

Detektorok jelének kiértékelése mesterséges intelligencia segítségével

Bevezetés

A fizikai kísérletek során használt detektorok jelkiértékelése gyakran időigényes manuális folyamatokat igényel, különösen nagy adatmennyiségek esetén. A hagyományos módszerek korlátai mellett azonban a mesterséges intelligencia (AI) alapú automatizálás új lehetőségeket nyit a valós idejű adatfeldolgozás területén. Bár az AI-t már széles körben alkalmazzák spektrális elemzésre[1], a jelen munka újdonsága abban rejlik, hogy egyszerű, alacsony költségű LED-szenzorok és egy mikrokontroller alapú rendszer segítségével valósítja meg a gyors és pontos osztályozást.

A kidolgozott módszer hat különböző színű LED-et használ detektorként, amelyek fotovoltaiikus üzemmódban képesek a beeső fény spektrális jellemzőit feszültségjelekké alakítani. Az ESP32 mikrokontroller ezeket az adatokat gyűjti, majd egy gépi tanulási modell elemzi és osztályozza őket – például a fény színének vagy intenzitásának meghatározására. A rendszer kifejezetten oktatási célokat szolgál, lehetővé téve a diákok számára, hogy közvetlenül megismerjék a modern adatfeldolgozás és AI alapú döntéshozatal gyakorlati alkalmazását.

A megközelítés előnye nem csupán a költséghatékonyság és az egyszerű megvalósíthatóság, hanem az is, hogy a felhasználók saját méréseiken keresztül tanulmányozhatják a fizikai jelenségeket és az AI általuk generált adatokon való működését. A jelen cikk bemutatja a hardver és szoftver felépítését, valamint az AI-modell tanításának és alkalmazásának módszertanát.

1. A detektor működésének fizikai alapjai

A LED-ek nemcsak fényforrásként, hanem fényérzékelőként is működhetnek. Normál üzemmódban elektrolumineszcens fénykibocsátásra képesek, de fordított polarításban – külső fény hatására – fotofeszültséget generálnak a belső fotoeffektus révén. Ennek során azok a fotonok, amelyek energiája elegendő:

$$E = h \cdot f \geq E_g$$

elektron–lyuk párokat hoznak létre a félvezetőben, amelyeket a p–n átmenet elektromos tere szétválaszt.

A LED-diódák fotodetektorként való használata azonban több fizikai hatás figyelembevételét igényli. Vegyük példaként egy piros LED-et, amelynek fénykibocsátó rétege jellemzően GaAsP vagy AlInGaP anyagból készül. A kibocsátott fény hullámhossza 620–650 nm, ami a tiltott sáv (bandgap) szélességéből következően kb. 1,8–2,0 eV energiatartománynak felel meg.

A belső fotoeffektus hatására csak azok a fotonok képesek töltéshordozókat kelteni, amelyek energiája meghaladja a félvezető tiltott sáv szélességét. Ezért a pirosnál hosszabb hullámhosszú (alacsonyabb energiájú) fotonok nem hoznak létre elektron–lyuk párokat, így fotoáram sem keletkezik, ha ilyen fény világítja meg a LED-et.

Ugyanakkor a piros LED geometriai kialakítása elsősorban fénykibocsátásra optimalizált. A szerkezetében található vastag aktív réteg képes elnyelni a nagyobb energiájú (pl. 350 nm-es UV) fotonokat is, ám ezek detektálása korlátozott, mivel:

- a p–n átmenet mélyen helyezkedik el az eszköz belsejében,
- az UV-fotonok által keltett elektron–lyuk párok jelentős része rekombinálódik a felületen, mielőtt mérhető jel keletkezne.

Ez alapján az várható, hogy:

- a piros LED érzéketlen lesz a pirosnál hosszabb hullámhosszú (pl. infravörös) fényre,
- az UV-tartományban is 0 V körüli választ ad, mivel a felépítése nem teszi lehetővé a hatékony detektálást.

