

Mesterséges intelligencia alapú árvízi üzemirányító rendszer a Felső-Tiszai árapasztó tározók optimalizált, valós idejű üzemirányítására

Szabó János Adolf⁽¹⁾ — Lucza Zoltán⁽²⁾

- 1) HYDROInform, Hidroinformatikai Kutató, Rendszerfejlesztő és Tanácsadó BT.
- 2) Felső-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság, Nyíregyháza

1. Bevezetés

A Felső-Tisza árvízvédelmének üzemirányítása, hatékony árvízi döntéstámogatás kialakítása az ukrán – magyar szoros együttműködésen alapuló, több éve közösen megtervezett koncepció alapján történik. A koncepció súlyponti elemei a közös érdekeltégű monitoring rendszer kialakítása, online adatcsere megteremtése, közös hidrológiai előrejelző és döntéstámogató rendszer kialakítása, melyeket közös EU-s pályázatokon elnyert támogatással hoztak létre ("A magyar és az ukrán felső-tisza árvízvédelmi fejlesztési programok továbbfejlesztése és összehangolása, integrált árvízvédelmi előrejelző rendszer létrehozása térinformatikai alapú modellrendszer alkalmazásával").

A projekt keretében hidroinformatikai elemzéseket (HYDROInform, 2012), majd fejlesztéseket valósítottak meg közösen, melynek keretében létrehozták a Felső-Tisza, térinformatikai alapú (térben és paramétereiben is osztott), 3D-s, fizikai megalapozottságú hidrológiai-hidraulikai előrejelző és döntéstámogató rendszerüket, a DIWA-HFMS-t, amely azóta is automatikus üzemmódban, órás időlépcsőben, felhasználói közreműködés nélkül üzemel.

Az elmúlt néhány év fejlesztési feladatai kapcsán a rendszerfejlesztések egy újabb mérföldkövéhez, az üzemirányítás DIWA-HFMS-be való integrálásához érkezett. Ehhez pedig olyan fejlesztést kellett megvalósítani, amely együtt szolgálja Ukrán partnerünk érdekét is, és az integrált szemléletű árcsökkentést az Ukránok védelmi képességeivel is összehangoltan. Ehhez pedig az kellett, hogy a DIWA-HFMS-be (amelyet az Ukránok is folyamatosan használnak) bármikor rugalmasan lehessen hozzátenni valamely megvalósult völgyzárógátas vagy síkvidéki tározókapacitást, amely aztán azonnal, rendszer-fejlesztői segítség nélkül képes a már meglévő tározókkal összehangolt védelmi elemé lenni a Felső-Tisza régióban. Mindezekon felül, a DIWA-HFMS fejlesztését abba az irányba kellett vinni, hogy akár hány tározó együttes, feltételesen optimális (tehát összehangoltan optimálisan üzemeltetett) üzemrendjét lehessen online – még az árhullám időelőnye alatt – megtervezni.

Ezen célnak az elérése nagyon bonyolult, összehangolt, célirányosan (specifikusan) megtervezett módszertani és hidroinformatikai fejlesztéseket igényeltek.

2. Módszertani összefoglaló

Ebben a fejezetben összefoglaljuk az árcsökkentő tározók optimális üzemrendjének kialakításával kapcsolatos elvárásokat, az elvárásokból eredő feladatokat, az optimalitás kritériumait, az ebből eredő matematikai problémát, majd annak korrekt megoldását egy saját fejlesztésű, gépi tanuláson alapú mesterséges intelligencia-modul felhasználásával. Megmutatjuk (de a konferencia témaköréhez nem illő volta miatt itt nem bizonyítjuk) a gépi tanulás konvergenciájának feltételeit garantáló tételt is.

2.1. A kutatás, fejlesztéssel kapcsolatos elvárások

Amint azt fentebb említettük, a kutatás, fejlesztéssel kapcsolatos elvárások alappillérei voltak, hogy:

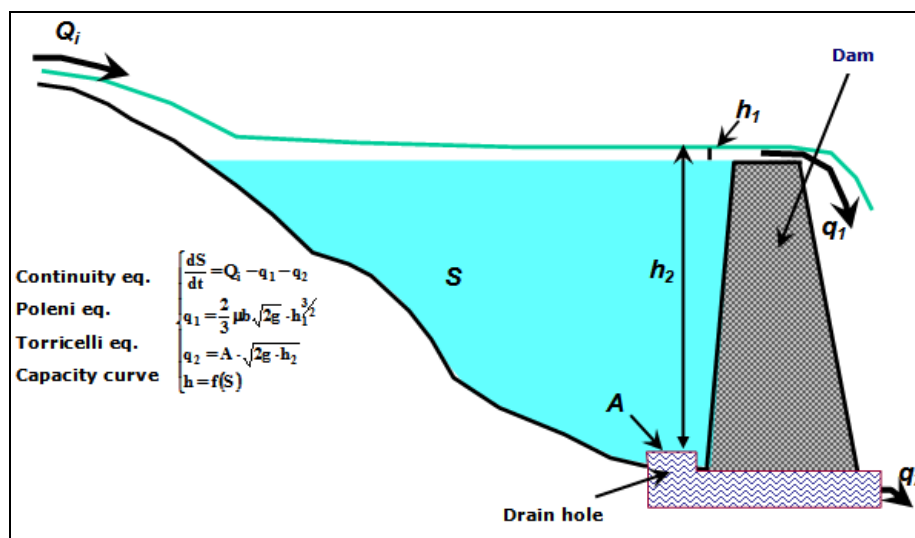
- a) A Felső-Tisza árvízvédelmének üzemirányítása, hatékony árvízi döntéstámogatás kialakítása az Ukrán–Magyar szoros együttműködésen alapuló, több éve közösen megtervezett koncepció alapjait figyelembe véve történjen. Ezek szerint a DIWA-HFMS rendszer továbbfejlesztést úgy kellett megvalósítani, hogy az egyaránt szolgálja a magyarországi "*Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése*" program keretében megépült síkvidéki árcsökkentő tározók, valamint az Ukrán "*A Tisza vízgyűjtő komplex árvízvédelmi vázlatterve*" (már elfogadott) program keretében várhatóan megépülő további síkvidéki, és a hegyvidéki, völgyzárógátas, önszabályozó fenékleeresztővel üzemeltetett árvízcsökkentő tározók üzemirányítását, az üzemeltetés hatásainak figyelembevételét az előrejelzések során. Mivel az Ukrán oldali árvédelmi elemek (tározók) kialakítása várhatóan időben akár jelentősen is elhúzódhatnak, ezért (is) a DIWA-HFMS-t (amelyet az Ukránok is folyamatosan használnak) úgy fejlesztettük, hogy fejlesztői segítség nélkül bármikor rugalmasan lehessen hozzátenni valamely megvalósult tározókapacitást, amely aztán azonnal, képes a már meglévő tározókkal összehangolt védelmi eleme lenni a Felső-Tisza régióknak.
- b) Mindkét, a síkvidéki árapasztó tározók, valamint a hegyvidéki, völgyzárógátas, önszabályozó fenékleeresztővel üzemeltetett árvízcsökkentő tározók üzemirányítását valós időben, az előrejelzés időelőnye alatt a rendszernek automatikusan kell tudni paraméterezni az aktuálisan levonuló árhullám karakterisztikáihoz (jellemzőihez) igazodóan, miközben figyelembe kell venni a kisebb mellékágak vízszállítását is. Cél, hogy az üzemeltetés során hatékony árapasztást lehessen elérni a legjobb (optimális) idejű nyitással-zárással és leeresztőnyílással, azaz akkor kezdődjön meg a zsiliptáblák felhúzása, fenékleeresztők méretre állítása, amikor az valóban szükséges, és csak annyi síkvidéki tározót igénybe venni, amennyi elégséges.
- c) A rendszernek képesnek kell legyen az úgynevezett „tréning” üzemmódban is működni. Lényege, hogy a ritkán előforduló „éles” helyzeteket úgy lehessen gyakorolni szintetikus adatokkal, mintha a helyzet valós lenne. Ennek előnye 1 - a rendszerismeret folyamatos fenntartása; 2 - a védekezésben résztvevő szervezetek, intézmények tevékenységeinek tréningyszerű összehangolásának gyakorlása; 3 - és nem utolsósorban az újonnan érkező kollégák felkészítése.

