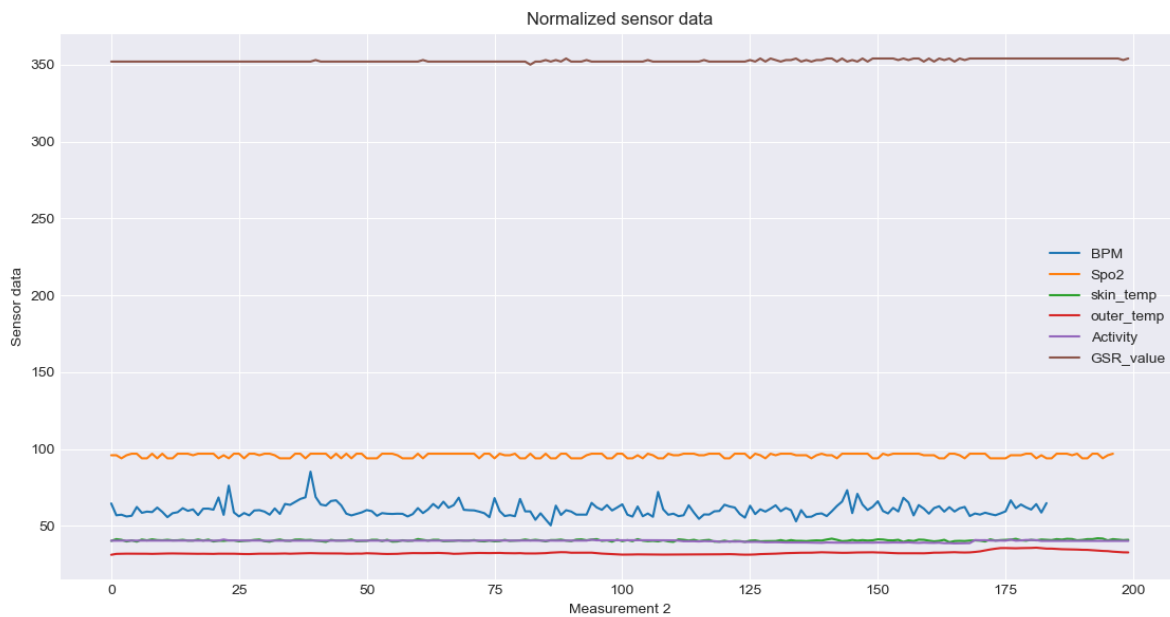
Emellett a stressz-szint is számottevő hatással bír a jelenség kialakulásában. Ezzel korrelál a szívfrekvencia is. Az aktivitás értéke pedig kiegészítő információt szolgáltat mind a kesztyű fűtésének szabályozásában, mind pedig az utólagos adatelemzésben. Egyrészt, a keringés vizsgálatakor figyelembe kell venni azt is, hogy éppen nyugalmi vagy aktív állapotban volt az alany. Másrészt, ha aktivitást érzékelünk, akkor a mért értékeket fokozott körültekintéssel kell kiértékelni, ugyanis ekkor a szenzorok elmozdulásából fakadó kiugró értékeket kaphatunk.

Ennek elkerülése érdekében célszerű kiszűrni ezeket a kiugró értékeket. Erre mutat példát a 28. ábra, ahol az SpO<sub>2</sub>, tehát a véroxigén-szintnél csak az 60 és 100 közötti értékeket veszem be az inicializálási halmazba.



28. ábra: A véroxigén-szint (SpO<sub>2</sub>) kiugró értékeinek kiszűrése

Egy nyugalmi körülmények között mért értékek grafikonját mutatja a 29. ábra:



29. ábra: Nyugalmi értékek alakulása

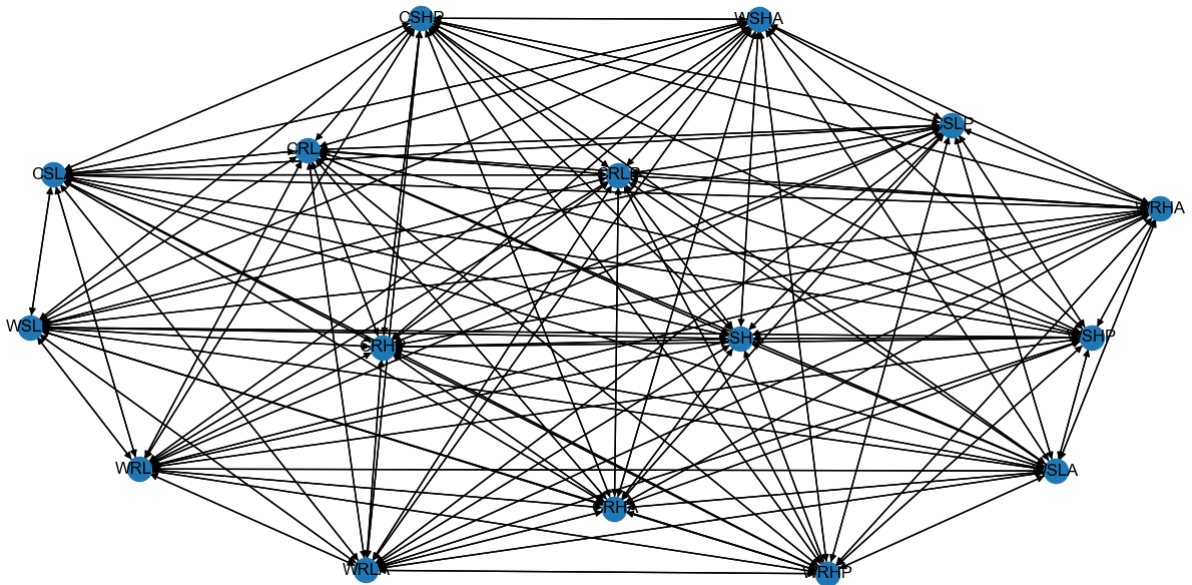
A modell tanítását újabb mérések értékeivel tehetjük meg. Minél több értékkel tanítjuk az algoritmust, annál pontosabb állapot-átmeneti valószínűségeket szolgáltat, így egyre pontosabban ismerhetjük meg azokat a tényezőket, amelyek a jelenséget indukálják.

