



SZAKDOLGOZAT

GYÓGYSZERGYÁRI SZENNYVÍZ IRÁNYÍTÁSÁNAK SZÁMÍTÓGÉPES VEZÉRLÉSE INTELLIGENS TECHNOLÓGIÁK ALKALMAZÁSÁVAL

Szerző:

Ivanics Péter

mérnök informatikus szak, III. évf.

Konzulens:

Nagyné Dr. Hajnal Éva

egyetemi docens

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A feladat ismertetése.....	4
3. A probléma háttere.....	6
3.1. A mérés alapelve.....	6
3.2. Mérési eredmények.....	6
3.3. A KOI és a BRIX közötti összefüggés meghatározása	7
3.3.1. Összefüggések keresése	7
3.3.2. A logisztikus modell	9
3.4. Genetikus algoritmusok felhasználása folyamatok irányításában	16
4. Módszerek és eredmények.....	19
4.1. A tartályba befolyó szennyvíz KOI értékének meghatározása	19
4.1.1. Átlagos KOI.....	19
4.1.2. Kumulatív KOI	20
4.2. A logisztikus matematikai modell tesztelése	21
4.3. Bilineáris modell.....	24
4.3.1. A modell kidolgozása	24
4.3.2. A modell értékelése	26
4.4. A vezérlőmodul	26
4.4.1. A váltott üzemmódú rendszer tesztelése.....	26
4.4.2. A közvetlen vezérlésű rendszer (Direct Control Module, DCM)	27
4.4.3. A DCM rendszer működésének általánosítása (Intelligent Control Module, ICM)	30
4.5. Értékelés	34
5. Tartalmi összefoglaló.....	36
6. Summary	37
7. Irodalomjegyzék	38
8. Függelék.....	39

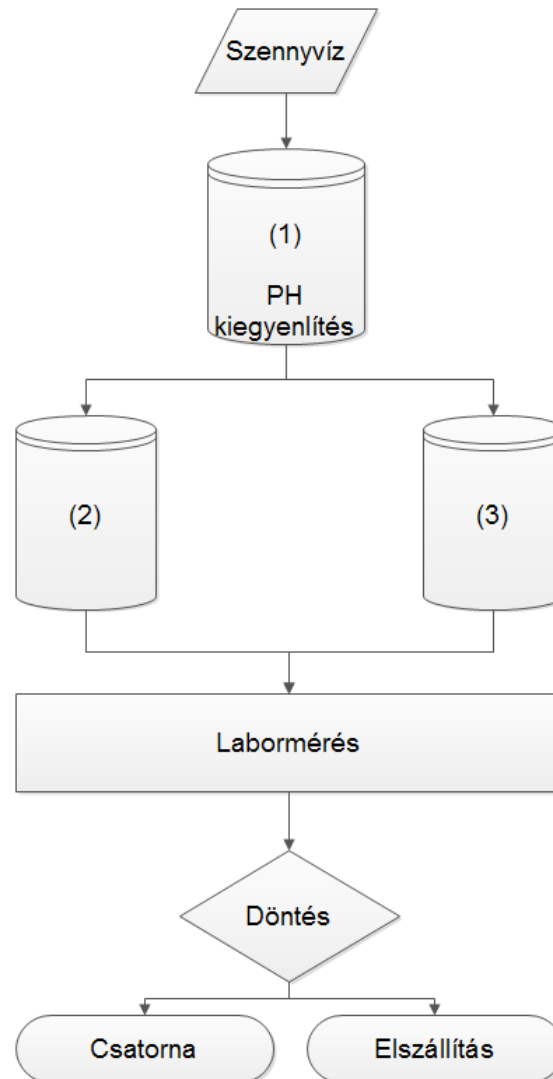
1. Bevezetés

Manapság a környezetvédelem nagyon fontos szempont az ipari tevékenységet végző vállalatok és gyárak életében. Sok helyen foglalkoznak ezzel a témával, többek között a szennyvízkezelés területén is [1, 2, 3, 4]. Magyarországon szigorú jogszabályok vonatkoznak a közcsontra engedhető kommunális szennyvíz paramétereire és összetételére, melyet többek között az KvVM 2004/28 rendelete szabályoz [5]. Ezen rendelet meghatározza a kiengedhető szennyvíz pH-ját, maximális kémiai oxigénigényét (továbbiakban KOI), szárazanyagtartalmát, biokémiai oxigénigényét, nitrogéntartalmát stb. Amennyiben ezek a paraméterek megfelelnek az előírásoknak, a szennyvíz kibocsátható a csatornába.

Dolgozatom célja egy olyan szoftver kifejlesztésének előkészítése, amely egy mérőműszer-rendszer adatait felhasználva egy matematikai modell alapján kiszámítja a szennyvízre jellemző paramétereket, valamint a fent említett rendelet szabályait figyelembe véve vezérli a szennyvizet, ezáltal megakadályozva, hogy határérték feletti szennyvíz kerüljön a közcsontra. A rendszer valós idejű működést biztosít, ezáltal kiváltva a laborméréseket, melyek a szennyvíz összetételének meghatározásához elengedhetetlenek a rendszer használatának hiányában. A munka során a rendszer működésének modellezésére a Matlab 7.0 szoftvert használtam.

2. A feladat ismertetése

A szennyvíz egy magyar gyógyszergyár által a gyógyszerek felületére gyártott cukorbevonat gyártási folyamatai, valamint a felhasznált műszerek mosása során keletkezik. A gyógyszergyári szennyvíz javarészt (mintegy 90%) cukrot tartalmaz, de emellett megtalálhatók más oldott és szuszpendált adalékanyagok is (pl. citromsav, és sói, színezőanyagok, talkum).



1. ábra: A jelenlegi rendszer működési vázlata

A jelenlegi vezérlőrendszer (1. ábra) kiegyenlíti a gyárból érkező szennyvíz pH-ját egy tartály segítségével, majd az így keletkező vizet két további tartályba gyűjti. Amint az egyik tartály megtelik, tartalmából mintát vesznek, melynek paramétereit ($KOI [\frac{mg}{l}]$, pH, vezetőképesség $[\mu S]$, hőmérséklet $[^{\circ}C]$ stb.)

laboratóriumi mérések során határozzák meg. Ez több percet is igénybe vesz, viszont nagy pontossággal megmutatja a mért paraméterek értékét. Amennyiben a paraméterek meg-felelőek, a tartály tartalmát kiengedik a csatornába, viszont ha megszegik a korlátozásokat, ezt nem lehet megtenni. Ebben az esetben a szennyvizet el kell szállítani további feldolgozásra. Mialatt az egyik tartály leeresztés alatt van, a másik tartályba gyűjthető a szennyvíz. A tartályok űrtartalma 24 m^3 .

A legnagyobb problémát a szennyvíz KOI értéke jelenti, amelynek csatornába engedéshez 1000 mg/l alatt kell lenni. A pH értéke mindig a megfelelő intervallumban van, ezért az 1-es tartályt fel lehet használni egyéb célokra a továbbiakban.

A KOI egységnyi mennyiségű vízben található szerves anyagok oxidálásához szükséges oxigén mennyiségéről nyújt tájékoztatást. Az oxidációt leggyakrabban kálium-permanganátos oldattal végzik kénsav jelenlétében (Kubel módszer), de a mérés lehetséges kálium-bikromátos módszer alkalmazásával is [6]. Mértékegysége: $\frac{\text{mg}}{\text{l}}$.

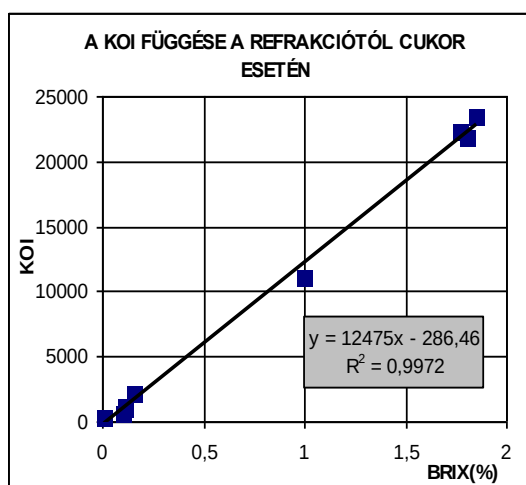
Első feladat egy olyan matematikai modellt kidolgozása, amely más – a labormérések adataitól eltérő – a szennyvízre jellemző mérhető adatok alapján képes a szennyvíz KOI értékét nagy precizitással számítani. További feladat (a gyár által biztosított labormérések felhasználásával) a kapott eredmények tesztelése és validálása.

Második lépésként egy rendszertervet állítok fel és vizsgálom, amely a jelenlegi irányítást hivatott lecserélni, ezáltal a szennyvíz kezelését környezetvédelmi és pénzügyi szempontokból hatékonyabbá teszi.

3. A probléma háttere

3.1. A mérés alapelve

A szennyvíz szerves anyag tartalmának refrakció méréssel történő meghatározása azon az elven alapul, hogy a törésmutató egyenesen arányos a víz cukortartalmával, így a mérés valójában cukoregyenértéket (BRIX [%]) mér. A KOI szintén arányos a szennyvíz szerves anyag tartalmával. Tiszta cukoroldat esetén a KOI és a BRIX között direkt kapcsolat van (2. ábra) meglehetősen magas korrelációval ($R=0,9986$), ezért gondolom azt, hogy a szennyvíz KOI értéke is számítható a BRIX alapján, viszont a szennyvízben található adalékanyagok törésmutatót módosító hatásai miatt a korreláció visszaesését eredményezhetik (sztochasztikus kapcsolat).



2. ábra: A KOI függése a cukoregyenértéktől (BRIX) tiszta cukoroldat esetén.

3.2. Mérési eredmények

Nagy mennyiségű refraktométeres, on-line mérés során meghatároztam az adott mintához adott időpontban tartozó cukoregyenérték (BRIX [%]), vezetőképesség (VK), pH és hőmérséklet (TEMP [°C]) értékeket, továbbá a tartályok aktuális szintjeit (LTM1 [%], LTM2 [%]) és a mosások időpontjait (Függelék 1. táblázat).

A mérőműszer optikáját időnként tisztítani kell, ezt a folyamatot mosásnak hívjuk. A mosás során a BRIX érték beáll 0.3-0.5% közé az eredeti értéktől függetlenül, ami valószínűleg a felkavarodás által keletkező légbuborékok

eredménye. Ilyenkor a pH érték is felmegy jellemzően 7.2 körüli értékre. Ez az állapot 1 perc után megszűnik és visszaáll az eredeti, normális működés.

Ebből kifolyólag törölni kell az adatsorból a mosási adatokat és az azokat követő két mérést. A mosás időtartamára egy átlagos szárazanyag tartalmat kell definiálni és ezekkel számolni a mosás ideje alatt.

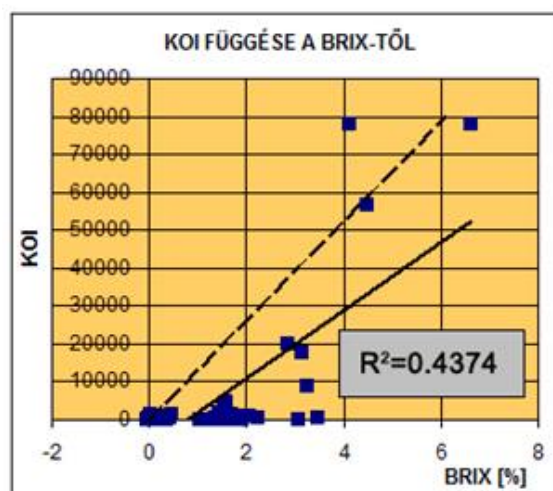
3.3. A KOI és a BRIX közötti összefüggés meghatározása

A kémiai oxigén igény (KOI) és a cukoregyenérték (BRIX) közötti összefüggések meghatározásához adott mintáknál, laboratóriumi körülmények között meghatároztam a hozzájuk tartozó KOI értékeket, amelyeket a Függelék 2. táblázata tartalmaz (128 mérés). A táblázatból látható hogy néhány adat (négy darab) erősen kilógott a sorból, valószínűleg nem egy időben (helyen) történt a mintavétel a refrakcióhoz és a KOI-hoz, ezért ezeket az adatpárokat töröltem. Mivel a továbbiakban lényeges feltételként szerepel a minták függetlensége, ezért törlésre kerültek az egynél többször előforduló adatpárok is.

Az így generált (tisztított) adatokat a 3. táblázat tartalmazza, a továbbiakban ezt az adatsort használok a KOI és BRIX közötti matematikai modell felállításához.

3.3.1. Összefüggések keresése

A laboratóriumban mért adatok alapján összefüggéseket lehet keresni az egyes paraméterek és a KOI között. Kijelenthetjük, hogy a vezetőképesség és a KOI között ($R=-0.0634$), valamint a pH és a KOI között nincs ($R=-0.0262$) korrelációs kapcsolat. Ennek oka valószínűleg a szennyvízbe kerülő adalékanyagok nagy mennyisége lehet. A vezetőképesség és a pH változása a vízbe kerülő lúgok és savak jó vezetőképességével magyarázható, míg a KOI változását a szennyvíz cukortartalma magyarázza.

