A TÁROZÓSZÁMÍTÁS TÖMEGGÖRBE-MÓDSZEREI ÉS EZEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA A RENDSZERTECHNIKAI MÓDSZEREKKEL

DOMOKOS MIKLÓS[1]

[Beérkezett: 1980. augusztus 22-én]

Napjainkban a gyakorlati hidrológiai-vízkészletgazdálkodási feladatmegoldások egyik fontos csoportját továbbra is a tározókkal kapcsolatos számítások alkotják. Ezek részben a tározók szükséges térfogatának, részben célszerű működtetési rendjének a meghatározására irányulnak, gyakran pedig e két feladatrészt együttesen oldják meg. Egy tározó működhet egyedi (független) tározóként vagy valamely együttműködő tározórendszer elemeként. Fő célját tekintve vízhasznosítási, árvízszabályozó vagy többcélú tározó lehet.

1. Bevezetés

1.1 *A tanulmány célja*

E tanulmány vízhasznosítási célú egyedi tározók méretezési, továbbá többcélú egyedi vagy együttműködő tározók működtetési kérdéseivel foglalkozik. Általánosságban meghatározza a gyakorlatban ezekkel kapcsolatban előforduló feladatokat, felsorolja a megoldásukra kidolgozott módszercsoportokat, majd az utóbbiak közül röviden ismerteti és számpéldákkal szemlélteti a tömeggörbe-módszereket és utal a rendszertechnikai módszerekre. Végül az utóbbi két módszercsoportot több szempontból összehasonlító [23] tanulmány fontosabb megállapításainak ismertetése alapján ajánlást ad a gyakorlati feladatok megoldásához célszerűen alkalmazható módszerek megválasztására.

1.2 *A tanulmányban használt jelölések*

t, τ	— idő
Δt	— a tározószámítás alapjául választott alapidőegység, amelyen belül minden időfüggvény-szakaszt átlagértéke helyettesít, továbbá annak tartama (a 3.3. szakasz számpéldáiban $\Delta t = 2{,}63 \cdot 10^6$ s, az „átlagos hónap" tartama)
T	— a tározószámítás alapjául választott (jövőbeli) tervezési időszak, továbbá annak tartama $\left(T = \bigcup_{i=1}^{n} \Delta t_i\right)$ és végpontja ($t = T$)
ΔT	— a T időszaknak a Varlet-féle „kifeszített szál" két szomszédos sarokpontja által meghatározott részidőszaka

[1] Domokos Miklós, Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Központ (VITUKI) Vízrajzi Intézete, 1095 Budapest, Kvassay Jenő út 1.

$x(t)$, $X(t)$ — a hozzáfolyás (vagyis a tározót tápláló vízhozam) időfüggvénye és annak tömeggörbéje:[2]

$$X(t) = \int_0^t x(\tau)\, d\tau \tag{1}$$

$q(t)$, $Q(t)$ — a tározóból kielégítendő vízigény időfüggvénye és annak (1) típusú tömeggörbéje

$y(t)$, $Y(t)$ — a tározóból való — részben a $q(t)$ vízigény kielégítését szolgáló — vízeresztés időfüggvénye és annak (1) típusú tömeggörbéje

x_i, q_i, y_i — az $x(t)$, a $q(t)$ ill. az $y(t)$ időfüggvény Δt_i-beli átlagértéke

$\bar{x}$, $\bar{q}$, $\bar{y}$ — az $x(t)$, a $q(t)$ ill. az $y(t)$ időfüggvény T-beli átlagértéke