A fenti a)-c) alatti elvárások közül az a) és a c) valójában inkább számítógépes programozási fejlesztéseket igénylő feladatok voltak, melyek sikeresen lezárultak ugyan, de azok – bár újdonsággal bírnak – tárgyalását, bemutatását jelen dolgozatunkban nem terveztük. A kutatás-fejlesztés lényegi középpontja a b) alatt megfogalmazott elvárások teljesítése volt, amely nem mindennapi alkalmazott, és algoritmikus matematikai megfontolásokat, fejlesztéseket igénylő feladattá formálódott. Dolgozatunkban a továbbiakban csak ennek a pontnak a kifejtését, a probléma megoldására irányuló matematikai apparátus részleteit fogjuk bemutatni.

2.2. A feladat matematikai megfogalmazása

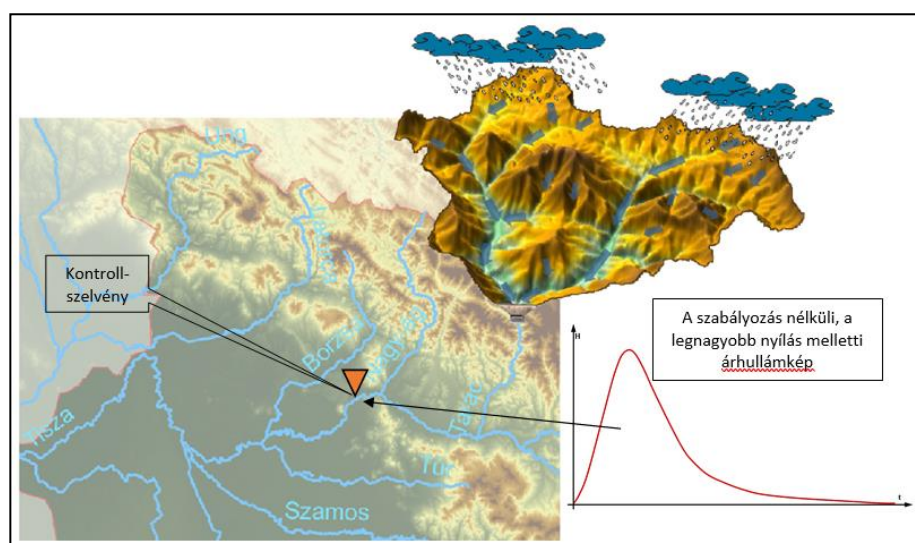
Valójában tehát a kutatás, fejlesztés két tározótípus, a hegyvidéki völgyzárógátas, és a síkvidéki árapasztós tározók összehangolt, optimális üzemirányításának módszertani kidolgozását, majd megvalósítását tűzte ki célul.

a) A hegyvidéki, völgyzárógátas, önszabályozó fenékleeresztővel üzemeltetett árvízcsökkentő tározók üzemirányítása látszólag megoldott azáltal, hogy az újratervezett Ukrán vázlattervben a fenékleeresztők méretét a projekt keretein belül meghatározott fix méretre írják elő, amely a Q1%-ot Q10%-ra hivatott csökkenteni (HYDROInform, 2012). Ugyanakkor a projekt végén javaslatunk az volt az Ukrán kollégák felé, hogy ne zárkozzanak el mereven a fenékleeresztő méretének esetleges változtathatóságától, mert azzal 1 – lehet fokozni a hatékonyságot, 2 – elkerülhetőek lehetnek az esetleges árhullám-szuperponálás esetleges problémái is. Amíg a tározók meg nem épülnek, ezt a javaslatunkat úgy tekintjük, hogy akár meg is fontolhatják, és akkor a DIWA-HFMS-t nem érheti meglepetés, mivel a fejlesztés során előre beépítettük ezt a funkciót.



1. ábra. A hegyvidéki, völgyzárógátas, fenékleeresztővel üzemeltetett árvízcsökkentő tározó tározóban lejátszódó hidraulikai folyamatok

A feladat megfogalmazásához tekintünk előbb a fenti 1. ábrát, amelyről leolvasható, hogy ha adott a tározó kapacitás és vízfelszín görbéje a vízmélység függvényében, továbbá adott a fenékleeresztő mérete ($A [m^2]$), akkor a csapadék-lefolyás hidrológiai modell által (Szabó 2007, Szabó et al., 2023) a tározó feletti vízgyűjtőre hullott csapadékból (+hóolvadásból) keletkező Q_i bemenő árhullám alapján meghatározhatók a kimenő q_1 és q_2 fluxusok is.



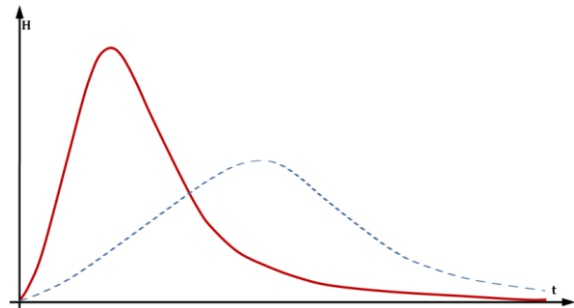
2. ábra. A tározó és vízgyűjtője, a kontroll-szelvény a vízhálózaton és az önszabályozott árhullámkép

Az elmondottak alapján nyilvánvaló, hogy tározónkként két-két kontroll-paraméter értelmezhető. Az egyik a leeresztő nyílás szűkítésének időpontja, a másik a szűkítés mértéke (mondjuk %-ban).

A szabályozás feladata ez esetben az alábbiakban értelmezhető: Adott egy (vagy több) tározó, és adott egy kontroll-szelvény valahol a tározó(k) által védett vízfolyáson (lásd fent a 2. ábra), amelyre az alábbi alternatív elvárások fogalmazhatók meg:

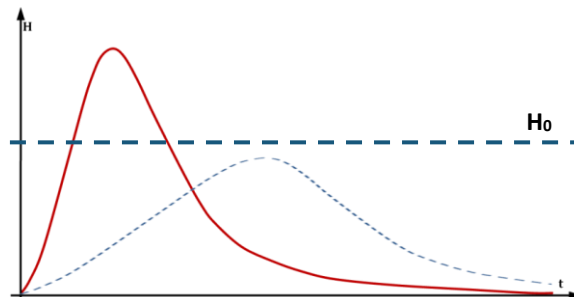
I. Egy konkrét árhullámkép kialakítása:

Ez egy lehetséges szabályozás, de csak megközelítően (mondjuk a legkisebb négyzetesen minimális cél mentén)



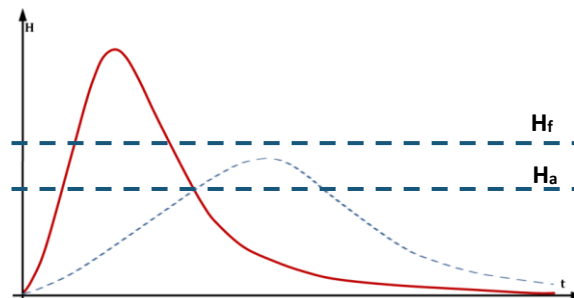
II. A szabályozott árhullám legnagyobb értéke egy adott, H_0 szint alatt legyen:

Ez is egy lehetséges szabályozás, de mivel végtelenül sok ilyen megoldás létezik, a tározó indokolatlanul túltöltődhet.