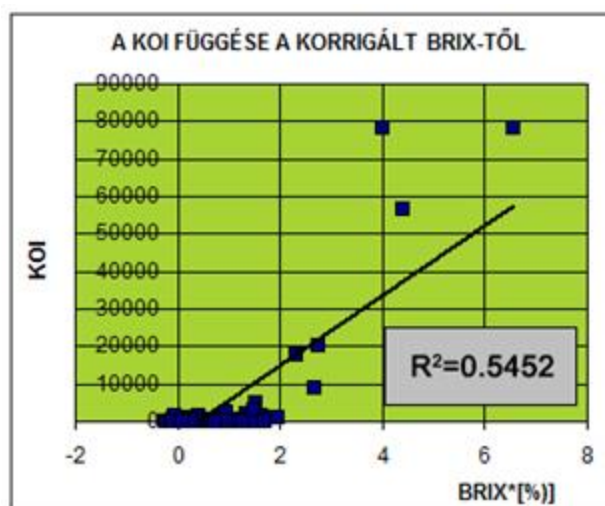


3. ábra: A kémiai oxigénigény (KOI) függése a cukoregyenértéktől (BRIX) a 2. táblázat adatai alapján. A vonal az illesztett egyenes, a szaggatott vonal a cukoroldatra vonatkozó összefüggés.

Tapasztalataim alapján a hőmérséklet befolyásolja a vezetőképesség változását, viszont a KOI szempontjából elhanyagolható, nincs különösebb szerepe. A BRIX és a KOI között elfogadható korrelációs együtthatót tapasztaltam ($R=0.6614$, 3. ábra), ezzel érdemes tovább dolgozni. Az így kapott korreláció még nem garantál kellő biztonságot a számítások pontosságához, ezért bevettem a vezetőképességet (VK) is a kalkulációba és képeztem a

$$BRIX^* = BRIX - \lambda * VK \quad (1)$$

korrigált refrakciót ($BRIX^*$). Ezáltal a korrelációs együttható értéke nő, maximumát ($R=0.7384$) pedig $\lambda = -0.1$ -nél éri el. Ezt a többlet-forgatást és a megnövekedett vezetőképességet valószínűleg a citromsav sói okozzák, melyek a KOI-ra közvetlenül nincsenek hatással. A 2. táblázatból kiszűrt adatok felhasználásával (melyek a 3. táblázatban találhatók) a korrelációs együttható tovább nő ($R=0.7954$), ami ugyan jobb illesztést ad az előzőnél, de jól látható (4. ábra), hogy a lineáris helyett egy szigmoid (vagy más néven logisztikus) görbe használatával tovább növelhető a korreláció.



4. ábra: A kémiai oxigénigény (KOI) függése a korrigált cukoregyenértéktől (BRIX*) a 2. táblázat adatai alapján.

3.3.2. A logisztikus modell

A KOI várható értékére (K) az említett közelítés az alábbi lesz (n-ed rendű tagig sorba fejtve):

$$\ln \frac{K}{K_{MAX} - K} = g_K(BRIX) = \sum_{i=1}^n a_i(BRIX^*), \quad (2)$$

ahol a_i a sorfejtés együtthatói, k_{MAX} pedig a KOI várható telítési értéke.

A mérési eredmények szórása (σ), a labormérések (x) négyzetes eltérése a KOI várható értéktől, K-tól, mint a BRIX* függvénye

$$\sigma^2 = (x - K)^2 \quad (3)$$

és az illeszthető görbe (2)-höz hasonlóan az alábbi lesz:

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_{MAX} - \sigma} = g_\sigma(BRIX) = \sum_{i=1}^n b_i(BRIX^*) \quad (4)$$

ahol b_i a sorfejtés együtthatói, σ_{MAX} pedig a szórás várható telítési értéke.

Az illesztés paramétervariálással (k_{MAX}, σ_{MAX}), polinom regresszióval történt (MATLAB szoftver segítségével). A regressziós együttható $n=1$ $R=0.9021$,

$n=2$ $R=0.9737$. Magasabb n értékeknél az R tovább nőtt, a σ_{MAX} viszont tartott a 0-hoz, melynek oka az, hogy nagy értékekre kevés volt a mérés, ezért a sorfejtésben $n=2$ -nél meg kellett állni.

A fenti illesztésnél az $R=0.9737$, tehát a logisztikus közelítés minden eddigi illesztésnél lényegesen jobb lett. Problémát jelentett, hogy míg kis BRIX értékekre jó volt az illeszkedés, nagyobbakra már kevésbé. Ennek oka, hogy kevés kiemelkedően nagy adatot mért a műszer, így a kis értékek „elhúzták” a görbét.

A kalibrációs görbe

Ezt a problémát (részben) úgy oldottam fel, hogy nagyjából azonos BRIX* tartományokra csoportokat képeztem (3. táblázat) és a csoportokon belül meghatároztam az átlagos BRIX* értékeket és a hozzájuk tartozó átlagos KOI mért értékeket és azok szórását az alábbi módon (m -edik tartományban).

Képeztem minden (m -edik) intervallumban az alábbi értékeket az átlagérték és a szórás képzési szabályainak megfelelően:

$$BRIX_m^* = \frac{1}{n_m} * \sum_m BRIX_i^*, \quad (5)$$

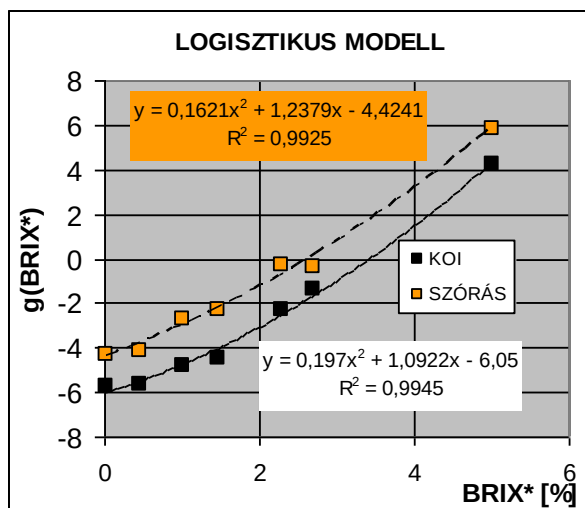
$$x_m = \frac{1}{n_m} * \sum_m x_i, \quad (6)$$

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_m (x_i - x_m)^2}{n_m - 1}}, \quad (7)$$

ahol az összegezést az m -edik intervallumban lévő i -edik mintára kell elvégezni és az n_m az adott intervallumba eső minták száma.

Ezen utóbbiból kiszámítottam a (2) és (4) logisztikus értékeket, majd ábrázoltam azokat a BRIX* függvényében (5. ábra). Ezekhez illesztettem a (2) és (4) összefüggés alapján függvényeket paraméter-variálással (K_{MAX} illetve σ_{MAX}), majd másodfokú polinom illesztéssel (MATLAB szoftver és szakirodalom

segítségével [7, 8]). A kapott paraméterek leolvashatók az 5. és 6. ábráról, nevezetesen a KOI várható értékére vonatkozóan: $a_0=-6,05$, $a_1=1,09$, $a_2=0,2$; továbbá $K_{MAX}=72000$; a szórásra vonatkozó értékek pedig a következők: $b_0=-4,42$, $b_1=1,38$, $b_2=0,16$, végül $\sigma_{MAX}=12500$.



5. ábra: A (2) és (4) logisztikus görbék másodrendű közelítésben a KOI-ra és a szórásra vonatkozóan.

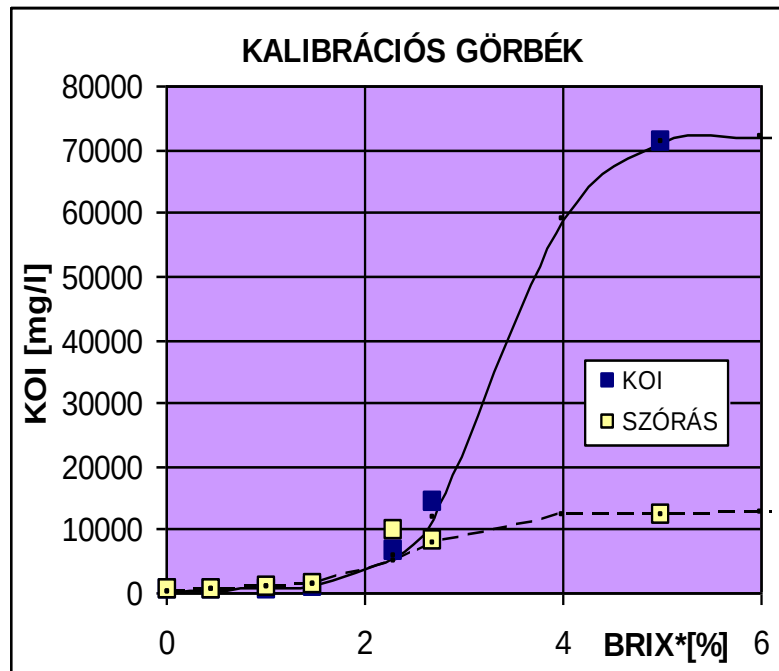
A (2) és (4) átrendezésével valamint a fent említett konstansok felhasználásával megkapható a KOI és a hozzátartozó szórás várható pillanatnyi értéke:

$$K_{PILLANATNYI} = \frac{e^{a+b*B^*+c*B^{*2}} * K_{MAX}}{1 + e^{a+b*B^*+c*B^{*2}}}, \quad (8)$$

ahol $a=-6,05$, $b=1,09$, $c=0,2$ és $K_{max}=71000$ és B^* a korrigált cukoregyenérték (BRIX*) értéke;

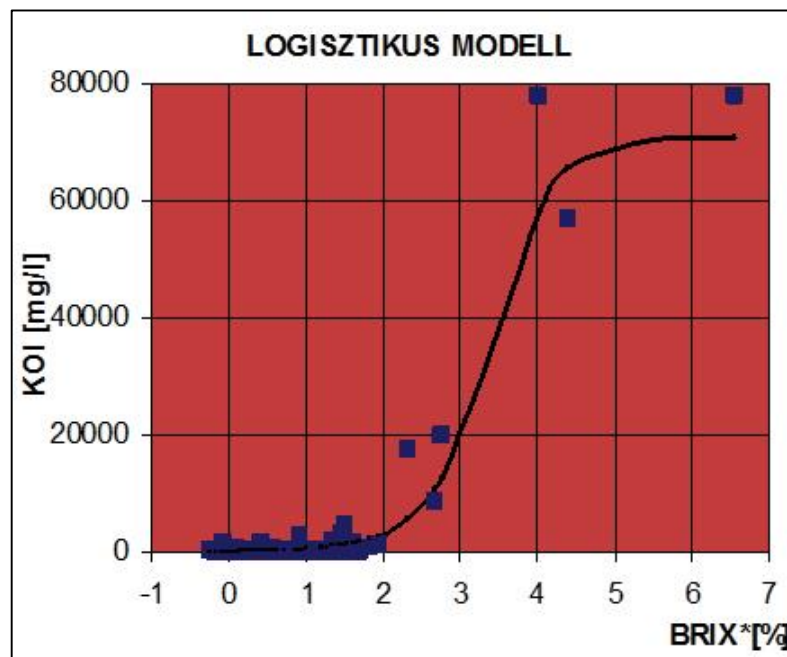
$$\sigma_{PILLANATNYI} = \frac{e^{a+b*B^*+c*B^{*2}} * \sigma_{MAX}}{1 + e^{a+b*B^*+c*B^{*2}}}, \quad (9)$$

ahol $a=-4,42$, $b=1,38$, $c=0,16$ és $\sigma_{MAX}=12500$ és B^* a korrigált cukoregyenérték (BRIX*) értéke.



6. ábra: A kalibrációs görbék a KOI számított értékeire és szórására az (5) és a (6) összefüggések szerint a fenti paraméterek mellett, mint a BRIX* függvényei. A szimbólumok a laboratóriumban mért KOI értékek, a vonal belőlük számított szórásértékeket jelöli

A 7. ábrán összevettem a KOI mért és számított adatait. A korrelációs tényező a logisztikus modell esetén $R=0.9775$ minden eddigénél jobb, azaz a számított és a mért adatok között jó a korreláció.



7. ábra: A mért KOI és a (7) szerint számított adatok a BRIX* függvényében.

Megbízhatósági határ

Feltételezhető, hogy az adott BRIX* értékhez tartozó KOI értékek normális eloszlást követnek. Ebben az esetben a KOI-nak a BRIX*-hoz tartozó mért értékei (x) 95%-os valószínűségi szinten, a (becsült) várható érték körül a kétszeres szórásmezőn ($\pm 2\sigma$) belül vannak, nevezetesen $P\{K - 2\sigma \leq x \leq K + 2\sigma\}$. Legyen

$$K^+ = K + 2\sigma \text{ a felső határ,}$$

$$K^- = K - 2\sigma \text{ az alsó határ } (K^- \geq 0).$$

(10)

Ez azt jelenti, hogy a mért értékek 95%-os valószínűséggel (100 mérésből átlagban 95) ezen két érték közé esnek.

