



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma (Pécs)**

Stolcz Norbert

**NAPELEMEK MŰKÖDÉSI  
HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE  
NAPKÖVETÉSSEL**

KONZULENS  
KISS BÁLINT

Pécs, 2022.11.01

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló</b> .....	3
<b>Abstract</b> .....	3
<b>Bevezetés</b> .....	4
<b>Napkövető napelem rendszer</b> .....	5-6
<b>Irányítástechnikai alapfogalmak</b> .....	7-8
<b>Szabályozástechnika történeti áttekintő</b> .....	9-10
<b>1. A forgatható makett</b> .....	11
1.1 Az Arduino Mega alapú fejlesztői környezet .....	11-12
1.2 A program kód .....	12-13
1.3 Kód működése .....	13-14
1.4 Eredmény .....	14-17
<b>Irodalomjegyzék</b> .....	18

# SZERZŐI NYILATKOZAT

Alulírott **Stolcz Norbert**, középiskolai diák kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot 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 nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye.

Kelt: Pécs, 2022. 09.

.....

Stolcz Norbert

# Összefoglaló

A megújuló energiaforrások közül a napenergia az egyik legnépszerűbb, hiszen telepítése mérsékelt infrastrukturális beruházást igényel. A napelemek hatásfokát a beeső sugárzás szöge lényegesen befolyásolja, ezért megfontolható olyan mechanizmus alkalmazása, amely a napelem orientációját egy vagy két tengely körüli forgatással képes változtatni. A forgatás megfelelő kivitelezése irányítástechnikai feladat. A dolgozatomban egy fény irányát követni képes forgató mechanizmus irányításával foglalkozom, amelyet egy makett használatával meg is valósítottam. Bemutatom az irányítástechnika történetét, a napelemek forgatásának előnyeit, továbbá azt a makettet, amelyet egy Arduino fejlesztőkártya segítségével mozgatok. Ismertetem az irányítási algoritmust, valamint vizsgálom a szabályozási kör jeleit és a megoldás működését.

## Abstract

Among the renewable energy sources, solar energy is one of the most popular, as its installation requires moderate infrastructure investment. The efficiency of solar cells is significantly affected by the angle of the incident radiation, so it is advisable to consider the use of a mechanism that can change the orientation of the solar cell by rotating it around one or two axes. The proper execution of the rotation is a control engineering task. In my report, I deal with the control of a rotating mechanism capable of following the source of light. The feedback law is implemented using a reduced-size but fully functional prototype. I present the history of control technology, the advantages of rotating solar panels, and the model that I control with the help of an Arduino development board. I describe the control algorithm and study the signals of the control loop and the operational features of the solution proposed.

# Bevezetés

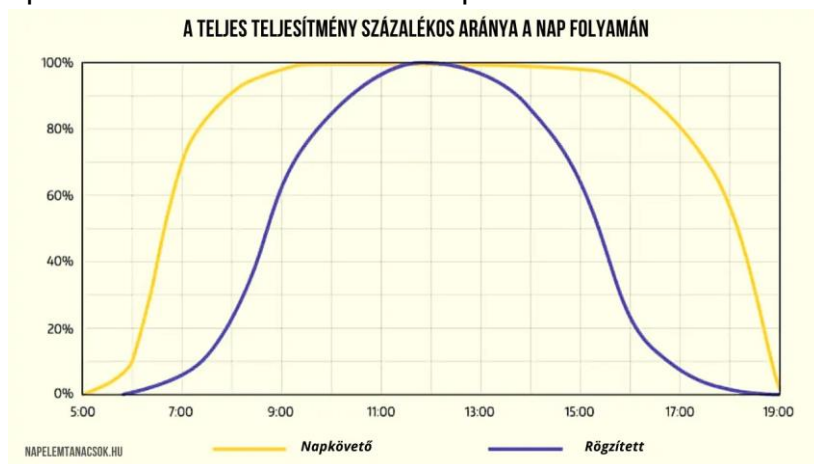
A dolgozatomban egy megújuló energiaforráshoz, a napelemekhez köthető irányítási problémát vizsgáltam, mivel a megújuló energiaforrások részesedése az energiapiacra már több évtizede növekvő tendenciát mutat. Ehhez a folyamathoz erősen hozzájárult a világ környezettudatosságra való törekvése, ami egyre nagyobb teret nyer politikai és civil téren is. A megújuló energiaforrásokra történő áttérést az is indokolja, hogy földünk fosszilis erőforrásainak mennyisége véges. Napjainkban Európát energiaválság is sújtja, a gáz világpiaci ára pedig 2008 óta nem volt ilyen magas szinten, ami további érv a megújuló energiaforrások használatára mellett.[1][2][3]

Többféle megújuló energiaforrás is létezik amelyek hatékony hasznosításához elengedhetetlen valamely irányítási feladat megoldása. Vegyük példaként a szél-erőműveket, ahol jelentősen hozzájárul a hatékony termeléshez egy olyan szabályozás, amely a szélnek megfelelő irányába állítja a lapátokat. A vízi erőművek esetében a vízszint szabályozása az egyik megoldandó feladat. Én a projektemhez a napelemeket választottam azon belül is a statikus napelemekkel szemben kevésbé elterjedt, napkövető napelem rendszert. A napkövető kollektorok jellemzője egy mozgatható keret, így a napelemeket képes a nap mozgásának megfelelő irányba állítani egy szabályozási feladat megoldásával.[4]

# Napkövető napelem rendszer [5][6]

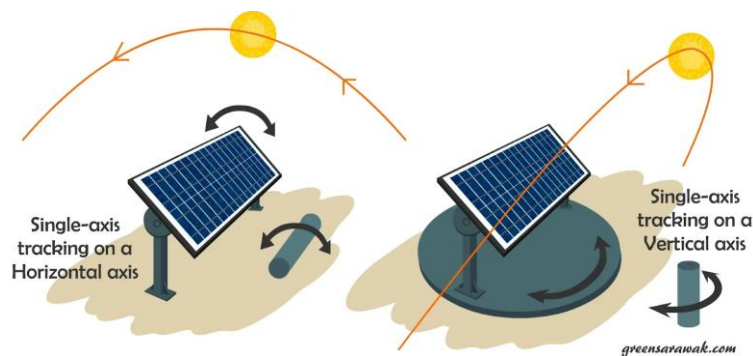
A feladat megvalósítása közben utána néztem a napkövető napelem rendszerek típusainak, illetve az elérhető hatékonyság javításának is.