$\bar{x}_{\Delta t}$ — az $x(t)$ időfüggvény ΔT-beli átlagértéke

Δq_i — a vízigény-kielégítés elégtelensége a Δt_i időszakban:

$$\Delta q_i = \min(0, y_i - q_i) \leq 0$$

$Z(t)$ — a hozzáfolyás maradék-tömeggörbéje:[2]

$$Z(t) = \int_0^t (x(\tau) - y(\tau))d\tau = X(t) - Y(t) \tag{2a}$$

$Z_0(t)$ — a hozzáfolyás maradék-tömeggörbéje az $y(t) = \bar{x}$ esetben (vagyis teljes vízhozamkiegyenlítés esetében):

$$Z_0(t) = \int_0^t (x(\tau) - \bar{x})\, d\tau = X(t) - \bar{x} \cdot t \tag{2b}$$

$Z^*(t)$ — a hozzáfolyás maradék-tömeggörbéje az $y(t) = q(t)$ esetben (más elnevezéssel: a tározó hipotetikus feltöltődési görbéje):

$$Z^*(t) = \int_0^t (x(\tau) - q(\tau))\, d\tau = X(t) - Q(t) \tag{2c}$$

$W(t)$ — a vízeresztés (2b) típusú maradék-tömeggörbéje:

$$W(t) = \int_0^t (y(\tau) - \bar{x})\, d\tau = Y(t) - \bar{x} \cdot t \tag{3}$$

Var $[y(t)]$ — a vízeresztés ingadozását jellemző mutató:

$$\text{Var}\,[y(t)] = \int_0^T (y(t) - \bar{y})^2\, dt \tag{4}$$

R — a vízigény-kielégítés tényleges ill. várható biztonságát jellemző mutató, amelynek különböző lehetséges változatai [8], [12], [53] közül e tanulmányban a

[2] Az (1) képlettel definiált $X(t)$ függvényt a magyar szakirodalom — a német „Summenlinie" [12] mintájára — többnyire vízhozamösszegző görbének [34], [52] vagy vízhozamintegrálgörbének [32], a (26) képlettel definiált $Z_0(t)$ függvényt pedig — a német „Summendifferenzenlinie" mintájára — különbségösszegző görbének [52] nevezi. Ebben a tanulmányban eltérünk ettől a gyakorlattól és — elsősorban a rövidség kedvéért, az angol „mass-curve" és „residual mass-curve" mintájára — az $X(t)$, $Q(t)$ és $Y(t)$ függvényt tömeggörbének, a $Z_0(t)$, a $Z(t)$ és a $W(t)$ függvényt pedig maradék-tömeggörbének nevezzük. A $Z(t)$ maradék-tömeggörbe neve a (9) ill. (10) képlettel definiált vízeresztés esetében: tározó-igénybevételi görbe (vö. az 5, lábjegyzettel).

gazdasági szempontból általában leghatékonyabbnak tartott mutatót: a ténylegesen kiszolgáltatott és az igényelt összes vízmennyiség hányadosát értjük:

$$R=\frac{\int_0^T q'(t)dt}{\int_0^T q(t)dt}, \quad q'(t)=\begin{cases} q(t), \text{ ha } y(t) \geq q(t) \\ y(t), \text{ ha } y(t) < q(t) \end{cases} \tag{5}$$

R^* — az R mutató megkövetelt (előírt) alsó határértéke
K — a tározó hasznos térfogata (kapacitása)
S — a tározóteltség, vagyis a tározóban pillanatnyilag levő víztömeg
L — a vízszolgáltatás elégtelensége okozta (vagyis a vízszolgáltatástól függő) gazdasági veszteség

2. A tározószámítás feladatai és módszerei

2.1 *A tározószámítási feladatok általános megfogalmazása*

2.11 *A tározóegyenlet vizsgált változatai.* A gyakorlatban a vízhasznosítási és többcélú tározókkal kapcsolatos — közgazdasági szempontból egyszerűbb típusú[3] — feladatok többsége lényegében az ún. tározóegyenlet alábbi három változata valamelyikének a T tervezési időszakra való megoldását kívánja [32], [53]:

$$K=f_K\,(x(t), q(t), R^*) \tag{6a}$$

$$R=f_R\,(x(t), q(t), K) \tag{6b}$$

és

$$y_{\mathrm{opt}}(t)=f_y\,(x(t), K); \quad \mathrm{Var}[y(t)]=\min \tag{6c}$$

A (6a) és (6b) feladat vízhasznosítási tározók méretezésére, a (6c) feladat pedig többcélú tározók üzemrend-meghatározására irányul. A (6b) egyenletet általában az $R \geq R^*$ feladat megoldására, iteratív ismétlésekkel alkalmazzák.