A becsült értékekre tulajdonképpen csak felső korlátot lehet megadni, K^+ -t, ugyanis az alsó korlát (az érdekes kis BRIX* tartományban) már 95%-os valószínűségnél is $K^- \cong 0$. A felső korlát az adott valószínűségi szinthez ($1 - \epsilon$) tartozó maximális érték, pl. $\epsilon = 0.05$, azaz $1 - \epsilon = 0.95$ azt jelenti, hogy 100 esetből 5 esetben haladhatja meg a KOI a maximális értéket. Különböző valószínűségi szintekre (féloldali valószínűség) a következő összefüggés írható fel:

$$\Phi\left(\frac{K^+ - K}{\sigma}\right) = 1 - \epsilon,$$

(11)

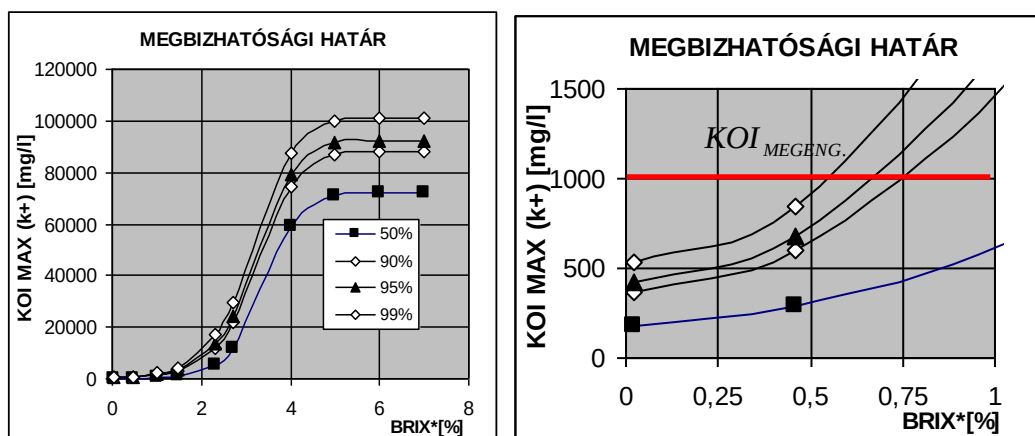
ahol Φ a standardizált normális eloszlás eloszlásfüggvénye. Ebből a K^+ , azaz a számítás alapján becsült maximális érték, mint a korrigált cukoregyenérték (BRIX*) függvénye az alábbi lesz:

$$K^+ = K + \sigma * \Phi^{-1}(1 - \epsilon),$$

(12)

ahol Φ^{-1} a standardizált eloszlásfüggvény inverze, melynek értékei különböző valószínűségekre a standardizált normális eloszlás táblázatból megkaphatók ($\epsilon=0.05$, azaz 95%-os valószínűségnél $\Phi^{-1}(0.95) = 1.64$, amit én

is használtam a számításokhoz), amelyek felhasználásával a k^+ értéke különböző valószínűségi szintekre a (11) és a (12) alkalmazásával kiszámolható, mint a BRIX* függvénye (8. ábra). Ezek a számítások a pillanatnyi értékekre vonatkoznak.



8. ábra: A különböző konfidencia-intervallumokhoz tartozó maximális KOI értékek a BRIX* függvényében (bal) és annak egy kisebb intervalluma (jobb).

A szórás problémája

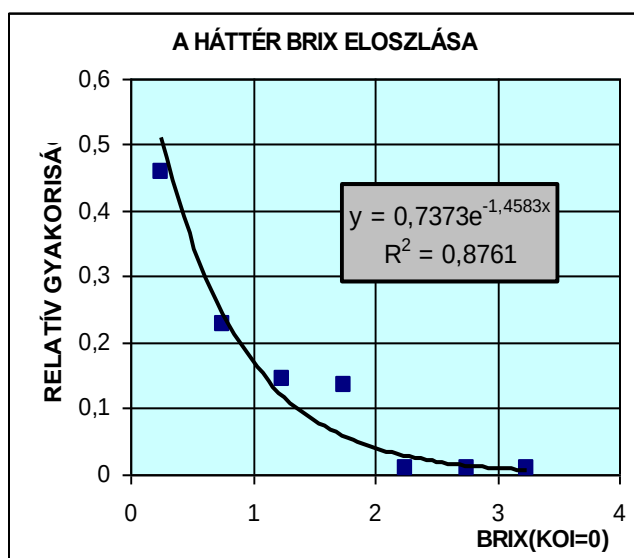
Sajnos a pillanatnyi értékek szórása meglehetősen nagy, ezt a következők okozhatják:

- a refraktométer mérési pontossága;
- a KOI-t meghatározó matematikai módszer hibája;
- mintavételi hibák – nem összetartozó adatpárok;
- a szennyvíz háttérösszetételének (cukor nélküli) változása, amely a KOI értékét nem (vagy alig), viszont a törésmutatót (BRIX-et) jelentősen befolyásolhatják.

Úgy gondolom, KOI mérés hibája kicsi, különösen alacsony KOI értékeknél, ahol nagy a (relatív) szórás. A refraktométernek, mint berendezés mérési pontossága is jóval nagyobb annál, hogy ekkora szórást eredményezzen, továbbá a mintavételi hibákat korrigáltam, így a szórás jórészt az utóbbiakból eredhet.

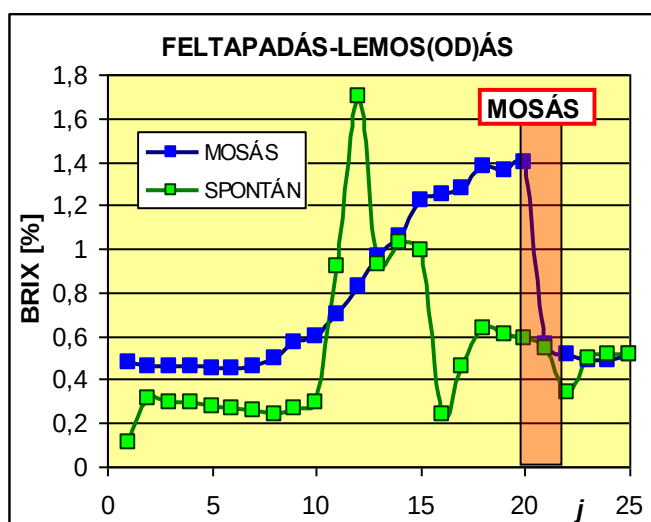
Ezen probléma kiderítése céljából felvettem KOI=0 értékhez tartozó (háttér) cukor-egyenérték (BRIX₀) eloszlását oly módon, hogy a BRIX értékekből levontam a mért KOI-nak megfelelő értéket (a 2. ábrából 0.008/100 KOI) és felvettem az így kapott BRIX (KOI=0)=BRIX₀ értékek eloszlását (9. ábra). A háttér BRIX₀ értékei exponenciális (véletlen események eloszlása) eloszlást mutatnak 0.74 várható értékkel és szórással.

A BRIX értékek megnövekedését (BRIX₀>0) okozhatja az is, hogy a szennyvíz a cukor mellett tartalmaz a törésmutatót erősen növelő anyagokat (pl. citromsav). Ebben az esetben azonban a BRIX₀ normális eloszlású lenne, szemben a tapasztalt exponenciális eloszlással. A másik lehetséges eset az on-line mérési módszerből származó hiba, melynek lehetséges megvalósulása az, hogy a mérőműszerben (annak üvegén) megnő a cukorkoncentráció (feltapad a cukor), így megnő a szennyvízhez képesti BRIX érték is. Ez a feltapadás véletlenszerű folyamat ezért a feltapadt mennyiség exponenciális eloszlású lesz (9. ábra).



9. ábra: A KOI=0-ra korrigált (háttér) BRIX₀ értékek gyakoriságának eloszlása.

Ezt a folyamatot illusztrálja a 10. ábra. A MOSÁS mérésnél (2011 10.14 6.30-6.55) a BRIX 0.5-ről növekedett 1.4-ig és a mosás után értéke visszaállt az eredetire. A növekedést nyilván bizonyos mennyiségű cukor feltapadása okozta. A SPONTÁN mérésnél (2011 10.14 9.40-10.02) szintén megnő a BRIX értéke feltapadás után, de az spontán módon leválik (a hígabb oldat lemossa).



10. ábra: A cukor feltapadásának és lemosódásának hatása a BRIX értékekre két különböző mérési szakaszban.

Úgy gondolom, hogy a viszonylag nagy szórást elsősorban az on-line BRIX mérésből, mint módszerből eredő hibák (feltapadások) okozzák (kisebb mértékben eredményezheti a szennyvíz háttérösszetételének változása is, jóllehet annak egy részét kompenzálja az ellenállásmérés alapján a korrigált BRIX használata).

Ez a szórás csökkenthető a módszer fejlesztésével (pl. a műszer célszerűbb elhelyezésével, amely megnehezítené a feltapadások kialakulását). Egy másik megoldás a tartályban lévő átlagos KOI becslése, ugyanis ebben az esetben az átlag szórása a (független) minták számának növelésével csökken. Meg kell jegyezni, hogy az említett hibák (feltapadások) nagy része a 10. ábrán mutatottnál általában kisebb (9. ábra), de mivel kis BRIX változáshoz is nagy KOI változás tartozik (2. ábra) ezért a szórást (elsősorban kis KOI értékeknél) jelentősen növelhetik.

3.4. Genetikus algoritmusok felhasználása folyamatok irányításában

A vezérlőrendszer kidolgozásához több algoritmust vizsgáltam, melyek kisebb-nagyobb mértékben ráhúzhatók voltak a problémára. A feladat általánosítását szem előtt tartva intelligens módszerek után kutattam az irányítástechnika területén, melyek közül a genetikus algoritmusok a legmegfelelőbb jelen probléma esetén.

A hatvanas években merült fel az evolúció ötletének átültetése a számítástechnikába optimalizálási problémák megoldására. Elsőként a német Rechenberg használt evolúciós stratégiáknak (Evolutionsstrategie) nevezett módszert repülőgép-szárnyak paraméterezésére. A későbbiekben különböző elképzelések születtek a világ más területein, evolúciós programozás (evolutionary programming) és genetikus programozás (genetic programming) néven, ez utóbbi adta az alapján a genetikus algoritmusok (genetic algorithm) megjelenésének. Az első kutatások a genetikus algoritmus terén Michiganben kezdődtek, és John Henry Holland nevéhez fűződik az első kutatás és publikáció a témában [11].

Bár a korai eredmények megosztották a közönséget, azóta nagyon sok előrelépés történt a genetikus algoritmusok terén, melyek nagyon elterjedtek lettek azóta optimalizálási problémák megoldásában. Az ICM fejlesztése során harmadik lehetőségként a genetikus algoritmusokat vizsgáltam [9, 10], melyek genetikus algoritmusok a darwini evolúció elmélete alapján kidolgozott keresőeljárások. Számítástechnikában manapság széles körben elterjedt e módszer használata, ugyanis rengeteg területen alkalmazható különböző típusú problémák esetén még akkor is, ha a feladat struktúrája nem teljesen ismert és sok lehetséges megoldás közül kell kiválasztani a legjobbat.

A genetikus algoritmus minden esetben a megoldások egy populációjával dolgozik, majd az aktuális populációból szelekciós operátor segítségével szülőket választ, majd a szülők génjeit (a lehetséges megoldás különböző paramétereit) keresztezi és mutálja a rekombinációs és mutációs operátorok által a következő generáció előállításához. Az egyes megoldások értékelését a rátermettségi vagy fitnessz függvény végzi a probléma típusától függően eltérő módon. Az így kapott értékek alapján megmondható az egyes egyedek fitnessze, és a legjobbak szülőként használhatók a következő generáció előállításához.

Mivel a generációk előállítása során az egyedek jósága konvergál az optimálishoz (elméletileg minden generáció rátermettebb egyedeket fog tartalmazni az előzőnél), minden lépéssel közelebb kerülök a kívánt célhoz. A probléma jellegétől függően az egyedek fitnessz értékének minimalizálása vagy maximalizálása is lehet cél. Elvben minden tanulási probléma felfogható

optimalizálási feladatként, valamint a módszer sokrétősége miatt a genetikus algoritmusok széles körben alkalmazhatók a gépi tanulás területén.

A genetikus algoritmusokat általánosságban az alábbi pszeudokóddal tudjuk leírni (P az egyes populációk egyedeiből, F az egyedekhez tartozó fitness értékekből alkotott tömb):

1. *Paraméterek inicializálása()*;
2. $t = 0$;
3. $P_0 = \text{Kezdeti populáció létrehozása}()$;
4. *CIKLUS AMÍG (Kilépési feltétel == hamis)*
5. $F_t = \text{Fitness kiszámítása}(P_t)$;
6. $P_{t+1} = \text{Szelekció}(P_t)$;
7. $P_{t+1} = \text{Rekombináció}(P_t)$;
8. $P_{t+1} = \text{Mutáció}(P_{t+1})$;
9. $t = t + 1$;
10. *CIKLUS VÉGE*
11. *Legjobb egyed kiválasztása*(P_{t-1}, F_{t-1});

A genetikus algoritmus legnagyobb előnye a problémafüggetlen természete, hiszen szinte bármilyen optimalizálási probléma esetén alkalmazható, amennyiben ismert az elérni kívánt cél. Az algoritmus önmagában nem bonyolult, viszont a fitnessfüggvény megfelelő definiálása nagyban meghatározza a program futásának sikerét. Ennek következtében a fitnessfüggvény komplikált is lehet, valamint a futási idő elnyúlhat a sok egyed és generáció előállítása miatt. Nagyon fontos továbbá az algoritmus helyes paraméterezése, ami hosszas tesztelési fázist eredményez. Mivel ismert az elérni kívánt cél, a teszteredmények minősíthetők, a paraméterek megváltoztatása és tesztelése után könnyedén összehasonlíthatók.

Ezek alapján úgy gondoltam, ez a technológia alkalmazható lehet a gyógyszergyári szennyvíz kezelésére, ugyanis fel tudja dolgozni a tanuláshoz a már rendelkezésre álló adatsort, és az algoritmus hatékonyságát is könnyen lehet minősíteni.

4. Módszerek és eredmények

Munkám során a 3. fejezetben leírt matematikai összefüggések és a 3. táblázat adatainak felhasználásával megbecsültem a tartályba befolyó szennyvíz paramétereit (4.1. fejezet) és a logisztikus modellt teszteltem (4.2. fejezet). Úgy gondoltam, hogy ez a számítási módszer bizonyos vezérlők (pl. PLC) számára túl bonyolult lehet, ezért egy bilineáris modellt is kidolgoztam és teszteltem (4.3. fejezet) a KOI becslésére.

A matematikai modellekre építve, vezérlőmodul tervezésével foglalkoztam (4.4. fejezet), melynek során kidolgoztam egy közvetlen vezérlésű modult (DCM, 4.4.2. fejezet) és egy intelligens vezérlőmodult (ICM, 4.4.3. fejezet). A vezérlőmodul kidolgozása során szimulációkat végeztem a jelenlegi (váltott üzemmódú) rendszer (4.4.1. fejezet), valamint az általam kidolgozott vezérlőmodulok hatásfokára. A szimulációk összefoglaló eredménye a 4.5. fejezetben olvasható.