A napelem rendszerek hatékonysága függ a Nap állásától. A Nap helyzete folyamatosan változik, ezért a statikusan álló (nem mozgatott) napelemek csak egy adott napszakban képesek maximális teljesítményük kihasználására/leadására. Erre a fejlődő technológia révén megoldást jelenthet a napkövető napelemes rendszer, ami biztosítja, hogy a napelem folyamatosan a Nap irányába nézzen, így maximalizálva a termelés hatékonyságát. Tehát egy pl. 5 kW-os statikus napelem ezt a névleges teljesítményt nagyjából 1 órán keresztül tudja leadni, még egy forgó rendszer egy napos nyári napon akár 8 órán keresztül is képes lenne.

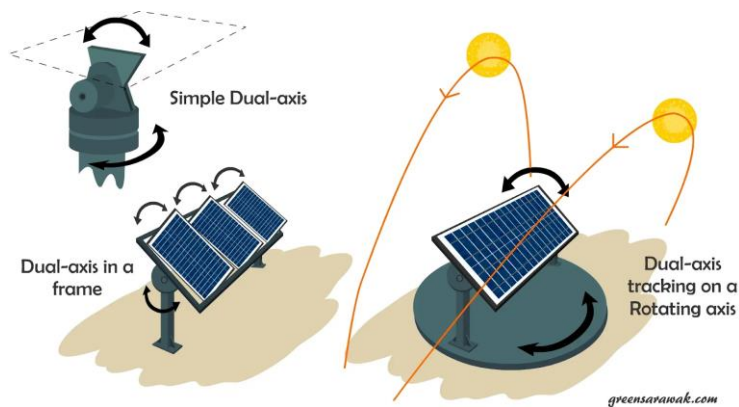


1.ábra: A napelem rendszerek teljesítménye egy nap folyamán [5]

A napkövető rendszernek is több változata van a Nap 100%-os lekövetéséhez pl. két tengely menti forgatásra van szükség, ami egy drágább és esetenként nagyobb készüléket igényel. Ez a technológia nem termel jelentősebben többet, ezért elterjedtebb az 1 tengely mentén forgó szerkezet.



2.ábra: Egytengelyes napkövető rendszer [6]



3. ábra: Kéttengelyes napkövető rendszer [6]

Az egytengelyes szerkezet nagyjából 25-35% növeli a napelem termelését a két tengelyes képes lehet 40%-ra is.

A napkövető rendszer hátulütője lehet, hogy háztetőre nem rakható, földet igényel, több helyet foglal, mint a sima napelem panel és a forgással is számolni kell körülötte. A technikai háttér: követést bizonyos érzékelők biztosítják, amelyek a Nap helyzetét képesek felismerni, vagy egy meghatározott algoritmus vezérli. Az érzékelős típusok alapját a fototranzisztor (fényvezérlésű), vagy éppen a fotoellenállás (ellenállás értéke a napfénytől függ) szolgáltatja. Az algoritmusok pedig csillagászati adatokon alapulnak, mellyel biztosítja a folyamatos nyomkövetést. A forgást léptetőmotorok, vagy motor által forgatott lineáris hajtóművek biztosítják. További szenzorok érzékelhetik az egyéb környezeti hatásokat is, például hó vagy eső után "megmozgatják" a napelemeket, hogy a víz (vagy akár a sár) ne rontsa a panelek hatásfokát. Továbbá erős szél esetén a paneleket vízszintes pozícióba állítja, hogy megakadályozza, hogy a szél alájuk kapjon.

Megéri-e? Azt, hogy megéri vagy nem, nem lehet egyértelműen kijelenteni, mert a napkövető rendszer még eléggé drága, a mozgó alkatrészek miatt többször igényelhet karbantartást. A plusz pénzből, amibe kerül, lehetne venni még több napelemet, ami szintén meg növeli a termelést és egy adott területre valamivel több sima napelemet lehet felszerelni, mint mozgót. Felmérések szerint a sima rendszer ára hamarabb megtérül annak ellenére, hogy a mozgó rendszerrel havi szinten többet spórolhatunk, de lehetséges, hogy a jövőben a napkövető rendszer ára arányokban nézve csökkeni fog és praktikusabb lesz a használata.

Dolgozatomban ehhez a napkövetéshez fűződő irányítástechnika probléma egyik lehetséges megoldását mutatom be. Mivel a középiskolai tananyag nem foglalkozik ehhez megfelelő mélységben a szabályozástechnika területével, ezért ezzel a munkám során ismerkedtem meg, itt az alapfogalmak rövid összefoglalását szerepeltetem.

# Írányítástechnikai alapfogalmak<sup>[7]</sup>

Az irányítástechnika célja egy folyamat befolyásolása valamely kívánt viselkedés elérése érdekében. Jelen helyzetemben ez a folyamat a nap felé fordulást jelenti, hogy hatékonyabb legyen a napelem. Maga az Irányítástechnika (Control Engineering) egy műszaki tudomány, ami az irányítás általános törvényszerűségeivel foglalkozik. Az irányított rendszer(folyamat, process) a világ azon lehatárolható része, amely esetében a kívánt viselkedést biztosítani kívánjuk.

A szabályozás az irányítást, az érzékelés - döntés - beavatkozás hurkon (visszacsatoláson -feedback) keresztül megvalósító eljárás. Ez a szabályozási kör.

A szabályozástechnika az irányítást szabályozási kör segítségével megvalósító rendszerek törvényszerűségeivel foglalkozó műszaki tudomány.

Ha a szabályozási kör műveleteinek valamelyikét kezelő személyzet végzi, akkor kézi szabályozásról (Manual control) van szó. Önműködő szabályozás (Automatic control) pedig mikor a szabályozási kör minden művelete kézi beavatkozás nélkül megy végbe.