## 6.2. Az eredmények számszerűsítése

A modell állapot-átmenet valószínűség értékei jelentik a megfigyelések számszerűsítését. Ezek az értékek megmutatják, hogy az egyes állapotokból mekkora valószínűséggel lépünk át másik állapotba. Jelen esetben az állapotok konkrét mérési értékek által definiáltak. Így tehát képet kapunk arról, hogy milyen körülmények között, milyen gyakorisággal és súlyossággal fordul elő a Raynaud-jelenség az egyes betegeknél egyénre szabottan. Ha például valakinél a véroxigén-szint nagymértékben lecsökken a 99%-os normál értékről, akkor érdemes megvizsgálni, hogy mi váltotta ki a jelenséget: a környezeti hőmérséklet csökkenése, vagy a stressz-szint megemelkedése, esetleg mindkettő egyszerre való fennállása. Ezután ebből az állapotból megvizsgálni, hogy mekkora a többi állapotba való átmenet valószínűsége. Ezáltal arra következtethetünk, hogy milyen körülmények okozták a jelenség megszűnését, amikor a véroxigén-szint ismét a normál értékhez közelít. Végigkövethetjük az állapot-átmenetek mentén, hogy a vizsgált élettani paraméterek hogyan változnak, és azok hogyan befolyásolták a betegség tüneteit.

A fent ismertetett módszerhez az alábbi információk állnak rendelkezésre: egy gráf, amely az egyes állapotokat tartalmazza, és az állapot-átmeneti mátrix, amely segítségével számszerűsíthetjük, hogy az egyes körülmények között fellépő állapotokból mekkora valószínűséggel jutunk másik állapotba, ahol a környezeti és/vagy élettani paraméterek is

megváltoztak. Mindezek szemléltetésére a *Python matplotlib* package segítségével egy gráfot rajzoltatok ki, melyek állapot átmenet valószínűségeit megkapjuk a modell paramétereinek lekérdezése segítségével. Ezt láthatjuk a 30. ábrán.



30. ábra: Az egyes állapotokból felépített gráf.

Bármely állapotból bármely állapotba eljuthatunk, tehát egy teljes gráfról van szó. Fontos jelentősége van annak, hogy mekkora ezeknek az éleknek a súlya – azaz mekkorák az állapot átmeneti mátrix értékei. Természetesen minél több mérési eredménnyel építjük fel a kezdeti modellt, annál pontosabb átmeneteket kapunk már tanítás nélkül is. Ezután a tanulási folyamat során pontosíthatjuk ezeket az átmeneteket.

Az élek súlyait, azaz az átmenetek valószínűségeit az alábbi formátumban kapjuk:

`('állapot1', 'állapot2'): x`

Például, egy valós mérési eredmény: `('WSLP', 'CSHA'): 0.0616`

Ezt úgy értelmezhetjük tehát, hogy kiindulási állapotként melegben (**W**-warm), stresszes állapotban (**S**-stressed), alacsony véroxigén-szinttel (**L**-low), passzív állapotban vagyunk (**P**-passive). Annak a valószínűsége, hogy ezután olyan állapotba – olyan körülmények közé – kerülünk, ahol hideg van (**C**-cold), továbbra is stresszes az állapot (**S**), mégis megfelelő szintű véroxigén ellátottságunk van (**H**-high), és egyébként aktivitásunk növekedett (**A**-active), 0,0616.

Első lépésként tehát minden állapotból vizsgálhatjuk az átmeneteket minden másik állapotba. Ezután, a tanítás után egyre inkább látni fogjuk, melyek azok az átmenetek, ahol kisebb vagy nagyobb a valószínűsége a váltásnak. Ezáltal az irreleváns átmeneteket figyelmen kívül hagyhatjuk, és a nagyobb valószínűséggel rendelkezők esetében vizsgálódhatunk tovább: jobban kitérve a részletekre, ezáltal képet kapva arról, hogy milyen körülmények indukálhatták a jelenséget, és milyen körülmények hatására szűnt meg. Mindemellett az időbélyeg támpontot nyújt abban is, hogy mennyi időre volt szüksége a keringésnek, amíg normalizálódott.

### 6.3. Az eredmények értelmezése Raynaud-jelenség tekintetében

Ahogy már korábban leírásra került, minden állapothoz egy-egy valószínűség rendelhető. Minden állapotban szerepel vagy az 'L' (low SpO<sub>2</sub>- alacsony véroxigén szint) vagy a 'H' (high SpO<sub>2</sub> – magas véroxigén szint) építőelem. Az előbbi jelzés azt fejezi ki tehát, hogy jelen van a Raynaud-jelenség, utóbbi esetben pedig nincs. Az állapot többi építőelemei pedig a különböző élettani és környezeti paraméterre utalnak.

Ezekből azt tudjuk kiolvasni, hogy milyen körülmények között, milyen intenzitással és mekkora valószínűséggel jelentkezik a Raynaud-jelenség. Ez egyénenként eltérő. Mindenkinek az aktuális stressz állapotától, keringési rendszerének állapotától, a hőmérséklettől, és más befolyásoló tényezőtől is függhet – legfőképp attól, hogy elsődleges, vagy másodlagos Raynaud-ról van-e szó. Sokféle mechanizmus áll a háttérben: a biokémiai folyamatoktól kezdve az erek károsodott sejtfaín át, az autoimmun betegségek okozta antitestek jelenlétéig különféle befolyásoló tényezők állhatnak a háttérben.

Hasznos információként szolgálhat az aktivitás figyelemmel követése is. Némely esetben a vérkeringés beindítása testmozgással nagyban hozzájárul a perifériás erek visszatágulásához, így az 'A' (aktív) értéket tartalmazó állapotok felé irányuló átmeneti valószínűségek nagyobb értékeket mutathatnak. Mindez feltételes szóhasználatban, mert súlyosabb esetekben a vérkeringés ily módon történő fokozása sem elegendő a tünetek csökkentéséhez. Ha valakinél érzelmi stressz hatására jelentkezik a fokozott érösszehúzódság, akkor a testmozgás nem sokat segít. Ekkor kisebb valószínűséggel fog egy passzív ('P'), alacsony véroxigén-szinttel ('L') rendelkező, stresszes ('S') állapotból olyan állapotba váltani a modell, ahol a paraméterek alakulása 'A' (aktív) és 'H' (magas véroxigén-szint) – ami tehát azt jelenti, hogy aktivitás hatására elmúlt a Raynaud-jelenség.

Egy másik példa egy ellenkező esetre: ha valakinél a környezeti hőmérséklet csökkenése okozza a véroxigén-szint esést, és így a Raynaud-jelenség előfordulását, akkor ebben az esetben a stressz-szint változása nem fog nagy valószínűségű átmeneteket eredményezni. Legvégül pedig, ha valamely esetben mind a hideg, mind pedig a stressz is közrejátszik a tünetek jelentkezésében, akkor ezek egyszerre történő megszűnésekor (hőmérséklet emelkedése, stressz szint csökkenése) olyan állapotokba történő váltás a legvalószínűbb, ahol ezek az értékek vannak jelen. Az, hogy emellett a további paraméterek hogyan befolyásolják a valószínűségeket, további kiegészítő információval szolgál.