A legnagyobb érzékenység a saját tiltott sáv szélességéhez közeli fotonenergiák esetén várható. A spektrum narancs–zöld tartományában az érzékenység fokozatosan csökken.

Elektromos viselkedés – kimeneti feszültség

A detektorként használt LED lezárása egy 5,6 M Ω -os ellenállással azt eredményezi, hogy a fény hatására keletkező kis mértékű fotoáram hatására feszültség jelenik meg a LED kivezetésein. Ez a feszültség:

- arányos a megvilágító fény intenzitásával (azaz a keletkező töltéshordozók számával),
- de nem haladhatja meg a félvezető anyag E_g tiltott sáv szélességéhez tartozó feszültséget, azaz kb. 1,8–2,0 V.

A mérési eredmények ezt a várakozást igazolják, amint az alábbi táblázat is mutatja.

Kísérleti eredmények – Mért feszültségek különböző színű LED-fényekre

Szín	Hullámhossz (nm)	Fotonenergia (eV)	Mért feszültség (V)
Piros (R)	~620–650	~1,9–2,0	1,46
Narancs (O)	~590–620	~2,0–2,1	0,55
Zöld (G)	~495–570	~2,1–2,5	1,03
Kék (B)	~450–495	~2,5–2,75	1,41
UV	~350–400	~3,1–3,5	0,01 (zajszint)

Összegzés

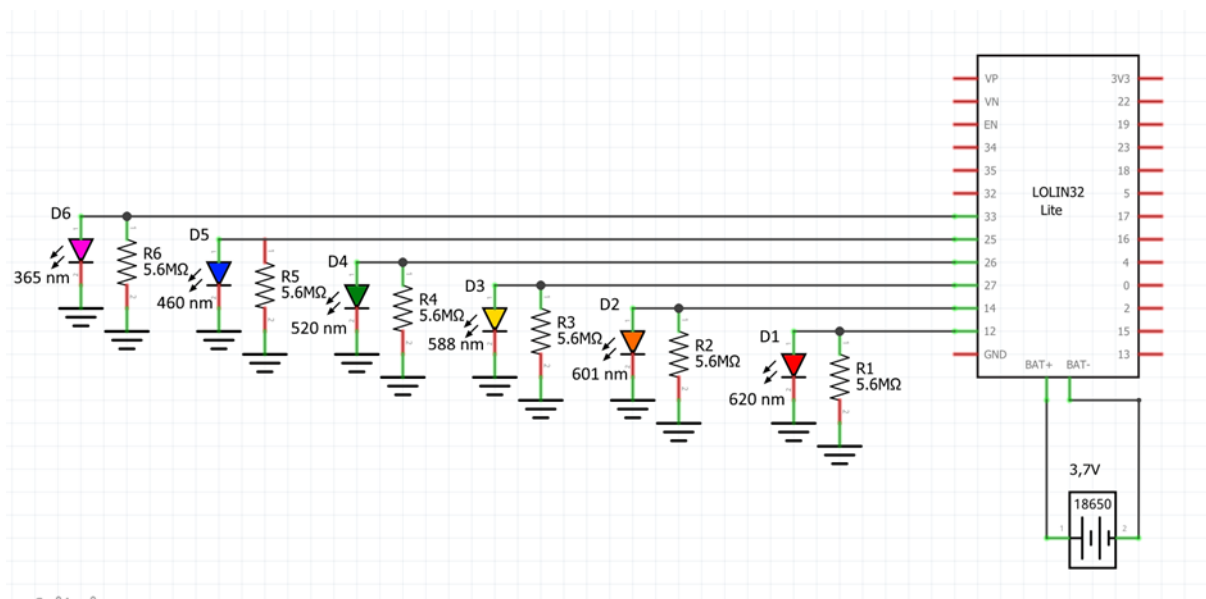
A piros LED fotodetektorként nemcsak a saját színére, hanem a rövidebb hullámhosszú, nagyobb energiájú fényekre is érzékeny lehet. Azonban az UV-fényre adott válasza már minimális, mivel a struktúrája nem teszi lehetővé a hatékony detektálást ebben a tartományban.