A szabályozás folyamatát formálisan is jól szemlélteti az ún. szabályozási kör, amely a legtöbb irányítástechnikai problémára illeszthető és a benne található blokkok és jelek elnevezéseit szabvány rögzíti.



4.ábra: A szabályozási kör elemei és jelei [7]

A jelek elnevezései az alábbiak.

$x_a$  - alapjel

$x_r$  - rendelkező jel

$x_b$  - beavatkozó jel

$x_m$  - módosított jellemző

$x_s$  - szabályozott jellemző

$x_z$  - zavaró jel (zavarjel)

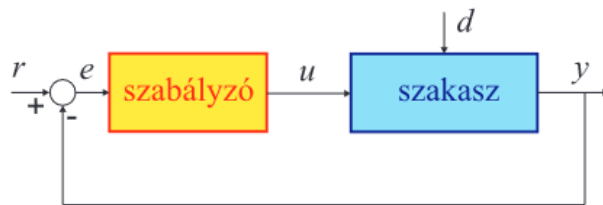
$x_e$  - ellenőrző jel



A szabályozó megfelelő méretezésével az alábbi ún. szabályozási célokat kell megvalósítani.

1. A szabályozott jellemző ( $x_s$ ) kövesse az alapjelet ( $x_a$ ). Az általam vizsgált problémánál a szabályozott jellemző a mechanika szöge a Nap irányához képest.
2. A rendelkező jel (hiba,  $x_r = x_s - x_a$ ) maradjon kicsi.
3. A külső zavaró jel ( $x_z$ ) hatása a szabályozott jellemzőre maradjon kicsi ( $x_s$ ).
4. Egy kültéri valódi napelemes rendszer esetében ilyen zavarás lehet a szél vagy egy mechanizmusnak ütköző kóbor állat.
5. A beavatkozó jel ( $x_b$ ) ne legyen túl nagy, azaz a napelem forgatása semmiképpen ne fogyasszon több energiát annál, ami a forgatással járó hatékonyság növeléssel kinyerhető.

A korábbi, 5. ábrán szereplő hatásvázlatot egyszerűsíteni is szokás a beavatkozó szervet és az érzékelőt beleértve a szakaszba.

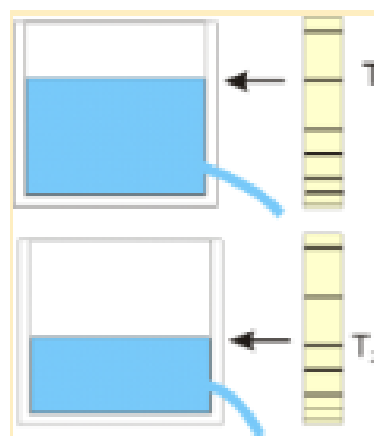


5.ábra: A szabályozási kör egyszerűsítve [7]

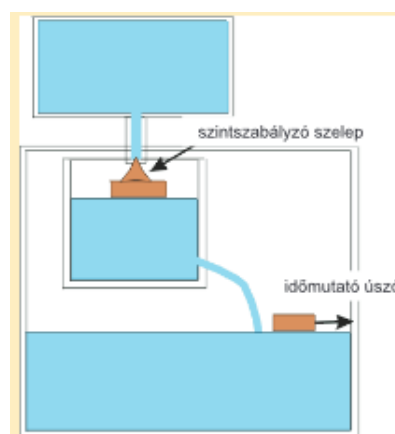
# Szabályozástechnika történeti áttekintő

A jó szemléltetés érdekében érdemes bemutatni a múlt korok kezdeti szabályozási folyamaton alapuló eszközeit, erről egy listát készítettem.

Az egyik legelső szabályozást használó készülék a Vízóra (klepszüdra) i.e. 3. században jelent meg. Legfőbb előnye a napórával szemben, hogy árnyékban is működik. A XVIII. századig a legpontosabb időmérő eszköz lesz. Az elve, hogy egy edényből vizet folytatva a vízszint mutatja az idő múlását. Ezekhez később továbbfejlesztették hogy az állandó vízáram biztosítva legyen. Ez így már egy egyszerű szabályozási folyamat, melynek fő eleme a képen látható szabályozó szelep. (Ez a szabályozás mai korban a wc tartályoknál van alkalmazva.)

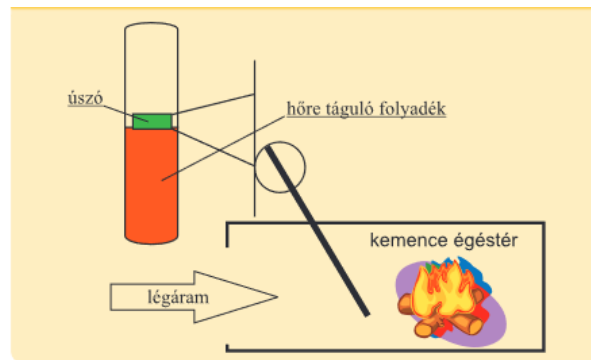


6.ábra: Egyszerű vízóra [7]



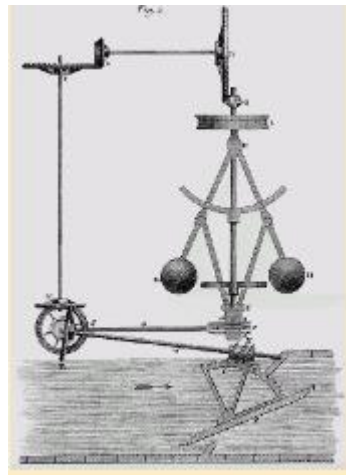
7.ábra: Állandó vízáramú vízóra [7]

Az történelemben előre haladva a következő jelentősebb találmánynak az aranycsináló gépet mondanám, amit a XVI. században Drebbel talált fel. Ennél a gépnél a szabályozástechnikai feladat célja az volt, hogy a hőmérsékletet az előírt értéken tartsák, (mivel az alkimisták azt gondolták, hogy ez az egyik módszer az arany előállítására más fémekből). Ezt az elvet kihasználva találmányát csibekeltetőként hasznosította Drebbel.



