



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Dudás Dávid Bence

**FROCE-SENSING RESISTOR  
TECHNOLÓGIÁRA ÉPÜLŐ  
ERŐMÉRŐRENDSZER  
FEJLESZTÉSE**

KONZULENS

**Dr. Sujbert László**

BUDAPEST, 2019



## DIPLOMATERVEZÉSI FELADAT

**Dudás Bence (TQCI53)**

szigorló villamosmérnök hallgató részére

# Force-sensing resistor technológiára épülő erőmérőrendszer fejlesztése

Mechanikai rendszerekben gyakran nincs lehetőség a szerkezet olyan mértékű megváltoztatására, amelyet egy hagyományos szenzor elhelyezése jelentene. A BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszéken rendelkezésre álló piezoelektromos szenzorok és a hozzájuk tartozó áramkörök nagy pontosságú mérést tesznek lehetővé, de csak váltakozó erőhatás (pl. rezgés esetén fellépő erők) mérésére alkalmasak.

Az ún. force-sensing resistor technológia alapja egy vezető tulajdonságokkal rendelkező polimer, amely ellenállását a ráható nyomóerő függvényében változtatja. Méreteit tekintve az ismert nyúlásmérő bélyegekkel mutat hasonlóságot, de erőmérésre való alkalmazásához nincs szükség arra, hogy mechanikai szerkezetre szereljük, ezáltal mérete, különösen vastagsága igen kicsi, néhány tized milliméter lehet. Az eddigiekben elsősorban nyomóerő detektálására alkalmazták ezeket az ellenállásokat, az ellenállás-változás ugyanis az erőhatás nemlineáris függvénye, és a reprodukálhatóság sem magas szintű.

A diplomatervezés célja kisméretű, illetve kifejezetten vékony szenzorral rendelkező, konstans erőhatás mérésére is alkalmas rendszer kifejlesztése. A fejlesztés során figyelemmel kell lenni a linearitás, a hőmérsékletfüggés és a reprodukálhatóság javítására. A rendszert fel kell készíteni erő—idő függvény számítógéppel való rögzítésére.

A hallgató feladata részletesen a következő

- Ismertesse a force-sensing resistor technológiát, különös tekintettel a mérés technikai felhasználásra!
- Készítse el a mérőrendszer rendszertervét, figyelembe véve a linearitási hiba és a hőmérsékletfüggés csökkentésére, illetve a reprodukálhatóság növelésére vonatkozó feltételeket!
- Építse meg a mérőrendszert, működésének helyességét mérésekkel igazolja!

**Tanszéki konzulens:** Dr. Sujbert László, docens

Budapest, 2018. október 7.

.....  
Dr. Dabóczy Tamás  
tanszékvezető  
habilitált egyetemi docens

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló</b> .....	<b>6</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Bevezetés</b> .....	<b>8</b>
1.1 Fizikai alapok áttekintése.....	8
1.1.1 Erő és erőhatások .....	8
1.1.2 Tömeg .....	8
1.2 Mérlegek .....	8
1.2.1 Nyúlásmérő bélyeg .....	9
1.2.2 Nyomásérzékeny ellenállás.....	10
<b>2 Feladat részletezése</b> .....	<b>13</b>
2.1 Mérés kivitelezése.....	13
2.1.1 Ellenállásmérés .....	13
2.1.2 Feszültségmérés .....	14
<b>3 Tervezés</b> .....	<b>15</b>
3.1 Használt eszközök.....	15
3.1.1 Nyomásérzékeny szenzorok .....	15
3.1.2 Arduino Mega2560 .....	16
3.1.3 Pro Micro .....	16
3.1.4 Óraüveg- és hátlap behelyező prés .....	17
3.1.5 Salter konyhai mérleg .....	18
3.1.6 További eszközök .....	19
3.1.7 Mérési elrendezés .....	19
3.2 Mérési eredmények feldolgozása.....	20
3.2.1 Arduino felprogramozása .....	20
3.2.2 Mérési eredmények ábrázolása.....	21
3.3 Kivitelezési akadályok.....	22
3.3.1 Analog to Digital Converter (ADC) hibája.....	22
3.3.2 Kalibrációs súlyok és felületi hibák.....	23
3.3.3 Külső ellenállás pontatlansága.....	25
3.3.4 Nem lineáris karakterisztika .....	25
3.3.5 Hőmérsékletfüggés .....	27

<b>4 Feszültség tömegnek való megfeleltetése .....</b>	<b>29</b>
4.1 Kalibráció.....	29
4.1.1 Kis súlyok .....	29
4.1.2 Nagy súlyok .....	31
4.2 Mérési tapasztalatok .....	32
4.3 Konklúzió.....	33
<b>5 Eszköz kivitelezés .....</b>	<b>35</b>
5.1 Nyáktervezés Altiummal .....	35
5.2 Nyomtatott áramkör készítése .....	36
<b>6 Irodalomjegyzék.....</b>	<b>37</b>

# HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

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

Kelt: Budapest, 2019. 12. 22.

.....  
Dudás Dávid Bence

# Összefoglaló

A diplomamunkámban arra a felmerülő problémára próbálok megoldást nyújtani, hogy hogyan lehet súlyt mérni olyan szűk helyen, ahol a közismert mérési eljárások nem alkalmazhatóak. Dolgozatomban jellemzést adok a tömegmérési módszerekről, azok fizikai alapjairól. Szemléltetem a tömegmérési eszközök (mérlegek), kiváltképpen a nyúlásmérő bélyeg és a méréseimhez használt force-sensing resistor (nyomásérzékeny ellenállás), röviden FSR működési elvét. Részletesen bemutatom a megvizsgált ellenállás típusok felépítését, villamos viselkedését és a köztük lévő különbségeket.

A tömegmérés megvalósítására egy az FSR-el sorba kötött ellenálláson mért feszültséget feleltettem meg a tömeg dimenziójának. A számításokat és a tápfeszültség ellátást egy Arduinoval oldottam meg. Az Arduinon található Atmel processzor képes az analóg feszültségeket 10-bites digitális jellé (ADC) alakítani, ezt az átalakítást használtam a feszültség meghatározására. A méréseim során törekedtem arra, hogy a szenzor a lehető legpontosabban adja vissza a ráhelyezett tömeg értékét. Különböző ismert súlyok felhelyezésével párosítottam a mért feszültséget és súlyokat. A párosítás során kapott koordinátákat felhasználva egy ötödfokú polinomiális függvényillesztést végeztem. A függvényillesztéssel kapott függvényem a nyomásérzékeny ellenállásra jellemző nemlineáris karakterisztikát jól közelíti. Az FSR-re jellemző ellenállás csökkenés, nagyjából a 2 kilogrammos határig (több száz  $k\Omega$ ) számottevő, utána pedig közel elhanyagolható (pár száz  $\Omega$ ). Ennek okán a nagyobb 2 kilogrammot meghaladó súlyok esetében nem a függvényillesztéssel megkapott függvényemet, hanem már csak egy lineáris közelítést használtam. A felmerülő mérési pontatlanságokról, (mint például hőmérsékletfüggés vagy tápfeszültség esés) és azok korrigálásáról is említést teszek. A kapott eredmények alapján jellemzést adok a force-sensing resistor alkalmazásáról, annak előnyeiről és hátrányairól.

A felhasznált elektronikai eszközöket egybefogóan egy saját eszközt készítettem, ami képes a force-sensing resistor érzékelő felületére helyezett súly mennyiségének kijelzésére.

## Abstract

In my Master's thesis I try to solve the problem that arises, how to measure weight in such a narrow place where the well-known measurement methods are not applicable. In my dissertation I describe the methods of mass measurements and their physical basis. I illustrate the operation of the weight measuring instruments (scales), especially the strain gauge and the force sensing resistor (aka FSR), which is used for my measurements. I present in detail of the structure, electrical behavior and the differences between the resistor types what I examined.

For the purpose of mass measurement, the voltage measured on a resistor connected in series with the FSR corresponded to the mass dimension. The calculation and power supply were solved with an Arduino. The Atmel processor on Arduino, is capable of converting analog voltages into a 10-bit digital signal (ADC), which I used to determine the voltage. In my measurements I tried to make the sensor give the most accurate mass returned value. Applying different known weights I paired the measured voltages with the applied value of weights. Using the coordinates which is obtained during the pairing, I made a five-degree polynomial function fit. The function what I obtained by function fitting is approximate well on the nonlinear characteristic of the force sensing resistor. The FSR typical resistance decreasing is considerable up to 2 kg limit (several hundred  $k\Omega$ ), and therefore nearly negligible (few hundred  $\Omega$ ). As a result, for weights which is greater than 2 kilograms, I did not use the function what I get from the curve fitting just only one linear approximation. I also mention the occurrent inaccuracy of the measurement (such as temperature dependence or power supply drop) and their correction. Based on the results obtained, I make a description of the application of the force-sensing resistor, its advantages and disadvantages.

I created my own device from the used electronic devices which is able to display the amount of weight that placed on the force-sensing resistor surface.

# 1 Bevezetés

## 1.1 Fizikai alapok áttekintése

### 1.1.1 Erő és erőhatások

Az erő olyan hatás, ami egy tömeggel rendelkező testet gyorsulásra/állapotváltoztatásra készítet. Az erőnek sok fajtáját ismerjük Coulomb-erő, mágneses erő, súrlódási erő, centrifugális erő, rugó erő stb. Mind közül a legszembetűnőbb erő, a két test között fellépő gravitációs kölcsönhatásból származó gravitációs erő. Gravitációs erő következménye a nehézségi erő, melybe beleszámítjuk a Föld forgásából származó egyéb hatásokat. Amíg egy testre ható nehézségi erő a Föld egy pontján mindig változatlan nagyságú, addig a test súlyát a körülmények befolyásolják. Egy test súlya tehát változó nagyságú, lehet a nehézségi erőnél kisebb, nagyobb, de vele egyenlő nagyságú is. A súly az az erőhatás, amellyel a test az alátámasztását nyomja, vagy a felfüggesztését húzza [1].

### 1.1.2 Tömeg

A tömeg a fizikai testek tulajdonsága, ami a bennük lévő anyagmennyiséget (másképpen a tehetetlenségüket) jellemzi. A súlytól eltérően a tömeg mindig ugyanaz marad, akárhová kerül is a hordozója.