A detektált feszültség felső határát a félvezető tiltott sáv szélessége korlátozza.

A leírt jelenségek nemcsak a piros LED-re, hanem más színű LED-ekre is igaznak bizonyultak. Ez is indokolja azt a megközelítést, hogy a detektorjelek kiértékeléséhez célszerű mesterséges intelligencia (MI) alkalmazása, különösen akkor, ha azt szeretnénk eldönteni, hogy milyen színű fényforrással történt a megvilágítás. [2][3][4]

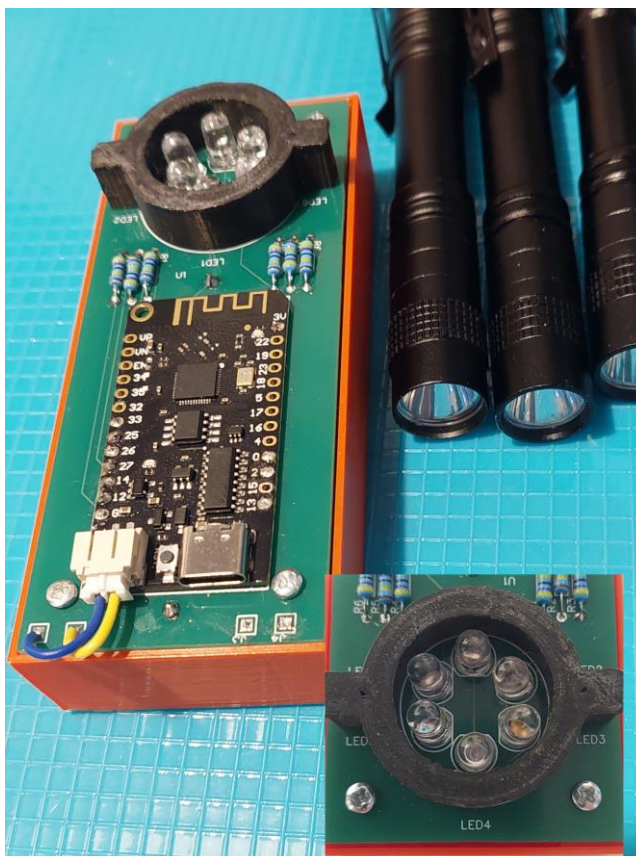
2. A minimális hardverfelépítés

A rendszer magját egy ESP32 alapú mikrokontroller alkotja (~1500 Ft), mely integrált Wi-Fi/Bluetooth kommunikációval és elegendő számú analóg bemenettel rendelkezik. Ez lehetővé teszi a szenzoradatok valós idejű rögzítését és vezetékes/vezeték nélküli továbbítását (1. ábra).



1. ábra: A mérőeszköz kapcsolási rajza

A detektor egység hat spektrálisan optimalizált, 5mm átmérőjű LED-ből áll (365 nm, 460 nm, 520 nm, 588 nm, 601 nm, 620 nm), amelyek átlátszó házban kör alakban vannak elhelyezve (2. ábra) a fény egyenletes eloszlásához.



2. ábra: A detektor geometriája

Minden LED anódja egy 5,6 MΩ-os munkaellenálláson keresztül csatlakozik az ESP32 ADC bemeneteihez. Az elrendezés fotovoltaikus üzemmódban működik, ahol:

- A LED-ek fényérzékeny félvezetőként viselkednek
- A generált fotoáram a munkaellenálláson feszültséggé alakul
- Az ESP32 digitálisan mintavételez és továbbítja az adatokat

Kritikus tervezési szempontok:

- Passzív működés (külső tápellátás nem szükséges)
- Közvetlen ADC csatlakozás (nincs jelkondicionáló áramkör)
- Kompakt elrendezés (átlátszó ház biztosítja az optikai csatolást)

A hardver kialakítása lehetővé teszi a későbbi fejlesztéseket, például külső fényzáró burkolat vagy szűrők hozzáadását pontosabb spektrális mérésekhez.