8. ábra: Drebbel aranycsináló gépe. [7]

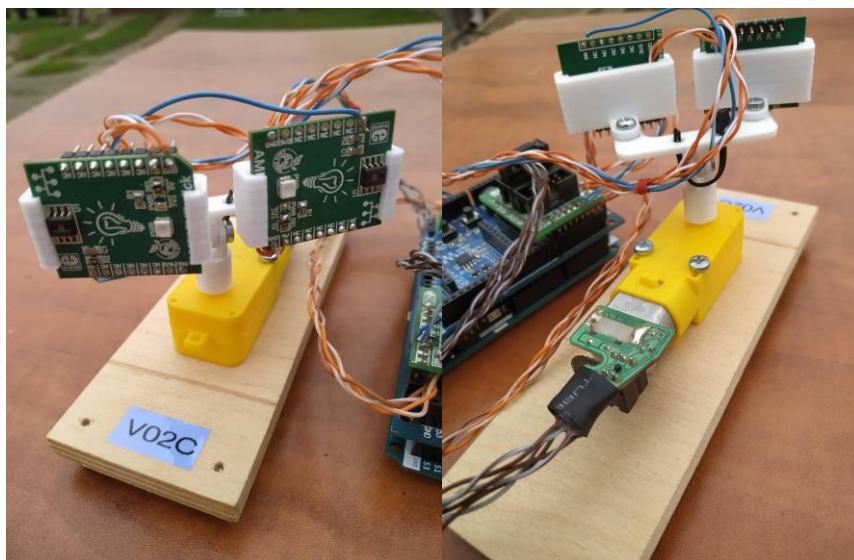
Még tovább haladva a történelemben, a XVIII. században James Watt feltalálta a tempomatját, itt a szabályozástechnikai feladat a fordulatszám előírt értéken tartása volt. Működési elve az volt, hogy a különböző forgási sebességeknél különböző centrifugális erő hat a forgó tömegre (golyókra).



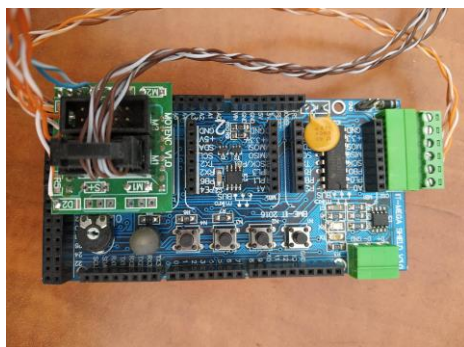
9. ábra: James Watt tempomatja [7]

# A forgatható makett

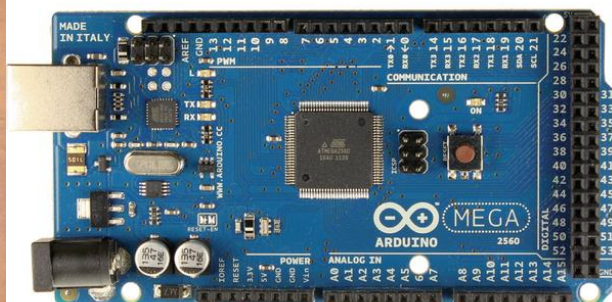
A legjobb szemléltetés, vizsgálat és a szabályozási kör gyakorlati megvalósítása végett készítettem egy forgásra képes makettet. A hardware-ként érzékelés szempontjából 2db Ambient Click fényérzékelő modult használtam, az egész makett alapját egy Arduino Mega mikrokontroller képezi, amin van egy IIT-MEGA-SHIELD mivel a gyári Arduino MEGA kártya kizárólag egy ATMEGA2560 típusú mikrokontrollert és a programozásához szükséges USB-soros átalakítót tartalmazza, ezért szükséges egy kiegészítő panel (shield) használata. A kiegészítő panelen többféle áramkör és csatlakozó van. Nekem a Dupla H-híd miatt volt szükségem rá, ami által alkalmas lesz kis teljesítményű DC motor vezérlésére az Arduino. A DC motor felel a modell mozgatásáért, ami egy 3D nyomtatott vázat forgat. Ezek a legalapvetőbb feltételei, hogy működő makett legyen, amit sikerült is megvalósítanom. A szabályozási kör a modell alapján, a beavatkozó szerv a motor, az értékelő egység két fotódiódából áll. A szabályozó pedig az Arduino.



10.ábra: Modell szenzorok. [8] 11.ábra: Modell egészben [8]



12.ábra: Arduino Shielddel [8]

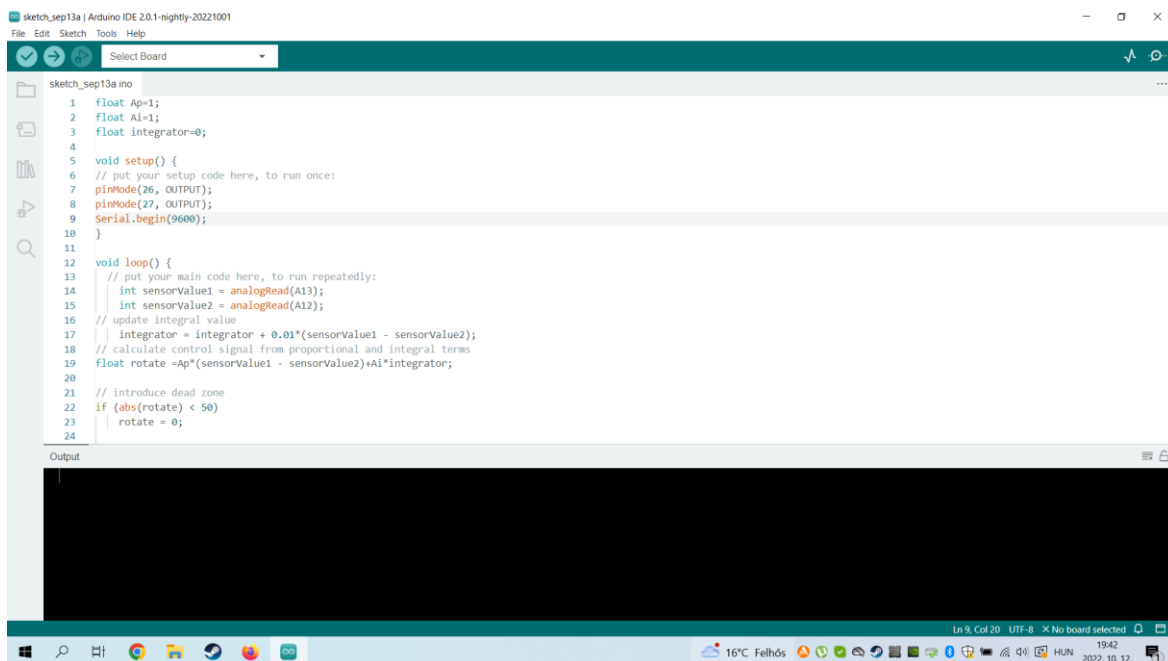


13.ábra: Arduino ATMEGA2560 [9]