A (6a) és (6b) feladat nyilvánvalóan az előre meghatározott $q(t)$ időfüggvénnyel adott vízigény minél teljesebb kielégítését, más szóval: az $y(t)$ függvény (s vele az R vízigény-kielégítési biztonság) maximálását célozza. A (6c) feladat célkitűzése viszont az $y(t)$ vízeresztés minél teljesebb kiegyenlítése, amelyet gyakran a lefolyásszabályozás legfőbb célkitűzésének tekintenek [25], minthogy többcélú tározás, valamint konvex $L(y)$ veszteségfüggvény esetén bizonyíthatóan [23] gazdasági optimumot eredményez.

A tározóegyenlet tanulmányunkban vizsgálandó fenti három változatának bal oldalán értelemszerűen keresett, ill. meghatározandó mennyiségek (a szükséges tározókapacitás, az elérhető biztonság, a vízeresztés optimális

[3] A közgazdasági szempontból való egyszerűsítés fő összetevői: (a) merev R^* vízszolgáltatási biztonság előírása a (6a) és a (6b) feladatban; (b) az $L(y)$ gazdasági veszteség-függvény konvex voltának feltételezése a (6c) feladatban; (c) a jövőbeli gazdasági hatások diszkontálásának mellőzése mindhárom feladatban (l. még a *2.13* és az *5.1* szakaszban).

rendje), jobb oldalán — független változókként — pedig előre megadott (előírt) mennyiségek szerepelnek.

2.12. *A tározóegyenletek bemenő adatai.* A tározóegyenlet mindhárom változatát valamely jövőbeli T tervezési időszakra (időhorizontra) vonatkozóan kell megoldani. A megoldás feltétele tehát az egyes egyenletek jobb oldalán szereplő független változók T-beli — vagyis jövőbeli — értékeinek, ill. időfüggvényeinek ismerete.

Ezek közül a (6b) és a (6c) egyenlet jobb oldalán szereplő K érték — topográfiai és gazdasági adottságok figyelembevételével — általában viszonylag egyszerűen felvehető, ill. iterációval is közelíthető. Az R^* biztonság előírása közgazdasági megfontolásokon alapulhat, de a gyakorlatban többnyire önkényes [5], [8], [51]. A tározóból kielégítendő vízigény $q(t)$ időfüggvénye jövőbeli (T-beli) szakaszának meghatározása — az ezzel kapcsolatos sokirányú erőfeszítések [6] ellenére — általában nagyon bizonytalan. Végül az $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvény T-beli szakasza egyáltalán nem (még bizonytalanul sem) jelezhető előre. Ezért a gyakorlatban ezt az időfüggvény-szakaszt egy olyan függvényszakasszal helyettesítik, amelyről feltehető, hogy a jövőbeli tényleges $x(t)$ szakaszt a tározó méretezése, ill. működtetése szempontjából egyenértékűen helyettesíti. A helyettesítő $x(t)$ szakaszt a gyakorlatban kétféle módon választhatják:

(a) felteszik, hogy $x(t)$-nek egy múltbeli T hosszúságú időszakban észlelt szakasza változatlanul megismétlődik a jövőbeli T tervidőszakban; vagy

(b) az $x(t)$ függvény jövőbeli (T-beli) szakaszát — a múltban észlelt x értékek és egyéb hidrológiai információk felhasználásával — mesterségesen állítják elő [12], [14], [20], [21].