Ezekre különböző orvosi vizsgálatok során derülhet fény. Például kapillármikroszkópiás vizsgálattal megállapítható, hogy az ujjbegyeknél milyen állapotban vannak a perifériás erek. Immunológiai vizsgálat során az antitestek kimutatása jelenti a diagnózist. Más autoimmun betegségekkel rendelkezőknél is hasonló a helyzet, de ott a Raynaud-szindróma, mint mellékhatás van jelen. Nehéz tehát eldönteni, milyen mechanizmus és biokémiai reakció zajlik a szervezetben, miközben jelentkezik a jelenség.

Ezen nehéz döntési helyzeten hivatott segíteni a mért értékekből kiolvasandó valószínűségi értékek. Segítségükkel pontosabb képet kaphatunk arról, hogy milyen tényezők idézték elő a Raynaud-jelenséget. Így konkrétan, egyénre szabott vizsgálatok sorozatát kezdeményezhetjük. Ezzel talán könnyebben lehet a megfelelő úton elindulni, és

kevesebbszer „mellélőni”, felesleges vizsgálatokat elvégezni, kizárni egyes folyamatok jelenlétét.

Jellemző példaként: egy elsődleges Raynaud-betegséggel rendelkező páciensnél a jelenség szimmetrikusan hat, mindkét kézen egyszerre, ugyanazon az ujjakon jön elő, ugyanolyan (vagy legalábbis hasonló) mértékben. Ezzel annak az esélye, hogy más autoimmun betegség áll a háttérben, rögtön lecsökken, és a megfelelő úton indulhatunk el a további vizsgálódásban, nem futunk egyből vakvágányra. Ugyanígy, egy másodlagos Raynaud-betegnél a támadások erősen aszimmetrikus volta miatt egyből gyanakodhatunk autoimmun folyamatokra a háttérben. Így például egy immunológiai vizsgálat indokoltá válhat. Egyszóval, az eszköz által mért adatok és az ezekből kinyert információk támogatják a döntéshozatalt, vagy a további vizsgálatokhoz információkat biztosít.

Az eszköz tehát jelen alkalmazásban a Raynaud-szindróma tüneteit vizsgálja: annak gyakoriságát és súlyosságát, valamint az azt kiváltó és megszüntető tényezőket. Ahogyan a bevezetőben említettem, a *helicobacter pylori* eradikációs vizsgálatban [6] a betegeknek naplózásszerűen kellett feljegyezni az adatokat: hőmérsékletet, stressz szintet 1-9-es skálán, a Raynaud-jelenség előfordulását. Első alkalmazásban például ezt a naplózásszerű folyamatot lehetne kiváltani az általam készített eszközzel. Ennek segítségével sokkal pontosabb értékeket kaphatunk például a viselőjének stressz szintjéről ahhoz képest, mint amikor saját belátása alapján pontozza azt egy skálán. Emellett az előző fejezetekben ismertetett eljárással további összefüggéseket tárhatunk fel az egyes élettani paraméterek között. Ebben van segítségünkre a valószínűségi számításra alapuló modellünk is, amely annál pontosabb átmeneti értékeket szolgáltat egyik állapotból a másikban, minél több adattal tanítjuk azt.

#### 6.4. Kézremegés megfigyelés és stresszbecslés Parkinson-kóros betegen

A Semmelweis Egyetem neurológiai osztályán lehetőséget kaptam arra, hogy egy Parkinson-kóros betegen végezhessek méréseket az eszközzel. Ennek relevanciája, hogy a Parkinson-kór tünetei közé sorolható az ujjak remegése (súlyosabb esetben az egész kézfej remegése), valamint a vegetatív idegrendszer csökkent funkciója is. Ez utóbbit több módszerrel is mérik, melyek között szerepel egy bőrimpedancia mérésen alapuló eljárás is.

Ennek az eljárásnak a lényege az, hogy egy ingerületátvivő anyagot (neurotranszmittert) – nevezetesen acetilkolint – juttatnak a beteg bőrfelszínhez közeli részeihez iontroforézis segítségével. Az iontroforézis során a hatóanyagot közvetlenül be lehet juttatni a szervezetbe, helyileg lehet azt alkalmazni. Éppen ez történik ebben az esetben, ugyanis az acetilkolin hatására lokálisan megindul a verejtékezés, és így a bőrimpedancia mérővel megfigyelhetjük, hogy a beteg autonóm idegrendszere mennyire mutat csökkentett aktivitást.

A 31. ábrán egy olyan mérési elrendezés látható, ahol a beteg végtagjaira rögzített elektródokon keresztül stimulálják lokálisan vagy a szőrtüszőket, vagy a verejtékmirigyeket.



31. ábra – Parkinson-kóros betegen végzett vizsgálatok mérési elrendezése

Az első esetben egy másik eljárás segítségével teszik mérhetővé az autonóm idegrendszer hatékonyságát. Ez a projektem szempontjából nem kapcsolódik a méréshez, azonban érdemes megemlíteni a teljesség kedvéért: adott környezetben stimulált szőrtüszők segítségével lehet következtetni arra, hogy mennyire jó a beteg ingerületvezető képessége. A stimulált hely körül minél több szőrtüszőt ér el az inger, annál jobb a beteg autonóm idegrendszerének állapota. Azt, hogy mennyi szőrtüszőt ért el az inger, egy gél segítségével lehet később megszámolni. A betegről levett gélen látszódik, hogy a stimulálás környezetében „milyen messzire jutott az inger (32. ábra).



32. ábra: A betegről speciális gél segítségével levett szőrtüsző mintázat

A második eset pedig már releváns a projekt szempontjából is: az acetilkolin iontoforézis segítségével bejut a szövetek közé, melynek eredménye lokális verejtékképződés lesz. Ezáltal megváltozik a bőr vezetőképessége. Ezt lehet detektálni az elektródok segítségével.

Ez utóbbi esetben a kesztyűbe varrt elektródok segítségével is lehet mérni a bőrimpedancia változást. Ezt a beteg ujjaira felszerelt különböző mérőelvezetések miatt nem rajta, hanem saját magamon végeztem el (33. ábra). Itt csupán az volt a szándékom, hogy a kesztyűben lévő bőrimpedanciamérésen alapuló, stresszbecslésre alkalmas szenzort teszteljem.



33. ábra: Iontroforézis segítségével a szövetekbe lokálisan bejuttatott acetilkolin segítségével verejtékezés váltható ki. Ez a bőr vezetőképességének megváltozásával jár, így a bőrimpedanciamérő működése ellenőrizhető, finomhangolása elvégezhető.