## Az Arduino Mega alapú fejlesztői környezet

Mivel az Arduino programozás nem képezi a középiskolás anyag részét így a programozás menetének is utána jártam. A program megírásához én az Arduino internetes oldalán ajánlott nyílt forráskódú software-t az IDE-t használtam. Ez egy nem túl bonyolult C programnyelv alapú felület, amit kifejezetten az Arduinohoz készítettek.

Az IDE-ben a program lefutása a következő: a kód első részében kell definiálni a változókat és azok jellegét pl. `float Ap=1;` a `void setup()` után a `{}`-ben lévő program egyszer fut le, ezért itt célszerű megadni az Arduino lábak felhasználási módját pl. `pinMode(26, OUTPUT);` a `void loop()` a utáni `{}`-ben pedig a kód ismétlődően fut le. Ide kell írni az adott feladatot, ami az én esetemben a szabályozási feladat.



14.ábra: Az IDE felülete [8]

## A program kód

```
float Ap=1;
float Ai=1;
float integrator=0;

void setup() {
// put your setup code here, to run once:
pinMode(26, OUTPUT);
pinMode(27, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
}
```

```

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  int sensorValue1 = analogRead(A13);
  int sensorValue2 = analogRead(A12);
  // update integral value
  integrator = integrator + 0.01*(sensorValue1 - sensorValue2);
  // calculate control signal from proportional and integral terms
  float rotate = Ap*(sensorValue1 - sensorValue2)+Ai*integrator;

  // introduce dead zone
  if abs(rotate)<50
    rotate = 0;

  // send control signal
  if (rotate > 0) {
    digitalWrite(27, HIGH);
    digitalWrite(26, LOW);
  }
  else {
    digitalWrite(27, LOW);
    digitalWrite(26, HIGH);
  }
  analogWrite(4, abs(rotate));

  // send values on serial port
  Serial.print(rotate);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(sensorValue1 - sensorValue2);

  delay(10);
}

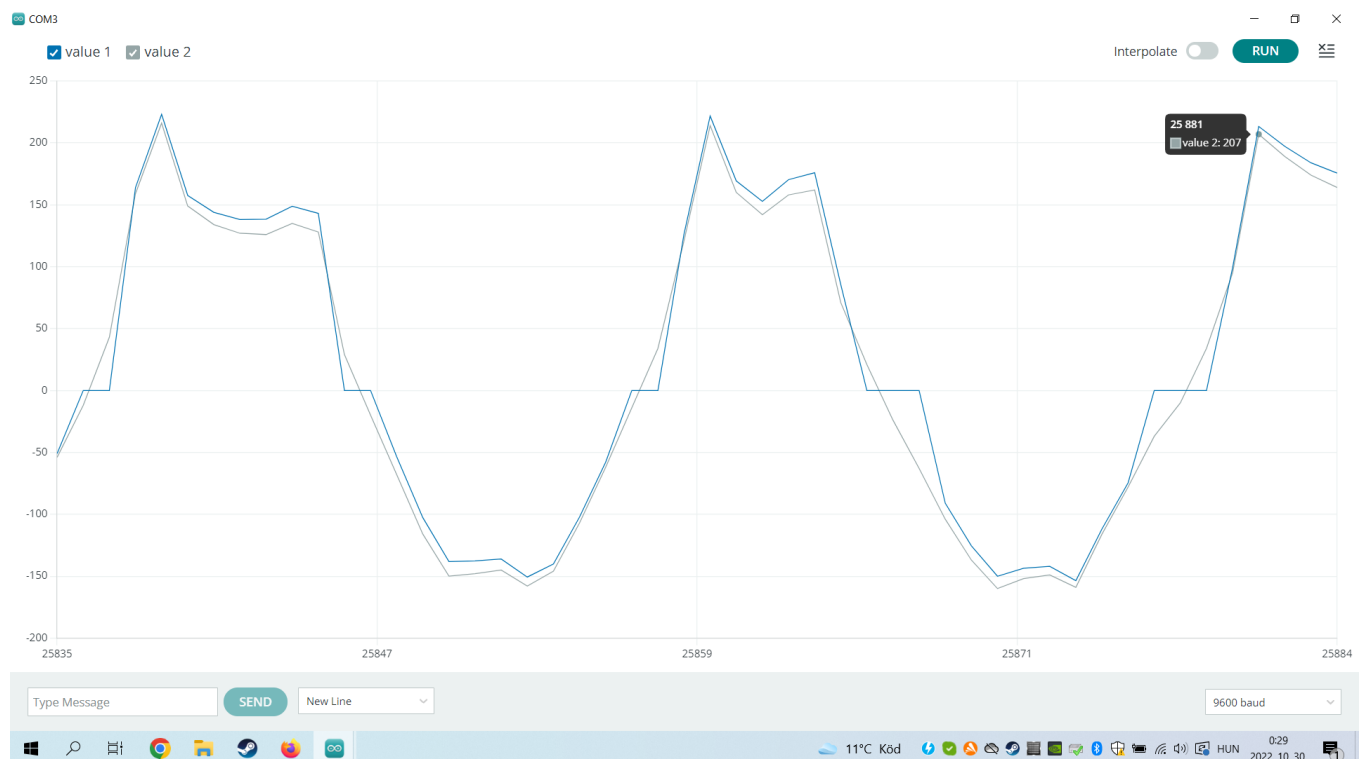
```