Az emberiség történelmében már az ókorban bevett dolog volt a testek tömegének mérése, melynek fő mozgató rugója a kereskedelemben található. A cserét képző áruk, termékek mennyiségének meghatározására, elengedhetlenné vált a tömeg mérésére alkalmas eszközök megjelenése, a mérlegek [2].

## 1.2 Mérlegek

A hagyományos, mechanikus mérlegek működésének alapelve kétféle lehet: tömeg összehasonlításon alapuló vagy erőmérő. Az előbbi a mérendő tömeget egy vízszintes kétkarú emelő, vagy arra visszavezethető mechanizmus egyik végén elhelyezett serpenyőbe helyezik, az emelő másik végén lévő serpenyőbe pedig annyi ismert tömegű súlyt raknak, amivel a mérleg egyensúlyba kerül, vagyis nem billen egyik oldalra sem. Ha az emelő két karja egyenlő hosszú, a súlyok ismert tömegének összege a mérendő tömeggel egyenlő. Az utóbbi pedig, a súlyerőt méri változatos fizikai hatások

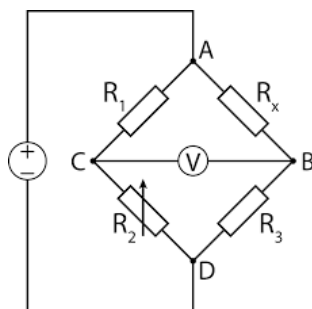


segítségével [2]. Manapság túlnyomórészt elektromos mérlegeket használnak, melyeket további funkciókkal látnak el (személymérleg testösszetétel mérés, bolti mérlegek áru értékének kiírása stb.).

### 1.2.1 Nyúlásmérő bélyeg

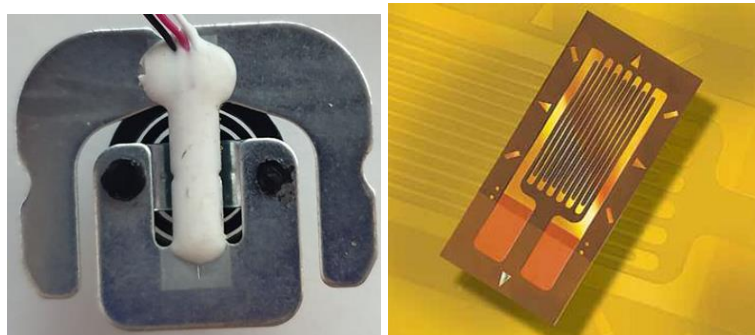
Elektronikus érzékelőkkel többféleképpen lehet súlyt mérni, legelterjedtebb a nyúlásmérő bélyegekkel történő mérés. Itt a teher olyan alkalmasan kialakított rugókra támaszkodik, melyeknek alakváltozását a nyúlásmérő bélyegek mérik. A nyúlásmérő bélyeg fém alkatrészre ragasztható elektromos ellenállás, melynek értéke a megnyúlásával közel arányosan változik. Ezt az ellenállás változást méri a mérleg és megfelelően kalibrálva tömeg dimenzióban jelzi ki [2].

A nyúlásmérő bélyeg működésének alapja, hogy ha egy elektromos vezető (például egy alumínium huzal) rugalmassági határán belül hosszirányban megnyúlik, egyúttal kontrahál is, vagyis csökken a keresztmetszete. Ebből következően az elektromos vezetőképessége is csökken, vagyis nő az ellenállása. Hasonló, de ellentétes irányú változás zajlik le akkor, ha egy vezetőt nyomásnak tesznek ki anélkül, hogy kihajlást szenvedne. Ekkor a vezető hossza megrövidül, keresztmetszete nő, és ennek megfelelően nő a villamos vezetőképessége is. Elektromos ellenállásának méréséből kiszámítható a megnyúlás és a fajlagos nyúlás értéke. A legtöbb nyúlásmérő bélyeg vékony nyúlóképes műanyag fóliára cikk-cakk alakban felvitt vékony fémrétegből áll, melynek alakja olyan, hogy a mérendő irányban nagy legyen a fent leírt ellenállásváltozás, az erre merőleges irányban pedig lehetőleg kicsi. Ha egy ilyen bélyeget fémalkatrészre ragasztanak olyan módon, hogy a nyúlásmérő bélyeg együtt deformálódhasson a mérendő darabbal, akkor az alkatrész terhelésekor a bélyeg ellenállásának változásából a vizsgálandó test helyi, fajlagos nyúlását ki lehet számítani. Ha egyirányú feszültségi állapotban van a test, akkor a Hooke-törvényből a rugalmassági modulus ismeretében közvetlenül számítható a test felületén ébredő helyi feszültség [3]. A nyúlásmérő bélyegeket általában Wheatstone-hídba kötve használják úgynevezett erőmérő celláknál. A bélyegek száma befolyásolja a cella érzékenységét, a mérés pontosságát és az érzékenységét a hőmérséklet változására. A kimenő elektromos jel tipikusan pár mV (millivolt), így a legtöbb esetben erősíteni kell a jelet, vagyis mérőerősítő szükséges a használatához. A kimenő elektromos jel erőre vagy tömegre (ekkor mérlegcellának hívjuk) skálázható [4].



1. ábra Wheatstone-híd

A Wheatstone-híd kapcsolást elsődlegesen nem villamos mennyiségek (nyúlás, hőmérséklet, elmozdulás stb.) mérésére használjuk. Alapja, hogy a kapcsolásban található  $R_x$  ellenállás értékét meghatározhatjuk az  $R_2$  ellenállás értékének a változtatásával. A cél, hogy a híd C és D pontja között ne legyen feszültségkülönbség (ekkor van a híd egyensúlyi állapotban).



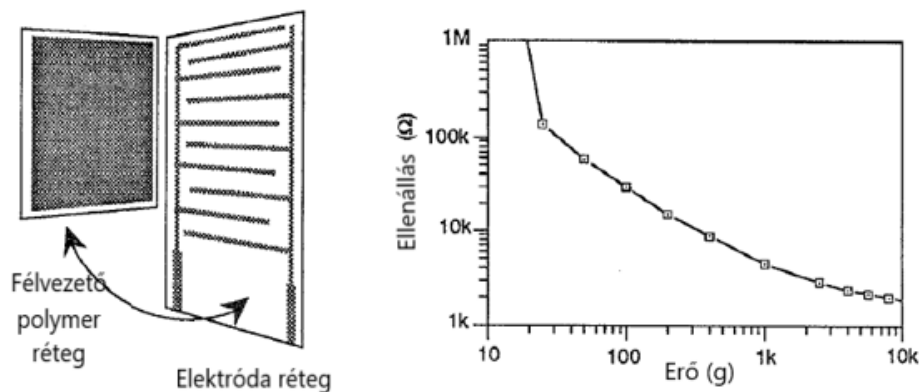
2. ábra Fém lapra ragasztott nyúlásmérő bélyeg és maga nyúlásmérő bélyeg [9]

### 1.2.2 Nyomásérzékeny ellenállás

A tömeg mérésének alternatív módszere, hogy nyomásérzékeny ellenállást (Force-Sensitive Resistort, röviden FSR-t) használjanak. Jellemzően olyan területen használják, ahol egy felület adott pontjára érkező nyomást szeretnénk mérni. (Korábbi tudományos cikkben példa az ilyen típusú felhasználásra, hogy az emberi talpra nehezedő testsúly hogyan oszlik el.)

A nyomásérzékeny ellenállás első felbukkanása a zeneiparban történt. Az elektromos billentyűs hangszereknél az adott billentyű lenyomásával, csak egyetlen hangot adott ki a hangszer. A szenzor segítségével a billentyű lenyomásának erősségét lehet mérni, ezzel lehetővé téve, hogy a billentyűre gyakorolt nyomás nagyságával más hangszínen szólaljon meg a hangszer [7].

A szenzor a működésének alapja, hogy az ellenállás felületére érkező külső nyomás hatására ( $\Omega$ -os) villamos ellenállása megváltozik. Alapvetően a szenzor ellenállása végtelennek adódik, viszont terhelés hatására ez az érték a szenzor specifikációjában megadott érték szerint csökken (ahogy az a lenti ellenállás-erő karakterisztikán is látszik). A szenzorok típusától függően általában 1-10 kg-os terhelés között változik a maximális terhelhetőségi határ. Az FSR belső felépítését tekintve két filmréteg helyezkedik el egymáson, köztük pedig egy, a teret kitöltő réteg található. Az egyik filmrétegen vezetőképes elektróda lenyomat van nyomtatva, míg a másik egy félvezető filmréteg. A két filmréteg a teret kitöltő réteg miatt nem érintkezik egymással, így egy nyílt áramkört valósít meg (szakadásként viselkedik). Ezt az állapotot fenntartja mindaddig, míg a felületére érkező nyomás hatására záródik az áramkör, vagyis a filmrétegek egymáshoz érnek és villamos vezető kapcsolat jön létre. További terhelés hatására a korábban leírt módon csökken a szenzor ellenállása. A polymer filmréteg összenyomhatósága véges. Az ellenállás a maximális terhelés hatására nem csökken tovább, a szenzor telítésbe kerül. A nyomásérzékeny ellenállásokat különböző méretekben és kivitelben gyártják. Felületének nagysága jellemzően  $0,5 \text{ cm}^2$  és  $4800 \text{ cm}^2$  között változik. Előfordul egyedüli szenzorként vagy tömbösével, a felhasználásának megfelelően. Az FSR vastagsága  $0,1$ - $1 \text{ mm}$  közé tehető, ami az erőmérő szenzorok között kiemelkedően jó értéknek számít [6].