Hangsúlyozzuk, hogy mindkét helyettesítő $x(t)$ szakasz T-beli bekövetkezésének valószínűsége zérus. A (b) megoldást elsősorban akkor célszerű választani, ha az $x(t)$-re vonatkozó észlelések tartalma túl rövid.

E tanulmányban a fenti megjegyzéseken túl nem foglalkozunk részletesebben a tározóegyenlet három változatának jobb oldalán független változókként szereplő mennyiségek meghatározásának, ill. felvételének módjával és megbízhatóságával, hanem a továbbiakban ismert adottságokként kezeljük őket.

2.13. *A tározószámítási feladat közgazdasági vonatkozásai.* A tározóegyenlet (6a) és (6b) változatával kapcsolatban meg kell jegyeznünk, hogy alakilag a tározóméretezési feladat közgazdasági kölcsönhatásoktól elvonatkoztató, a közgazdasági elvárásokat egyetlen merev R^* érték előírásával érvényesítő megközelítését jelentik. Elvileg a közgazdasági kölcsönhatások dinamikáját ennél jóval árnyaltabban érvényesítő, valamely vízkészletgazdálkodási rendszer paramétereit — s benne nemcsak a tározók, hanem a vízigények paramétereit is — egyszerre optimáló modellek is elképzelhetők [5], [7], [10]. A közgazdasági tényezőkre (költség- és veszteségfüggvényekre stb.) vonatkozó ismereteink rendkívül szegényes volta azonban jelenleg még nem teszi lehetővé az ilyen modellek hatékony és megbízható alkalmazását [9]. Másrészt megfelelő közgazdasági függvények — pl. a tározó építési és üzemelési költségeinek K-tól való függése, valamint a népgazdasági eredmény R-től, ill. $y(t)$-tól való függése — ismeretében a tározóegyenlet iterációsan alkalmazott (6b) változata is alkalmas lehet a gazdaságilag optimális (K, R) értékpár meghatározására.

A közgazdaságilag megalapozottabb tározószámítás fontos tényezője lehet még a jövőbeli gazdasági hatások $t = 0$-ra való redukálásához szükséges diszkontláb ismerete is. E tanulmányban — a gyakorlatban is kényszerűségből elterjedten alkalmazott durva közelítéssel — feltesszük, hogy ennek értéke zérus. Zérustól különböző diszkontláb érvényesítésére a [10] mű 5.5 fejezete ismertet módszert.

2.2 *A tározószámítás módszerei*

A napjainkig kidolgozott tározószámítási módszerek a következő öt csoportba sorolhatók:

(1) a hozzáfolyás- és a vízigény-időfüggvényt (vagy ezek tömeggörbéit) közvetlenül hasznosító determinisztikus szimulációs módszerek [38], [46] (amelyeket e tanulmányban röviden tömeggörbe-módszereknek nevezünk);

(2) matematikai statisztikán alapuló módszerek [25], [42];

(3) általánosított tapasztalati összefüggéseket alkalmazó módszerek [12], [32], [34];

(4) sztochasztikus modellezési módszerek (más néven: mátrix-módszerek) [12], [31], [40], [55];

(5) lineáris és dinamikus programozást alkalmazó módszerek [16], [35], [37], [40], [54], amelyeket e tanulmányban — [23] nyomán — rendszertechnikai módszereknek nevezünk.

A felsorolt öt módszer-csoporthoz a következő megjegyzéseket fűzzük:

— A felsorolás sorrendje nagyjából tükrözi a módszerek kialakulásának, ill. elterjedésének időrendjét: az (1) csoportba tartozó első tömeggörbe-módszert Rippl [38] 1883-ban publikálta, az (5) csoportba tartozó rendszertechnikai módszerek pedig az 1960-as évek kezdete óta terjedtek el; egy 1960-ban készült átfogó tanulmány [34] még csak az első három módszer-csoportot említi;