## Kód működése

A kód működése: az elején definiálva lettek a később használt változók `float Ap=1;` `float Ai=1;` `float integrator=0;` A setup-ban megadtam két lábat kimenetként. A shield leírás alapján az adott lábak kapcsolódnak a H-hídhez. Ezek a lábak kellenek a motor forgatásához. Megadtam még egy `Serial.begin(9600);` ez nincs hatással a modell működésére, hanem annak tanulmányozására használtam. A loopban először a fényszenzorok adatait kértem le analóg lábokról, `analogRead` mivel az analóg lábak képesek érzékelni különböző feszültségű jeleket. Utána, hogy a modell különböző fényviszonyok között is jól működjön. A szabályozási körben beavatkozóként ismert jel egy arányos hatással és egy integrált hatással lesz befolyásolva. Ezen két erősítés

(Ai és Ap) beállítását tapasztalati módon végeztem. Ezt követően kizártam a túl kicsi jelet és a fellépő zajt “dead zone” hoztam létre. Majd a jel előjelétől függően a két output két definiált lábat vagy High vagy Low értékre állítja a kívánt forgásirány elérése végett. Az elfordulás mértékét egy `analogWrite` parancs adja meg a motornak. A modellben a shield segítségével egyszerűen tudtam befolyásolni a motor forgatását végző jel kitöltési tényezőjét ezáltal befolyásolni a forgás sebességét. Visszatekintve arra, hogy miért kellett a dead zone, mivel egy bizonyos kitöltési tényező után nem képes a motor forogni. Eddig tartott a modell működéséhez kellő rész, a végén még a jelek tanulmányozása miatt használtam `Serial.print` parancsot, és még egy időzítés `delay(10)` a végén hogy ne menjen végbe túl gyorsan a program. A programot több prototípus után és tapasztalás útján írtam meg. Végül megbízhatóan képes lett követni a fényforrás különböző fényviszonyok között is, köszönhetően az erősítésnek.

## Eredmény

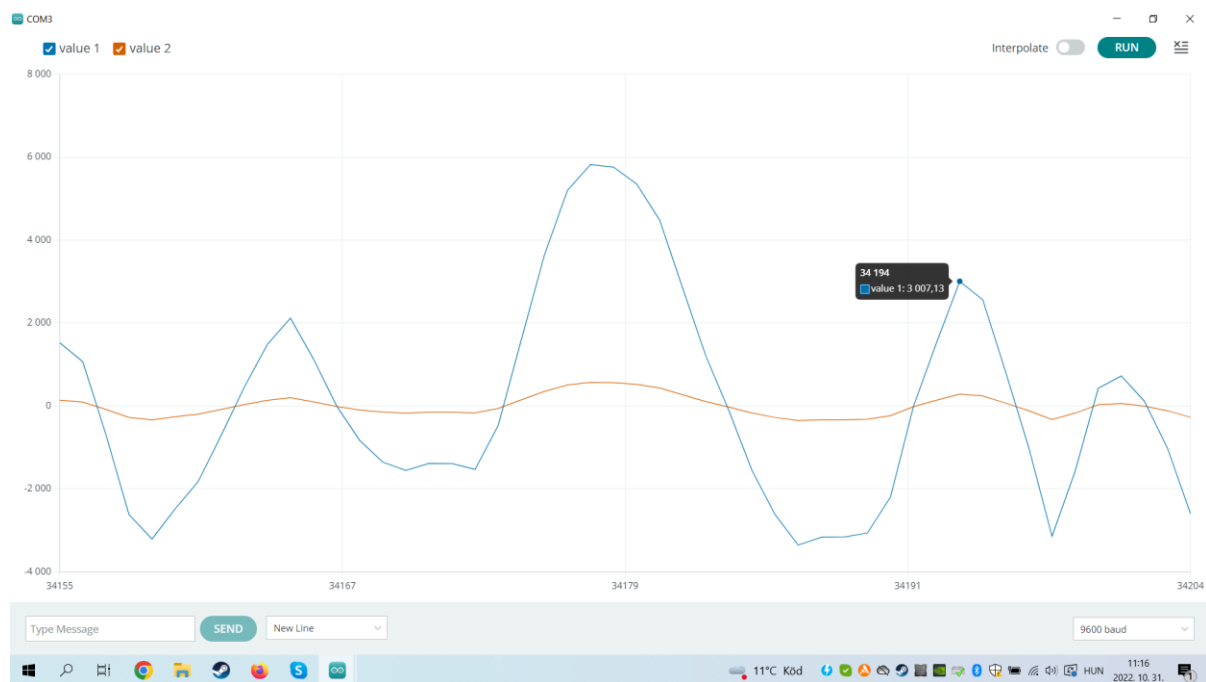


15.ábra:  $A_p = 1$   $A_i = 1$  [8]

A value 1 a beavatkozó(rotate) jel ez a jel forgatja a készüléket. A value 2 a két fotodióda által érzékelt fényerősség különbségének jele (`sensorValue1 - sensorValue2`). A két jel között az eltérés nagysága jelenti azt, hogy az érzékelt fényre, miként reagál a készülék. Minél kisebb a különbség annál jobban képes követni a fény irányát. Az ábrán a két jel között nincs jelentős eltérés. A modell ezért jelen beállítási adatokkal egy sikeres szabályozási rendszernek mondható. Ezen szabályozó

működésének beállítását tapasztalati módon csináltam. Az ábrán a value 1-en jól kivehető egyenes részeken a dead zone hatását láthatjuk.