4.1. A tartályba befolyó szennyvíz KOI értékének meghatározása

4.1.1. Átlagos KOI

Az átlagos KOI számított értéke az átlag képzési szabályának megfelelően a t -edik időpontig (j -edik mérés), amennyiben a mérések (i) között eltelt idő konstans és $t=j=0$ -ben a tartály üres, az alábbi lesz

$$\bar{K}_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j K_i \quad (13)$$

A mért értékre hasonlóképpen:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j x_i \quad (14)$$

Szórásnál a vonatkozó szabály szerint a független minták esetén a szórásnégyzetek adódnak össze:

$$\bar{\sigma}_j^2 = \frac{1}{j^2} \sum_{i=1}^j \sigma_i^2, \quad (15)$$

Abban az esetben, ha

$$\bar{K} < KOI_{MEG}, \quad (16)$$

akkor a szennyvíz a csatornába kiengedhető ($KOI_{MEG} = 1000$). Amennyiben a $\bar{K}^+ > KOI_{MEG}$ akkor egy bizonyos KOI érték (KOI_{MAX}) alatt hígítással $\bar{K}^+$ értéke KOI_{MEG} alá vihető, így a szennyvíz a csatornába szintén kiengedhető lesz. A KOI_{MAX} értéke függ a tartály telítettségétől, a maradék szabad térfogattól.

Az elmondottak lényegesen egyszerűsíthetők és szemléletesebbé tehetők a kumulatív (integrált) KOI bevezetésével.

4.1.2. Kumulatív KOI

A tartályokban összegyűlt szennyvíz KOI értékének meghatározásához a kumulatív (integrált) KOI-kat (számított és mért értékek), továbbá a számított értékek szórását az alábbi módon definiálhatjuk a (13)-(15) felhasználásával

$$K(j) = \frac{j}{j} \bar{K}_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j K_i, \quad (17)$$

$$X(j) = \frac{j}{j} \bar{x}_j = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j x_i, \quad (18)$$

$$\sum(j) = \frac{1}{J} \bar{\sigma}_j = \frac{1}{J} \sqrt{\sum_{i=0}^j \sigma_i^2}, \quad (19)$$

ahol a J a minták száma a tartály megteléséig ($j \leq J$). Mindhármát J-re normáltuk, ugyanis ebben az esetben $K(j = J) = \bar{K}_j$, $X(j = J) = \bar{x}_j$ és $\sum(j = J) = \bar{\sigma}_j$, azaz a kumulatív értékek éppen a tele tartályhoz tartozó átlagos értékeket adják.

Továbbá a (12) analógiájára a becsült maximális érték a kumulatív KOI-ra az alábbi lesz:

$$K^+(j) = K(j) + \sum(j) * \phi^{-1}(1 - \epsilon). \quad (20)$$

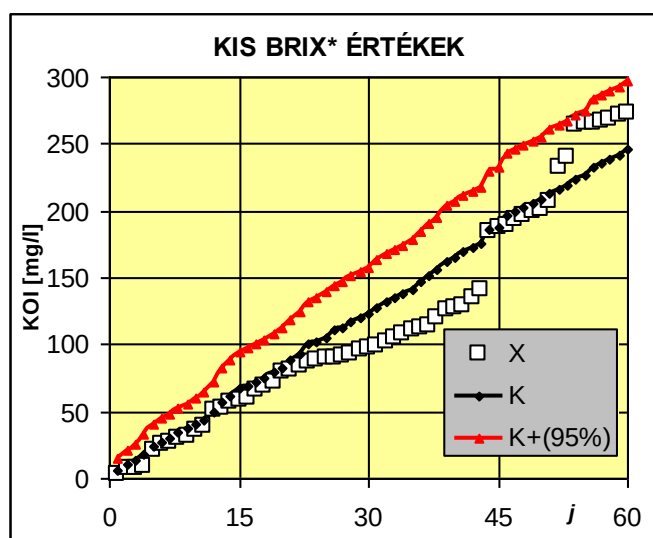
A megfelelő limit pedig a következő:

$$K_{LIMIT}(j) = \frac{j}{J} KOI_{MEG}. \quad (21)$$

Ezen képletek segítségével bármilyen időpillanatban meghatározható lesz a tartályokban lévő KOI relatív értéke, ami alapján már tudunk döntéseket hozni a szennyvíz vezérléséről.

4.2. A logisztikus matematikai modell tesztelése

A modell helyességének igazolására a (17)-(20) összefüggések és a 2. táblázat méréseinek felhasználásával kiszámítottam egy kis (11. ábra), egy nagy (12. ábra) és véletlenszerű (13. ábra) BRIX*-ű sorozatra a $K(j)$ az $X(j)$ és a $K^+(j)$ értékeket (95%-os valószínűségi szinten), továbbá ábrázoltam az így kapott eredményt, a mérések száma (j) függvényében. A minták kiválasztása a 2. táblázat összetartozó adatként történt, oly módon, hogy az adatokból kiválasztottam a 60 legkisebb, legnagyobb és 60 véletlenszerű adatot.



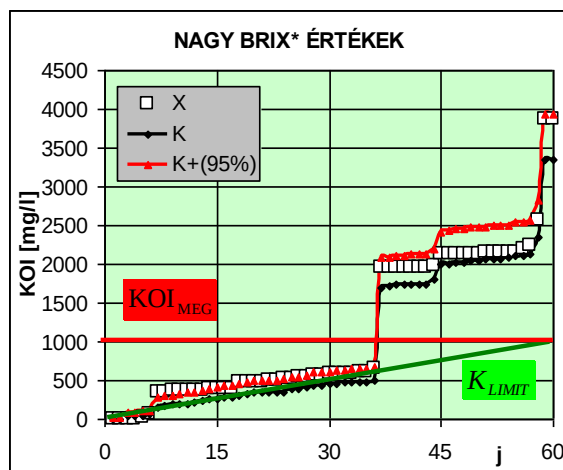
11. ábra: A laborban mért KOI (X), a számított KOI (K) és annak becsült maximális értéke (K+) 95%-os konfidencia intervallum használatával alacsony BRIX* értékekre.

Mivel egy tartály átlagban 5 óra (300 perc) alatt telik meg, így ezek ötpercenkénti mintavételnek (mérésnek) felelnek meg, vagyis csináltunk három olyan virtuális tartályt, amelyekben minden 5 percben az adott mintának megfelelő összetételű szennyvíz folyik (ezeket a tartályokat a számított és a mért KOI-k ismeretében a valóságban is így lehet megtölteni). A j érték $t=j \cdot 5$ [perc] időnek illetve $Z=100 \cdot j/60$ [%] tartályszintnek felel meg.

Mindhárom ábrából látható hogy az átlagos KOI számított értékei (K) és mért értékei (X) között eltérés, ennek megfelelően a szórás, már jóval kisebb (közel egy nagyságrenddel, mint az a pillanatnyi mérések esetén volt, ami már lényegesen jobb felső érték becslésre nyújt lehetőséget. Ennek oka, hogy független minták esetén a (15) átlag szórása az egyes minták (átlagos) szórásának $\sqrt{J} = \sqrt{60} \cong 8$ -ad része.

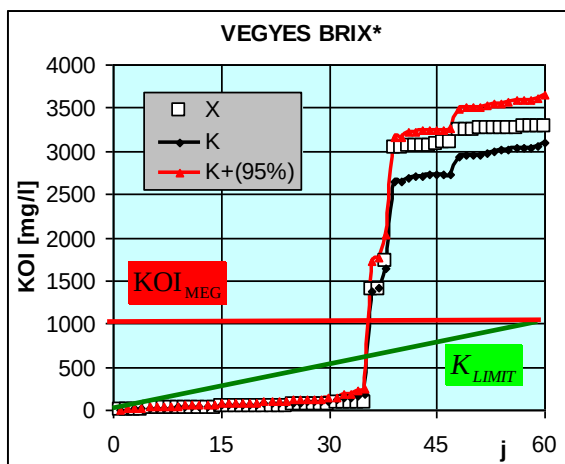
Kis BRIX* értékeknél a mért kumulatív KOI értékek mindvégig K_{LIMIT} alatt maradtak (11. ábra), ami azt jelenti, hogy ebben az esetben a szennyvíz a csatornába kiengedhető, illetve akár hígításra is felhasználható. A bemutatotton kívül a kis BRIX* adatokból még további, nagyszámú variációt elkészítettem, és a kapott görbék hasonlóak voltak. Egy-két esetben előfordult, hogy a mért értékek valamennyivel (nem jelentős mértékben) meghaladták a maximálist ($K^+(95\%)$), annak megfelelően, hogy ezek 95% valószínűséghez tartozó görbék.

Magas BRIX* értékeknél az első 35 mérés alatt jórészt a K_{LIMIT} fölött vannak, ez azt jelenti, hogy a szennyvíz csak hígítással engedhető ki. Továbbá néhány mért adat kismértékben a $K^+(95\%)$ felett van, melynek oka a fentebb említett. Lehetne ugyan egy nagyobb valószínűségi szintet is venni, de az eltérés nem olyan nagy, ami megérné, hogy lényegesen felül-becsüljük a tényleges adatokat. A 36. mérés után a kumulatív KOI meghaladja a KOI_{MEG} értéket, ezért a szennyvíz nem engedhető ki a csatornába (12. ábra).



12. ábra: A laborban mért KOI (X), a számított KOI (K) és annak becsült maximális értéke (K^+) 95%-os konfidencia intervallum használatával magas BRIX* értékekre.

A vegyes BRIX* értékeknél a mért értékek szintén a $K^+(95\%)$ érték alatt voltak (12. ábra). A 35. mérés alatt a szennyvíz a csatornába kiengedhető, fölötte nem (hígítással sem). Mindhárom esetben a mért KOI (95%-os valószínűséggel) a becsült alatt volt, tehát a modell a felső érték becslésre jól alkalmazható.



13. ábra: A laborban mért KOI (X), a számított KOI (K) és annak becsült maximális értéke (K^+) 95%-os konfidencia intervallum használatával véletlenszerű BRIX* értékekre.

A becslés számított hibája a kimenő KOI-ra 1000 mg/l esetén mintegy 100 mg/l lehet, amely 10%-os hibát jelent. Célszerűnek látszik a szennyvizet (a biztonság kedvéért) 90%-nál kiengedni (tehát $KOI_{MEG}=900$), ami további 10%-os hibát jelent, azaz a kritikus értéknél kiengedett szennyvíz átlagos KOI-ja 800 mg/l körül lehet.

4.3. Bilineáris modell

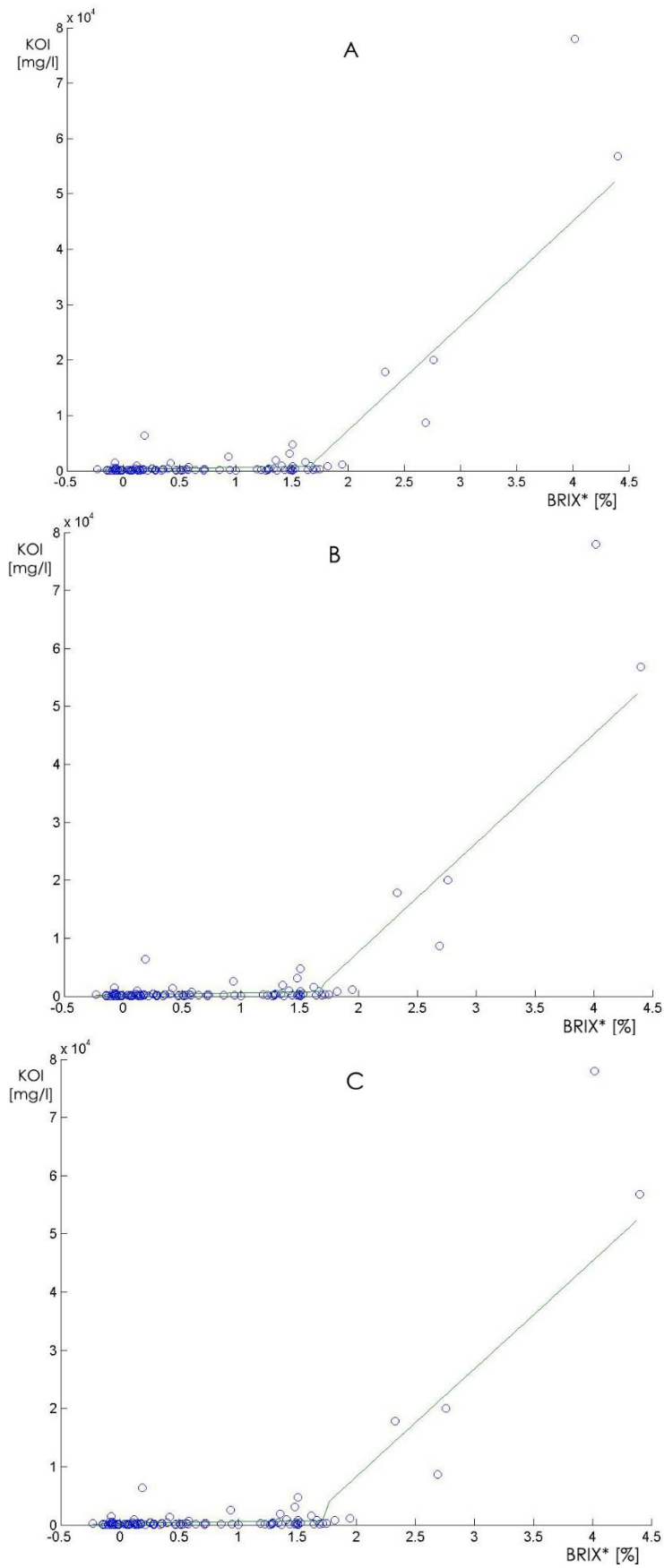
4.3.1. A modell kidolgozása

Egy másik koncepció szerint a KOI értékének becslésére kidolgozható egy kettős lineáris modell, melynek görbéje két elsőfokú függvény kombinációjából képződik: kisebb BRIX* értékekre egy laposabb, magasabb értékekre pedig egy meredekebb egyenest felhasználva. Feladatunk tehát a korábbiakban felhasznált, a 3. táblázatban található labormérések felhasználásával két, elsőfokú egyenlet meghatározása és ezek illesztése a laborban mért adatokra.