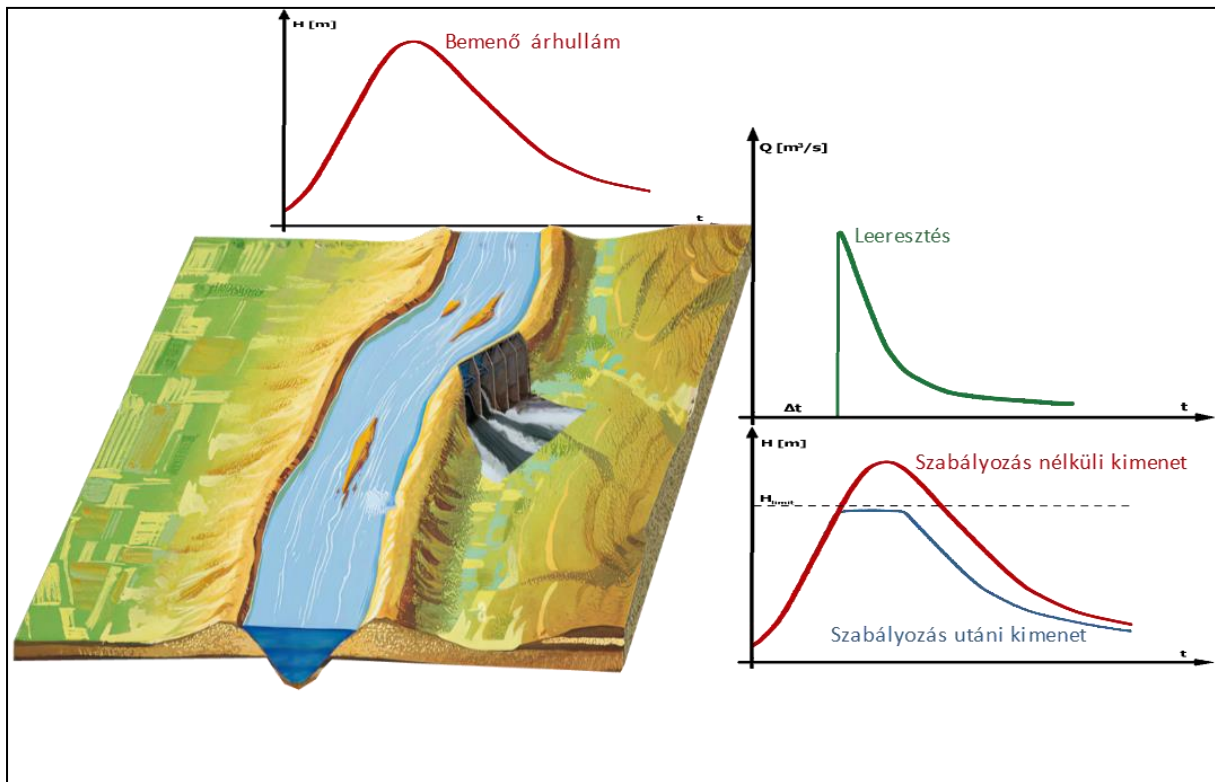
III. A szabályozott árhullám legnagyobb értéke egy adott, $[H_a; H_f]$ intervallumba kell eszen:

Ez is lehetséges szabályozás, jól kezelhető. Kifejezetten ez ajánlott!



b) A síkvidéki árapasztó tározók üzemirányítása műszakilag ugyan egészen más, mint a fenti a) alatt tárgyalt völgyzárógátás tározók esete, mindazonáltal – amint azt látni fogjuk – mindkét esetben matematikailag azonos módon fogalmazható meg a szabályozási feladat, és módszertanában teljesen azonos lesz a két probléma megoldása is.

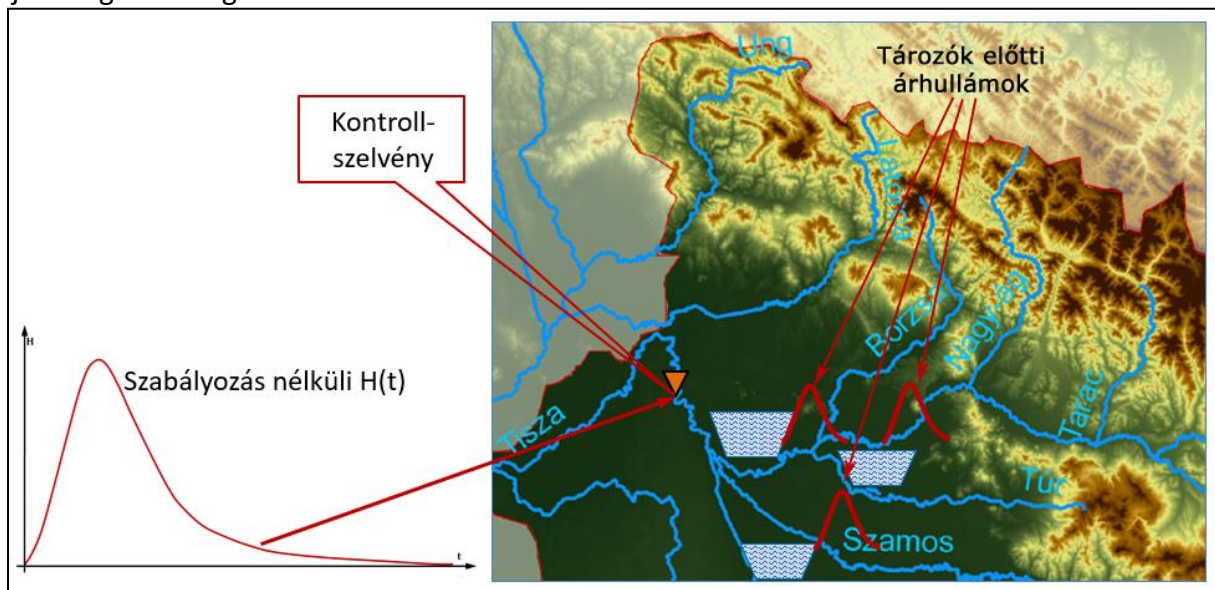
A "Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése" program keretében már megépült (és még építésre váró) síkvidéki árcsökkentő tározók árcsökkentési elve merőben eltér a völgyzárógátás árcsökkentéstől, ugyanis míg a hegyvidéki árcsökkentés esetében a csökkentendő víztömeg az árhullámban marad (hiszen a szabályozás „csak” elnyújtja az árhullámot), addig a síkvidéki árcsökkentés során az árhullám „lefejezése” történik, melynek során az árhullám csúcsának egy része a vízhálózaton kívül ideiglenesen tározásra kerül, amely aztán csak később kerül visszavezetésre a mederbe. A folyamatot jól szemlélteti az alábbi 3. ábra, melyen látható, hogy a szabályozott szakaszra beérkező árhullám a megfelelő helyen és időben „lefejezésre” kerül, és ezáltal egy alsó kontrollszelvénybe már egy kevésbé veszélyes csonka hullám érkezik.



3. ábra. A szabályozandó folyószakasz, a szabályozó leeresztő és a kontroll-szelvény

Ezek szerint nyilvánvaló, hogy elvileg tározónkként két-két kontroll-paraméter értelmezhető. Az egyik a kieresztő táblák nyitásának időpontja, a másik lehet a táblák nyitásának mértéke (mondjuk %-ban). Megjegyezzük, hogy bár a második – a táblák nyitási százaléka – paraméter (lent látni fogjuk) mint elvi lehetőség matematikailag bevonható a szabályozási kritériumok közé, mindazonáltal a védekezésért felelős tervezők a gyakorlatban minden tábla 100%-os nyitására készülnek.

A fenti 3., értelmező ábrával szemben, az alábbi 4. ábra már a valós helyzetet szemtatizálja a jelenleg már meglévő három Felső-tiszai tározóval.

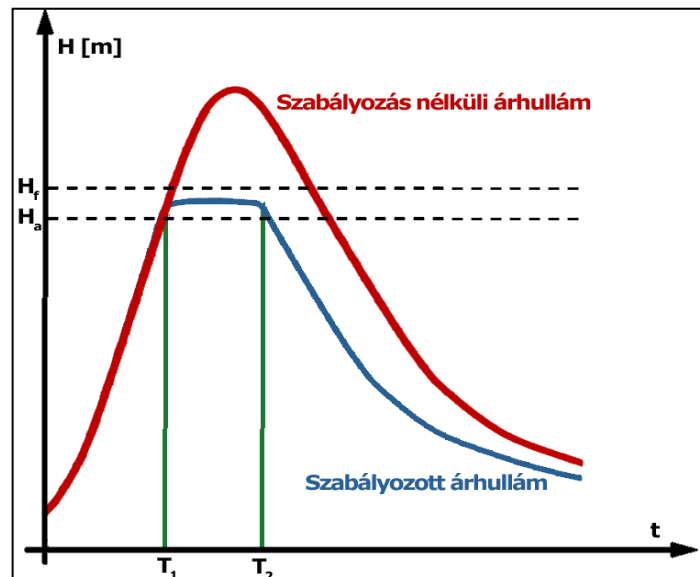


4. ábra. A tározók és a kontroll-szelvény a vízhálózaton, valamint a szabályozás nélküli árhullámkép

Ez esetben a szabályozás feladatát az alábbiakban értelmezhetjük: Adott egy (vagy több) tározó ismert terepi és beeresztőművi karakterisztikákkal, valamint adott azok feletti vízgyűjtő vízhalózatán az előrejelzett vízhozamok és vízállások idősorai (jelen esetben) a DIWA-HFMS rendszer által modellezve. Adott továbbá egy kontroll-szelvény valahol a tározó(k) által védett vízfolyáson (lásd a 4. ábra), amelyre ekkor az alábbi szabályozási elvárás fogalmazható meg:

I. A szabályozott árhullám legnagyobb értéke egy adott, $[H_a; H_f]$ intervallumba kell essen!

Ez – amint azt majd látni fogjuk – egy jól kezelhető szabályozás, melynek még akkor is van eredménye, ha az MI algoritmus nem talál a feltételnek eleget tevő szabályozást, mert kiválasztja a lehető „legjobbát”, a nem megfelelők közül (erről később lesz részletesen szó).