3. ábra Az FSR rétegei és ellenállás erő karakterisztika [5]

A nyomásérzékeny ellenállást számos előnye ellenére nem használják kvantitatív és abszolút erőmérésekhez. Ennek főként az az oka, hogy a nyomásérzékeny szenzorok ellenállása mérések megismétlésével más és más értéket mutathat. A gyártók ezért a tesztelt próbasúly mellett igen nagy (akár  $10 \text{ k}\Omega$ -os) határokkal adják meg az ellenállás értékét. Fontos megemlíteni, hogy a szenzor nem csak a mérések megismétlésével

mutathat más értéket, hanem adott mérés alatt is sokat változhat (dirft) ellenállása, ha az állandó terhelésnek van kitéve hosszabb ideig. A gyártók külön felhívják erre a figyelmet. Továbbá az FSR viszonylag lassú eszköz a piezoelektromos átalakítókhöz képest (tipikus mechanikai felfutási ideje 1-2 ms), kevésbé érzékeny a rázkódásra és az akusztikai zajokra. Használata általában szobahőmérsékleten történik, de a képes elviselni akár a 170 °C-os hőséget is. (Vannak típusuk, melyek külön nagy hőmérsékletet is képesek elviselni, ezek akár a 400 °C foknak is ellenállnak.) A hőmérséklet mellett a levegő páratartalma sem befolyásoló tényező az FSR működésének korlátaiban [5]. Mindazonáltal az ellenállásokra jellemző hőmérséklet és páratartalom függést mutatnak. Saját tapasztalataim alapján elmondhatom, hogy a nyomásérzékeny ellenállás mechanikailag igen strapabírónak bizonyult. Több száz mérés során sem tapasztaltam bármilyen deformációt.

## 2 Feladat részletezése

Az ismert és gyakran alkalmazott súlymérési módszerek nem teszik lehetővé azt, hogy bizonyos helyeken tudjunk erőkifejtést mérni (például szűk felületek közt). A nyúlásmérő bélyeg alkalmazásánál szükségünk van egy felületre, amelyre elhelyezve a szenzort annak deformálódását mérhetjük. Jelen problémánk esetében, miszerint a hagyományos nyúlásmérő bélyeggel nem tudunk egy kiterjedt felület egyetlen pontjára összpontosított nyomás nagyságát mérni.

Specifikusan a hegedű testet a húrok a hegedű-hídon keresztül kifejtett ismeretlen nagyságú erővel terhelik. Fontos tényező egy hegedű készítésénél, hogy a test elbírja a ránehezedő nyomást és ne repedjen meg alatta, még akkor sem, ha a vonót a kelleténél jobban rányomják a húrokra. Nem csak tartósságban, hanem a hangzásában is fontos szerepet játszik a hegedű-hídra eső nyomás, mivel az adja át a rezgéseket a testnek, megszólaltatva ezzel a hangszeret. Az alap kiindulás, hogy a nyomásérzékeny ellenállás a nyúlásmérő bélyeghez hasonlóan igen vékony, viszont a mérés során csupán az érzékelő felületét használja és nem szükséges hozzá más, csak megfelelő alátámasztás. Az ellenállás képes az összpontosított nyomás érzékelésére.

### 2.1 Mérés kivitelezése

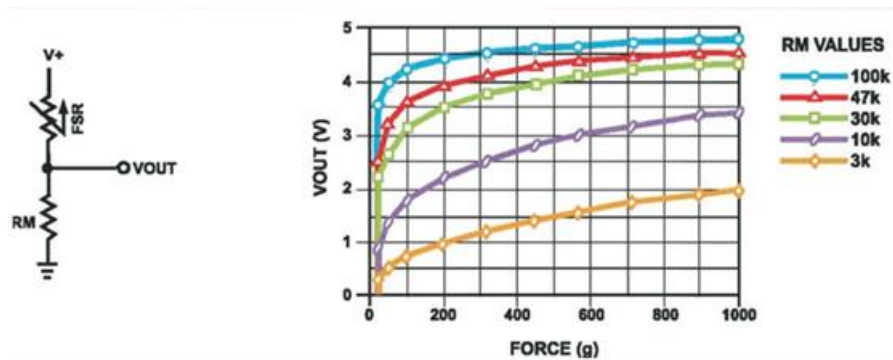
Az FSR működésének elve, mint ahogyan arról már korábban szó volt, nyomás hatására megváltozik az ellenállása (csökken) és ezáltal vezető képessé válik. A mérések kivitelezésénél két lehetőség merült fel, egyik, hogy az FSR ellenállását mérem, a másik, hogy egy, a szenzorral sorba kötött ellenálláson feszültséget mérek.

#### 2.1.1 Ellenállásmérés

Az ellenállás mérését a szenzor két lába között egy impedancia mérővel vagy egy multiméterrel vihetjük végbe. Az ellenállás nagy (akár 100 k $\Omega$ -os nagyságrend) értékek között mozog ugyanazon terhelés mellett. Fontos megjegyezni, hogy az itt alkalmazott ellenállásmérők pontossága is kulcsfontosságú szerepet játszik a mérések hitelességében. Egy hagyományos multiméter pontosságát szemügyre véve a M $\Omega$ -os és k $\Omega$ -os tartományban  $\pm 3,5\%$ -os értéket is elérheti a mérés pontatlansága. Az ellenállás mérésével a szenzor pontatlansága még jobban kiütöközik, mint feszültség mérés esetében, ezért ezt a módszert inkább nem alkalmaztam a méréseimnél.

## 2.1.2 Feszültségmérés

A feszültség méréséhez a szenzort egy ellenállással kötöttem sorba és ezen az ellenálláson mértem a feszültséget. Az így megvalósított kapcsolásban a mérni kívánt feszültséget az  $V_{OUT} = V_{IN} \frac{R_{RM}}{R_{RM} + R_{FSR}}$  képlettel kaphatjuk meg. A képletben lévő változók értelmezéséhez a 4. ábraán lévő kapcsolás nyújt segítséget. A feszültségmérés kisebb határok között mozog, ezért kisebb a zavar nagysága, mint az ellenállás mérésénél. Feszültség értéke függ a sorba kapcsolt ellenállás nagyságától, mint ahogy az látszik az ábrán látható grafikonon.



4. ábra A megvalósított kapcsolás, és a feszültség ellenállás függése [8]

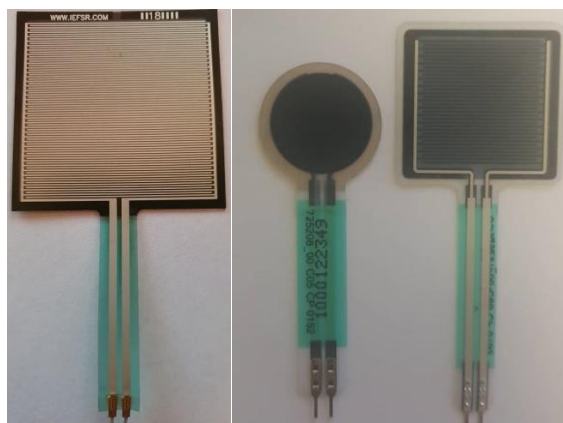
## 3 Tervezés

### 3.1 Használt eszközök

#### 3.1.1 Nyomásérzékeny szenzorok

A mérés során a legfontosabb eszközöm a nyomásérzékeny ellenállás, mint szenzor, mellyel a lényeges mérést végeztem. Többféle szenzort is kipróbáltam, pontosabban az IEE (International Electronics & Engineering) gyártótól a CP0153-ast és CP0152-est, illetve az Interlink electronics FSR406-ost. Az IEE által gyártott szenzorok elektronikai paramétereikben teljesen megegyeznek. Az egyetlen különbség a mechanikai kialakításukban van. A CP0152-es 19 mm átmérőjű kör alakú, a CP0153-as pedig 27 mm oldalhosszúságú négyzet alakú érzékelő felülettel rendelkezik. Az ellenállások felületén 0,2-100 N nagyságú erőt képesek érzékelni. A rájuk nehezedő erő hatására, mint azt már korábban említettem, az ellenállásuk megváltozik. Specifikusan ezen szenzorok esetében az ellenállás értéke a terheletlen 1 M $\Omega$ -tól egészen 2 k $\Omega$ -ig csökkenhet. Az Interlink Electronics FSR406 39,6 mm oldalhosszúsággal rendelkező szintén négyzet alakú szenzor. Villamos paramétereit tekintve a gyártó által kiadott adatlapja szerint 0,2 N-20 N nagyságú erőt képes érzékelni [8].

A méréseim során túlnyomórészt a CP0153-as szenzort használtam. Választásom oka, hogy a CP0153-as felületére könnyebben fel tudtam helyezni a súlyokat, mint a CP0152 esetében és mérési tartománya nagyobb, mint az FSR406-osé.



5. ábra Balról jobbra FSR406 CP0152 és CP0153

### 3.1.2 Arduino Mega2560

A jelek vizsgálatához először egy Arduino Mega2560-at használtam. Az Arduino Mega2560 egy ATmega 2560-as mikroprocesszorral van ellátva. A mikroprocesszor lábai az Arduinon ki vannak vezetve tükörsor aljzatba, hogy könnyedén elérjük a megfelelő be- és kimeneteket. A méréseim során az Arduino 5 V-os (Vcc) feszültséget kiadó lábára kötött aljzatot használtam a kapcsolásom tápjaként. A nyomásérzékeny ellenálláson áthaladó feszültséget visszamértem az Arduino analóg feszültség mérésére alkalmas (A0) bemenetének segítségével. Az mikroprocesszor képes az analóg bemenetein 0-5 V-os tartományban a feszültség szinteket mérni. Az Arduinon továbbá található egy plusz IC (RS-232), ami lehetővé teszi, hogy a mikroprocesszor képes legyen soros kommunikációra USB-n keresztül. Ezáltal képesek vagyunk számítógépen megjeleníteni a processzor által mért feszültség értékeit. A számítógép USB portjánál „COMn” portok között található meg az eszköz, amely így már könnyedén vezérelhető szoftveresen. (Főként az Arduino széleskörű elterjedése miatt is) sok program képes az USB-n küldött digitális és analóg jelek vizuális megjelenítésére.



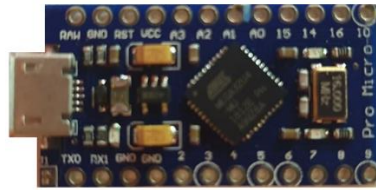
6. ábra Arduino mega 2560

### 3.1.3 Pro Micro

A végső eszköz tervénél a hordozhatóságra és a minimális méretre törekedve lecseréltem az Arduino Mega2560 változatát egy Pro Micronak nevezett boardra. A Pro Micron szintén Atmel gyártmányú, de egy kisebb Atmega32U4-es processzor van, amely funkcióját tekintve ugyanazt a feladatot látja el, mint nagytestvére az ATmega2560. A Pro Micro board hivatalosan nem egy Arduino termék, ezért szükség volt arra hogy, felflasheljem a bootleaderét egy tényleges Arduino terméknek, ami ugyan ezt a processzort használja. A Pro Micro panel processzora és lábainak kivezetés megegyezik



az Arduino Leonardoéval. A flashelést a Megával végzetem, ISP kommunikációs üzemmódban.