3. Az ESP32-n futó szoftver

Az ESP32 mikrokontroller Arduino IDE-ben fejlesztett firmware-e 200 ms időközönként mintavételezi a hat LED-szenzor analóg jeleit, és a nyers feszültségértékeket CSV formátumban továbbítja USB-n vagy Bluetooth-on keresztül. A szoftver szándékosan nem végez adatfeldolgozást – ez lehetővé teszi, hogy a gépi tanulási modell különböző eszközökön (PC, okostelefon) fusson, miközben a hardver marad.

A rendszer modularitását hangsúlyozza, hogy a [firmware nyílt forráskódú](#), így testre szabható az oktatási vagy kutatási igényekhez. A kód tartalmaz konfigurációs lehetőségeket a kommunikációs protokollok (UART/BLE) paramétereinek módosítására, valamint diagnosztikai üzenetek küldésére hibakeresés céljából.

4. Az AI-modell szerepe a kiértékelésben

A rendszer a hat LED-szenzor nyers feszültségadatait gépi tanulási modell segítségével dolgozza fel. A modell a különböző színű fényforrásokra jellemző feszültség-mintázatokat tanulja meg, lehetővé téve a mért fény színének (piros, zöld, kék stb.) vagy hiányának (sötét) automatikus azonosítását.

A betanítás során címkézett adatokat használunk - a LED-ek válaszait párosítjuk az ismert fényforrások színével. A betanított modell valós időben képes osztályozni az új méréseket, és értékelni a döntés megbízhatóságát, ami különösen hasznos kevert színek vagy határesetek esetén.

A rendszer egyszerű gépi tanulási algoritmusokat alkalmaz (pl. döntési¹ fa, KNN²), de lehetőséget nyújt különböző modellek kipróbálására is. Ez kiváló oktatási lehetőséget biztosít a gépi tanulás alapjainak megértéséhez.

A feldolgozás C# vagy Python (Jupyter notebook) környezetben valósítható meg. Az interaktív megvalósítás lehetővé teszi, hogy a felhasználók valós idejű visszajelzést kapjanak a modell döntéseiről. A rendszer minden predikcióhoz valószínűségi értéket is rendel, így értékelhető a döntés biztonsága.

¹ Döntési fa: A döntéseket egy fa-szerű struktúrával modellezi, ahol minden csomópont egy feltételes elágazást reprezentál a bemeneti jellemzők alapján.

² KNN: A K Legközelebbi Szomszéd (angolul *K-Nearest Neighbors*) algoritmus rövidítése, egy egyszerű, de hatékony gépi tanulási módszer osztályozási és regressziós feladatokra.

Az általam készített példaalkalmazás a Microsoft Machine Learning ([ML.NET](#)) keretrendszert használja, amely lehetővé teszi gépi tanulási modellek fejlesztését .NET környezetben. Főbb jellemzők:

- KNN és döntési fa implementáció egyszerű API-val
- Valós idejű predikció betöltött modellel
- Adatbetöltés CSV fájlból (TextLoader)
- Modell kiértékelés metrikákkal (pontosság, konfúziós mátrix)
- Nyílt forráskódú