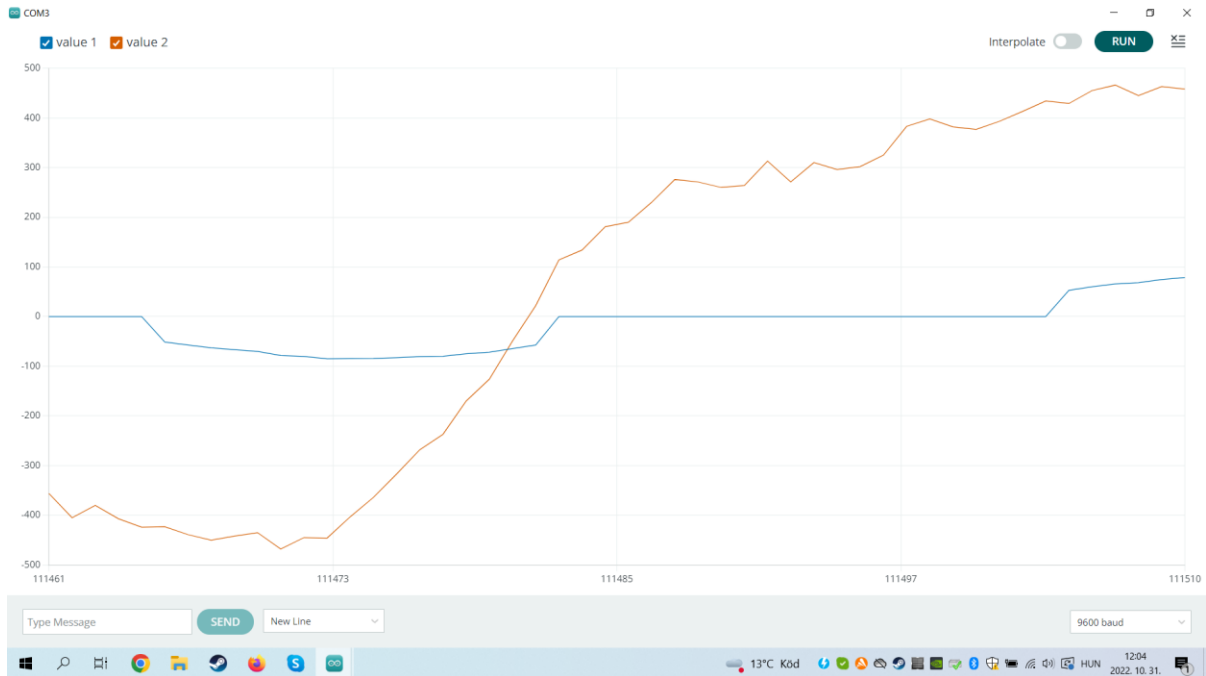
Ha az arányos erősítés ( $A_p$ ) értékét 10 szorosára növeltem, már a két érzékelő között fellépő aránylag kicsi fény különbség hatására is elkezdett mozogni az eszköz. Ez gyenge gyors pontszerű fényhatás lekövetésére alkalmas volt, de erősebb lassú vagy egyirányú fény hatására látszólagosan oda vissza kezdett rezegni. Ezen körülmények között folyton mozgásban van a rendszer, ebből adódóan nem célszerű a Nap követésére. Nem lenne hatékony befektetett és megtérült energia arány szempontjából, ha Napelemmel lenne megvalósítva. Az ábrán is látszik, hogy az eszköz minden kis fénykülönbségre (value 2 / narancssárga) jelentős reakciót ad (value 1 / kék). A túl nagy reakció miatt túl forog a fényforráson, ezért aztán ismét fénykülönbséget érzékel, ami miatt az ellenkező irányba fordul túl és kezdődik az egész újra.



16.ábra:  $A_p = 10$  [8]

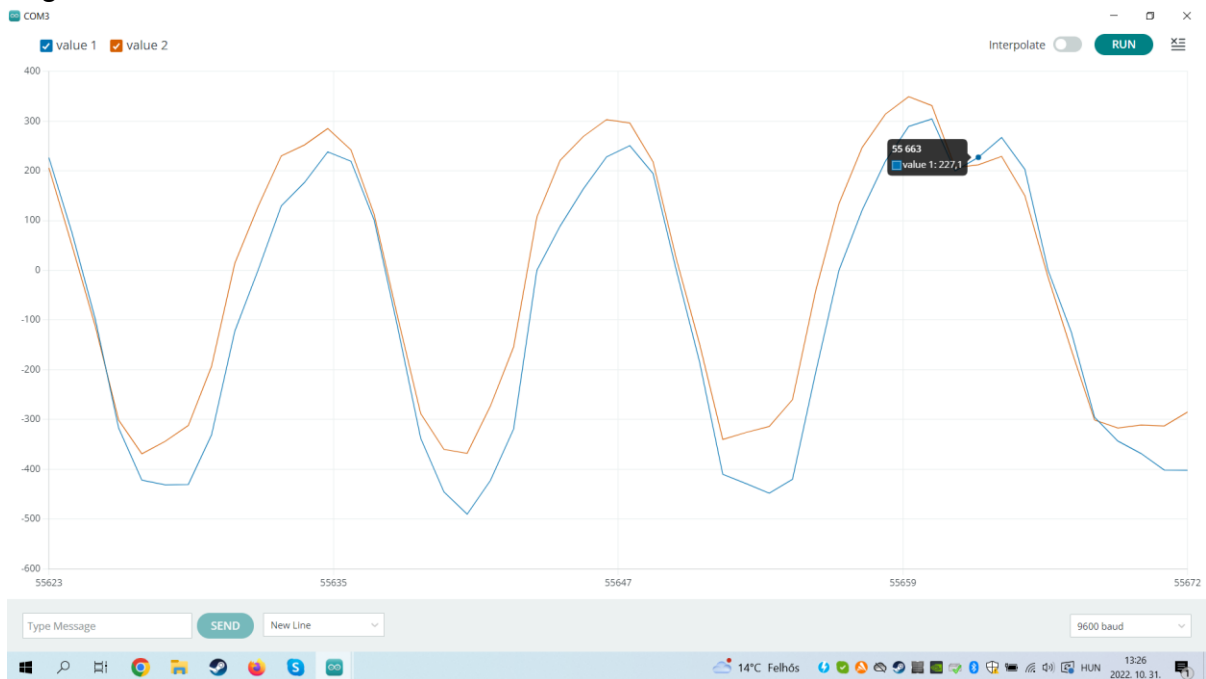
Ha az arányos erősítés ( $A_p$ ) értékét 0.1 szorosára növeltem az egész fordítottan működött. Kis fény különbségre nem reagált. Gyorsan mozgó fénynél többször túlfordult annyira, hogy utána nem volt képes a fényforrás irányába beállni, mert az érzékelőkre nem jutott elég fény. Ez a beállítás alkalmas olyan nagy, erős és lassú fényforrás követésére, mint a Nap. A napelemek viszont nem lennének képesek tartani 90 fokhoz közeli szöveget a napsugarakkal, mivel a készülék késve fordulna a Nap után. Az ábrán jól látszik, hogy sokkal nagyobb fényerősség különbségnek kell lennie, ha azt eléri, akkor kezd a készülék fordulni. A value 1-en látható vízszintessel 45 fokot bezáró rész a dead zone miatt.