7. ábra Pro Micro

### 3.1.4 Óraüveg- és hátlap behelyező prés

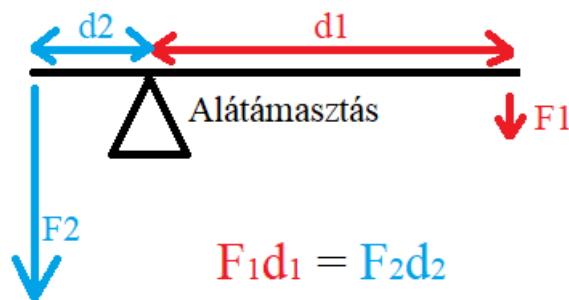
A mérés során feltétlenül szükségem volt, olyan megoldásra, ami egyszerre képes stabil alátámasztást nyújtani és a szenzor felületét is optimális mértékben terhelni. Konzulensem javaslatára kezdtem el használni egy óraüveg- és hátlap behelyező prést. Az alap 12 cm-es kar hosszát további 29 cm-es fém rúddal hosszabbítottam meg. A hosszabbított karra egy csúszkaként működő rögzíthető anyát raktam, amire egy kampót erősítettem.



8. ábra Óraüveg- és hátlap behelyező prés és a szenzor nyomására használt prés szerszámlap

A présgép egy első osztályú (kétkarú) emelőnek felel meg. A kétkarú emelő lényege, hogy az alátámasztási ponttól egyenlő távolságban lévő azonos nagyságú erők egyensúlyban legyenek. A présgép a rögzített oldalon kifejtett erőhatást saját tömegéből „fedez”. Abban az esetben, ha a két oldalon nem egyeznek az erő nagyságok forgató hatás lép fel. Nem mindegy, hogy az erő milyen messze hat a tengelytől. A forgató hatás annál nagyobb, minél nagyobb az erő és minél messzebb hat a tengelytől, vagyis minél nagyobb az erőkar. Az erő hatásvonalának a forgástengelytől mért távolságát erőkarunk nevezzük. Az erő forgató hatásának mértékegysége a forgatónyomaték. Ahhoz, hogy a

prés nagy terhelés esetén se mozduljon ki stabil állapotából (ne hasson rá forgatónyomaték) egy lefogatóval rögzíttem az asztallaphoz.



9. ábra A présgép, mint emelő

Az emelő törvénye kimondja, hogy az erőknek a forgáspontra vonatkozó forgatónyomatéka egyenlő a teher forgatónyomatékával, vagyis  $P \times p = Q \times q$  vagy másképpen megfogalmazva: *teherkar*  $\times$  *tehererő* = *erőkar*  $\times$  *erő* [11].

### 3.1.5 Salter konyhai mérleg

A kalibrációnál egy Salter típusú elektronikus konyhai mérleget használtam. A konyhai mérleg 3 kilogrammos méréshatárig 1 gramm pontossággal képes súlyt mérni. Az FSR pontosságát figyelembe véve a kezdeti ellenállás csökkenés esetén vagyok csak képes gramm pontosságú súlykülönbségeket érzékelni, ezért a konyhamérleg a kisebb súlyok meghatározásában játszott fontos szerepet.

A mérleg négy olyan gumitalpon támaszkodik meg, ami nyúlásmérő bélyeggel ellátott fém lapra van szerelve. Feltételezem, a négy bélyeg a korábban említett Wheatstone mérőhídba van kötve. A mérlegben található áramkör méri a hídon kialakuló feszültségkülönbséget és konvertálja át a tömeg dimenziójába, majd jeleníti meg a mérleg LCD kijelzőjén.



10. ábra Salter konyhai mérleg

### 3.1.6 További eszközök

A tesztfázis során fontos volt, hogy gyorsan és könnyedén tudjam változtatni a kapcsolásom, ezért a breadboardot és a szalagkábeleket használtam a villamos kapcsolat létrehozásában. A későbbiekben a kész eszközönél elhagytam ezeket az eszközöket. A nyomtatott áramköri lemezre való áttéréssel, továbbiakban nem volt rájuk szükség.

A mérések vizualizációjánál fontosnak tartottam, hogy az eredményeket képes legyek bármikor leolvasni számítógép nélkül is. Az eredmények megjelenítésére egy 16-bites LCD kijelzőt használtam.

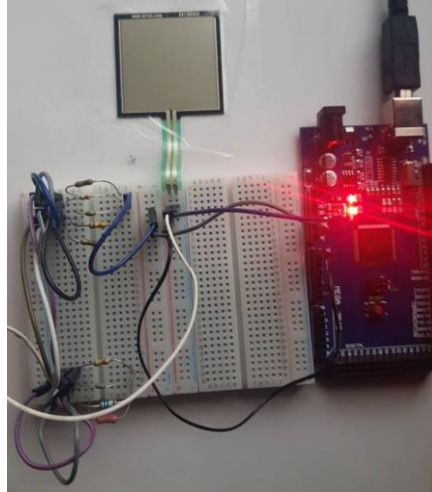
Az eszköz tápfeszültségét egy külső áramforrásból kapja jellemzően ez számítógép, de lehet ez akár egy külső akkumulátor (PowerBank) vagy hálózati adapter (5V-os telefontöltő) is. A lényeg, hogy egy USB kimenettel rendelkező feszültségforrás legyen. Az eszköz működése során már nincs szükség, arra hogy az USB kábelben adat jelek érkezzenek. Az adat jelek csupán a felprogramozás során játszottak fontos szerepet.

### 3.1.7 Mérési elrendezés

A mérés kivitelezése során, fontos, hogy megfelelő legyen a szenzor alátámasztása és a szenzorra nehezedő súly a teljes érzékelő felületet terhelje. Terhelés megfelelő elosztása érdekében célszerű az érzékelő felületre tökéletesen illeszkedő sík alátétet alkalmazni. A mérési feladat céljának megvalósításához szükséges, hogy szűk helyen tudjunk súlyt mérni, ezért a szenzorhoz hasonlóan az alátét se legyen túl vastag. Szilárdságát tekintve fontos, hogy kemény (lehetőleg fém) anyagból legyen, hogy a ráérkező nyomást a teljes felületével egyenletes eloszlásban adja tovább a szenzornak. Optimális esetben az alátét súlya kisebb, mint a szenzor érzékenysége, így akár annak súlyától eltekinthetünk.

Az első méréseim során az FSR-t rögzítettem az asztalhoz, hogy a teljes felületével alá legyen támasztva az érzékelő felület. A rögzítést egyszerűen celluluxal oldottam meg ügyelve, hogy a cellulux az érzékelő felületet ne, csak a külső borítást érje és ezzel ne befolyásolja a mérési értékeket. Később ezt az elvet követve rögzítettem a szenzort a fent említett présgéphez is. Az FSR lábait egy breadboardba vezettem be, amin keresztül összekötöttem az Arduinoval és a sorba kötött ellenállással. Az Arduino által feldolgozott jeleket USB-n keresztül továbbítottam a számítógépre. A mérési elrendezésemen (11. ábraa) látható, hogy több furatszerelt ellenállást helyeztem el a breadboardra, aminek szerepe, hogy különböző ellenállás értékekkel vizsgáltam a kiadott feszültséget. Az összes ellenállást sorba kötöttem az FSR-el és csak az éppen aktuálisan

vizsgált ellenállás másik lábát kötöttem az Arduino föld potenciáljára. Az ellenállás értékek változtatásával a mérési határok változtak. Az ellenállásokkal való kísérletezések folyamán az 1-3 k $\Omega$ -os tartomány bizonyult a legoptimálisabbnak minden FSR típusom számára. A továbbiakban 2 k $\Omega$ -os ellenállást használtam.



11. ábra Mérési elrendezés

## 3.2 Mérési eredmények feldolgozása

### 3.2.1 Arduino felprogramozása

Az Arduino felprogramozásához a saját fejlesztő környezetét használtam. Ez egy olyan program, ami leegyszerűsíti az Arduinon található mikroprocesszor programozását. A program a C nyelvhez hasonló, de némileg egyszerűsített programozási nyelvet használ. Az Arduino programok két kötelező fő függvényhívással rendelkeznek. A setup esetében a programrészlet csak egyszer, induláskor fut le. Ekkor állítja be az alap beállításait a processzornak. Itt történik meg például a soros kommunikációhoz szükséges baudrate kiválasztása vagy a csatlakoztatott eszközök inicializálása. A loop függvény már nem csak egyszer, hanem folyamatosan újra és újra lefutó kódot tartalmaz.

The screenshot shows the Arduino IDE interface. The main window displays the source code for the 'AnalogOutSerial' program. The code includes constants for pins, variables for sensor and output values, and functions for setup and loop. The loop function reads an analog value, maps it to a range of 0-255, and writes it to an analog output pin. The Serial Monitor window is open, showing a stream of output data in the format 'sensor = [value] output = [value]'. The data shows a sequence of sensor and output values ranging from 599 to 614. The status bar at the bottom indicates the board is 'ArduinoGenuno Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) ezen: COM4'.

12. ábra Arduino program

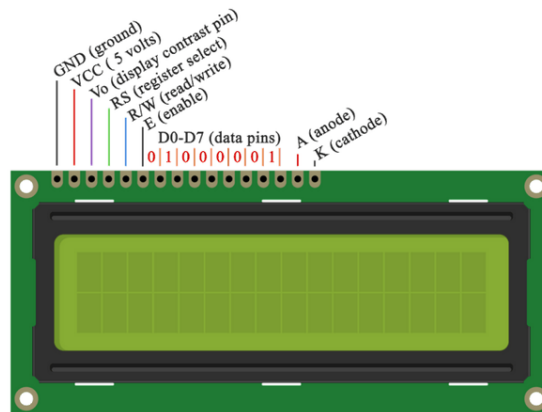
A méréseimnél használt programom alapja, hogy az analóg lábón beolvasott értéket egy 10 bites számra (0-1023) konvertálja az Arduino és ezt a számot továbbítja soros porton a számítógépre. A programon belül lehetőség van megnyitni a soros monitort, ahol látni milyen jeleket olvasunk be a portról.