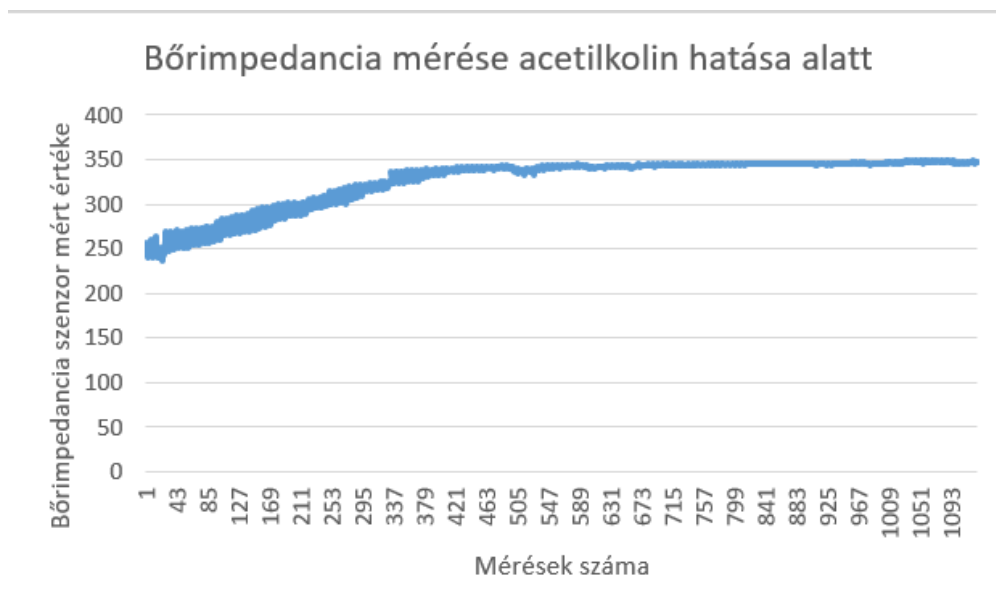
A betegen a verejtékezést egy másik módszer segítségével is megfigyelték: egy színezett-jódózott anyag felvitele után kirajzolódtak a verejtékcseppek, melyekről néhány perccel később, 15 másodperces időközönként felvételt készítve, kiértékelhető a lokális izzadási mértéke, és így a vegetatív idegrendszer ingerületvezetése (34. ábra).



34. ábra: A verejtékcseppek és ezáltal az ingerületvezetés hatékonyságának egyik mérési módszere



Az acetilkolin iontoforézis segítségével való bejuttatása után megindul a verejtékezés az adott területen, majd egy rövid ideig - néhány percig - folyamatosan fokozódik. Ezt a fokozódó jelenséget próbáltam megfigyelni, és számszerűsíteni a kesztyűbe varrt bőrimpedanciamérő segítségével. Ennek célja, hogy a szenzoron található potenciométer segítségével kalibrálni tudjam a szenzort, ugyanis nem elhanyagolható tényező a bőr hidratáltsága, zsírossága sem. Nem mindegy tehát, hogy az eszközzel egy fiatal vagy egy idősebb ember bőrfelületén mérünk – a bőr vezetőképessége különböző életkorokba eltérő. A folyamat során a bőrimpedancia mérővel rögzített adatokat a 35. ábra mutatja.



35. ábra Az acetilkolin hatására verejtékezés indul meg lokálisan a bőrfelületen. Ennek megszűnése közben indítottam a mérést. Jól látható, ahogy a bőrimpedanciamérő szenzor értéke visszaáll az eredeti értékre a verejtékezés megszűnésével.

A mérés során a beteg nyugalomban volt, nem jelentkezett nála ujjremegés, így ezt a jelenséget nem tudtam megfigyelni rajta a gyorsulásérzékelő segítségével. Az ujjremegést saját magamon „szimulálva” a 36. ábrán látható eredmények adódnak. A szenzor érzékenységét ilyen mérések segítségével lehet kalibrálni annak érdekében, hogy az ujjak finomremegését is tudjuk mérni általa.



36. ábra Egy „szimulált” ujjremegés során végzett minta mérés eredményei a gyorsulásérzékelő X, Y és Z tengelyeiről

## 7. Továbbfejlesztési lehetőségek, jövőbeni célok

A bevezető részben előzetesen szó esett már a projekt jövőbeni céljairól. Az eszköz működését, képességeit és lehetőségeit megismerve, az eredményeket áttekintve, számos más területen is alkalmazható lehet. A mért élettani paraméterek nem csak a Raynaud-szindróma megismerésében jelentenek segítséget. A kesztyű olyan betegségek, mint a Parkinson-kór korai tüneteinek felismerésére (az ujjak finomregése) is eszközt nyújt. Emellett a stressz-bebecslés, mint önálló kutatási terület is szorosan kapcsolódik a projekt profiljába a bevezetőben részletezett okok miatt – természetes körülmények között teszi lehetővé annak megfigyelését, kiküszöbölve ezzel a *fehérköpeny-effektus* hatását. A következő absztrakciós szintet meglépve, az autoimmun betegségek témakörét is bekapcsolhatjuk vizsgálódásunkba – jelen alkalmazás csak a Raynaud-szindrómára terjed ki, de útmutatóul szolgál annak a ténynek a felismerésében, hogyan lehetne használni a modern technológiai eszközöket hétköznapi körülmények között az ilyen folyamatok korai felderítésében. Ezek a folyamatok nagyon nehezen felismerhetőek kezdeti állapotban. Amikor a tünetek jelentkeznek, már egy előrehaladott, kóros autoimmun folyamat játszódik le a szervezetben. Ebben a részben a projekt további lehetőségeire mutatok példákat.

### 7.1. Sclerodermás betegen alkalmazott gyógyszerek hatásainak monitorozása

A projekt szempontjából szintén releváns orvosi szakterületen is sikerült új ötleteket meríteni a projekt továbbfejlesztési lehetőségeihez: a Semmelweis Egyetem Bőrklínikai Osztályán az immunológiai részleg orvosaival konzultálva az a meglátás, hogy a sclerodermás betegeknek a kézfejen megjelenő fekélyesedés miatt egy újabb szenzort is lehetne a kesztyűbe szerelni, ami a bőrnek ezt az állapotát képes nyomon követni. Egy ilyen betegségben szenvedő páciensnek nagyban függ az állapota az alkalmazott gyógyszeres kezeléstől. Jövőbeni cél, hogy a különböző hatóanyagú gyógyszerek által okozott változásokat megfigyeljük, és következtetéseket vonjunk le azzal kapcsolatban, hogy melyik szer alkalmazása milyen tüneteket produkál, milyen javulást vagy rosszabbodást eredményez például a beteg bőrén.