Akárcsak a logisztikus modellnél itt is a lineáris regresszió módszerét alkalmaztam az illesztéshez MATLAB szoftver segítségével: egy olyan programot készítettem, amely az adatsort minden i -edik ($1 < i < n$, ahol n a mérések száma) adat után szétválasztja, és az így keletkező két adatsorra illeszt lineáris egyenest. Az így kapott egyenesek paramétereit elmentettem és kirajzoltam, így összesen 107 görbét kaptunk.

Ezen kombinációk közül kiválasztottam azokat, melyeknél a két egyenes metszéspontjánál kapott x érték nagyobb, mint az egyenesek és az x tengely metszéspontjánál lévő x érték ($x_1 < m$ és $x_2 < m$, ahol m a két egyenes metszéspontja, x_1 az első egyenes és az x tengely metszéspontja, x_2 a második egyenes és az x tengely metszéspontja). Így összesen 74 lehetséges megoldást kaptunk, melyek közül kiválasztottam azt, ahol a lineáris regresszió során az eltérések négyzetösszege (sum of residuals/residual sum of squares) minimális. A szimuláció teszteredményei a 4. táblázatban láthatók.

A függvények meghatározását követően minden függvénypárhoz ábrát készítettem, majd ezeket megvizsgáltam. A feltételeknek megfelelő ábrákat a 101-103. adatoknál történő szétválasztás adta, ezek a 14. ábrán láthatók.



14. ábra: A kettős lineáris modell tesztelése során kapott grafikonok a 101. (A), 102. (B), 103. (C) adatoknál elhelyezett töréspontokkal.

4.3.2. A modell értékelése

A teszteredmények alapján azt a következtetést vontam le, hogy modell alkalmas a tartályba gyűjtött gyógyszergyári szennyvíz kémiai oxigénigény (KOI) értékének számítására refrakció (cukoregyenérték) mérés által. Az on-line mérések segítségével a KOI pillanatnyi értékei viszonylag nagy szórással rendelkeznek, de a tartályban gyűlő szennyvíz kémiai oxigénigénye mind magas, mind alacsony KOI esetén megfelelő pontossággal meghatározható. A KOI érték becslése lényegesen növelhető a műszer célszerűbb elhelyezésével és a kalibrációs görbe pontosabb felvételével. A mérőrendszer adatainak elemzése alapján kimondható, hogy átfolyó rendszerű vezérlőrendszer nem működtethető biztonságosan, de gyűjtő módú rendszer megfelelő biztonsággal, a környezetvédelmi előírásoknak megfelelően üzemeltethető.

A matematikai modellre támaszkodva kialakítható egy vezérlőrendszer, amely a mérőműszer által begyűjtött adatok alapján számítja a korrigált cukoregyenértéket (BRIX*), valamint a pillanatnyi és a tartályban összegyűlt (kumulált) KOI-t, majd az így kapott értékek függvényében döntést hoz a szennyvíz irányításáról.

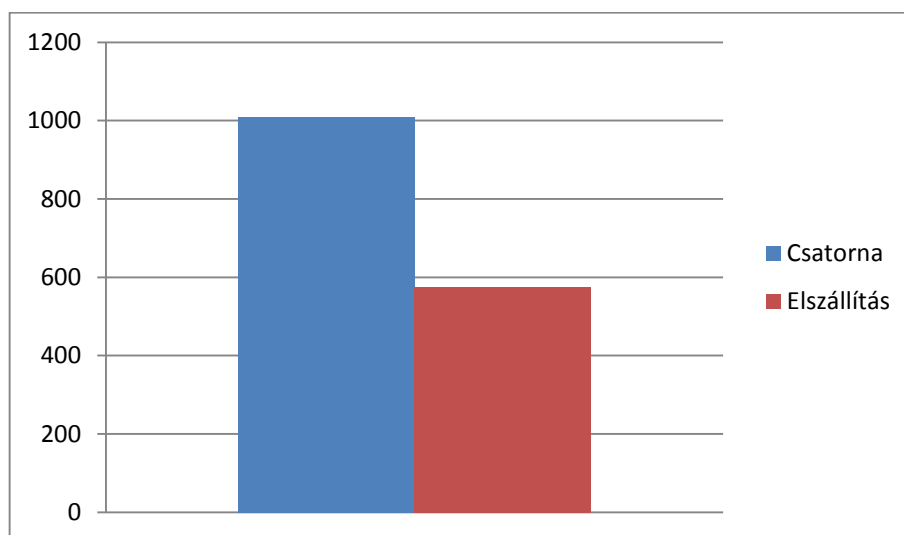
4.4. A vezérlőmodul

A matematikai modellek (7. ábra és 14. ábra) sikereit látva belevágtunk egy vezérlőmodul kidolgozásába, amely az érkező szennyvíz pillanatnyi on-line refraktométer által mért értékei, valamint a tartályban összegyűlt szennyvíz számított adatai alapján a dönt az érkező víz irányításáról.

4.4.1. A váltott üzemmódú rendszer tesztelése

A refraktométer által 45 nap alatt begyűjtött adatok és MATLAB szoftver felhasználásával szimulációkat végeztem az eredeti rendszer (1. ábra) hatásfokának meghatározására. A 45 nap mérési adataiból a hibás adatokat kiszűrve 16000 mért adat maradt, ezeket használtam fel a szimulációk elvégzéséhez.

A szimuláció alapján megállapítható, hogy az eredeti modell az adatok alapján 42 tartálynak megfelelő szennyvizet engedett a csatornába és 24 tartálynit kellett elszállítani a teljes mennyiségből. A szimuláció eredményei a 15. ábrán láthatók.



15. ábra: Az eredeti váltott üzemmódú rendszer 1010 m³ (42 tartály) határérték alatti (csatornába engedett), 576 m³ (24 tartály) határérték feletti (elszállított) szennyvizet generált.

4.4.2. A közvetlen vezérlésű rendszer (Direct Control Module, DCM)

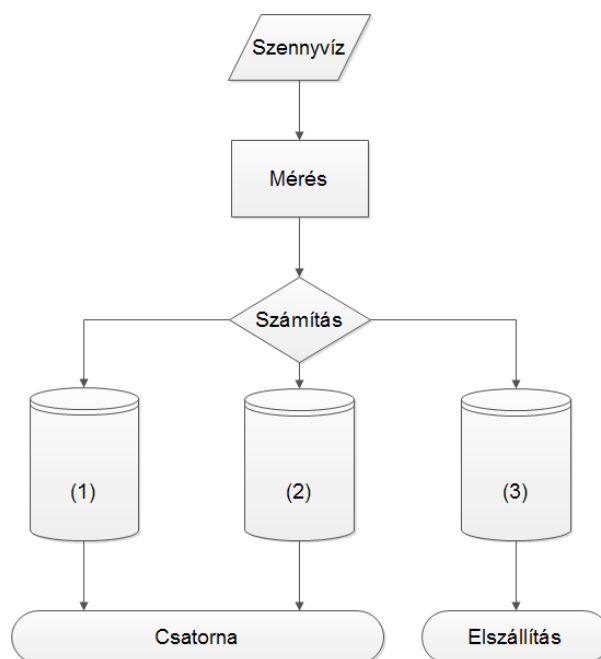
Általános szabályok

Az eredeti váltott üzemmódú rendszer (1. ábra) mindhárom tartálya immár felhasználható a szennyvíz gyűjtésére, mivel a pH kiegyenlítésre nincs szükség, ugyanis a pH nem lépi át a megengedett határértéket. Egyszerre csak az egyik tartályba lehet beengedni a vizet, de ez alatt két tartályból lehet a csatornába engedni. Biztonsági okokból egyik tartályt sem töltöm fel teljesen, legfeljebb 70%-ig engedem a szennyvíz szintjét.

A tartályok között van átjárás (tehát egyik tartály tartalmát átönthetném a másikba), bár ezt nem használom ki (első lépésben az egyszerűsége törekedtem, és ez a funkció bár növelné a hatásfokot, de ugyanakkor nagyon elbonyolíthatja az algoritmus működését).

A három tartály funkcionalitását tekintve ugyanazon célokra alkalmas, de mégis úgy döntöttem, hogy az egyik tartályba csak az olyan szennyvizet gyűjtök,

amely a szabályok szerint nem engedhető ki a csatornába (ebből minden körülmények között elszállítunk). A másik két tartályba felváltva engedem a szennyvizet, és megpróbálom a határértékhez alulról közelíteni az így összegyűlt szennyvíz kumulált KOI értékét (ezekből mindig a csatornába engedek), miközben a teljes mennyiség minél kisebb töredékét küldöm elszállításra. Az új rendszer vázlata a 16. ábrán látható.



16. ábra: A vezérlőmodul működési vázlata.

A közvetlen vezérlésű rendszer (DCM) működése

A DCM vezérlőmodul fejlesztését és tesztelését MATLAB szoftver segítségével végeztem. A rendszer algoritmusa a következő:

Refraktométer segítségével mérjük az érkező szennyvíz paramétereit. A mérések adatait felhasználva a 3.3 fejezetben említett képletek segítségével kiszámítom a korrigált cukoregyenértéket (BRIX*), az aktuális szennyvíz pillanatnyi kémiai oxigénigényét (KOI), valamint az egyes tartályokban lévő kumulált KOI értékét. Amennyiben az érkező szennyvíz KOI értéke az $1000 \frac{mg}{l}$ -es határérték alatt van (ez a legjobb eset), akkor az 1-es 2-es tartály közül abba engedem, amelyikben magasabb a kumulált KOI értéke. Ha az érkező szennyvíz KOI értéke az $1000 \frac{mg}{l}$ -es határérték felett van, három lehetőség áll elő:

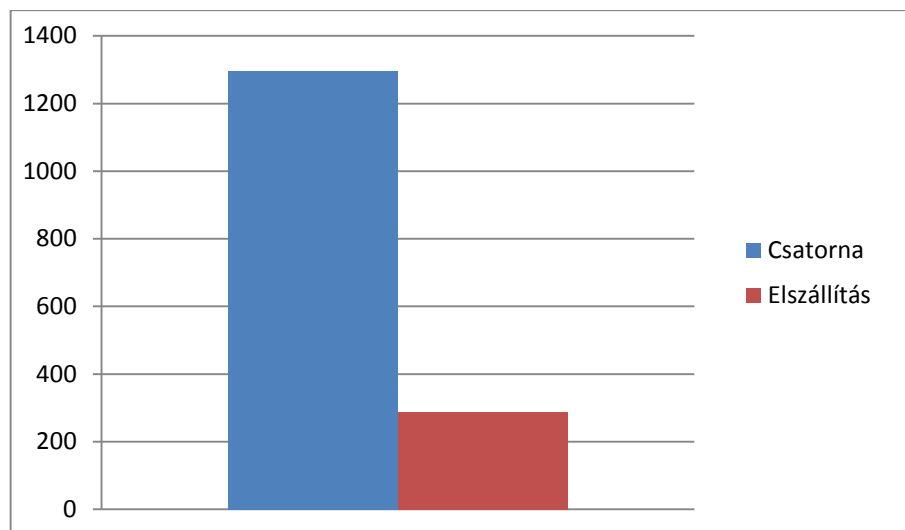
- ha extrém magas ($K \geq 10000 \frac{mg}{l}$) KOI-ű szennyvíz érkezik, akkor a 3-as tartályba engedem
- ha az érkező szennyvíz KOI értéke extrémnél kisebb, de a limitnél magasabb, akkor
 - ha a beengedés után mindkét tartály tartalma határérték alatt maradna, akkor abba engedem, amelyiknek magasabb lesz a kumulált KOI értéke a beengedés után (alulról közelítem a határértéket)
 - ha egyik tartály kumulált értéke sem tartható a határérték alatt (legrosszabb eset), akkor a 3-asba engedjük.

Mialatt az egyik tartályba beengedem a vizet, a többi tartály tartalma kiengedhető a csatornába (ha a 3-asba engedünk, a másik kettőt egyszerre engedem le). Ha a 3-as tartály megtelik, a program üzenetet küld a képernyőre (elszállításra küldi annak tartalmát).

A DCM rendszer tesztelése

Az így kiépített rendszer szimulációját ugyanazon adatsoron (16000 adat) végeztem, mint a váltott üzemmódú rendszer esetén (4.1. fejezet), szintén MATLAB segítségével.

A szimuláció alapján megállapítható, hogy az eredeti modell az adatok alapján 54 tartálynak megfelelő szennyvizet engedett a csatornába és 12 tartálynyit kellett elszállítani a teljes mennyiségből. A szimuláció eredményei a 17. ábrán láthatók.



17. ábra: Az általunk DCM rendszer 1300 m³ (54 tartály) határérték alatti (csatornába engedett), és 288 m³ (12 tartály) határérték feletti (elszállított) szennyvizet generált.

4.4.3. A DCM rendszer működésének általánosítása (Intelligent Control Module, ICM)

Látva a DCM rendszer sikereit úgy gondoltam, hogy érdemes további lehetőségek után nézni, amellyel a rendszert még jobbra, hatékonyabbá tehetem. Céлом továbbra is az, hogy minél kevesebb szennyvizet kelljen elszállítani, és a kiengedett szennyvíz KOI értéke minél magasabb legyen, de továbbra is határérték alatt maradjon.