### 3.2.2 Mérési eredmények ábrázolása

Az első méréseim alkalmával a szenzor változásait észlelő processzor adatait soros portról számítógépen nyertem ki. Az Arduino program képes adatokat fogadni és küldeni a porton keresztül a párosított eszköznek. A számítógéppel való megjelenítés előnye, hogy minden értéket ki tudok nyerni a processzorból, ami méréseim során fontos lehet. Lehetőség van az eredmények megjelenítésére többféle módon, például grafikusan vagy csak számbelileg. A számítógépes mérési eredmények ábrázolásának egyetlen hátránya (ha csak ezt az egy módszert alkalmaznám), hogy önmagában az eszköz nem képes megjeleníteni az adatokat. A mérések során fontosnak tartottam, hogy az eredményeket képesek legyenek bármikor leolvasni számítógép nélkül is.

A gép nélküli adatjelzés végrehajtására egy 2x16-bites LCD kijelzőt használtam, ami folyamatosan mutatja az ellenálláson mért feszültség értékéből számított súlyt. Az LCD kijelző használatához mind a bekötést, mind pedig a programozást tekintve egyszerű dolgom volt. A kijelző foglalja le a legtöbb pinct a Pro Micron, szám szerint hatot. Összesen 16 lábbal rendelkezik, ebből 8 adatjel, 8 pedig működés vezérlő. Az adatlábak közül csak a felső négy bitre van szükség, ennyivel is képes tökéletesen megjeleníteni a

karaktereket. A kontraszt beállításához egy 1 k $\Omega$ -os ellenállást használtam. A programozást illetően az Arduinoban van külön az LCD kijelző kezelésére készített könyvtár. A könyvtár használatával csupán annyi volt a dolgom, hogy a meghatároztam azokat a lábakat, amiket közvetlen digitális kimentekre kötöttem. Karakterek megjelenítéshez pedig a soros kommunikációhoz hasonlóan, print függvényeket használtam.



13. ábra LCD lábkiosztás [12]

## 3.3 Kivitelezési akadályok

### 3.3.1 Analog to Digital Converter (ADC) hibája

Az analóg jel 10 bites digitálissá való átalakítását a processzor egy 12 csatornás multiplexeren keresztül végzi. A feszültséget lineárisan konvertálja át  $2^{10}$  lépésekkel. A legalacsonyabb 0 digitális jel a GND, míg a legmagasabb 1023-as (LSB-1) feszültséget képviseli, vagyis az 5 voltos Vcc-t. Az ADC ideális működésétől való eltérést számos hibafaktor befolyásolja, például offset hiba, erősítési hiba, nemlineáris integrálási hiba és differenciális nemlineáris hiba.

A digitális áramkört kívülről és belülről érkező elektromágneses impulzusok is befolyásolhatják az analóg mérésekben. A gyártó, a kritikus átalakítási pontosság érdekében a következő zajcsökkentési technikákat javasolja [13]:

- Az analóg jelutak a lehető legrövidebbek legyenek és ügyeljünk rá, hogy nagy kiterjedésű föld potenciálon keresztül haladjon át.
- Tartsunk kellő távolságot nagyfrekvenciás digitális jelektől.

- Használjuk az ADC zajcsökkentő funkcióit.
- Kerüljük az ADC portjainak digitális kimenetként való felhasználását.

### 3.3.1.1 $V_{cc}$ feszültségese

Az összes használt elektronikai eszközöm a processzor  $V_{cc}$  kimenetét használja tápforrásként. A túlzott tápforrásként való kihasználtságból és a processzor kimenetén jelentkező feszültségingadozásból eredően a kimeneti egyenfeszültség értéke nem éri el az 5 voltot. A tápfeszültséget multiméterrel megmérve, 4,61 voltos értéket kaptam. Ez a feszültség csökkenés az eszközeim meghajtására még elegendő, de az analóg méréseknél hibát okoz, mivel a processzor így nem képes a maximális mérési tartomány kihasználására. A feszültség stabilizálására megoldást jelenthet egy DC/DC converter, ami a 4,5 – 5,5 voltos bemeneti feszültségtartományt 5 voltos kimenetű alakítja. Ezt a megoldást elvettem, mert a converteren szintén felléphet feszültségingadozás (nem mellesleg viszonylag egy drága alkatrészről van szó). A másik megoldás, hogy szoftveresen hozzáigazítom a mért értékeket a tápfeszültség eltéréséhez. Ehhez szükségem volt a processzor belső referenciájára, ami az ATmega 32U4-es processzornál 2,56 volt. A referencia feszültség a megfelelő regiszter értékek beállításával válik elérhetővé. A processzor analógjel beolvasásakor a következő képlettel könnyedén kiszámíthatjuk a tápforrásként szolgáló  $V_{cc}$  feszültségértékét.

$$V_{cc} : V_{ref} = 1024 : ADCérték \Rightarrow V_{cc} = \frac{V_{ref} * 1024}{ADCérték}$$

### 3.3.2 Kalibrációs súlyok és felületi hibák

A kalibrálás során feltétlen fontos, hogy olyan súlyokkal dolgozzunk, aminek pontosan tudjuk a súlyát. A tanszéken található precíziós súlyokkal is próbálkoztam, ami nem volt sikeres. A súlyok alja csak a peremen érintkezik a felülettel, ennek előnye, hogy kisebb az esélye, hogy szennyeződések tapadjanak meg rajta, ami zavarhatja a súly pontosságát. A homorú talpazat okán és a szenzor méretei miatt a kalibrációs súlyok közvetlenül nem használhatóak a méréseimnél.



**14. ábra Kalibrációs súlyok [10]**

Abban az esetben, ha a felhelyezett nyomás csak részlegesen fedi az érzékelő ellenállást kellően nagy érték esetén helyi telítésbe léphet a felület. A felület terheletlen pontjainál az ellenállásrétegek nem érintkeznek, és ez által kihasználatlanul maradnak ezek a területek a mérés szempontjából. A terhelt felület telítésbe lépésekor elérte az ellenállás értékének alsó határát, tovább nem képes csökkenni. A méréseim során alátét használatával törekedtem az egész felület terhelésére, így a szenzor közel teljes mérési tartományát kihasználtam. Az alátét felhelyezésnél fontos, hogy a szenzor szélső fekete körvonalát ne érintse. A körvonal érintésével olyan felületet is terhelünk, ami nem szenved ellenállás csökkenést, ennek következtében pontatlan feszültséget kapunk. Célszerű a szenzort rögzíteni a sík alátámasztásra. A rögzítést ragasztással próbáltam meg megoldani. A ragasztással az a probléma adódott, mind felülről (az ellenállás körvonalára celluxszal), mind pedig alulról (szenzor felület és alátámasztás közé kétoldalú ragasztóval), hogy az érzékelés pontosságát rontja. A felülről való rögzítésnél a körvonal mentén leszorított szenzor állandó terhelést érzékel, még akkor is, ha gondosan elkerüljük az ellenállás rétegeket. Az alulról való rögzítésnél pedig az alátámasztás lesz nem megfelelő, ennek eredménye képpen a felületterhelés kiegyensúlyozatlan.

Célszerű lenne egy az FSR méreteihez igazított befogót készíteni, amibe, ha behelyezzük, meggátolja minden irányú elmozdulását. Ezzel a kivitelezéssel biztosítanám, hogy a szenzor felülete, mindig minden mérésben ugyan azon a ponton egyenlő nagyságban legyen terhelve, nagyban növelve ezzel a mérés reprodukálhatóságát.

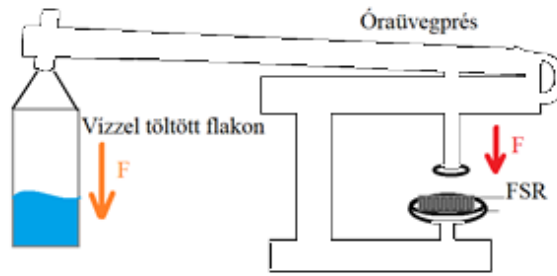


### 3.3.3 Külső ellenállás pontatlansága

A force-sensing resistorral sorba kötött ellenállást a korábbi kísérletezéseim során 2 k $\Omega$ -osnak választottam meg. A használt ellenállás 1 %-os toleranciával rendelkezik, ami 10000 ppm-nek felel meg. Ez az érték igen jónak számít, viszont nem tartozik a precíziós ellenállások közé. Az ellenállások köztudottan hőmérsékletfüggők. Jelen esetben az ellenállásom tűrése 1°C-onként 100 ppm-el változik. Az ellenállásra vonatkozóan a mérés pontosságát egy precíziós ellenállással lehetett volna növelni, viszont ilyen ellenállás nem állt rendelkezésemre. A precíziós ellenállások toleranciája  $\pm 0,01$  %-os (100 ppm). A precíziós ellenállások jobb viselkedést mutatnak a hőmérséklet és páratartalom függésre is.

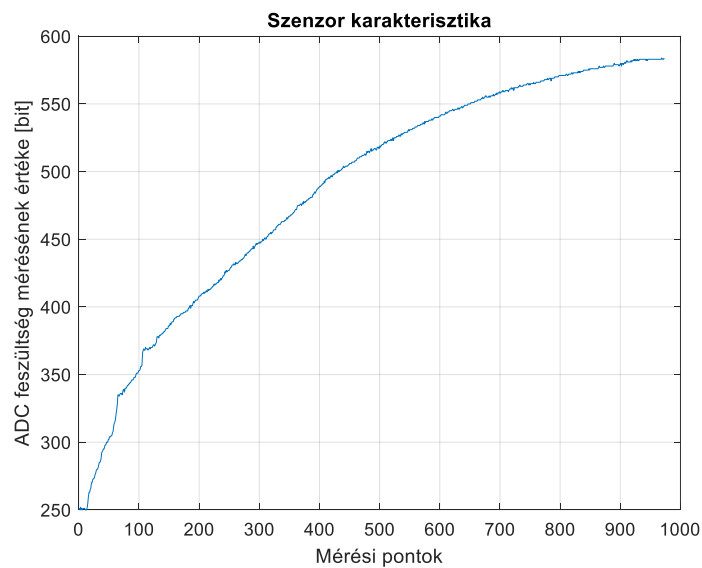
### 3.3.4 Nem lineáris karakterisztika

Az FSR érzékelő felületére helyezett nyomás növelésével az ellenállás nem lineáris módon csökken. A csökkenés következtében a sorba kötött ellenállásra eső feszültség hasonlóan nemlineáris módon nő. A feszültségnövekedés karakterisztikájának feltérképezéséhez az óraüvegprést használtam, aminek erőkarját meghosszabbítottam. A meghosszabbított kar végére egy rögzíthető anyát raktam, amibe egy kampót erősítettem. Az így összeszerelt akasztómra egy flakont függesztettem. A flakont lassú egyenletes tempóban feltöltöttem vízzel. A víz mennyiségével nőtt az erőkaron át kifejtett nyomás nagysága a szenzoron. A felfüggesztett flakon 4 liter űrtartalmú, így közel a szenzor maximális terhelhetőségéig képes voltam vizsgálni az értékeimet. A karakterisztika feltérképezése során használt elrendezés a 15. ábrán látható.