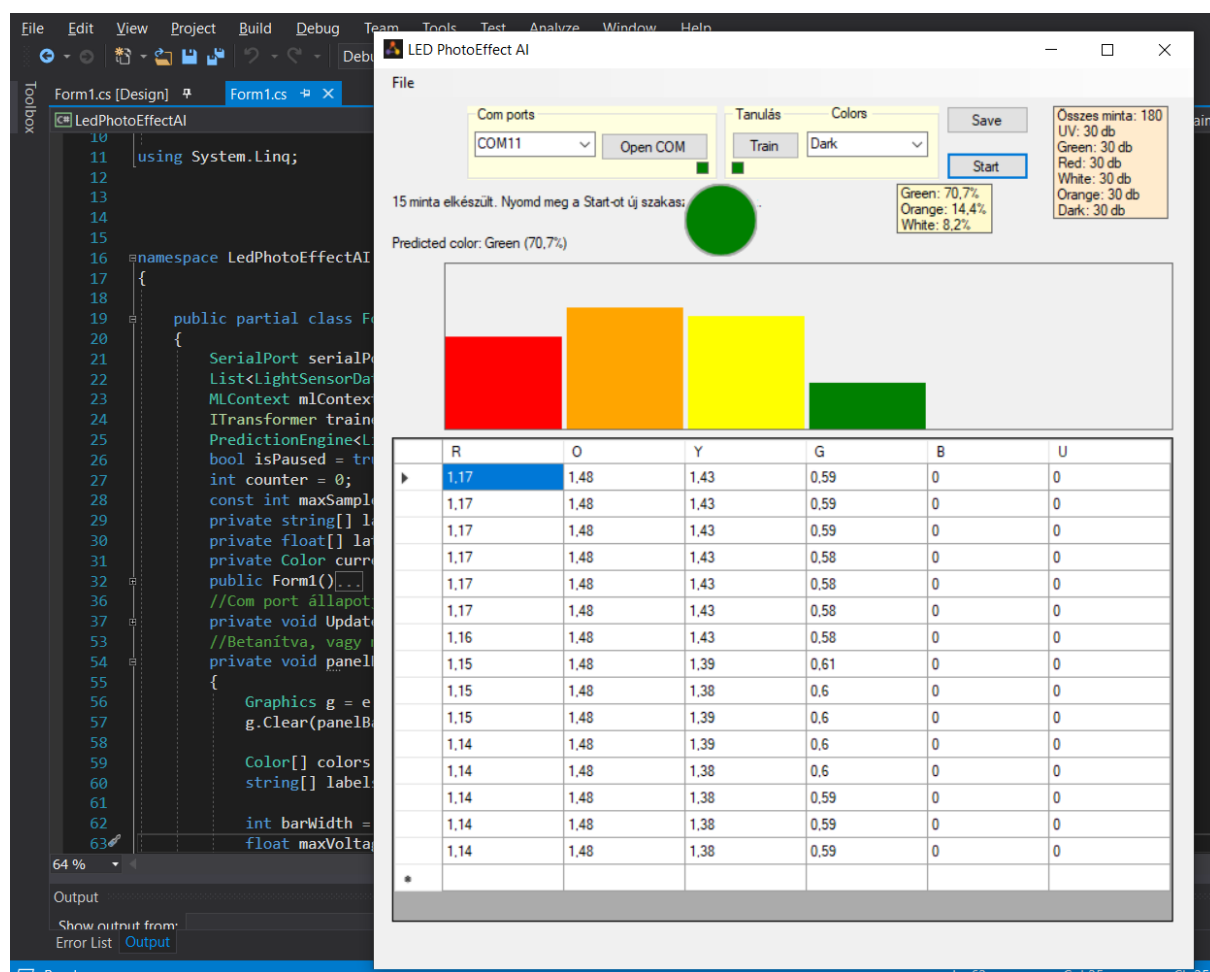
A teszteléshez készítettem egy példaalkalmazást, melynek nyílt forráskódja elérhető [itt](#).

5. A C#-ban írt mintaalkalmazás bemutatása

A kiértékelő rendszer egy Windows operációs rendszeren futó, C# nyelven fejlesztett asztali mintaalkalmazás, amely az ESP32 mikrokontrollertől érkező adatokat dolgozza fel és jeleníti meg. Az alkalmazás a következő fő funkciókat valósítja meg:

- ✓ Valós idejű adatfogadás soros porton keresztül (COM-port, 9600 baud), ahol minden sor hat mért feszültségértéket tartalmaz.
- ✓ Adatok rögzítése és címkézése: a felhasználó kiválaszthatja az adott minta színét (pl. *Red*, *Green*, *UV* stb.), majd az adatokat CSV fájlba mentheti tanítás céljára.
- ✓ AI-modell betanítása: a beépített gépi tanulási pipeline a Microsoft ML.NET keretrendszerét használja, ahol a betanítás történhet frissen gyűjtött vagy fájlból betöltött adatokkal. A modell többosztályos osztályozó algoritmust (LbfgsMaximumEntropy) alkalmaz.
- ✓ Valós idejű osztályozás: betanítás után az újonnan beérkező szenzoradatokat a program automatikusan osztályozza, majd a legvalószínűbb színt megjeleníti.
- ✓ Predikciós valószínűségek megjelenítése: a program nemcsak a legvalószínűbb színt mutatja, hanem a három legvalószínűbb kategória nevét és százalékos esélyét is.
- ✓ Interaktív vizualizáció: a szenzoradatok táblázatban jelennek meg, a tanítóadatok statisztikája folyamatosan frissül.

Az alkalmazás kezelőfelületének ablaka a 3. ábrán látható



3. ábra: A C#-ban írt mintaalkalmazás vezérlőfelülete

Az alkalmazás célja nemcsak a technikai működés biztosítása, hanem az is, hogy tanórai környezetben a tanulók saját maguk is betaníthassák és kipróbálhassák a modellt, így közvetlen élményük legyen a gépi tanulás működéséről. A teljes forráskód és a program telepítője itt [elérhető](#) és szabadon felhasználható.

6. Tanórai alkalmazás és oktatási lehetőségek

A bemutatott detektorrendszer és a hozzá kapcsolódó szoftveres környezet kiválóan alkalmazható középiskolai fizika vagy Science órákon, különösen olyan témák feldolgozására, mint a fény és anyag kölcsönhatása, a fotoeffektus, a szenzortechnika, valamint a mesterséges intelligencia alapfogalmai.

6.1. Tantárgyi kapcsolódások

- **Fizika:** belső fotoeffektus, félvezetők működése, fény hullámhossza, elektromos feszültség mérése.
- **Digitális kultúra/Informatika:** adatgyűjtés, adatfeldolgozás, programozás, MI-modellek működése.
- **Kutató projekteken alapuló tanulás:** tanulók saját mintavétele és modelltanítása.

6.2. Tanulói tevékenységek

A rendszer használata során a tanulók aktívan bekapcsolódhatnak a kísérletbe:

A szenzor segítségével különböző fényforrásokat vizsgálnak (pl. LED, telefon vaku, napfény, UV-lámpa).

Méréseket végeznek és adatokat gyűjtenek egy-egy színosztályhoz.

Az adatokat elmentik, címkézik, majd a modellt betanítják.

Valós időben tesztelik az osztályozó működését, és értelmezik a predikciók valószínűségeket.

Megbeszéljük, mikor téved a modell, és mitől válik megbízhatóbbá.

Ez a megközelítés lehetőséget ad arra, hogy a tanulók: kísérletező módon ismerkedjenek meg a mesterséges intelligencia alapjaival, megtapasztalják a szenzoradatok fizikai jelentését, megtanulják, hogyan kell adatokat gyűjteni, elemezni és feldolgozni.

6.3. Didaktikai előnyök

- **Projektalapú tanulás:** a diákok valódi problémát oldanak meg, amit ők maguk taníthatnak be és értékelhetnek ki.
- **Interdiszciplinaritás:** természettudományos és informatikai tartalmak összehangolása.
- **Motiváció és önállóság:** a tanulók látható, kézzel fogható eredményt produkálnak – működő, tanítható AI-rendszert.

[1] [Machine Learning Techniques for Optical Spectrum Analysis" \(IEEE Photonics Journal\)](#)

[2] E. Vannacci, S. Granchi *, M. Calzolari, E. Biagi: [Applications of light emitting diodes as sensors of their own emitted light](#) (Department of Information Engineering (DINFO), University of Florence, Via Santa Marta 3, 50139 Florence)

[3] Homemade-physics.de: [bandluecke-photonenenergie](#)

[4] Schirripa Spagnolo, G., Leccese, F., Leccisi, M. (2019). [LED as transmitter and receiver of light: A simple tool to demonstration photoelectric effect](#). CRYSTALS, 9(10), 531 [10.3390/cryst9100531].