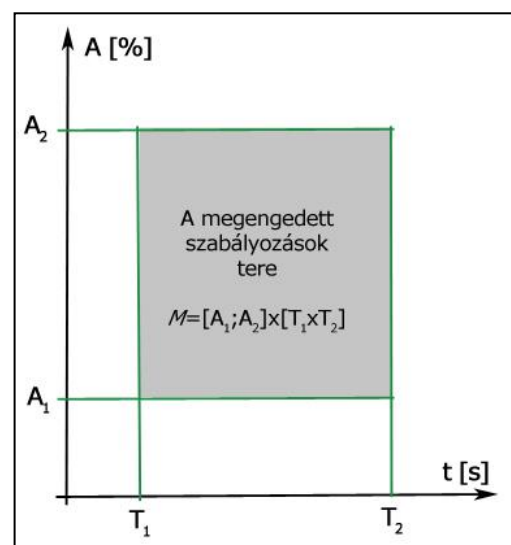
c) A „megengedett szabályozások halmaza” jelentésének ismerete az üzemirányítás matematikai feltételeinek alapvető fogalma. A fenti 2.2./b) alatti probléma műszakilag ugyan egészen más, mint a 2.2./a) alatt tárgyalt völgyzárógátás tározók esete, mindazonáltal – amint azt látni fogjuk – mindkét esetben matematikailag azonos módon fogalmazható meg a szabályozási feladat, majd módszertanában teljesen azonos lesz a két probléma megoldása is.

A fenti 2.2./a) és b) alapján már felírhatjuk a megoldandó probléma matematikai alakját. Ehhez mindenekelőtt definiáljuk mi is az a „megengedett szabályozások halmaza”. Az alábbiakban három, könnyen interpretálható esetet mutatunk be:

I. Első alapeset, ha egy tározónk van, amelynek optimális üzemrendjét két paraméter mentén szeretnénk megoldani: nyitási/szűkítési időpont (t), valamint a nyitás/szűkítés mértéke a lehetséges mérték maximumának százalékban.

A döntéselőkészítőnek ekkor definiálnia kell a lehető legkorábbi és legkésőbbi nyitási/szűkítési időpontokat (T_1 és T_2), valamint a nyitás/szűkítés mértékének lehetséges legkisebb és legnagyobb értékeit (A_1 és A_2). Ekkor a $(t-A)$ szabályozási térben a két intervallum közös része adja a megengedett szabályozások halmazát:

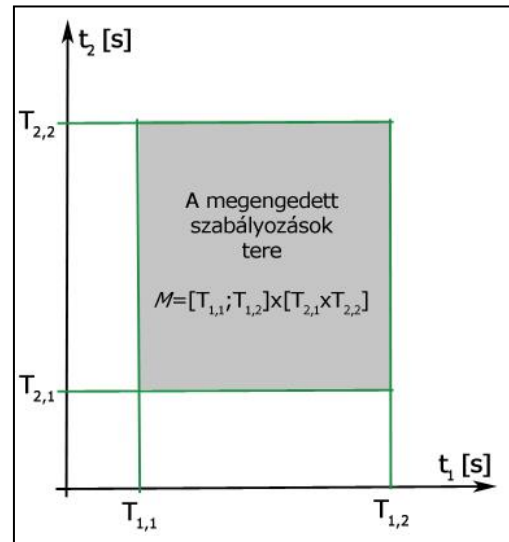
$$M=[A_1;A_2] \times [T_1;T_2]$$



II. Második alapeset, ha két tározónk van, amelyek összehangolt optimális üzemrendjét egy-egy paraméter mentén, a nyitás időpontja által szeretnénk megoldani minden tábla teljes nyitásával: nyitási időpontok tározónkként (t_1 és t_2).

A döntéselőkészítőnek ekkor definiálnia kell tározónkként a lehető legkorábbi és legkésőbbi nyitási időpontokat: első tározóra $T_{1,1}$ és $T_{1,2}$, a másodikra $T_{2,1}$ és $T_{2,2}$. Ekkor a (t_1-t_2) szabályozási térben a két intervallum közös része adja a megengedett szabályozások halmazát:

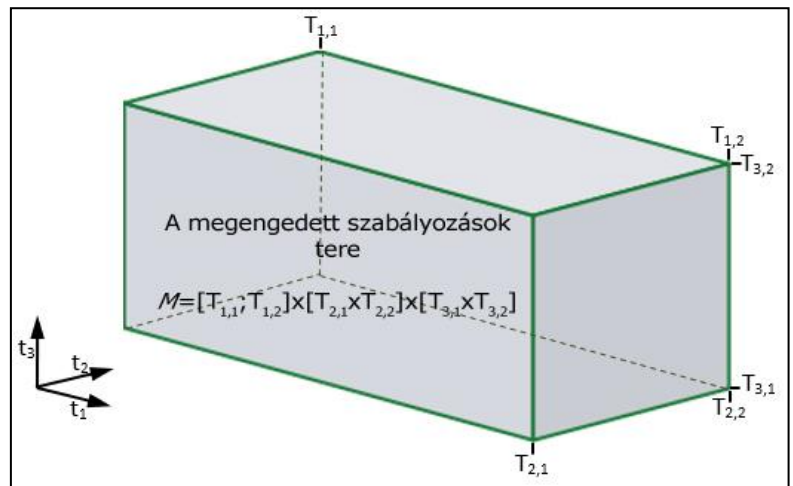
$$M=[T_{1,1};T_{1,2}] \times [T_{2,1};T_{2,2}]$$



III. Harmadik alapeset lehet a fenti c)/II. alatti, ha ugyan úgy szeretnénk a szabályozást megoldani, de most éppen három tározóval.

Ekkor a $(t_1-t_2-t_3)$ szabályozási térben értelemszerűen a három intervallum közös része adja a megengedett szabályozások halmazát:

$$M=[T_{1,1};T_{1,2}] \times [T_{2,1};T_{2,2}] \times [T_{3,1};T_{3,2}]$$



A fentiek alapján aztán elképzelhető az összes lehetséges, ÉLETSZERŰ üzemirányítási helyzethez tartozó megengedett szabályozások tere, és halmaza. Amint növekedik a tározók száma, és/vagy az elvárások száma, azzal arányosan növekszik az M halmaz dimenziója (ami valójában egy „ n ” dimenziós téglá), és ezáltal a megoldandó üzemirányítás bonyolultsága.

d) Az optimális üzemirányítási feladat matematikai megfogalmazása a fentiek alapján az alábbi (1) szerinti operációkutatási feladat megoldását jelenti:

$$\underset{x \in M}{\text{opt}} f(x) \quad (1)$$

Itt az „opt” bármilyen kritérium szerinti (minimum/maximum stb.) feladatot jelöl, f az optimális üzemirányítás célfüggvénye amely a megengedett szabályozások M halmaza felett van értelmezve, és az x vektor szimbolizálja a döntési változók együttesét, vagyis egy konkrét megengedett szabályozási variánst.