A közvetlen vezérlésű rendszer egyik nagy hiányossága, hogy soha nem engedi meg, hogy az 1-2-es tartályokban határérték feletti kumulált érték legyen, pedig elképzelhető, hogy ez a később érkező szennyvíz ezt még felhígítja, így újra olyan szennyvízhez jutunk, ami kiengedhető a csatornába. Egy másik aspektus, hogy a programot általánosítva más, hasonló vezérlésű rendszerek esetén is alkalmazni lehessen (természetesen kisebb-nagyobb módosítások után, pl. a számítási modell átalakítása).

Következő célom egy olyan intelligens döntési rendszer felállítása, ami bizonytalan helyzetekben is képes jó döntést hozni. További követelmény, hogy más területeken is alkalmazhatóvá tegyem a jelenlegi rendszert. Az alábbi lehetséges mesterséges intelligencia területén alkalmazott lehetőségeket megvizsgáltam és megkerestem az erre a problémára alkalmazható módszert.

Az intelligens vezérlés megvalósításához több lehetőség állt rendelkezésre, melyek közül elsőként a fuzzy rendszerek vizsgálatára fektettem hangsúlyt. A fuzzy logika problémája a tagságfüggvények definiálása, jelen problémánál nem tudtunk funkcionálisan megbízható és hatékony tagságfüggvényeket definiálni, ezért ezt a lehetőséget elvetettem.

Bár a fuzzy rendszer nem bizonyult alkalmasnak az eddigi rendszer fejlesztésére, jó lehetőségnek gondoltam egy mesterséges neurális háló kiépítését. Ezen lehetőség azt a problémát hozta, hogy a háló betanítását csak nehézségek árán tudnánk megoldani, mert a rendszer előrecsatolt jellege miatt nem tudtam megfelelő, a betanításhoz alkalmas teszt-adatsort generálni.

Az ICM modul algoritmus

A megoldáshoz genetikus algoritmust használtam. Jelen esetben a fitness értékeként az elszállítandó szennyvíz mennyiségét választottam, amit minimalizálni szeretnék. A modern irányzatoknak megfelelően nem bitvektort használok a megoldás során: a kromoszómák jelen probléma esetén a valós számot tartalmazó súlyfaktorok, az egyes populáció egyedeinek kromoszómái az ezekből összefűzött súlyvektorok.

A szennyvíz irányításában fontos szerepet játszanak a súlyfaktorok. Minden generáció esetén más és más súlyfaktorokat használok, melyeknek értéke mindig a $]0,1[$ intervallumba esik. A futás során m darab súlyfaktorra lesz szükségem, amelyek mindegyike egy-egy tartályra (saját értékének felhasználásával) szavaz. A kiértékelés után a legnagyobb összesített szavazattal bíró tartály nyer, ebbe engedem a szennyvizet. Természetesen lesznek speciális esetek, melyek növelik, vagy éppen lepontozzák (pl. ha a tartály leeresztés alatt van) az egyes tartályokra összegyűlt szavazatok értékét. A szavazást és a szennyvíz irányítását a fitnessfüggvény végzi.

Az első generáció esetén véletlen számokkal inicializálom a súlyfaktorokat és ezeket egy súlyvektorban tárolom. Minden generáció esetén n darab súlyvektort generálok, melyeket egy $n * m$ -es súlymátrixba fűzöm, majd ezzel futtatom le a szimulációt, amely kiszámítja a fitness értékét minden súlyvektorhoz (a mátrix minden sorához) tartozóan.

A fitness értéke a hármastartályba gyűlő, elszállításra kerülő szennyvíz térfogata lesz, melyeket a hozzájuk tartozó súlyvektorokkal együtt növekvő sorba rendezek, majd a p legjobb fitnessű egyedet a következő generáció szülőiként választom. Ezt a p szülőt meghagyom a következő generációban is, majd a maradék $q = n - p$ új egyedet két véletlen szülő, véletlen számú súlyfaktorának cseréjével készítem el (többpontos átkeresztezés). Az olyan súlyfaktorok helyére, melyek nem kerültek átlagolásra véletlen számokat generálunk.

Ezen felül mindegyik kromoszóma értékét P valószínűséggel mutálom, ami azt jelenti, hogy a kapott értékhez $\pm M$ értéket adok ($-0.2 \leq M \leq 0.2$), ezáltal növelve a keresési teret és elkerülve azt, hogy az algoritmus egy lokális minimumon ragadjon.

A fitnessfüggvény

Az egyes egyedek fitnessének kiszámítását és a szennyvíz tényleges irányítását a fitnessfüggvény végzi el és az így elszállításra kerülő szennyvíz mennyisége adja meg a fitness értékét. A futás során a program először kiszámítja az érkező szennyvíz KOI értékét ($K_{PILLANATNYI}$), majd az egyes tartályok előző kumulált ($K_{ELŐZŐ_KUMULÁLT}$) értékei alapján az új kumulált értékeket ($K_{KUMULÁLT}$), ami a tartályban tárolt szennyvíz új kumulált értékét becsli meg, ha az érkező szennyvizet beleengednénk az adott tartályba.

Ezen értékek a határérték ($K_{MEG}=1000$) és az extrém magas KOI értékének ($K_{EXTRÉM}$) felhasználásával különböző matematikai műveletek során egy viszonyszámot képezek. Ez a szám megmutatja, hogy „mennyire” érdemes az egyes tartályokba engedni a szennyvizet, majd ezt szorozom meg az egyik súlyfaktoral. Fontos, hogy egy súlyfaktort ne használjunk fel többször ilyen szorzások során.

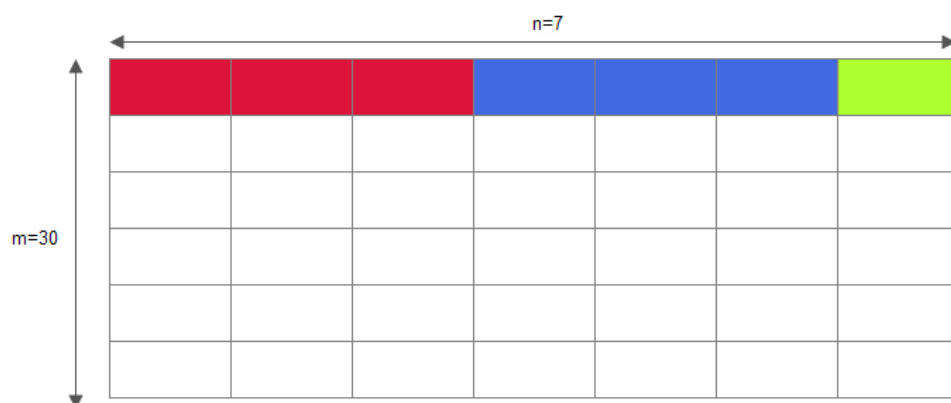
Amennyiben az egyik tartály leeresztés alatt áll, a hozzá tartozó szavazatot le kell csökkenteni, illetve ha az egyik tartály leeresztés alatt áll, és a másik megtelt, akkor mindenképp a harmadikba kell engedni az érkező szennyvizet, tehát ilyen esetben a 3-as tartályra történő szavazást erősíteni kell.

A fitnessfüggvény az adatsort minden k generáció minden n súlyvektorára feldolgozza. A program addig fut, míg az egyedek fitnesszeinek szórása (az adott generációra vonatkozóan) vagy a legjobb fitness értéke el nem éri a nullát, továbbá megszabunk felső korlátot a generációk számára is (g).

A genetikus algoritmus tesztelése

A genetikus algoritmus teszteléséhez szintén a 45 napos mérési sorozat 16000 válogatott adatát használtam fel, akárcsak a váltott üzemmódú és a DCM esetén. A tesztelés során a program $g = 240$ generáción keresztül futott, $n = 30$ egyedet $m = 7$ súlyfaktossal generálva minden generációban, melyek közül mindig a $p = 10$ legjobbat szülőként választottam és vittem tovább, majd két véletlen szülő, véletlen számú súlyfaktorának keresztezésével készítettem új egyedeket.

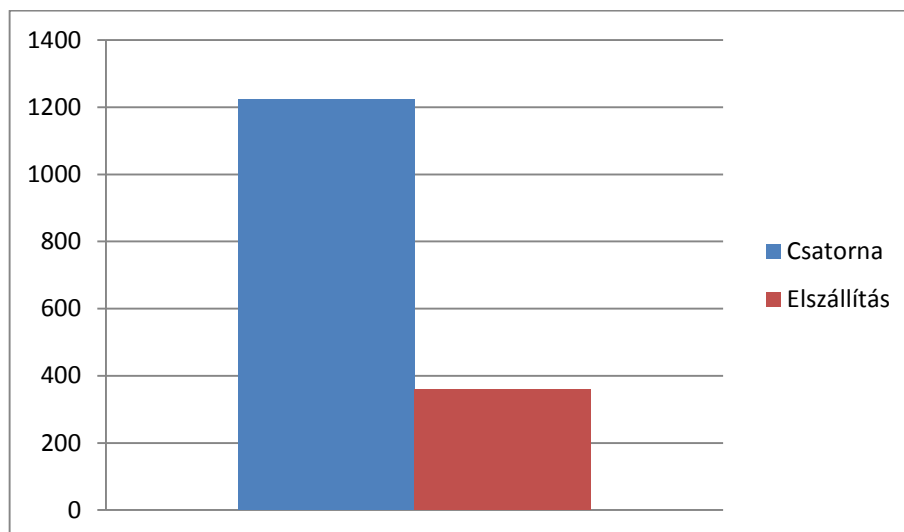
A tartályokra történő szavazás a súlyfaktorok felhasználásával történik. A súlyvektor 7 elemét csoportokra soroltam, melyek az egyes tartályokra szavaznak. Ha az indexelést 1-től kezdjük, akkor a hét elemet tartalmazó súlyvektor első, második és harmadik eleme az 1-es tartályra, negyedik, ötödik és hatodik eleme a 2-es, hetedik eleme pedig a 3-as tartályra szavaz. A súlymátrix szerkezete és az így kialakult csoportok a 18. ábrán láthatók.



18. ábra: A genetikus algoritmus futása során használt súlymátrix szerkezete és a szavazatok csoportosítása (piros=1-es tartály, kék=2-es tartály, zöld=3-as tartály).

A fitnessfüggvény futása során a tartályok szavazati pontjai minden esetben 0-ról indulnak, melyekhez hozzáadom a számított viszonyszámok és a súlyfaktorok szorzatát. A pontos számítási módszer a Függelék 5. táblázatában látható.

A tesztelés során az első generáció fitnesze 377.28 m^3 (15.72 tartály) kiengedett szennyvíz fokozatosan csökkent, minimumát a 90. generációnál érte el, 341.28 m^3 (14.22 tartály) értékkel. A szimuláció eredménye a 19. ábrán látható.



19. ábra: Az általunk kidolgozott ICM rendszer 1242.72 m^3 (51.78 tartály) határérték alatti (csatornába engedett), 341.28 m^3 (14.22 tartály) határérték feletti (elszállított) szennyvizet generált.

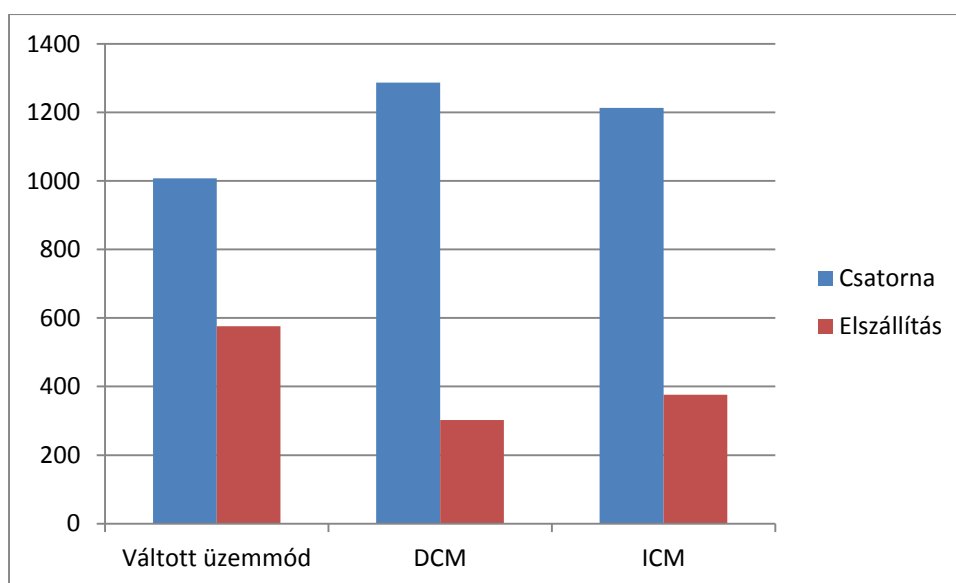
4.5. Értékelés

A laboratóriumi adatok (2. táblázat) felhasználásával felállítottam egy bilineáris matematikai modellt (4. fejezet), ami képes a gyógyszergyári szennyvízre jellemző kémiai oxigénigény pillanatnyi értékét számítani (melynek közvetlen mérése csak laboratóriumi mérésekkel lehetséges) a cukoregyenérték (BRIX) és vezetőképesség ismeretében, melyek mérőműszer alkalmazásával online, valós időben mérhető paraméterek. A tartályokban felgyülemelő szennyvíz KOI értékének számítására a kumulatív (integrált) KOI-t vezettem be (4.1.2. fejezet), amely kellő biztonsággal becsli meg a szennyvíz KOI értékét, melyet a rendelet [5] értelmében határérték alatt kell tartani.