### 7.2. Parkinson-kór korai tüneteinek felismerése – az ujjak finomremegése

Az eszköz tulajdonságait megismerve láthatjuk, hogy a mért paraméterek összefüggése az autoimmun folyamatokkal (a Raynaud-szindróma által), és ehhez hozzávéve az ujjak finomremegésének jelenlétét, a Parkinson-kór korai tünetei figyelhetőek meg. Ez a projektnek egy távoli célja: hogyan lehetne ezt az eljárást pontosítani, illetve felhasználni a korai tünett felismerés elősegítésében azon túl, hogy ismerjük az ujjak remegésének állapotát.

### 7.3. Stresszbecslés „természetes körülmények között”

Az elkészült eszköz egy prototípusként használható, megbízható, hiteles eredményeket nem szolgáltat. Egyik legfontosabb jövőbeni cél, hogy a mért adatok megbízhatóságát alátámasszuk, a mért adatokból számított értékeket kalibráljuk, pontosítsuk. Példának okáért, a stressz-szint becslésénél a bőrimpedancia-mérés eredményeit egy validációs folyamatnak lehet alávetni: más, megbízható forrásból. pl.: MR felvételek által agyi aktivitásból megfigyelt érzelmi állapot változásokra hogyan reagál a GSR-szenzor által szolgáltatott érték. Ez alapján például kalibrálni lehet a stressz-becslő algoritmusokat, így a valószínűségi számító algoritmusok is pontosabb eredményekkel dolgoznak, ennek megfelelően azok is pontosabb eredményeket szolgáltatnak.

### 7.4. Egyes autoimmun folyamatok korai felderítésének elősegítése

A következő absztrakciós szint az, hogy azokat az autoimmun folyamatokat, amelyek az emberi szervezetben lejátszódnak, jobban kezelni tudjuk azáltal, hogy hamarabb észrevesszük a jelenlétét, vagy, hogy egyáltalán észrevesszük a jelenlétét. Jelen alkalmazás ebben a tekintetben csak a Raynaud-szindrómára, mint autoimmun betegségre terjed ki. Az autoimmun betegségek eredete az esetek túlnyomó részében a bélrendszerből fakad. Ennek vizsgálatára korlátozottak a lehetőségeink külső eszközökkel. Ezzel a módszerrel is csak közvetve tudunk levonni következtetéseket az ilyen autoimmun folyamatokról, és azoknak is csak egy részéről: ami Raynaud-jelenséggel jár. A projekt útmutatóul szolgál abban a tekintetben is, hogyan lehet a technikai eszközöket felhasználni a napjainkban drasztikusan növekedő autoimmun betegségek területén.

### 7.5. Kitekintés

A legfőbb probléma, amit a projekthez kapcsolódóan felvetnék, hogy mennyire nem használjuk ki a modern technológia adta lehetőségeket a „hétköznapi diagnosztikában”. Ez utóbbi alatt azt értem, hogy manapság már szinte bevált szokás, hogy a betegek először felállítanak magukról egy diagnózist, különböző online forrásokból kutakodva, majd elmennek az orvoshoz, hogy ez és ez a tünet, panasz, és szerintük ez a betegség. Meglepő módon, általában nem állnak messze az igazságtól az ilyen önmagukat diagnosztizáló „modern kor betegek”. Ezt persze az orvosok nem veszik jó néven, de talán pontosan azért, mert bármi nemű szaktudás vagy mélyebb ismeret nélkül bármilyen is legyen az az öndiagnosztizálás – vagy nevezzük inkább találgatásnak –, nem lehet hiteles. A hiteles alatt ez esetben azt értem, hogy nincs alátámasztva semmi konkrétummal az, hogy a tünetek mennyire valóságosak, vagy csak inkább szeretjük beképzelni azokat – jobb híján.

Ez a fajta gondolkodásmód legfőképp az autoimmun betegek körében elterjedt, ahol szinte minden labor és egyéb vizsgálatok eredménye negatív, az orvos pedig nem tudja eldönteni, hogy most egy hipochonderrel áll-e szemben, és valóban nincs különösebb egészségügyi problémája, vagy csak nem tudnak rájönni, hogy hol keressék, vagy, hogy

egyáltalán mit keresnek. Ilyen esetekben az egyik legjobb kiindulási pont a bélrendszer rendellenességeinek vizsgálata, ugyanis számos betegség innen ered.

A jobb érthetőség kedvéért tekintsük példaként a glutén károsító hatásait a szervezetre nézve: nem maga a glutén az, ami káros a szervezetre, hanem az egyik alkotóelemének, a gliadinnak a lebontása során a bélrendszerben keletkező zonulin nevezetű anyag [8]. A zonulin képes a bélrendszer egyetlen sejtrétegnyi vastagságú falait károsítani: a sejteket fehérjék kötik össze, hogy azok alapvetően szorosan illeszkedjenek egymáshoz, és csak akkor lazulnak meg, amikor emésztés után a tápanyag először a vékonybélben keresztül elkezd felszívódni a szervezetben. A glutén emésztése után keletkező zonulin, és más egyéb tényezők – pl.: stressz, nem megfelelő táplálkozás – hatására a bélrendszer szivárgóvá válhat. Ez azt jelenti, hogy ezek a kötések fellazulnak, és már nem csak a lebontott tápanyagból származó molekulák képesek rajtuk áthatolni, hanem a bélrendszer baktériumai is „átférnek” a réseken. Ekkor az immunrendszer el kezd védekezni ezek ellen a keringésbe kikerült baktériumok ellen, elpusztítja azokat. Eddig még nincs is gond; nagyobb baj akkor keletkezik, amikor ezek a baktériumok a molekuláris mimikri tulajdonságuk révén nagymértékben képesek hasonlítani a gazdaszervezet (az emberi test) egyes saját sejtjeire. Ekkor az immunrendszer nem tudja megkülönböztetni, hogy melyik sejtet kell elpusztítani, ezért elpusztítja mind a baktériumot, mind pedig az az által „utánzott” sejteket. Ezzel ki is alakult az autoimmunitás a szervezetben. Nagyon nehéz ezeket a tüneteket felismerni, legfőképp antitestek, vagy egyéb markerek (pl.: LPS – lipopoliszacharid, ADMA – asszimmetrikus dimetilarginin, helyiobacterium pylori) kimutatásával lehet próbálkozni [9]. Mire eljut ide egy-egy autoimmun beteg, addigra évek telhetnek el. A tünetek lappangóak, az életkörülményeket nem rontják jelentősen, de folyamatos gyulladásban tartják a szervezetet, és így az immunrendszer is folyamatos készenléti állapotban van. Egy idő után pedig egyre súlyosabbá válnak, és már a mindennapi életünket is befolyásolja. Nem is beszélve arról, mekkora befolyása van az egészséges mikrobiomnak a hangulatunkra, kedvünkre. Depressziót, levertséget, rossz hangulatot tud okozni a rosszul táplált, nem megfelelő összetételű mikrobiomunk. Nehéz ezt elképzelni, de egy példával rávilágítva máris érthetőbbé válik: a szerotonin (egyfajta boldogsághormon) 90%-át a bélbaktériumaink termelik [10] [11]. Nagyon szoros a kapcsolat az agy és a bélrendszer között: a bolygóidegen (*nervus vaguson*) keresztül kommunikál e két szervünk. Mindezt egy külön terület, a neurogastroenterológia tárgyalja.