Az optimális üzemirányítás célfüggvényét, f -t a fent már megfogalmazott valamely alternatív szabályozási elvárások (lásd.: 2.2.a) I-III.-ig, vagy a 2.2.b) I.) szerint definiálhatjuk. Ennek lényege, hogy mivel bármely $x \in M$ -hez a kontroll-szelvényben mindig tartozik egy hidrológiai-hidraulikai válasz (a szabályozás hatása a kiválasztott alsóbb szelvényre), ezért ennek a válasznak (ami nem más, mint egy $H(t)$ vízállásidősor, amelyet a hidrológiai-

hidraulikai modell – jelen esetben a DIWA-HFMS – számítja ki) valamelyik kiválasztott értékének az eltérése, „jósága” függvényként felírható minden $\mathbf{x} \in M$ -hez. Matematikailag:

$$f(\mathbf{x}) := |H_{comp}(\mathbf{x}) - H^*| \quad (2)$$

ahol:

- $H_{comp}(\mathbf{x})$ - az \mathbf{x} szabályozási variánshoz tartozó modellezett vízállás;
 H^* - a vízszintben megkívánt célérték, amely az alábbiak valamelyike lehet (beállítási paraméter): legkisebb, legnagyobb, átlagos eltérés.

Matematikailag tehát előttünk a feladat. Megoldandó az (1) probléma a (2) célfüggvénnyel. A továbbiakban erre koncentrálnak a dolgozatunkban.

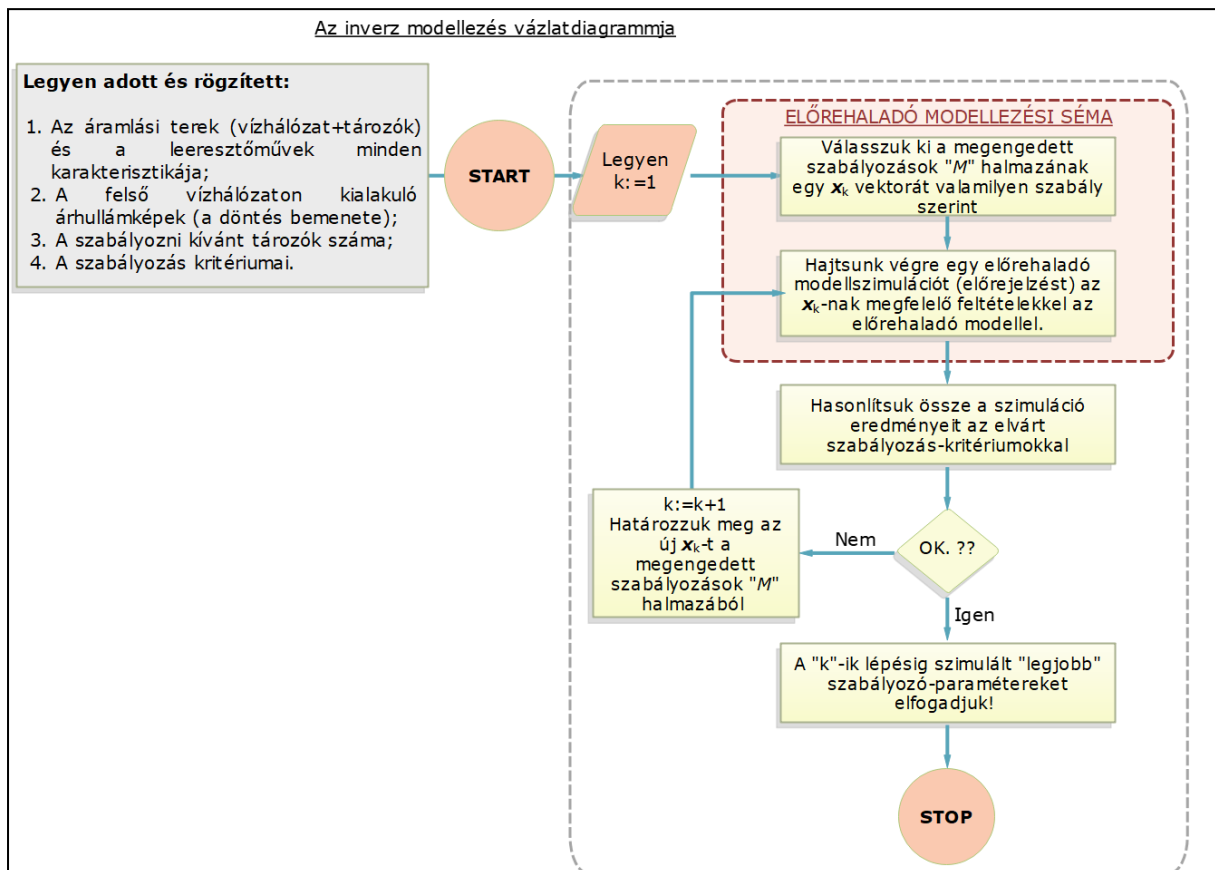
2.3. Az inverz-modellezés problémája és megoldhatósága

Az (1) problémának a (2) célfüggvénnyel való megoldására (továbbiakban „az üzemirányítás matematikai problémája”) irányuló megközelítéseket együttesen úgy mondhatnánk, hogy ez maga az előrejelzés inverz feladata. Ez azt jelenti, hogy midőn az alsóbb (kontroll) szelvényre előrejelzett árhullám szerint bekövetkezhet egy kritikus helyzet (lásd.: 2.2.a) I-III.-ig, vagy a 2.2.b) I.), akkor a feladat egy olyan, a kontroll-szelvény feletti vízhálózaton kialakuló felső árhullámképek meghatározása, amelyeknek a kontroll-szelvényig való levonulása már nem okoz kritikus helyzetet. Ily módon a kritikus helyzetet okozó felső árhullámképek és a kritikus helyzetet még nem okozó, az alsó kontroll-szelvényből a felső szelvényekbe „visszaszámított” (detektált) árhullámkép adná meg a tározókba kivezetendő vízmennyiséget. Észre kell venni, hogy míg az első feladat a fizikai folyamattal azonos irányú előrejelzési modellezésé, addig a másik annak éppen az inverz feladata: előírt alsó árhullámképből (mint okozatból) a felső árhullámképek (mint okok) számítása. Ez maga az inverz modellezés problémája. Tömören: Inverz modellezés = szembe modellezni magával a fizika természetes folyamatával.

Más szakterületeket ide vonatkozó hasonló problémáit nem érintve, az inverz modellezési probléma a vízgazdálkodás, és azon belül is a hidrológiai előrejelzések gyakorlatában rendre, szükségszerűen felbukkanó probléma. Matematikailag ezek a problémák kis kivételtől eltekintve analitikusan nem oldhatók meg. Igazán üde, ritka kivételt jelentett a hazai gyakorlatban a diszkrét lineáris kaszkádmódel (DLCM) invertálása lévén született „input detekció” modellje (Iritz és Szöllősi-Nagy 1983; Szöllősi-Nagy 1989), amely a linearitás keretein belül egy igen szellemes, korának élenjáró megoldását adta a problémának az akkori ismereteinkhez igazodóan. Mindazonáltal a nemlineáris modellek, és ezzel együtt a korszerű 3d-s, térinformatikán alapuló, térben és paramétereiben is osztott hidrológiai-hidraulikai modellek megjelenése, elterjedése révén napjainkban már olyan bonyolult előrejelző modelleket kellene a feladathoz invertálnunk, amelyeket oly elegánsan, véges zárt alakban kifejtve amint azt Szöllősi-Nagy tette (Szöllősi-Nagy 1989) már lehetetlen. Új megoldások irányába fordult a szakma, hogy megoldja az egyre szaporodó inverz modellezési problémákat. Ilyen a mi esetünk és alkalmazott megoldásunk is, amelyet alább részletezünk.

Az inverz modellezés egyik legismertebb, és leginkább alkalmazott és egyben hatékony algoritmus az úgynevezett „próba-hiba módszer” (az angol nyelvű szakirodalomban „trial

and error method”), amelyet mi is követünk. A módszert olyan, szekvenciálisan ismétlődő, a megengedett szabályozások halmazához tartozó különböző feltételekkel lefuttatott előrejelzési modellkísérletek jellemzik, amelyek addig folytatódnak, amíg valamilyen kritérium alapján a kísérlet sikeresé nem válik, vagy amíg a döntés-előkészítő le nem állítja. A nem invertálható szimulációs modellek esetében ez azt jelenti, hogy különböző peremfeltétellel a valós fizikai folyamatok mentén modell-szimulációk sorozatait (nevezzük kísérleteknek) addig hajtunk végre, amíg valamilyen értelemben meg nem közelítettük az elvárt modellkimenetet. Ezt szemlélteti az alábbi, a 4. ábrán látható folyamatábra is.