— A felsorolt módszer-csoportok eléggé jól elkülönülnek egymástól, de nem zárnak ki teljesen bizonyos kölcsönkapcsolatokat (pl. az (1) csoport szimulációs módszereinek alkalmazásához bemenő adatként igényelt hozzáfolyás-időfüggvényt gyakran mesterségesen kell előállítani, amihez viszont nem nélkülözhetők a (3) csoportba tartozó általánosított tapasztalati kapcsolatok és a (4) csoporttal rokon adatgenerálási módszerek);

— Az (1), (4) és (5) csoport módszerei általában tározótérfogat- és üzemrendmeghatározásra egyaránt alkalmasak, a (2) és (3) csoport módszerei csak a szükséges tározótérfogatot — ill. általánosabban: az összetartozó (K, R) értékpárokat — szolgáltatják;

— A számítástechnikai apparátust nem igénylő (elsősorban tapasztalati képleteket, ill. nomogramokat alkalmazó) (3) csoportbeli — és részben (2) csoportbeli — módszerek napjainkban elsősorban egy-egy nagyobb régió tározási lehetőségeinek tömeges összehasonlító számbavételéhez nyújthatnak nagy gyakorlati segítséget;

— Az első három csoport módszerei inkább csak egyedi tározókra [3], a legutóbb kialakult (4) és (5) csoport módszerei már együttműködő tározók rendszerére [39] is alkalmazhatók;

— A tározószámítási feladatok a gyakorlatban a leggyakrabban a (6b) alakban jelentkeznek; a közvetlen cél igen sokszor a valamely adott $q(t)$ vízigény-időfüggvényhez tartozó $R = R(K)$ függvény előállítása. Ezt a feladatot az (1) csoportba tartozó tömeggörbe-módszerek az — észlelt, vagy mesterségesen előállított — $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvénynek a K_i térfogatú tározó általi $y_{K_i}(t)$ vízeresztés-időfüggvénnyé való átalakítását ismételten szimulálva és az R_{K_i} értékeket az előállított $y_{K_i}(t)$ függvényekből számítva oldják meg. A (4) csoportba tartozó sztochasztikus módszerek (mátrix-módszerek) viszont az $R(K)$ függvényt közvetlenül az $x(t)$ függvény eloszlási struktúrájából, a tározóműködés szimulálása nélkül állítják elő. (Az utóbbi csoportba egyébként matematikusok számára is csak nehezen követhető, „tiszta'' tározóelméleti módszerek is tartoznak);

— A (4) és az (5) csoportba tartozó módszerek alkalmazása általában hatalmas számítástechnikai apparátust igényel, úgyhogy szélesebb körű gyakorlati elterjedésüket az elektronikus számítógépek nyújtotta lehetőségeknek köszönhetik. A számítógépek fejlődése ugyanakkor kedvezően hatott az (1) csoport módszereinek alkalmazhatóságára is, mivel igen nagy lehetőséget biztosít a szimuláció bemenő információjaként igényelt $x(t)$ adatsorok tetszőleges hosszúságban és tetszőleges számú változatban való előállítására. Mivel az (1) csoport módszerei jó betekintést engednek a tározóműködés folyamatába s ezzel lehetővé teszik a számítástechnikai apparátussal végzett szimuláció realitásának mérnöki megítélését, az (5), különösen pedig a (4) csoport módszereire viszont ez egyáltalán nem jellemző, végülis valószínűsíthető, hogy a számítógépek elterjedése az egyedi tározók gyakorlati méretezése terén inkább kedvez az (1), mint a (4) és (5) csoport módszereinek. (Az (5) csoport vonatkozásában l. bővebben az 5.2. szakaszban);

— Magyar kutatók elsősorban a (3) csoportba tartozó módszerek kidolgozása és fejlesztése terén értek el kimagasló és mindmáig jól hasznosítható eredményeket [32], [34], amelyek közül PUSKÁS T. gyakorlati szakemberek számára is közzétett módszere [41] egyrészt Magyarország tározási lehetőségeinek számbavétele során [48], [49], másrészt számos azóta megépült hazai tározó méretezése során, széles körben hasznosult. A (4) csoportba tartozó sztochasztikus módszerek alkalmazása és fejlesztése terén ZSUFFA I. ért el eredményeket [55]. Végül az utóbbi évek magyar szakirodalmában több példát is találhatunk az (1) csoport szimulációs tömeggörbe-módszereinek [17], [33], [43] és az (5) csoport rendszertechnikai módszereinek [24], [39], [45] alkotó alkalmazására.