Visszatérve az öndiagnosztizálás bizonytalanságához: a projekt célja tágabb értelemben véve nem csupán az, hogy egy élettani paramétereket monitorozó, hordozható orvostechnikai eszköz elkészüljön – kiváltképp a Raynaud-betegségre koncentrálna. A projekt célja az is, hogy segítsen a „modern” betegek szervezetük jelzéseinek minél pontosabb megértésére azáltal, hogy az eszköz által végzett mérések is alátámasztják, számszerűsítik azokat. Gondoljunk csak bele, ha egy Raynaud-szindrómás beteg elmegy egy érvizsgálatra, mivel nem megfelelő a perifériás területein a keringése, mégis a vizsgálat során semmi kimutatható tünet nem látszódik. Ekkor az orvos nagy valószínűséggel nyugodt lelkiismerettel hazaküldi, hogy minden a lehető legnagyobb rendben van, hordjon kesztyűt, ha fázik. Az orvosi oldalt is meg lehet érteni, hiszen a több száz vagy akár ezer betegére egy-egy orvos nem tud annyi időt szánni, hogy mindenkit részletesen kivizsgáljon, megértse minden panaszának eredetét. Ehhez nagyon szoros és folyamatos orvos-beteg kapcsolat lenne szükséges, ami a mai betegszám és orvosi létszám arányait tekintve nem kivitelezhető. Ebben a kérdésben jelenthet segítséget egy olyan, élettani paramétereket folyamatosan monitorozó eszköz, mint ez a kesztyű.

Az projekt tehát útmutatóul szolgál a modern technika hétköznapi egészségügyi alkalmazására, a „hétköznapi diagnosztikai feladatok” megtámogatására azáltal a mennyiségű adat által, amit az eszköz a viselőjéről gyűjteni képes. Ilyen egyénre szabott diagnosztikai jellegű eszközt ma még nehéz lehet elképzelni – talán a jelen dokumentumban tárgyalt szenzorokkal ellátott kesztyű közelebb hozza az „elrugaszkodott” elképzeléseket a valósághoz, és a fent taglalt problémák megoldásában segítséget nyújthat.

## 8. Összefoglalás

A projekt célja olyan gondolatok és megoldási lehetőségek vizsgálata és kipróbálása, amelyek a modernkori egészségügyi szemléletmódot, betegkövetés és betegség prevenciók lehetőségei eddig ki nem használt területeire fókuszálnak. A kialakított eszköz felhasználási köre egészen a specifikustól az általánosig terjed: a Raynaud-szindróma követését, tüneti kezelését lehetővé tevő hordozható, viselhető orvostechnikai eszköz elkészítése maga után vonja annak a lehetőségét, hogy az eszközt szélesebb körben is felhasználjuk.

Összefoglalva tehát az eszköz tulajdonságait és felhasználási lehetőségeit: a kézre helyezett kesztyűben lévő szenzorok által mért élettani paraméterek alapján utólagos adatelemzést vagy valós idejű megfigyelést tesz lehetővé.

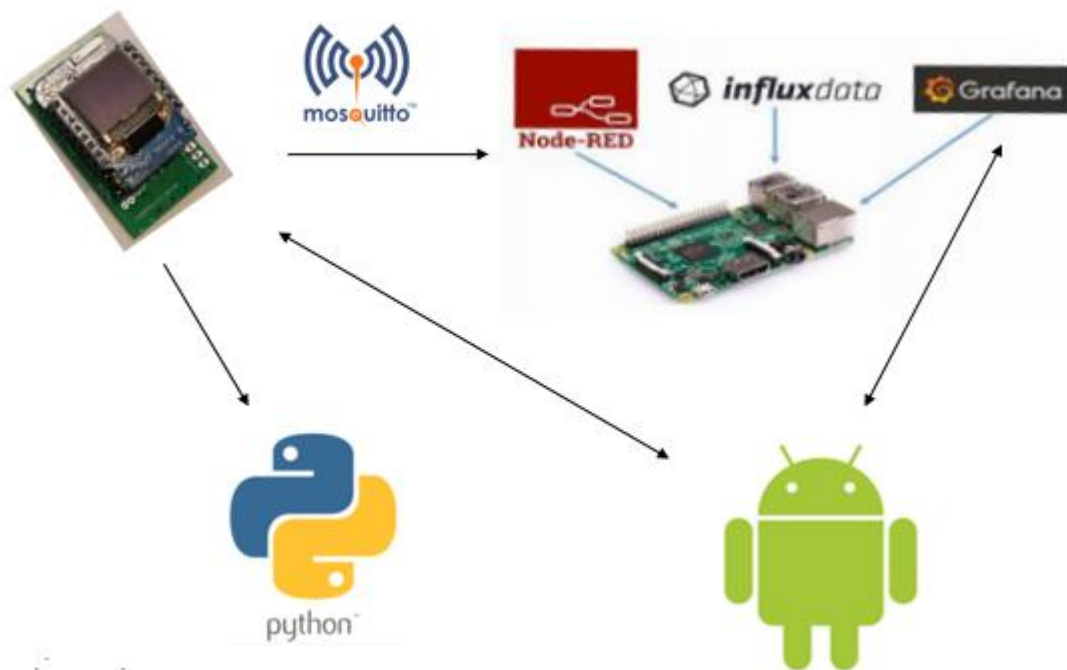
Míg "okos kesztyű" már létezik a világban, konkrétan az általam vázolt betegcsoportokra (autoimmun-folyamatok korai felderítése, Raynaud-betegség, Parkinson-kór, elesés-detektálás, stressz-becslés, scleroderma, stb.) - nincs példa a kutatói hálózatokban. Bár a kardiovaszkuláris vizsgálatokra többen is javasolnak kesztyű-szerű hordozható eszközt [24], és erőmérőket is többen alkalmaznak [25] - az Apple nemrég szabadalmaztatott egy eszközt [26], amiben ezek is szerepelnek. Az általam javasolt és megépített eszköz teljesen egyedi. Egyik korábban javasolt eszköz sem használja együtt az általam alkalmazott szenzorok adatait, és a célzott diagnosztikai terület is teljesen újszerű.