5. ábra. Az inverz modellezés vázlatdiagramja

Ezt az algoritmust alapvetően kétféleképpen lehet végrehajtani:

1. Valamely kísérletező szakértő személy által, aki a korábbi tapasztalatai alapján maga állítja be (majdhogynem véletlen) az egyes kísérlet $x \in M$ paramétereit, és futtatja le a folyamat irányára fejlesztett előrejelzési modellt, majd maga értékeli ki, és annak megfelelően választja meg az új kísérlethez az $x \in M$ szabályozást;
2. Algoritmusok által generált konvergens szekvenciák alapján, melynek során egy arra fejlesztett „öntanuló” algoritmus (gépi tanulás) „tudatosan” és adaptívan pásztázza a megengedett szabályozások „n” dimenziós halmazát, miközben a maga által generált kísérleti stratégiáiból folyamatosan „tanulja”, hogyan kell a keresési stratégiáját úgy megválasztani, hogy az a lehető legkevesebb kísérleti lépésben garantáltan a legjobb paraméterezéshez vezessen, vagyis: konvergáljon a megoldáshoz.

Mi nyilván a második megoldást tartjuk tudományosan komoly megoldásnak. Az első, a szakértői megközelítés nagyon lassú, és nem garantált a legjobb megoldás. A második emberi kéz érintése nélkül kivitelezhető, és garantált a konvergencia. Sőt! Akár több, alternatív megoldást is képes megtalálni, amelyek mondjuk mind megfelelnek az elvart kritériumoknak, de valamiben mégis eltérőek egymástól az egyes szabályozások. A második hátránya, hogy nagyon bonyolult ilyen algoritmusok és azok szoftvereinek fejlesztése.

2.4. A gépi tanulás alapú mesterséges intelligencia modul

Jelen alfejezet céljainak a teljesítése érdekében koncentráljunk most csupán az (1) problémának a (2) célfüggvénnyel való megoldására tisztán, az eredeti feladat mellőzésével, tehát általános formában.

Egészen általánosan tehát a feladat:

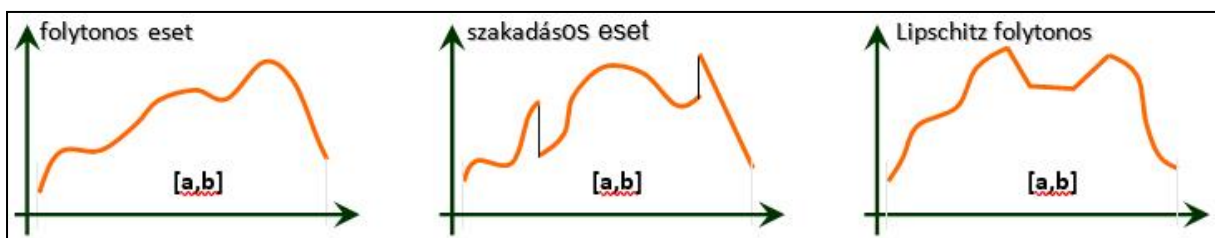
$$\min_{x \in [a,b]} f(x) \quad (3)$$

ahol:

- Az x vektor a lehetséges megoldások halmazának eleme ($x \in \mathbb{R}^n$),
- $[a,b]$ egy „n” dimenziós intervallum, amely a megengedett megoldásokat tartalmazza ($[a,b] \subset \mathbb{R}^n$),
- f a probléma célfüggvénye, amelyről fel kell tételeznünk, hogy legalább Lipschitz értelemben folytonos függvény az $[a,b] \subset \mathbb{R}^n$ -ben, vagyis létezik olyan $L \geq 0$ konstans, hogy

$$|f(x_2) - f(x_1)| \leq L|x_2 - x_1| \text{ minden } x_1, x_2\text{-re az } [a,b]\text{-ből,} \quad (4)$$

ahol L az úgynevezett Lipschitz konstans, amely a lehető legkisebb eltéréssel majorálja a függvény variabilitását az $[a,b]$ -ben. Fontos fogalom ez itt, mert az MI algoritmus ennek adaptív becslése (megismerése) révén építi fel a gépi tanulásának a folyamatát. A fogalom szemléletes megértését szolgálja az alábbi 6. ábra.



6. ábra. A különböző függvényfolytonosságok vizuális értelmezése

Az algoritmus célja tehát megtalálni (a nem feltétlenül egyedüli) megoldását a (3) problémának, feltéve a célfüggvény (4)-ben előírt tulajdonságát. Erre a célra több konvergens algoritmus is született már, mi egy az $[a,b]$ „n” dimenziós intervallum (tégla) úgynevezett adaptív öntanuló módon való részintervallumokra bontásának módszerét

dolgoztuk ki, amelynek célja, hogy miközben a részintervallumokat legyártja az MI algoritmus, azok közül a „kiválasztottak” (lásd később) belső pontjaként tartalmazzák a keresett megoldást/megoldásokat. Másként, határesetben az intervallum-képzés a (3) feladat megoldásához konvergál. Az MI algoritmus lépései (Pintér és Szabó 1985, Szabó 2006):

0. lépés (inicializálás): legyen $l=1$ (a lépések aktuális száma); $m(l)=1$ (az l -ik lépésig generált részintervallumok száma $[a,b]$ -ben; és a kezdeti célfüggvényértékeket számítsuk ki $[a,b]$ csúcsaiban.

1. lépés (a soron következő felbontandó intervallum meghatározása): Az algoritmusnak ki kell választania azt a „ t ” indexet, melyre

$$R(t) = \max_{1 \leq i \leq m(l)} R(i)$$

ahol $R(\cdot)$ egy alkalmas valós függvénye a Lipschitz-állandó (L) iteratív közelítésének, az adott részintervallum méretének és a megfelelő célfüggvényértékeknek annak csúcsaiban.

2. lépés (kilépési kritérium ellenőrzése): Az algoritmus az l -ik lépésben az addig talált legjobb megoldással véget ér, ha az 1. lépésben talált t indexre a kiválasztott n dimenziós részintervallum mérete kisebb, mint egy előre rögzített $\varepsilon \geq 0$ szám, ami az előre elvárt pontosságra utal.

3. lépés (intervallum-hasító pont helyének megválasztása): Az algoritmus az 1 alatt meghatározott t indexű intervallum egy belső pontját az eddigi „tapasztalatai” (tanulása) alapján meghatározza abból a célból, hogy ez a pont generálja az adott intervallum 2^n darab új intervallumra „hasítsa”. Vagyis $x_{\text{new}}(t)=S(t)$, ahol $S(\cdot)$ egy megfelelő „hasítási” szabályt szimbolizál a kiválasztáshoz. Ekkor $x_{\text{new}}(t)$ definiálja a kiválasztott intervallum felosztását 2^n új részintervallumra, majd definíció szerint legyen $l:=l+1$ és $m(l)=m(l)+2^n-1$

4. lépés (mintavétel): Határozzuk meg a célfüggvény értékeit a 3. lépésben újonnan keletkezett részintervallumok csúcsaiban, válasszuk ki közülük azt(azokat) amelyek „jobbak” a korábbiaknál, mentsük el azokat, majd számoljuk újra $L(l)$ becslését, és térjünk vissza az 1. lépésre.

Végezetül, a fent vázolt MI algoritmus konvergenciáját garantáló tétel (Pintér és Szabó 1985):

1. Ha az intervallum-kiválasztás $R(\cdot)$ függvénye folytonos $[a,b]$ -ben;
2. Ha az intervallum-kiválasztás $R(\cdot)$ függvénye transláció-invariáns $[a,b]$ -ben;
3. Ha az intervallum-kiválasztás $R(\cdot)$ függvénye szigorúan monoton csökkenő függvénye a részintervallum csúcsaihoz tartozó célfüggvényértékeknek;
4. Ha az $R(\cdot)$ függvény minden véges intervallumon nagyobb, mint bármely, az adott intervallum tetszőleges belső pontjába zsugorodó ponthoz tartozó értékénél, vagyis:

$$R(X(i), Z(i)) > \lim_{\substack{i \rightarrow \infty \\ X(i) \rightarrow X}} R(X(i), Z(i))$$

5. És végül, ha az $\mathbf{x}_{new}(t)=S(t)$ új pontja minden esetben szigorúan belső pontja minden kiválasztott részintervallumnak,
akkor a fenti MI algoritmus által generált $\{\mathbf{x}\}$ részintervallumcsúcsok sorozata tartalmazza a keresett optimumot.