**15. ábra** A karakterisztika feltérképezésére használt elrendezés

A szenzor ellenállás értéke folyamatos csökkenésnek indult a növekvő víz (és kifejtett tömeg) mennyiségének arányában. A szenzor adatlapjában közétett csökkenő ellenállás függvénye egy logaritmikus görbéhez hasonlítható. A karakterisztika felvétele során az volt az elvárásom, hogy minél jobban megközelítsem ezt a logaritmikus függvény alakot.



**16. ábra** Szenzor karakterisztika

A 16. ábraán látható, hogy a mért karakterisztika az adatlapban foglaltakhoz hasonló jelleget mutat, amivel teljesültek az elvárásaim. A grafikonon látható, hogy a függvény a 250-es értéken indul. Ez az érték az óraprés gép terheletlen súlyát mutatja. A mérés többszöri ismétlésére is az értékek közel azonos függvényt rajzoltak. A karakterisztika kirajzolásához használt súlymennyiségek nagyok. A 4 liter űrtartalmú flakon teljesen megtöltve vízzel (a flakon súlyával és a karra helyezett kampóval együtt) több mint 4 kilogramm. Továbbá a prés gép erőkarj átvitele miatt, a szenzorra nehezedő súly felerősödik.

### 3.3.5 Hőmérsékletfüggés

Az ellenállások, de általában minden villamos vezetőanyag, fajlagos ellenállása 20 °C-os szobahőmérsékleten értelmezett. Köztudottan az ellenállások értékét befolyásolja a hőmérséklet, így a kapcsolásban a feszültség értéket mérő ellenállás és a szenzor is hőmérsékletfüggő. A hőmérséklet függés meghatározásához a szenzor karakterisztika felvételét különböző hőmérsékleteken is elvégeztem. A hőmérséklet méréséhez egy Texas Instrument által gyártott LM35DZ típusú precíziós hőérzékelő szenzort használtam. A hőmérő kimeneti feszültsége egyenesen arányos a hőmérséklettel, méghozzá 10 mV/°C-os arányban. A hőmérsékleti értéket, a hőmérő analóg kimenetét a mikroprocesszor ADC lábán mérem. Az ADC 10 bites értékét 0.4882815-el szorzom, hogy a tényleges hőmérsékleti értéket kapjam. Erre azért van szükség, mert az ADC a 0-5 V-os tartományt 10 bitre képezi le. Az így kinyert hőmérséklet könnyen számítható

$$ADC \text{ érték} \cdot \frac{5000 \text{ mV}}{1024 \cdot 10 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}} = \text{hőmérséklet } [^\circ\text{C}].$$

Az Atmel ATmega 32u4 processzora rendelkezik egy belső hőmérsékletmérő szenzorral. A szenzor használatához szükséges, hogy a belső referencia feszültség engedélyezve legyen, ekkor a szenzor az ADC-n bemeneti jelként jelentkezik. Ennek a szenzornak a kezdeti pontatlansága nagy ( $\pm 10^\circ\text{C}$ ), viszont a karakterisztikája az LM35DZ-hez hasonlóan lineáris. Kalibrációval könnyen lehet pontosítani az értékén. Ezt a szenzort pontatlansága és (az LM35DZ-hez képest) bonyolult használata miatt nem alkalmaztam.

A mérési eszközöm hőmérsékleti függésének megállapítására néhány ismert súlyértékkel végzett méréseket megismételtem különböző hőmérsékleten. A hőmérséklet különbséget kézenfekvően szobahőmérséklet (25 °C) és a kültéri (4 °C-os) értékek adták. A  $\Delta T = -21^\circ\text{C}$ -os különbségen mért értékek közt 18-21 bit értékű eltérést tapasztaltam

ugyanazon súlyok felhelyezése esetén. A hőmérsékletfüggés kiküszöbölésére a kalibráció során a 25 °C-os szobahőmérséklettől való  $\Delta T$  eltérést hozzáadtam a mért feszültséghez.

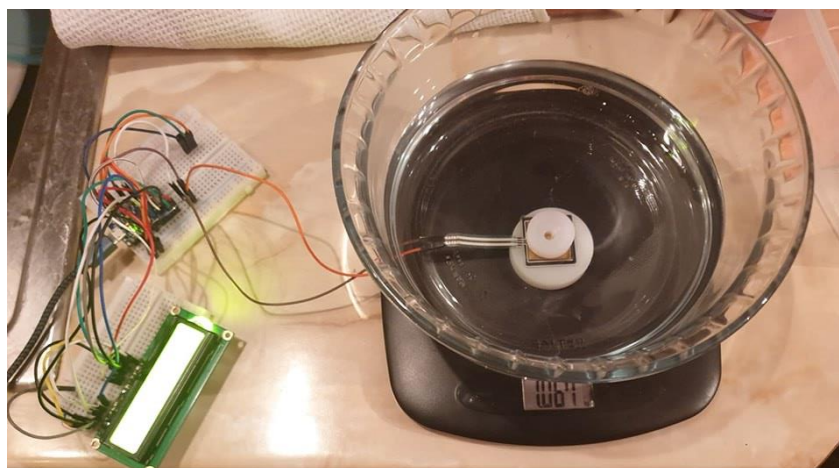
Megjegyezném, hogy az ismert nyúlásmérő bélyeg esetében használt Wheatstone mérőhíd fontos szerepet játszik a hőmérséklet különbség okozta pontatlanságok kiküszöbölésére. A nyúlásmérő bélyegek legnagyobb terhelés hatására is nagyon kicsi változást szenvednek az FSR változásához viszonyítva. A nyúlásmérő bélyegeknél sokkal számottevőbb akadály a hőmérsékletváltozás.

## 4 Feszültség tömegnek való megfeleltetése

### 4.1 Kalibráció

#### 4.1.1 Kis súlyok

A kalibrációm lényege, hogy meghatározzam az összefüggést, az Arduino processzorának feszültségmérési értéke és a szenzorra nehezedő tömeg közt. A feszültség értékek súlynak való megfeleltetéséhez szükségem volt arra, hogy tudjam mekkora súllyal dolgoztam az adott pillanatban, ehhez a Salter konyhai mérleget használtam. A mérlegre raktam a nyomásérzékeny ellenállásomat. A konyhai mérleget nulláztam, és a présgépnél használt alátéttel felhelyeztem egy mérő edényt. Fontos megjegyezni, hogy lényeges elem volt, hogy tudjam a szenzorra rakott alátétem hogyan illeszkedik a felületre. A mérőedényem felhelyezésekor könnyedén elmozdulhatott a szenzor az alátét alatt, ezért áttetsző (üveg) anyagú edényt választottam, hogy lássam a felhelyezéssel nem változtattam meg a szenzor pozícióját. A súly növelésére az edényt fokozatosan elkezdtem megtölteni vízzel, közben pedig figyeltem az Arduino által mért feszültséget és a mérlegen jelezett tömeget. Addig csináltam ezt, míg teljesen megtelt az edényem vízzel. Minden ötven gramm változásánál feljegyeztem a feszültség értékét. A kalibrációnál használt elrendezésem a 17. ábrán látható.



17. ábra Kalibráció folyamata

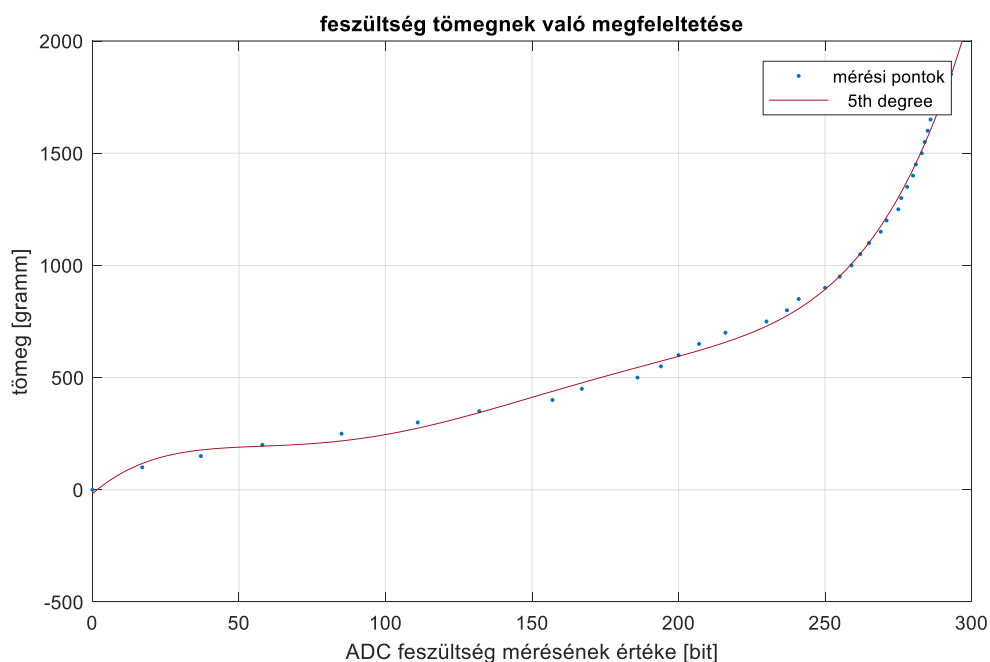
A feszültség és súly értékeket Matlabbal megfeleltettem egymásnak. Az x tengelyre az LCD kijelzőről, az y-ra pedig a mérlegről leolvasott értékeket vittem fel. A

szenzor nemlineáris karakterisztikáját pontosan nem soha nem lehet visszaadni, de jó közelítésű becslést lehet rá adni. A becslés legkézenfekvőbb módszere a görbeillesztés, másnéven függvényillesztés. A görbeillesztés lényege egy olyan függvény meghatározása, aminek teljes értékészletét nem ismerjük, de annak egy részhalmazát igen. Ebből a részhalmazból a továbbiakban analitikus közelítési módszerekkel próbálunk meg becslést adni. A függvény meghatározására a Matlab polyfit nevű függvényét használtam. A polyfit függvény a megadott x és y koordináták alapján egy polinomiális görbe illesztést végez. A polinomiális görbeillesztés esetében fokszámokkal adhatjuk meg a becslés pontosságát. Esetemben ötödfokú közelítést alkalmaztam, amely már jól megközelíti az ideális függvényem alakját.