A matematikai modell számításaira támaszkodva szimuláltam a váltott üzemmódú rendszert, majd kialakítottunk egy közvetlen vezérlésű modult (DCM), amely a tartályokba irányítja a szennyvizet, a határérték alatti szennyvizet a csatornába engedi, a határérték feletti szennyvizet pedig elszállításra küldi.

A DCM továbbfejlesztése céljából egy intelligens vezérlőrendszert (ICM) dolgoztam ki, amely egy genetikus algoritmus alkalmazásával általánosítja a problémát, így ez a megoldás alkalmazható lehet más, hasonló esetekben is.

A teszteredmények összehasonlítása során megállapítottam, hogy a DCM rendszer bizonyult a leghatásosabbnak jelen probléma esetén, valamint ezt az eredményt az ICM modul is megközelítette (20. ábra). A váltott üzemmódú rendszer működési hatékonyságát mindkét általam fejlesztett megoldás jelentős mértékben javítani tudta.



20. ábra: A váltott üzemmódú, a DCM és az ICM rendszerek szimulációi során hozott eredmények összehasonlítása.

Sajnos az általam fejlesztett rendszereket nem lehetett valós környezetben kipróbálni, melynek legfőbb oka az volt, hogy a fejlesztő cég nem tudja garantálni a mérőműszerek üzembiztos működését. A tesztidő alatt is több napos szünetek fordultak elő, mert a műszer karbantartásra szorult.

További céljaim között szerepel az ICM továbbfejlesztése, ugyanis nagy hiányossága, hogy nem töményíti a tartályokban felgyülemlett szennyvizet, ezáltal bizonytalan helyzetekben nem a legjobb döntést hozva meg. Úgy vélem, az ICM fejlesztésével képes lehetek a DCM hatásfokának túlszárnyalására is.

5. Tartalmi összefoglaló

A környezet –és vízvédelem nagyon fontos szempont manapság a mindennapi és a tudományos életben, de különösen az ipari szférában. Cégek és gyárak számára rendkívül lényeges ezen aspektus szem előtt tartása, ugyanis a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium rendeleteit minden körülmények között be kell tartani a gyártás során, miközben nyereségüket maximalizálják.

Kutatásom során egy magyar gyógyszergyár szennyvízkezelő rendszerén dolgoztam. A kommunális csatornába kiengedhető szennyvíz paraméterei a 2004/28-as KvVM rendelet által szabályozottak. Megfigyeléseim és szimulációim alapján úgy gondolom, hogy a jelenlegi rendszerben extra költséget jelentett nagy mennyiségű, csatornába nem engedhető szennyvíz elszállítása. A rendszer javítása érdekében refraktométeres, on-line mérések adatai alapján matematikai modellt dolgoztam ki a paraméterek valós idejű becslésére, amely korábban csak laboratóriumi úton volt lehetséges. A modellre építve egy rendszertervet készítettem, amely a gyárból érkező szennyvíz valós idejű vezérlését teszi lehetővé. A rendszer a szennyvizet három tartályba gyűjti és irányítja a csatornába, vagy küldi elszállításra amennyiben a paraméterek nem megfelelőek. A vezérlőmodul tesztelését párhuzamos laboratóriumi és műszeres mérésekkel végeztem. A vezérlőrendszeren végzett szimulációk elvégzéséhez 45 napos mérési sorozat adatait használtam fel, amely során az elszállításra küldött szennyvíz mennyisége 50%-kal csökkent, miközben az előírásokat megszegő összetételű szennyvíz egyáltalán nem került a csatornába.

Rendszerem sokat javított az eredeti megoldás hatásfokán, ezért úgy döntöttem általánosítom a problémát, hogy más, hasonló területeken is felhasználható legyen. Az intelligens vezérlés megvalósításához a genetikus algoritmust választottam, ahol a fitness értéke az elszállításra kerülő szennyvíz mennyisége. Az algoritmus ennek értékét próbálja minimalizálni úgy, hogy minden generációból a legkisebb fitnessű egyedeket szülőként választom a következő egyedek létrehozásához, kromoszómáikat keresztezem és mutálom. Ugyanazon 45 napos adatsor felhasználásával meghatároztam az algoritmus optimális paramétereit, ami közel olyan jó eredményt biztosított, mint a fent említett vezérlőmodul. Ezért javaslom ezen utóbbi vezérlőrendszer továbbfejlesztését, hiszen hasonló problémák esetén kisebb módosítások után alkalmazható lehet.

6. Summary

Environmental protection takes very important part of our scientific, industrial and everyday life. For companies working with industrial operations it is especially serious to protect the environment, because of the regarding orders by the Ministry of Environmental Protection, meanwhile maximizing their profit.

In my study a procedure was developed for waste water management system at a Hungarian pharmaceutical factory. The parameters of the waste water, which is allowed to flow into the drain, are ruled by the 2004/28 order of Ministry of Environmental Protection. On the strength of monitoring processes I think that the current system sometimes exceeded these limitations. To improve the managing system my idea was to apply an on-line measuring equipment set and develop two mathematical models that can mean the parameters of the water in real time, which was able only during laboratory measures before. Using the measured data, a scheme of a real time control system was made, that keeps the parameters of the under the threshold-value regarding the regulations ordained by the Ministry of Environmental Protection.

The system works with three collecting tanks and controls the water into the drain or suggests it to transportation if its parameters exceeded the limit. To validate the model I used parallel laboratory and measured data. To check the efficiency of the control system I used a 45 day measurement data for the simulations. During the test period it was established, that the volume of the water transported became less by nearly 50%, while no water, the parameters of which were above the threshold value, was flown into the drain.

The developed system was much better than the traditional practice, therefore I decided to generalize the solution in order to use my work at other similar places as well. I chose genetic algorithm, where the fitness value was the water which needed transportation. I tried to minimize this value by selecting the smallest fitness-value units as the parents for the next generation, recombining and mutating their chromosomes. Using the same 45 day data I optimized the control system to this solution, which has almost as good result as the first one mentioned above. That is why I suppose that this algorithm could be improved furthermore and applied in many cases of similar water direction systems.

7. Irodalomjegyzék

[1] **Benkő T, Sanyi Á, Mizsey P, Fonyó Zs:** Environmental and economic comparison of wastesolvent treatment options, Cent. Eur. J. Chem., 4 (1) 92-110., 2006

[2] IPPC Reference Document on Best Available Techniques in Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector, 2003 - http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/cww_bref_0203.pdf, 2003. február

[3] **Mizsey P:** Waste reduction in the chemical industry - a two level problem, Journal of Hazardous Materials 37 1-13., 1994

[4] **Salgado A.M, Folly R.O.M, Valdman B:** Biomass monitoring by use of a continuous on-line optical sensor, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 75, Issues 1–2: 24-28, 2001

[5] Thresholds for water pollution 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet a vízszennyező anyagok kibocsátásaira vonatkozó határértékekről és alkalmazásuk egyes szabályairól - http://www.complex.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A0400028.KVV, 2012. április

[6] Felszíni vizek vizsgálata, Kémiai oxigénigény meghatározása, MSZ 12750/21-71, MSZ ISO 6060:1991 - <http://cheminst.emk.nyme.hu/vizkemia/KOI.pdf>

[7] **Stoyan Gisbert:** MATLAB, Typotex Kiadó, 2005

[8] MATLAB Documentation - <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>

[9] **Álmos A, Győri S, Horváth G, Várkonyiné Kóczy A:** Genetikus Algoritmusok, Typotex Kiadó, Budapest, 2003

[10] **Futó Iván:** Mesterséges intelligencia, Aula Kiadó, 2003

[11] **John Henry Holland:** Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975

8. Függelék

1. táblázat: a munka során felhasznált mért adatok. A mérés ideje (DATETIME), a vezetőképesség (VK [μS]), a pH (), a refrakció cukoregységértékben (BRIX [%]), a hőmérséklet (TEMP [°C]), az 1. tartály szintje (LTM1 [%]), a 2. tartály szintje (LTM2 [%]) a mosás (kék szín) és a visszaállítás (sárga szín). A teljes adatsor 45 nap 16 000 mérését foglalja magába.

DATETIME	VK	PH	BRIX	TEMP	LTM1	LTM2	MOSONY
2011.10.11. 22:45:44	13,1	7,1	0,61	30,3	38,2	76,3	0
2011.10.11. 22:46:44	13,3	7,1	0,98	30,6	38,2	76,9	0
2011.10.11. 22:47:45	13,9	7	0,56	31	38,2	77,3	0
2011.10.11. 22:48:44	18,4	7,1	0,83	31,5	38,2	77,5	0
2011.10.11. 22:49:44	0,7	6,8	0,09	31,7	38,1	77,9	1
2011.10.11. 22:50:45	0,9	6,8	0,05	31,4	38,1	78,4	1
2011.10.11. 22:51:45	20,3	7,1	0,6	31,2	38,3	78,9	0
2011.10.11. 22:52:44	8,7	7	0,57	31,5	38,1	79,4	0
2011.10.11. 22:53:44	12,8	7,1	0,5	32	38,2	79,7	0
2011.10.11. 22:54:45	15,8	7,1	0,66	32,6	38,2	80,2	0
2011.10.11. 22:55:44	13,1	7	0,68	33	38,2	80,5	0
2011.10.11. 22:56:45	10,6	7	0,62	33,2	38,2	80,8	0

2. táblázat: Az általunk felhasznált laborban mért 128 darab adat. A narancssárga adatok nem voltak megbízhatóak, valamint előfordultak duplikált adatok, ezért ezeket töröltem a szimuláció során.

Mintavétel dátuma	Idő	pH	VK [mS/cm]	Brix [%]	Hőmérséklet [°C]	KOI [mg/l] (labor mérés)
2011.09.14		7,1	1,11	0,84	30,2	305
2011.09.14		7	0,7	0,4	30	80
2011.09.14	15:30	8,6	0,67	0	28,5	338
2011.09.14	15:40	8,6	0,66	0,11	34,9	158
2011.09.14	15:45	8,7	0,69	0,06	36,5	100
2011.09.14	15:50	8,7	0,67	0,22	37	50
2011.09.14	16:10	6,8	0,7	0,54	33,1	50
2011.09.15	8:00	6,7	0,98	0	23,2	55
2011.09.15	10:30	7	16,7	1,44	31,5	231
2011.09.15	10:35	7	11,1	1,33	31,7	104
2011.09.15	10:45	7,3	8,7	0,73	31,9	103
2011.09.15	10:47	7,1	11,9	1,25	31,7	118
2011.09.15	13:36	6,9	1,19	1,06	40,9	2600
2011.09.15	14:05	6,8	1,39	0,78	36,1	191
2011.09.15	14:38	6,9	1,11	0,63	35,9	50
2011.09.15	15:35	7,2	0,91	0,65	36,7	324
2011.09.15	15:40	6,8	1,26	0,71	37,2	726
2011.09.15	15:47	7,1	0,77	0,94	38	124

2011.09.15	15:50	6,9	0,86	0,38	36,7	130
2011.09.15	15:47	7,1	0,72	0,55	38	118
2011.09.15	16:02	6,9	0,82	0,34	41,7	369
2011.09.15	16:04	6,7	0,8	0,66	42,1	152
2011.09.15	16:18	6,5	0,95	0,63	38,9	168
2011.10.11		8,6	0,67	0	26,1	338
2011.10.11		6,7	0,98	0	27,1	55
2011.10.11		8,7	0,69	0,06	27,9	100
2011.10.11		8,6	0,66	0,11	27,7	158
2011.10.11		6,9	0,86	0,21	28,3	130
2011.10.11		8,7	0,67	0,22	29,4	50
2011.10.11		6,9	0,82	0,34	28,4	369
2011.10.11		7	0,7	0,4	28,1	80
2011.10.11		6,8	0,7	0,54	27,1	50
2011.10.11		7,1	0,72	0,55	27,5	118
2011.10.11		6,5	0,95	0,61	27,6	168
2011.10.11		6,9	1,11	0,63	27,9	50
2011.10.11		6,7	0,8	0,66	27,5	152
2011.10.11		6,8	1,26	0,71	28,1	726
2011.10.11		7,3	8,7	0,73	28,5	103
2011.10.11		6,8	1,39	0,78	28,6	191
2011.10.11		7,2	0,91	0,81	29	324
2011.10.11		7,1	1,11	0,84	28,1	305
2011.10.11		7,1	0,77	0,94	29	124
2011.10.11		6,9	1,19	1,06	29	2600
2011.10.11		7,1	11,9	1,25	29,2	118
2011.10.11		7	11,1	1,33	29,4	104
2011.10.11		7	16,7	1,44	29	231
2011.10.11		6,8	1,1	0,26	28,9	251
2011.10.11		6,8	1,3	0,22	29,1	166
2011.10.11		6,9	1	0,17	29	50
2011.10.11		6,9	1,1	0,29	28,9	226
2011.10.11		6,9	1,1	0,29	29,2	169
2011.10.11		6,9	1	0,16	29,3	50
2011.10.11		6,8	0,9	2,01	29	51000
2011.10.11		6,8	0,9	4,11	28,4	78000
2011.10.11		6,8	1,1	2,87	28,5	20000
2011.10.11		6,8	1,3	0,32	28,7	6400
2011.10.11		7,3	1	0	29	182
2011.10.11		6,7	3,8	0,34	29,1	9600
2011.10.11				0	29	100
2011.09.28	17:18	6,8	1,1	0,26	33,9	251
2011.09.28	17:33	6,8	1,3	0,22	33,6	166
2011.09.28	17:25	6,9	1	0,17	34,2	50
2011.09.28	17:17	6,9	1,1	0,29	34,1	226
2011.09.28	17:16	6,9	1,1	0,29	34,2	169
2011.09.28	17:26	6,9	1	0,16	34,3	50
2011.10.27	14:35	6,8	0,6	0	30,1	50