— Mind az öt módszer-csoport hatékonyságának értékelésével, alkalmazási területének kijelölésével stb. e tanulmányban nem foglalkozunk részletesebben: az 5. fejezetben csupán a legősibb (1) és a legújabb (5) módszer-csoport összehasonlításáról a [23] tanulmányban a (6c) jelű vízeresztés-optimálási feladattal kapcsolatban közölt megállapításokat ismertetjük.

3. A tározószámítási feladatok megoldása tömeggörbe-módszerekkel

3.1. RIPPL *módszere*

A (6a) tározóegyenlettel kitűzött méretezési feladatok legegyszerűbb változata az $R^* = 100\%$ és $q(t) = \bar{x}$ helyettesítéssel adódó

$$K = f_K(x(t), \bar{x}, R^* = 100\%) \tag{7}$$

feladat, amely tehát az $x(t)$ hozzáfolyásnak a tározó által való teljes T-beli kiegyenlítését írja elő.

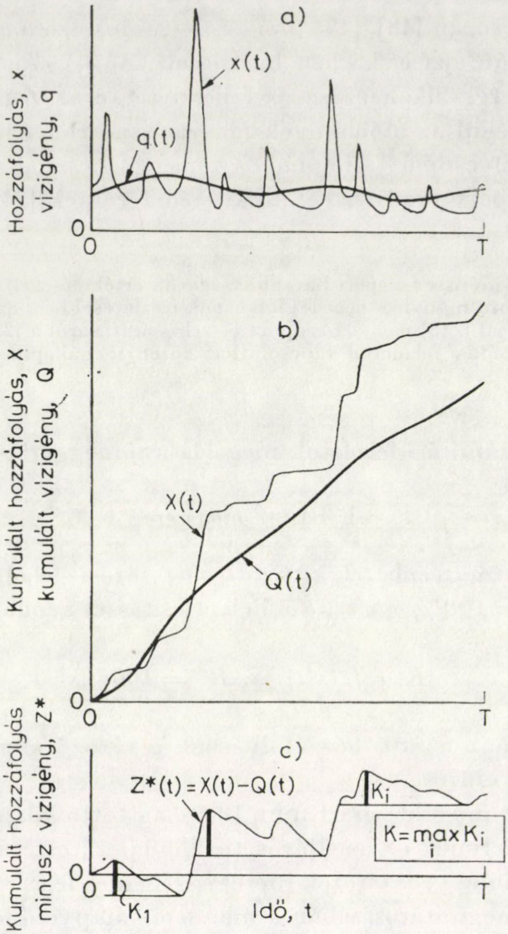
A (7) feladat megoldására RIPPL 1883-ban tette közzé híres tömeggörbe-eljárását [38], amelynek — az eljárás továbbfejlesztett változatai révén — a vízhasznosítási célú egyedi tározók méretezésében és legcélszerűbb üzemirányítási rendjének a meghatározásában a mai napig alapvető jelentősége van.

A Rippl-módszer eredeti alakjában a (7) feladat megoldására a jövőbeli $x(t)$ időfüggvényt helyettesítő múltbeli (észlelt) $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvényből előállított $X(t)$ tömeggörbét alkalmazta, amelyhez az egyenletes vízszolgáltatást jelképező $\bar{x} \cdot t$ egyenessel párhuzamos érintőket húzott. Bizonyítható, hogy a keresett K tározókapacitás egyenlő az utóbbi érintők közötti legnagyobb X-irányú ordinátametszékkel.