Az így kapott függvényem:

$$f(x) = 66,146 \cdot z^5 + 324,05 \cdot z^4 + 496,1 \cdot z^3 + 295,15 \cdot z^2 + 375,72 \cdot z + 658,02 ,$$

$$\text{ahol } z = \frac{(x-216,14)}{85,411}$$



**18. ábra Kalibráció során mért értékek és az arra illesztett ötödfokú polinomiális függvény**

További fokszámok növelésére nincs szükség, mert a mérés és annak megismételhetőségi pontatlanságából adódó hibák nagyobbak, mint az egyszeri alkalommal felvett kalibrációs pontjaimra illesztett függvény közelítési hibája. A mérési értékekre illesztett ötödfokú polinomiális közelítés a 18. ábrán látható.

A kalibrációs mérés során törekedtem az FSR teljes mérési tartományának feltérképezésére. Ezt a módszert nagyjából 1800 gramm súly leméréséig tudtam alkalmazni, ekkor a feszültség értéke 291 bit adódott. A nagyobb súlyoknál más eljárással becsültem a tömeget.

#### 4.1.2 Nagy súlyok

A polinomiális illesztéssel meghatározott függvény alakom pontossága a megadott ponthalmazon kívül egyre kevésbé követi az ideális függvény alakomat. A pontokon kívüli tartomány feltérképezéséhez a karakterisztika felvételénél használt óraprést használtam. A présgéppel képes vagyok nagy nyomás kifejtésére is, anélkül, hogy elmozdulna a terhelő és terhelendő felületem. A karakterisztikából tudom, hogy az ellenállás változás a nyomás növelésével egyre kevésbé csökken, míg nem teljesen eléri a telítési pontját, amin túl már egyáltalán nem csökken. Ebben a tartományban már az ellenállás csökkenése alig pár kiloohmos, szemben a kezdeti több százashoz képest. Megismételtem a karakterisztikát felvevő mérésemet, figyelve, hogy a présgép hasonlóan terhelje a felületemet, mint ahogyan az a konyhamérleges kalibrációnál volt. A karakterisztika felvételénél lineárisan növeltem az ismeretlen nagyságú súlyomat. A mért feszültség értékeket fedésbe hoztam a kis súlyos kalibrációnál mértekkel, így a mérési pontok számából meg tudom mondani mennyivel nőtt a terhelésem a pontok közt. A kissúlyos kalibrációnál mért feszültség szintekhez hozzá párosítottam a karakterisztika mérésnél kapottakat. A súlyok és feszültségérték megfeleltetését itt már nem polinomiális függvénnyel, hanem csak egy egyszerű lineáris közelítéssel közelítettem. A lineáris közelítéssel kapott függvényem esetében már a tévedés valószínűség jóval nagyobb, mint a kis súlyos kalibrációnál használt függvényemnél. A szenzor ellenállás csökkenése véges, ezért a minimális ellenállás értéket elérve a feszültségnövekedés is megáll.

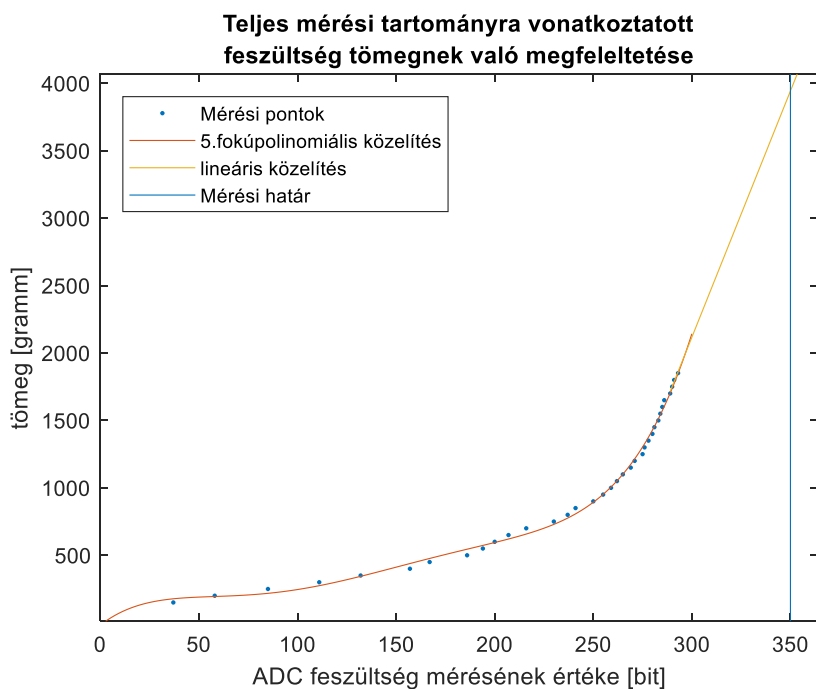
A kapott teljes karakterisztikát lefedő függvény alakom:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 66,146 \cdot z^5 + 324,05 \cdot z^4 + 496,1 \cdot z^3 + 295,15 \cdot z^2 + 375,72 \cdot z + 658,02 & 0 < x \leq 290 \\ 37 \cdot x - 8800 & 290 < x \end{cases}$$

$$\text{ahol } z = \frac{(x - 216,14)}{85,411},$$

$f(x)$ , mint tömeg grammban

$x$ , mint feszültség szint bitben



**19. ábra** A teljes tartományra vonatkoztatott közelítőfüggvényem

## 4.2 Mérési tapasztalatok

### 4.2.1.1 Hiszterézis jelleg

Megállapítottam, hogy a nyomásérzékeny ellenállás hiszterézis görbe jelleget mutat. Van egy kezdeti nyomás érték, ami alatt az ellenállás még nem kezd el csökkenni és van egy végső telítési pont, ami után már nem képes tovább csökkenni. Az ellenállás kimenetein nagyjából 100 gramm körüli terhelés hatására érzékelhető feszültség különbség. A szenzor maximális terhelését nem tudtam pontosan megállapítani. A hiszterézis jelleget, akkor mutatja, ha a felhelyezett súlyra további plusz nagy nyomást gyakorlok. A plussz nyomás megszüntetésével a szenzor nem a kezdeti nyomásértékre tér vissza, hanem egy nagyobbra. A méréseim során megállapítottam, hogy a kezdeti mért súly felhelyezése után további nagy erőt kifejtve a szenzorra, majd azt levéve az így kapott értékem kevésbé oszcillál, egy stabilabb állapotba kerül. A kalibrációs méréseimnél alkalmaztam ezt a technikát. Ennek a viselkedésnek az oka, hogy az ellenállásrétegek a nyomás hatására elrendeződnek, és amíg bármilyen terhelés fennáll, az ellenállás rétegek nem mozdulnak el onnan. A terhelés teljes megszüntetésével és a kezdeti súly ismételt felhelyezésével ismét az instabil, oszcilláló állapotba kerül az ellenállás.



#### 4.2.1.2 Drift állóság

Az FSR ellenállás értéke ugyanazon súly alatt és környezeti hőmérsékleten, a terhelés megkezdése után, az idő előrehaladtával negatív irányba elmozdul. Ez a változás feszültség szintre átszámolva nagyjából 2 óra leforgása alatt 30 bitet jelentett. A méréseket a pontosság érdekében érdemes súlyonként egyesével végezni.

#### 4.2.1.3 FSR

Érdekesség képpen megemlíteném egyszeri kísérletem során megfigyelt tapasztalatomat, amikor a nyomásérzékeny ellenállás végső terhelési határát kerestem. A szenzor felületre 10 kilogrammot is bőven meghaladó nyomást gyakoroltam. Ennek következtében feltételezéseim szerint a szenzor ellenállás rétegei elcsúsztak. Ezt az elcsúszást onnan feltételeztem, hogy a mért feszültségértékek a 0-1024 –es tartomány között nagy differenciával ugráltak huzamosabb ideig. A szenzort leválasztottam tápfeszültségéről és finom simításokat végeztem a felületen. Ezek után visszakapcsolva a tápfeszültségre, azt tapasztaltam, hogy a szenzor ismét a megfelelő működést mutatja. Ebből kifolyólag vontam le a következtetést, mint azt már korábban is említettem, hogy a nyomásérzékeny ellenállás igen strapabíró.

### 4.3 Konklúzió

A force-sensing resistorral való súlymérés sok mérésbeli problémával rendelkezik, ezért precíziós mérésekre semmi képpen nem ajánlom használatát. Ahogyan az ellenállás adatlapjában is benne van (specifikusan itt az IEE-CP33-as FSR-re értem, amit a méréseim túlnyomó részében használtam) nagyjából a 100 g-tól a 2 kg-os tartományig lehet a ráhelyezett súlyt jól megbecsülni.