2011.10.12	17:27	6,6	1	0,22	32,7	964
2011.10.14	16:00	6,8	0,6	0,48	30,1	1400
2011.10.19	15:50	5,9	1,1	1,59	29,3	162
2011.10.21	15:36	6,7	1	1,61	27,9	158
2011.10.24	16:02	6,7	0,9	0	25,8	526
2011.10.25	18:50	6,8	0,4	0	24,2	46
2011.10.26	17:13	6,8	0,2	0	27	121
2011.10.25	7:22	6,9	0,7	0	24,3	66
2011.11.08	20:24	6,8	0,6	0	27	466
2011.11.10	15:26	6,8	0,4	0	20,9	46
2011.11.10	20:43	6,3	0,2	0	19,5	78
2011.11.11	11:37	7	0,6	6,61	15,7	78000
2011.11.11	11:41	7	0,7	4,47	15,6	56800
2011.11.11	11:41	6,9	0,6	0,49	15,6	20800
2011.11.11	11:48	6,6	0,9	0,02	15,6	350
2011.11.11	11:56	6,8	1,1	0,06	15,6	165
2011.11.11	12:22	7	1	0,03	15,8	1500
2011.11.11	12:48	6,8	0,9	0	17,6	45
2011.11.11	13:26	6,2	0,9	0,04	19,9	48
2011.11.11	13:28	6,8	0,9	0	19,5	38
2011.11.11	15:47	6,8	0,9	0	20,5	50
2011.11.11	14:51	7	10,5	0,96	20	100
2011.11.11	15:00	6,9	13,7	1,28	22	100
2011.11.11	15:57	7	17	1,6	18,2	100
2011.11.11	15:41	6,9	0,7	0	20,7	50
2011.11.11	16:43	6,7	0,7	0,15	18,5	100
2011.10.17	8:41	6,7	33,6	3,47	23,4	384
2011.10.17	9:57	6,8	13,9	2,04	22,7	96
2011.10.17	10:48	6,2	0,5	1,28	26	192
2011.10.17	13:13	7	8,3	3,16	31	17800
2011.10.17	15:47	6,6	0,9	1,58	31	384
2011.10.17	16:28	6,6	0,6	1,44	29,2	68
2011.10.18	8:57	7	5,6	3,25	22,2	8640
2011.10.18	10:17	6,8	0,9	1,36	25,9	259
2011.10.18	11:42	6,7	0,6	1,5	28,2	158
2011.10.18	13:11	7	21,4	3,09	29	202
2011.10.18	14:50	6,8	0,9	1,6	31,1	792
2011.10.18	16:08	6,5	0,9	1,6	31	4800
2011.10.19	8:41	6,8	18,8	2,23	22,7	250
2011.10.19	9:55	6,7	1	1,4	28,6	374
2011.10.19	11:52	6,8	0,6	1,68	25,8	1580
2011.10.19	13:50	7,3	0,9	1,62	30,4	384
2011.10.19	14:35	7	0,4	1,76	39,4	269
2011.10.19	15:57	6,4	1,1	1,62	29,5	82
2011.10.28	8:46	6,7	0,1	0,18	22,6	110
2011.10.28	9:53	6,6	0,5	0,04	32,3	139
2011.10.28	10:55	6,7	0,6	0,05	29,5	192
2011.10.28	11:57	6,5	0,6	0,35	27,8	110

2011.10.28	14:04	6,8	0,6	0,35	27,1	93
2011.10.28	15:18	6,7	0,6	0,42	28,2	288
2011.10.28	16:02	6,8	0,6	0,34	26	173
2011.10.14	15:40	6,9	0,9	1,45	21,1	1920
2011.10.14	15:58	6,7	0,9	1,5	20,7	960
2011.11.15	10:08	6,6	0,9	1,43	17	408
2011.11.15	11:43	6,7	0,6	1,73	21,5	768
2011.11.15	14:59	6,7	1	1,59	25,6	144
2011.11.15	16:20	6,8	6,3	1,92	21,6	216
2011.11.16	11:25	6,7	0,7	1,54	19,5	3070
2011.11.16	13:09	6,9	1	1,92	22,5	792
2011.11.16	14:22	7	0,9	1,73	24,5	154
2011.11.16	15:43	6,7	0,9	2,04	24,2	1150
2011.11.17	10:26	6,5	1	1,79	15,7	125

3. táblázat: a kalibrációs görbéhez felhasznált, az előző adatsorból kiszűrt, „tisztított” adatok (109 darab). A színek a BRIX* szerinti csoportosítást jelentik.

BRIX*	KOI	BRIX*	KOI	BRIX*	KOI	BRIX*	KOI	BRIX*	KOI
-0.23	231	-0.009	100	0.29	93	1	96	1.72	269
-0.14	103	0.04	158	0.29	110	1.19	259	1.75	230
-0.14	182	0.044	158	0.29	130	1.23	192	1.82	792
-0.12	38	0.06	118	0.294	130	1.27	48	1.95	1150
-0.1	100	0.06	50	0.34	80	1.29	259	2.33	17800
-0.1	55	0.07	50	0.35	250	1.29	216	2.69	8640
-0.098	55	0.08	100	0.36	288	1.3	374	2.76	20000
-0.09	100	0.09	166	0.4	374	1.34	408	4.02	78000
-0.09	45	0.11	384	0.42	1400	1.36	1920	4.4	56800
-0.09	526	0.12	130	0.47	50	1.37	67		
-0.07	66	0.12	192	0.478	118	1.41	960		
-0.07	338	0.12	964	0.51	168	1.44	158		
-0.07	350	0.124	130	0.52	50	1.48	162		
-0.07	1500	0.13	50	0.535	168	1.48	3070		
-0.07	100	0.15	50	0.56	324	1.49	144		
-0.067	338	0.15	251	0.58	152	1.49	384		
-0.06	50	0.153	50	0.584	726	1.51	82		
-0.06	466	0.17	110	0.64	191	1.51	158		
-0.05	165	0.18	169	0.719	324	1.51	792		
-0.04	46	0.18	226	0.72	48	1.51	4800		
-0.02	78	0.19	6400	0.72	324	1.53	384		
-0.02	121	0.22	104	0.73	305	1.62	1580		
-0.01	48	0.258	369	0.86	124	1.64	154		
-0.01	139	0.26	369	0.94	2600	1.67	768		
-0.01	100	0.28	173	0.95	202	1.69	125		

4. táblázat: a kettős lineáris modell kalibrációja során kapott egyenesek egyenletei ($f(x) = P1 * x + P2$ és $g(x) = P3 * x + P4$) és azok négyzetes eltérése az adatoktól (Norm).

Szétválasztás helye	P1*x	P2	P3*x	P4	Norm
13	240.4385	194.426	9500.741	-4918.94	78404.81222
14	2202.931	496.0666	9565.026	-5047.7	78895.84405
15	1883.66	446.9937	9618.828	-5155.47	78692.38383
16	1905.803	450.3045	9676.516	-5271.23	78443.73717
17	1511.697	394.6525	9732.661	-5384.37	78239.36917
18	1712.553	423.0155	9795.103	-5510.2	77972.56286
19	1471.256	391.2733	9855.51	-5632.65	77728.3076
20	1041.56	337.7423	9915.603	-5755.17	77506.54861
21	625.8352	289.8412	9975.241	-5878.19	77278.6546
22	392.4835	262.9537	10037.82	-6007.29	77026.7421
23	82.8152	228.5338	10100.63	-6137.59	76783.22766
37	164.4882	218.185	11144.9	-8398.06	72683.75713
38	108.1581	214.0438	11235.12	-8599.41	72316.66653
39	21.42263	207.8402	11327.79	-8806.85	71948.22517
46	2076.711	313.8799	12171.8	-10733.2	72243.24591
47	1830.098	303.141	12293.6	-11017.3	71753.60072
48	1672.323	297.6838	12415.5	-11306.5	71232.11798
49	1544.693	293.3262	12544.65	-11613.2	70672.39005
50	1356.339	287.7505	12672.79	-11920.1	70143.19534
51	1169.047	282.6277	12804.97	-12238.1	69602.96321
52	1021.056	278.5798	12946.6	-12578.9	69009.57377
53	903.2478	275.3575	13098.76	-12945	68357.93015
54	801.3985	272.6877	13260.72	-13335.3	67654.79093
55	677.4302	270.8997	13416.09	-13716.6	66995.76388
56	612.7314	270.1156	13582.37	-14126.3	66260.44148
57	564.7547	269.6476	13758.24	-14561.4	65471.34259
58	535.2691	269.6205	13932.57	-14999.4	64685.21327
59	745.6931	268.959	14131.5	-15503.1	63742.75179
60	610.592	270.6346	14298.06	-15933.4	63040.57968
61	513.831	271.9721	14475.99	-16394.5	62267.75163
62	436.5278	273.4834	14654.91	-16864	61485.35855
63	348.5771	275.3611	14841.96	-17356.9	60674.99794
64	294.7098	276.6632	15040.45	-17882.9	59789.03553
65	274.0006	277.2617	15247.17	-18435.9	58843.44905
66	226.5236	278.8128	15458.45	-19005.3	57891.90814
67	275.0871	277.1879	15700.71	-19659.3	56717.42799
68	233.9045	279.0037	15921.16	-20266.6	55709.88355
69	213.9223	280.139	16120.2	-20832	54813.97812
70	157.2738	283.3665	16331.64	-21432.9	53881.93849
71	147.5673	283.9195	16571.18	-22113.6	52760.12235
72	136.7628	284.5552	16829.11	-22849.2	51531.28236

73	98.59504	287.6017	17024.88	-23436.1	50686.44776
74	399.7387	260.401	17246.92	-24125.3	49801.62444
75	345.861	265.3381	17429.44	-24694.4	49036.11832
76	285.4315	271.2851	17597.43	-25230.1	48373.42928
77	241.1139	276.611	17682.93	-25532.3	48120.14306
78	197.4591	282.0361	17756.7	-25799.9	47928.80649
79	146.6151	288.5749	17817.07	-26024.8	47805.15183
80	125.8077	291.2991	17878.46	-26256.9	47668.69063
81	105.4488	293.9645	17944.99	-26508.3	47522.53224
82	100.9653	294.5578	18016.82	-26781.5	47359.02712
83	99.33973	294.7825	18078.07	-27020.7	47238.17168
84	202.7682	280.1698	18167.74	-27375.6	47135.0493
85	171.0892	284.6969	18222.49	-27593.7	47064.77586
86	197.9051	280.6845	18283.9	-27844.8	46968.72135
87	173.9691	284.3887	18320.44	-27997.2	46942.29695
88	152.5644	287.8495	18343.34	-28095.4	46937.14403
89	286.6505	266.1698	18437.14	-28497.3	47136.19299
90	259.4857	270.6141	18465.97	-28621.7	47136.40961
91	246.8041	272.6889	18505.48	-28792	47110.84991
92	221.7662	276.8922	18531.46	-28905.3	47118.76464
93	202.7348	280.0871	18564.24	-29048.2	47115.5383
94	210.9057	278.7154	18624.26	-29310	47072.88609
95	369.3422	252.1178	18843.8	-30267.4	47603.01717
96	353.528	254.8542	18916.77	-30588.2	47565.94058
97	381.7129	249.3541	18979.54	-30874.3	47563.52068
98	355.652	254.5623	18975.04	-30853.6	47591.80725
99	352.8218	255.1481	18971.6	-30837.7	47592.09498
100	328.1526	260.3728	18905.89	-30530.7	47602.57459
101	309.7606	264.4018	18784.29	-29957.8	47573.35174
102	291.1686	268.6102	18549.65	-28844.3	47474.15261
103	290.957	268.6615	18090.69	-26635.7	47180.27837
104	301.5193	265.8037	16982.12	-21183.9	46119.9001
105	965.3561	45.53704	16878.38	-20643.3	55730.04572

5. táblázat: Az ICM során felhasznált fitnessfüggvény működési táblázata. A tartályok szavazatainak vektora (t(1), t(2), t(3)), a súlyfaktorok szavazatainak vektora (s(1), s(2)...s(7)), a KOI megengedett felső értéke (K_{MEG}), extrém magas értéke (K_{EXTRÉM}), számított pillanatnyi (K_{PILLANATNYI}), kumulált (K_{ELŐZŐ_KUMULÁLT}) és becsült új kumulált (K_{KUMULÁLT}) értéke valamint a tartályokhoz tartozó pumpák (P) és tartályszintek (S).

Tartály	Feltétel	Számítás
1		$t(1)+=\frac{K_{MEG}-K_{PILLANATNYI}}{K_{MEG}}*s(1)$

		$t(1) += \frac{K_{MEG} - K_{KUMULÁLT}}{K_{MEG}} * s(2)$
	$ha K_{ELŐZŐ_KUMULÁLT} > K_{MEG}$ és $K_{KUMULÁLT} < K_{ELŐZŐ_KUMULÁLT}$	$t(1) += s(3)$
	$ha P_1 = be$	$t(1) = -100$
2		$t(2) += \frac{K_{MEG} - K_{PILLANATNYI}}{K_{MEG}} * s(4)$
		$t(2) += \frac{K_{MEG} - K_{KUMULÁLT}}{K_{MEG}} * s(5)$
	$ha K_{ELŐZŐ_KUMULÁLT} > K_{MEG}$ és $K_{KUMULÁLT} < K_{ELŐZŐ_KUMULÁLT}$	$t(2) += s(6)$
	$ha P_2 = be$	$t(2) = -100$
3		$t(3) += \frac{K_{PILLANATNYI} - K_{EXTRÉM}}{K_{EXTRÉM}} * s(7)$
	$ha P_1 = be$ és $S_2 \geq 70$ vagy $P_2 = be$ és $S_1 \geq 70$	$t(3) = 100$