A tétel bizonyítása (Pintér és Szabó 1985, továbbfejlesztett verzióhoz Szabó 2006) bonyolult, és nem egy műszaki-hidrológiai konferenciára való. Inkább csak azt kell belőle megérteni, hogy sikeres tanulás esetén, vagyis, ha teljesülnek a fenti feltételek, egy nagyon gyors konvergenciára lehet számítani, amelynek révén automatikusan, emberi próbálkozások nélkül garantált a lehetőségekhez legjobb döntés.

Az általunk alkalmazott, a DIWA-HFMS-be beépített, a fenti 5 kritériumnak eleget tevő két (R és S) döntési függvény konkrétan az alábbiak:

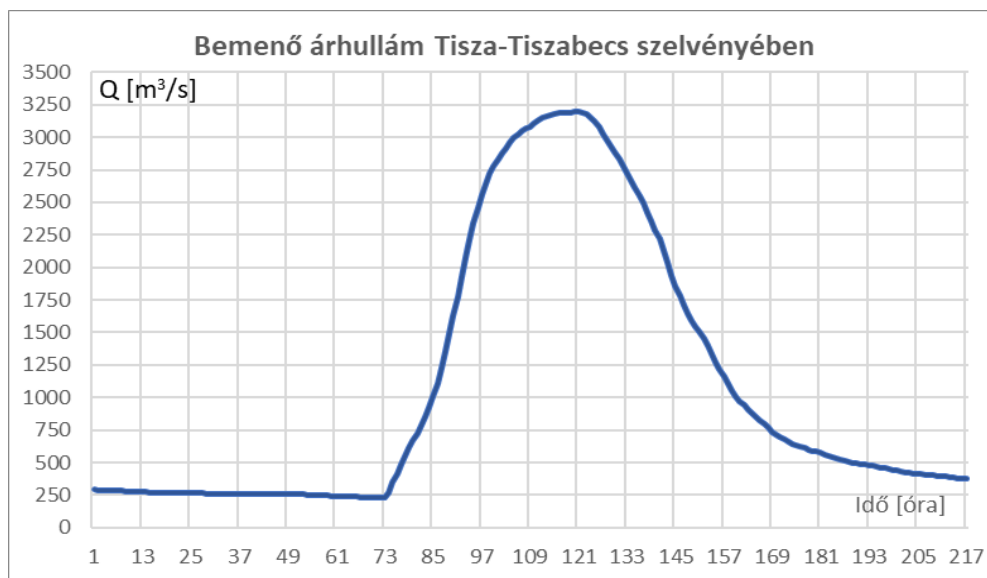
$$R_i(i) = L_1 \cdot \text{diam}(\mathbf{X}(i)) + \left\{ 1 - \frac{Z_{lex,max} - Z_{lex,min}}{L_1 \cdot \text{diam}(\mathbf{X}(i))} \right\}^2 - 4 \cdot Z_{lex,min}$$

$$\mathbf{x}_{new}(t) = \mathbf{x}_{centre} - \frac{Z_{lex,max} - Z_{lex,min}}{2 \cdot L_1} \cdot \frac{\mathbf{X}_{lex,max} - \mathbf{X}_{lex,min}}{\text{diam}(\mathbf{X}(i))}$$

ahol $Z_{lex,max}$ és $Z_{lex,min}$ az adott „n” dimenziós intervallum lexikografikus alsó, illetve felső csúcsaihoz tartozó célfüggvény-értékek.

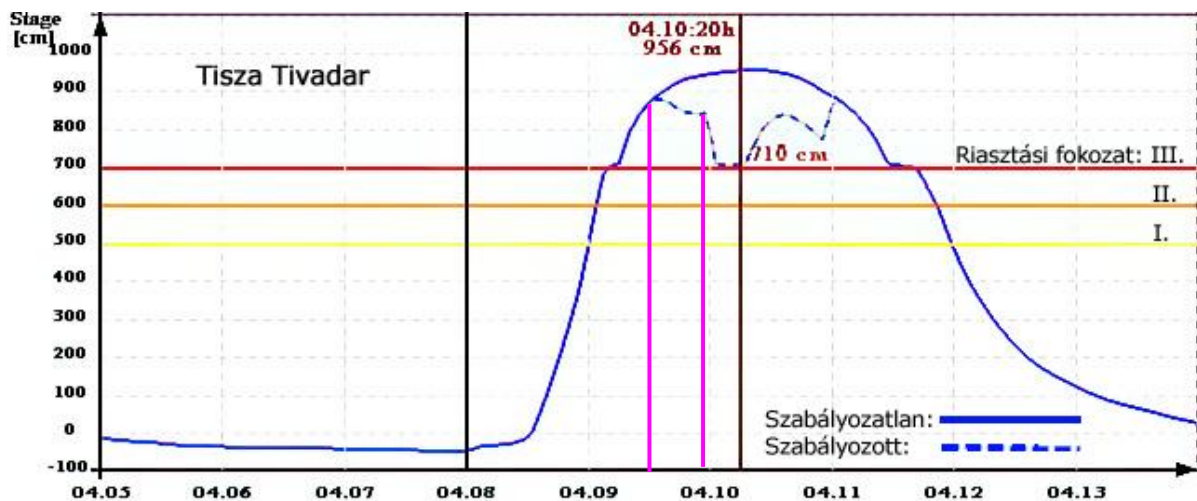
3. Demonstráció

A kutatás, fejlesztés eredményeként alább bemutatunk egy konkrét szabályozási feladat megoldását szintetikus adatokkal. A feladat peremfeltételei közül a Tisza fő folyón Tiszabecsnél az alábbi árhullámkép előrejelzett érkezését feltételeztük:

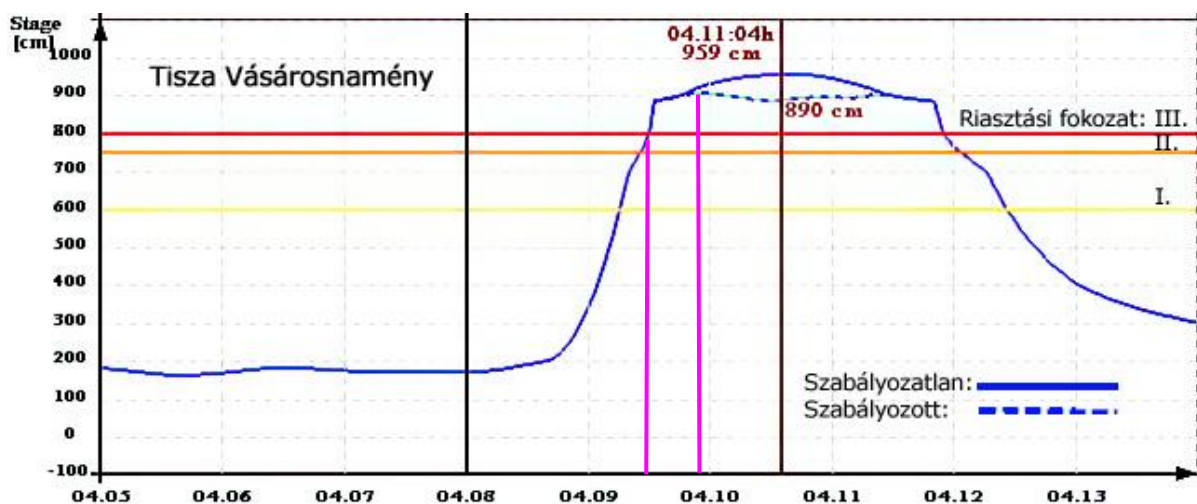


7. ábra.

A hatások tisztán értelmezhetősége érdekében a többi mellékágakon konstans vízhozamokat írtunk elő minden órára: Borszán 4 m³/s; Túron 15 m³/s; Szamoson 340 m³/s. Ezen peremfeltételekből evidens, hogy a három tározó közül kettő használatának van értelme, a Tisza-Túr, és a Beregi tározóknak. Alsó kontroll-szelvénynek a Tisza Vásárosnamény szelvényt választottuk. A megengedett szabályozások halmazának a 2.2./c)/II. alatti sematikus leírás szerinti esetet alkalmaztuk. Az optimális nyitást a Tiszabecsi tetőzés, és azt 48 órával megelőző időintervallumban a tározók teljes feltöltése mellett kerestettük az MI-vel. A keresés célfüggvényében a legnagyobb csökkentés elvárását fogalmaztuk meg. Az MI ezen a feladaton az algoritmus megkezdését követő 20 percen belül konvergenciát jelzett, és leállította a további keresést az alábbi eredményekkel:



8. ábra.