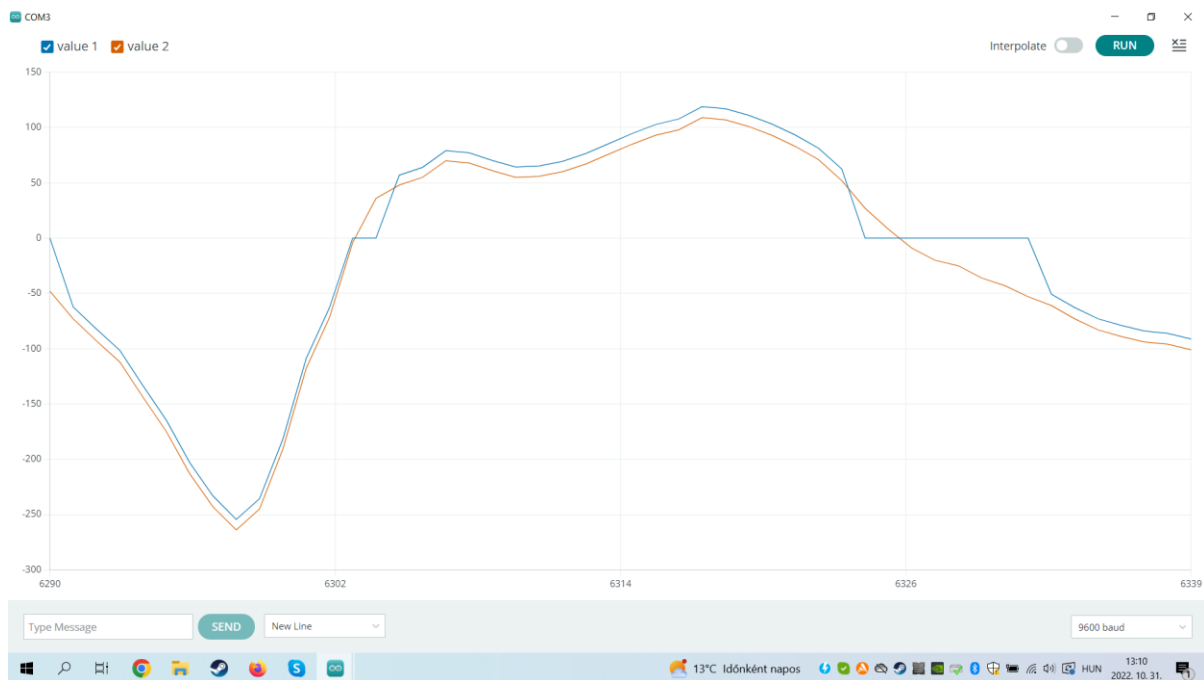
17.ábra:  $A_p = 0.1$  [8]

Ha az  $A_i$  integrált erősítő értékét 10 szerezére növeltem tapasztalatom hasonló volt, mint amikor az arányos erősítést lecsökkentettem, a gyenge fényt jól követte, viszont már a Nap fényétől elkezdte az oda vissza mozgást. A kettő között az általam tapasztalt különbség az volt, hogy ez az oda vissza forgást sokkal lassabban végezte.



18.ábra:  $A_i = 10$  [8]

Ha az Ai integrált erősítő értékét 0.1 szerezére növeltem meg nem tapasztaltam látható változást és az ábrát megnézve is arra jöttem rá, hogy alig van különbség a kezdeni 15. ábrához képest, ha a value 1 és 2 közötti különbséget nézzük. Itt is jól látható a dead zone.



19.ábra:  $A_i = 0.1$  [8]

# Irodalomjegyzék

- [1] 3.37. Megújuló energiaforrások.(3.ábra.) <https://www.ksh.hu/ffi/3-37.html>  
(hozzáférés ideje: 2022. október 2.)
- [2]Natural gas prices historical chart. <https://www.macrotrends.net/2478/natural-gas-prices-historical-chart>  
(hozzáférés ideje: 2022. október 2.)
- [3] *Vélemények a megújuló energiaforrások használatáról.* <https://www.forsense.hu/velemenyek-a-megujulo-energiaforrasok-hasznalatarol/>  
(hozzáférés ideje: 2022. október 2.)
- [4]Dr. Feierabend Izabella, Kirchkeszner Csaba. *Szélerőmű-balesetek okai és gyakorisága.*  
<https://www.paks2.hu/documents/20124/286244/Elemz%C5%91%20percek%20087.%20r%C3%A9sz%20-%202021.%2009.%2007.%20-%20Sz%C3%A9ler%C5%91m%C5%B1-balesetek.pdf/90715da0-51fa-c6bc-c647-284c7d074fd7>  
(hozzáférés ideje: 2022. október 2.)
- [5] Péter. *Napkövető napelemes rendszer ismertetése – Miért hatékonyabb?*  
<https://napelemtanacsok.hu/napkoveto-napelemes-rendszer/> (hozzáférés ideje: 2022. október 2.)
- [6] Catherine Lane. *What is a solar tracker and is it worth the investment?*  
<https://www.solarreviews.com/blog/are-solar-axis-trackers-worth-the-additional-investment>  
(hozzáférés ideje: 2022. október 2.)
- [7] Kiss Bálint. Szabályozástechnika előadás anyagok (2022) BME IIT
- [8] Az ábrák saját készítésűek
- [9] Kép <https://www.distrelec.hu/hu/mikrovezerlo-modul-mega2560-r3-arduino-a000067/p/11038920>  
(hozzáférés ideje: 2022. október 31.)