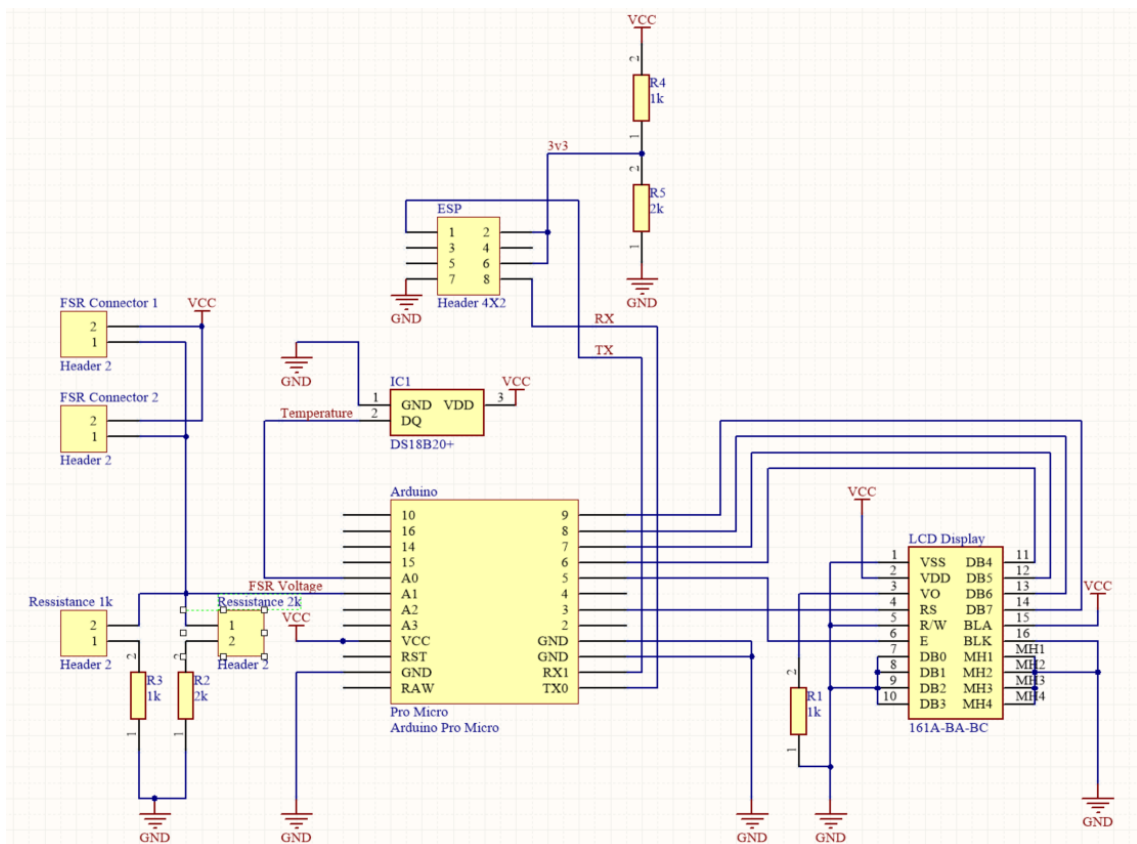
20. ábra Mérési pontosság ellenőrzése

A fent leírt módszerekkel megvalósított mérlegem a 100-1800 grammos tartományban képes maximum 30-40 grammos tévedéssel súlyt mérni. Ehhez viszont fontos, hogy a kalibráció során megadott paraméterekkel, hasonló elrendezésű mérést vigyek véghez. A pontosságban kulcsfontosságú szerepet játszik, hogy a felület milyen arányban és hol van terhelve. A 20. ábrán jól látható, hogy az LCD-n kijelzett súlyt 2 grammos különbséggel volt képes kijelezni a konyhai mérleghez képest.

## 5 Eszköz kivitelezés

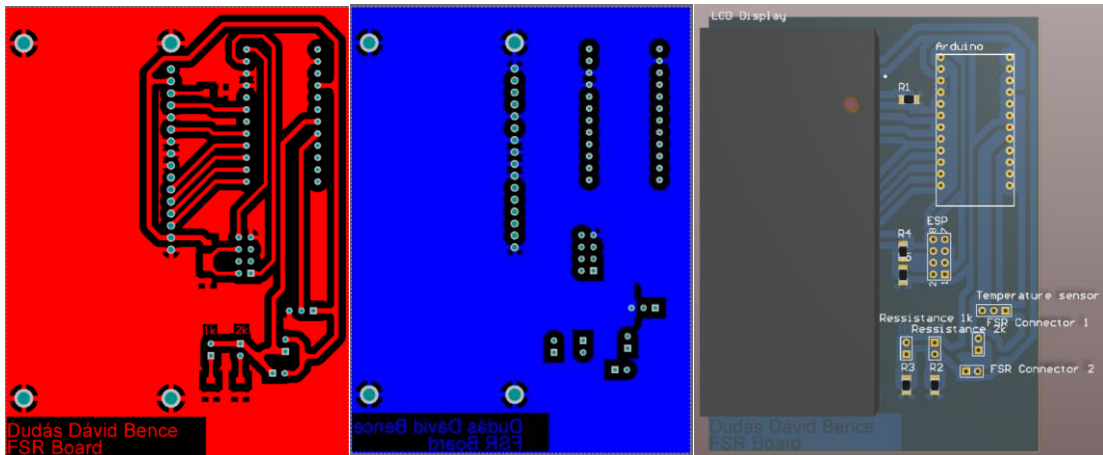
### 5.1 Nyáktervezés Altiummal

A mérések során használt breadboard és az összeköttetésekre szolgált szalagkábelek helyett egy szebb, igényesebb formát készítettem a végleges eszközömmek. A mérés kapcsolási rajzát (21. ábra) Altium Designerben terveztem. A kapcsolási rajzban használt alkatrészek szimbólumainak egy részét meglévő könyvtárakból töltöttem be, másik részét magam készítettem el.



21. ábra Mérés kapcsolási rajza

A nyomtatott áramkört mintázat (22. ábra) kialakításánál a kapcsolási rajzhoz hasonlóan az alkatrészek footprintjeit könyvtárakból vagy egyénileg oldottam meg.

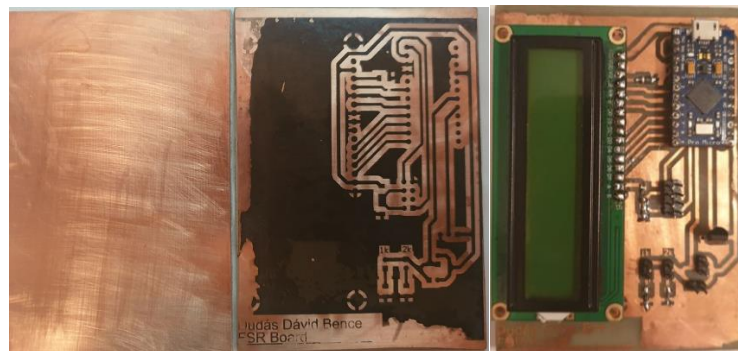


22. ábra Nyomtatott áramköri mintázat (top, bot, 3d)

A programban létrehozott NYÁK-omat kétoldalásra terveztem. Az Altiumban megtervezett top oldalra kerültek a vezetőrétegek, felületszerelt és furatszerelt alkatrészek is. A bottom oldalt csak a furatszerelt alkatrészek mechanikai rögzítésére használtam. Az eszköz használhatóságát tekintve az FSR csatlakozási pontja, USB tápcsatlakozó és az LCD kijelző miatt, a programban tervezett bottom oldal, a készülék felső oldala.

## 5.2 Nyomtatott áramkör készítése

A mintázatot tükrözve lézernyomtatóval fotópapírra nyomtattam. Az előre megtisztított rézlapra vasaló segítségével felvittem a fotópapíron lévő tintát, ezzel egy maszkot képezve a vezetőrétegnek. A maszkolatlan (felesleges) rézréteget 20%-os sósav (HCl) és 35%-os hidrogénperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) elegyében lemarattam. Az alkatrészeket kézi forrasztópákával és forraszhuzallal rögzítettem. Ezzel a megoldással elértem, hogy az eszközöm könnyen hordozhatóvá vált a korábbi szalagkábellel és breadboarddal kivitelezett tesztfázisban használt verzióhoz képest.



23. ábra Áramkör készítés folyamata: megtisztított rézlap, felvitt tinta maszkolat, lemaratott és kifűrt rézlap, felforrasztott alkatrészek

## 6 Irodalomjegyzék

- [1] *A dinamika alapegyenlete, jellegzetes erőhatások*,  
<http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/termeszetudomanyok/fizika/fizika-9-efolyam/a-dinamika-alapegyenlete-jellegzetes-erohatasok/erotorvenyek> 2018.10.20
- [2] *Mérleg (eszköz)*, [https://hu.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9rleg\\_\(eszk%C3%B6z\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9rleg_(eszk%C3%B6z)) 2018.10.20
- [3] *Nyúlásmérő bélyeg*,  
[https://hu.wikipedia.org/wiki/Ny%C3%BAl%C3%A1sm%C3%A9r%C5%91\\_b%C3%A9lyeg](https://hu.wikipedia.org/wiki/Ny%C3%BAl%C3%A1sm%C3%A9r%C5%91_b%C3%A9lyeg) 2018.10.20
- [4] Wikipedia: *Erőmérő cella*  
[https://hu.wikipedia.org/wiki/Er%C5%91m%C3%A9r%C5%91\\_cella](https://hu.wikipedia.org/wiki/Er%C5%91m%C3%A9r%C5%91_cella)
- [5] Dr. Stuart I. Yaniger: *Force Sensing Resistors: A Review of the Technology* oldalak: 666-668, *Electro International*, 1991
- [6] Avrum Hollinger, Marcelo M. Wanderley: *Evaluation of Commercial Force-Sensing Resistors*
- [7] David J. van den Heever, Kristiaan Schreve, and Cornie Scheffer: *Tactile Sensing Using Force Sensing Resistors and a Super-Resolution Algorithm*, *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 9, NO. 1, JANUARY 2009
- [8] *FSR 400 Series Data Sheet*
- [9] *Precision Strain Gages*  
[http://setpoint.gr/wp-content/uploads/micro-measurements\\_precision\\_strain\\_gages\\_catalog.pdf](http://setpoint.gr/wp-content/uploads/micro-measurements_precision_strain_gages_catalog.pdf)
- [10] *Calibration Weights*  
<https://www.indiamart.com/proddetail/calibration-weights-6551991712.html>
- [11] *Emelő*  
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Emel%C5%91>
- [12] *Arduino LCD tutorial*  
<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/lcd-tutorial/>
- [13] *ATmega16U4/ATmega32U4 Datasheet*  
[http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4_datasheet.pdf)