A kesztyű automatikus hőfok-szabályozása megakadályozza a Raynaud-jelenség előfordulását, meggátolva az oxigén-hiányos, perifériás érszűkületes állapot beállását. A fűtésszabályozás manuálisan is történhet, akár okostelefonról is (jelenleg *Android* alapon). Ugyanerről a felületről a valós idejű mérési adatokat is láthatjuk. Gépi tanuló algoritmusok segítségével lehetőség van a mért adatok közötti összefüggések keresésére, ezáltal pontosabb képet kapva akár magáról a Raynaud-betegségről – gyakoriságáról, előfordulási körülményeiről, súlyosságáról –, akár a szervezetünk aktuális állapotáról a pulzus, stressz-szintünk, aktivitásunk huzamosabb ideig tartó megfigyelésével.

Kulcsfontosságú célja az eszköznek mindezen adatok gyűjtése mellett, hogy a mérési körülmények hétköznapi körülmények során történjenek. Elesés-detektáló funkciója hasznos lehet akár az idősebb korosztály számára, akiknél egy-egy baleset előfordulása, vagy a segítség nem megfelelő időben érkezése komoly gondot jelenthet. Emellett azáltal, hogy az eszköz a mindennapi körülmények között képes méréseket végezni, és az adatokat továbbítani, a folyamatos monitorozás és betegkövetés megvalósítható általa. Stressz-becslő funkciója hétköznapi körülmények között használható, ezáltal a fehéreköpenyes

szindróma kiküszöbölhető, a beteg általános stressz állapotáról kaphatunk információt. Mindezt az ujjak finomremegésének monitorozásával egybekötve, a Parkinson-kór egyik tünetét vizsgálhatjuk.

A célkitűzések megvalósításához elkészült hardver tehát egy kesztyűbe varrt szenzorrendszer: pulzoximéter, gyorsulásérzékelő, bőrimpedancia mérő, hőmérsékletszenzor. A mikroprocesszoros rendszerrel való összeköttetés és a fűtés szabályozás érdekében ezek egy NYÁK-ra kerültek, és a szenzorokkal I2C-s interfészen kommunikálnak. A jelfeldolgozás már a mikroprocesszoron megtörténik: a nyers jelen szűréseket végzek, és ezekből számolom az adott paramétereket, mint például a pulzus, véroxigén-szint, aktivitás, stressz-szint, stb. Mindezek egy adatbázisban is tárolásra kerülnek, majd az egységes és átlátható megjelenítés érdekében grafikus felületen is vizsgálhatjuk a paramétereket. Az összefüggések megtalálását gépi tanuló algoritmussal támogatom. Az algoritmus annál pontosabb eredményeket szolgáltat, minél több adattal tanítom. Az eredményekben látható, hogy az elmozdulásból vagy a környezeti hatásokból, körülményekből adódó zajok meghamisíthatják a méréseket. Ezeket az adatokat kellő körültekintéssel kell vizsgálni. A jelfeldolgozó algoritmusok ezeken a hibákon hivatottak javítani, a lehető leghitelesebb kiértékelést lehetővé téve. A megvalósított rendszer kommunikációját foglalja össze a 37. ábra.



37. ábra Az elkészült rendszer kommunikációs kapcsolatai – a nyilak iránya a kommunikáció irányát jelölik

A szenzoradatok ellenőrzése érdekében mind a stressz-szint becslővel, mind a gyorsulásérzékelővel kontrollvizsgálatra érkező Parkinson-kóros betegeken végeztem méréseket a Semmelweis Egyetem neurológiai osztályán. A pulzoximéter által szolgáltatott adat egy orvosi gyakorlatban is használt pulzoximéterrel lett ellenőrizve. Az eredményekből látható, hogy az eszköz kezdetleges fázisban lett tesztelve, mind hardverben, mind pedig szoftverben pontosításra szorul. A pontosabb eredmények elérése érdekében rengeteg mérést kell végezni különböző állapotú betegeken, a lehető legkülönbözőbb körülmények között.

Akkor fogunk hiteles képet kapni az említett betegségek gyakoriságáról, súlyosságáról, ha minél szélesebb spektrumban vizsgálódunk és minél több adatból tanulhat az algoritmus. Erre már az itt bemutatott, működő prototípus segítségével is lehetőség nyílik. Emellett a modernkori szemléletű betegkövetés egyik lehetséges megvalósítását már ebben a fázisban is reprezentálja a projekt.

A fentebb említett célkitűzés - egy modern szemléletmódú betegkövetésez elkészített orvostechikai eszköz és a hozzá tartozó platform – alapjait a projekt által sikerült lefektetni, erre lehet építkezni a jövőbeni továbbfejlesztés során. A kiindulási problémát pedig – a Raynaud-jelenség tüneti kezelését a beteg aktuális állapota alapján – akár jelenlegi állapotában is tökéletesen megoldja az eszköz.

### ***Köszönetnyilvánítás***

A dolgozatban foglaltak több féléven keresztül tartó munkám eredményei, melynek gyökerei a villamosmérnöki alapképzés önálló laboratórium témámhoz nyúlik vissza. Ezúton szeretném megköszönni elsősorban konzulenseim, Dr. Varga Pál és Sárközy Péter segítségét a projekt elkészítésében, valamint Mészáros Tamás segítségét a kezdeti lépések megtételében. Köszönetet szeretnék mondani Antal Péternek is, aki ötleteivel hozzájárult a projekt felhasználási területének bővítéséhez.

Az orvosi jellegű mérések lebonyolításához segítséget kaptam Dr. Szatmári Szabolcstól és Dr. Pintér Alexandrától a Semmelweis Egyetem Neurológiai Osztályáról. Szintén orvosi területen, Dr. Kozsurek Márk meglátásai segítették a projekt előmenetelét. A SOTE Bőrklínikai Osztályán lehetőségem volt több Raynaud-szindrómás pácienssel beszélni, ötleteket meríteni, ezáltal a betegség sokszínűségét könnyebben megérthettem. Ezért a lehetőségért hálás vagyok Dr. Bozsányi Szabolcsnak és Dr. Hídvégi Bernadettnek.

Nem utolsó sorban pedig köszönetet szeretnék mondani orvostan-hallgató, vagy már végzett orvos ismerőseimnek a szakmai kérdésekben való segítségnyújtásért és információkért.