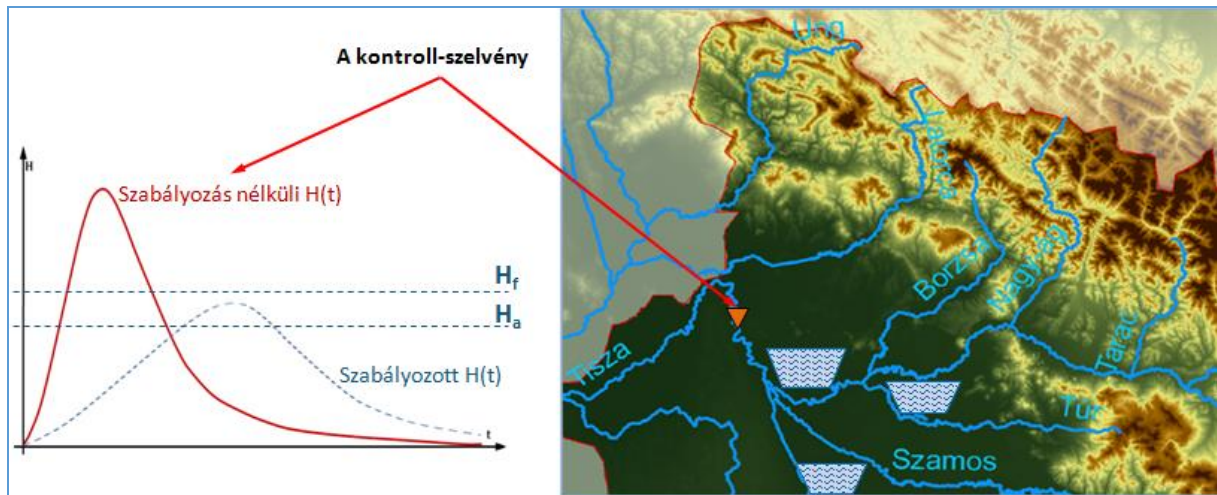


9. ábra.

A fenti 8. és 9. ábra tanúsága szerint a tározókhöz nagyon közeli Tivadar szelvényében nagy mértékű hektikus árhullámcsökkenés volt kinyerhető (ami természetes is, hiszen a tározók leeresztői nagyon közel vannak a szelvényhez), de az alsóbb, a Vásárosnaményi szelvényben is 70 cm-es hatékonyságot tapasztalhattunk, miközben a két tározó meg is telt. Az optimalizált üzemirányítás szerint az MI a Tisza-Túr tározót (az ábra skálájához igazodva) 04.09. 22h-ban nyitotta meg (lásd az első lila vonal), majd a Beregi tározót 04.10. 15h-ban (lásd a második lila vonal).

4. Összefoglalás

„Az optimalizált üzem valós időben történő meghatározása” elvárás azt fejezi ki, hogy az optimális/alternatív szabályozást mindenkor az aktuálisan levonuló árhullám karakterisztikáihoz (jellemzőihez) kell értelmezni, amelyről elvárjuk, hogy az a védelmi rendszer beavatkozási idején belül kivitelezhető legyen. Vagyis, olyan hidroinformatikai rendszert kellett kiépíteni és integrálni a meglévő DIWA-HFMS-be, amely képes az aktuális, konkrétan levonuló (2-3 napon belül tetőző) árhullámokhoz a "legkedvezőbb" üzemirányítási stratégiát kialakítani, és annak hatásait elemezni.



A szabályozás célja, hogy a szabályozott árhullám legnagyobb értéke a kontrollszelvényen egy adott, ($H_a; H_f$) intervallumba essen, ahol a H_a és H_f értékek a szabályozás paraméterei. Ez a célkitűzés matematikailag azt vonja maga után, hogy a feladatot a valós folyamatokkal ellentétesen, tehát az inverzét kellene megoldani, hiszen valamely elképzelt/elvart kimenethez keressük azt, a tározók által befolyásolt bemenetet, amely a kimenetet előállítja. Az ilyen problémák megoldását nevezi a szakirodalom inverz modellezési problémának. Ennek a feladatnak a megoldása közvetlenül, zárt alakban gyakorlatilag lehetetlen, ezért azokat speciálisan tervezett numerikus algoritmusokkal oldják meg. Legelterjedtebb ilyen algoritmusok, a különböző stratégiájú mintavételező eljárások, amelyek - esetünkben - a lehetséges szabályozások terét mintavételezi, majd minden lehetséges szabályozáshoz "hagyományos", tehát a folyamatokkal azonos irányú modellezéssel meghatározza a kimenő árhullámképet, és kiértékeli, mennyire "hasonló" az, az elvárthoz/tervezetthez.

Tekintve, hogy a lehetséges szabályozások tere egy, a tározók számától függően többdimenziós, végtelen lehetőséget magában foglaló tartomány, ezért az összes lehetőség kiértékelése, összehasonlítása gyakorlatilag lehetetlen, ezért csak valamely elvart pontosságú közelítésekre szokás törekedni, amely még így is óriási mennyiségű, emberi képességeket messze meghaladó számítási feladat kivitelezésével járna. Ennek elkerülése, és a döntéstámogatás reális időkeretekben tartása érdekében a mesterséges intelligencia (MI) eszközei kínálkoznak a leghatékonyabbnak. Esetünkben is, a HYDROInform Bt. szakemberei kifejlesztettek egy speciális öntanuló MI algoritmust, amely maga tervezi, majd adaptívan maga irányítja a saját mintavételezési stratégiáját úgy, hogy az elvart pontosságú optimális döntéshez a lehető legkevesebb mintavételre legyen szüksége.

Irodalomjegyzék

Iritz, L. és Szöllősi-Nagy A., 1983: Numerikus hidraulikus modellek az árvízvédelmi szükségeltározók igénybevitelének megtervezéséhez. Kézirat, VITUKI kutatási jelentés, témaszám: 7611-3/1/11

HYDROInform, 2012: "A hegyvidéki árapasztó tározók műszaki paramétereinek pontosítása, a tározók hatáselemzése" című, „A magyar és az ukrán felső-tiszai árvízvédelmi fejlesztési programok továbbfejlesztése és összehangolása, integrált árvízvédelmi előrejelző rendszer létrehozása térinformatikai alapú modellrendszer alkalmazásával" c. EU-támogatott projekt keretében résztéma kapcsán készített összefoglaló tanulmány. A tanulmány megrendelője: VIZITERV Environ Kft, Nyíregyháza. 2012., 150p.

Pintér, J., Szabó, J. A. (1985): *Multiextremal (global) optimization algorithms for engineering applications*. In: Adey, R. A. (ed.): *Proceedings of the Fourth International Conference on Engineering Software (ENGSOFT85)*, (Kensington, England, 1985), pp.: 7-17 to 7-25. (Springer, Verlag 1985.)

Szabó, J. A. (2006): *An efficient hybrid optimization algorithm and its application on water resources management*. Scientific presentation on Scientific Seminar Programme of JRC-IES (European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability). Ispra, Italy.

Szabó, J.A., 2007: Decision Supporting Hydrological Model for River Basin Flood Control. In: *Digital Terrain Modelling: Development and Applications in a Policy Support Environment* (Eds.: Peckham R.J. and Jordan Gy.). Springer-Verlag, Berlin. 145–182.

Szabó, J.A., Kis, A., Lucza, Z., 2023: A becsült klimatikus trendek várható hidrológiai válaszai a Felső-Tisza vízgyűjtőjén: MHT Országos Vándorgyűlés kiadványa (megjelenés alatt), 2023.

Szöllősi-Nagy A., 1989: A mederbeli lefolyás real-time előrejelzése dinamikus strukturális-stochasztikus modellekkel. Kiadó: VITUKI, HU ISSN 0134-1316, Felelős szerkesztő: Dr. Alföldi László főigazgató. Budapest, 1989, 236p.