## Irodalomjegyzék

- [1] John P Cookea and Janice M Marshallb. *Mechanisms of Raynaud's disease*. *Vascular Medicine* 2005; 10: 293–307.  
<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1191/1358863x05vm639ra>
- [2] Robert R. Freedman and Peter Ianni. *Role of cold and emotional stress in Raynaud's disease and scleroderma*. *British Medical Journal*, Vol. 287, 19 November 1983.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1549944/pdf/bmjcred00581-0013.pdf>
- [3] Sanjay Rajagopalan, Dana Pfenninger, Christine Kehrer, Anjan Chakrabarti, Emily Somers, Robert Pavlic, Debabrata Mukherjee, Robert Brook, Louis G. D'Alecy, and Mariana J. Kaplan. *Increased Asymmetric Dimethylarginine and Endothelin 1 Levels in Secondary Raynaud's Phenomenon*. *Arthritis Rheum.* 2003 Jul; 48(7), pp. 1992-2000  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/art.11060>
- [4] Toldy Anna: *A természetes antioxidánsok és a fizikai aktivitás szerepe az oxidatív stresszre a neurodegeneratív elváltozásokban*. Semmelweis Egyetem Doktori Iskola, 2006  
[https://tf.hu/wp-content/uploads/2009/07/ta\\_dis.pdf](https://tf.hu/wp-content/uploads/2009/07/ta_dis.pdf)
- [5] Kollárné Ogonovszky Helga: *Túledzés és oxidatív stressz*. Semmelweis Egyetem Doktori Iskola, 2005  
[https://tf.hu/wp-content/uploads/2009/07/oh\\_dis.pdf](https://tf.hu/wp-content/uploads/2009/07/oh_dis.pdf)
- [6] Antonio Gasbarrini, Irene Massari, Michele Serricchio, Paolo Tondi, Annetta de Luca, Francesco Franceschi, Veronica Ojetti, Antonio dal Lago, Roberto Flore, Angelo SantoLiquido, Giovanni Gasbarrini, and Paolo Pola. *Helicobacter pylori Eradication Ameliorates Primary Raynaud's Phenomenon*. *Digestive Diseases and Sciences*, August 1998, Vol 43, Issue 8, pp. 1641-1645  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1018842527111.pdf>
- [7] *Rejtett Markov modellek – BME-MIT jegyzet*  
[https://www.mit.bme.hu/oktatas/targyak/BIR\\_RejtettMarkov\\_Utmutato](https://www.mit.bme.hu/oktatas/targyak/BIR_RejtettMarkov_Utmutato)
- [8] *Python package: Pomegranate documentation*  
[https://github.com/jmschrei/pomegranate/blob/master/tutorials/B\\_Model\\_Tutorial\\_3\\_Hidden\\_Markov\\_Models.ipynb](https://github.com/jmschrei/pomegranate/blob/master/tutorials/B_Model_Tutorial_3_Hidden_Markov_Models.ipynb)
- [9] Alessio Fasano: *Zonulin, regulation of tight junctions, and autoimmune diseases*. *Ann N Y Acad Sci.* 2012 Jul; 1258(1). pp. 25–33.  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3384703/>
- [10] David Perlmutter – *Agyépítő (Brain Makers)*. 2015  
<https://www.amazon.com/Brain-Maker-Power-Microbes-Protect-ebook/dp/B00PW636FS/>
- [11] David Perlmutter – *Gabonaagy (Grain Brain)*. 2014  
<https://www.amazon.com/Grain-Brain-Surprising-Brains-Killers-ebook/dp/B00H4EPCGW/>

- [12] Giulia Enders – *Bélügyek (Gut)*. 2015  
<https://www.amazon.com/Gut-inside-story-bodys-under-rated-ebook/dp/B00VGJMAHA/>
- [13] Maxim Integrated – *MAX30100 modul adatlap*  
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30100.pdf>
- [14] *BMP180 és ADXL345*  
<https://forum.arduino.cc/index.php?topic=431805.0>
- [15] *Wemos D1 Mini Pro dokumentáció – PlatformIO*  
[https://docs.platformio.org/en/latest/boards/espressif8266/d1\\_mini\\_pro.html](https://docs.platformio.org/en/latest/boards/espressif8266/d1_mini_pro.html)
- [16] *Node-RED, InfluxDb, Grafana – bemutató*  
<https://www.youtube.com/watch?v=JdV4x925au0&t=517s>
- [17] Raivis Strogonovs: *Implementing pulseoximeter using MAX30100*  
<https://morf.lv/implementing-pulse-oximeter-using-max30100>
- [18] *Wemos D1 Mini Pro és a hozzá tartozó kiegészítők*  
<http://www.wireless-bolt.hu/kereses/d1+mini+pro>
- [19] *Leírás az MQTT protokoll használatáról – hivatalos honlap*  
<http://mqtt.org/>
- [20] *Node-RED, InfluxDB, Grafana telepítése Raspberry PI-re*  
<https://tech.scargill.net/the-script/>
- [21] Tim Noakes: *Lore of Running*. 2002  
<https://www.amazon.com/Lore-Running-4th-Timothy-Noakes/dp/0873229592>
- [22] Ben Greenfield: *Beyond training*. 2014  
<https://www.amazon.com/Beyond-Training-Mastering-Endurance-Health-ebook/dp/B00JOR771A/>
- [23] Thuróczy Bertalan - *Okos kesztyű projekt*  
[https://www.youtube.com/watch?v=leVOYX6hLAQ&list=PL9JSDbZGQYv6kG\\_y1sQuvo\\_3msbonUTfj&index=2&fbclid=IwAR3y1gVqPhXCnZKJ3wBcOCMonjKxTwOsl5ctQn916WWDLmJ5SZhOxhO-Xul](https://www.youtube.com/watch?v=leVOYX6hLAQ&list=PL9JSDbZGQYv6kG_y1sQuvo_3msbonUTfj&index=2&fbclid=IwAR3y1gVqPhXCnZKJ3wBcOCMonjKxTwOsl5ctQn916WWDLmJ5SZhOxhO-Xul)
- [24] *Wearable Technologies: Heart Up Smart Glove: Track Your Cardiovascular Fitness During Workouts*. 2018  
<https://www.wearable-technologies.com/2018/08/heart-up-smart-glove-track-your-cardiovascular-fitness-during-workouts/?fbclid=IwAR1YPAsy-R-uciofesqvQ6rrq26Vx27MbThBcP2aGK4jWzZHenu69mtITDU>

[25] Leire Francés, Paz Morer, Maria Isabel Rodriguez and Aitor Cazón. Design and Development of a Low-Cost Wearable Glove to Track Forces Exerted by Workers in Car Assembly Lines. MDPI Sensors, (19)2. January 2019

[26] Patently Apple: Apple Wins Patent for Smart-Fabrics based Health Glove, 8 October, 2019