A Rippl-módszer egyik egyenértékű — grafikus szerkesztés szempontjából kényelmesebben kezelhető — változata az $X(t)$ tömeggörbe helyett a $Z_0(t)$ maradék-tömeggörbét alkalmazza. Ebben az esetben a keresett K tározókapacitás értelemszerűen a $Z_0(t)$ görbéhez húzott vízszintes érintők közötti legnagyobb Z_0-irányú ordinátametszékkel lesz egyenlő.

A (6a) feladat $R = 100\%$ előírásával, de nem konstans $q(t)$ vízigény-időfüggvényre ($\bar{q} \leq \bar{x}$) adódó

$$K = f_K(x(t), q(t), R^* = 100\%) \tag{8}$$



1. ábra. ***Rippl*** **tömeggörbe-módszerének elvi vázlata időben változó $q(t)$ vízigény esetében**

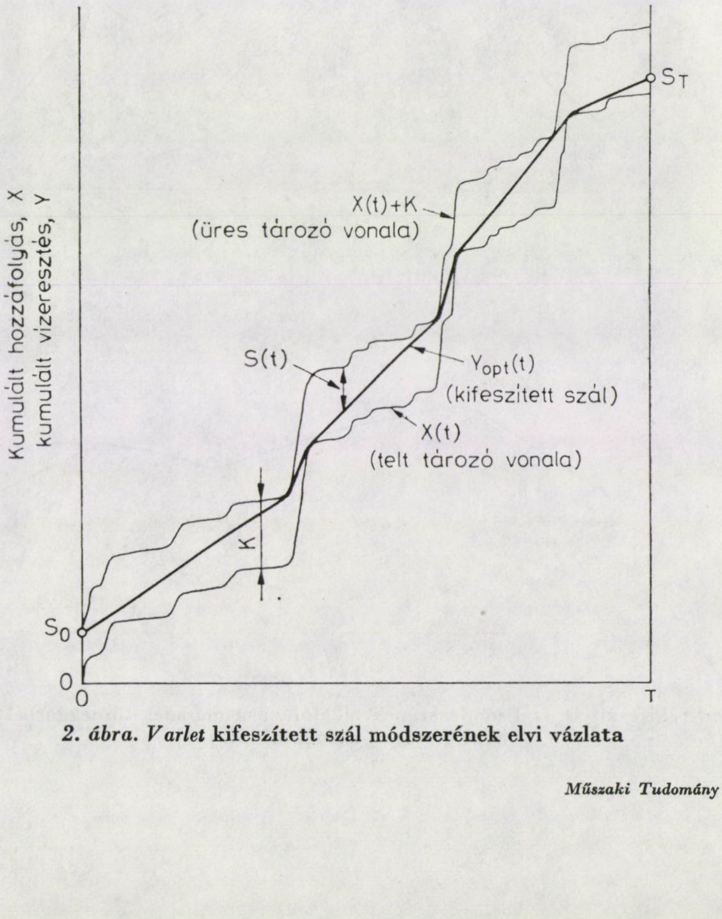
változata a maradék-tömeggörbe módszer elvének segítségével szintén könynyen megoldható [23], [52]. A megoldás kulcsa ekkor a (2c) szerinti $Z^*(t)$ maradék-tömeggörbe, amely tendenciájában növő függvény és szemléletesen egy végtelen térfogatúnak képzelt tározó feltöltődési görbéjeként értelmezhető. E görbe helyi szélsőértékeihez meg kell húzni azokat a vízszintes érintőket, amelyeknek mindegyike az érintési pontnak csak egyik oldalán (az alsó érintő pl. csak tőle balra) metszheti a $Z^*(t)$ görbét. A keresett K tározókapacitás egyenlő a szomszédos — sorrendben mindig felső és alsó — érintők alkotta érintőpárok közötti Z-irányú metszékek — vagyis a T-időszak kritikus részidőszakaihoz tartozó minimális K_i feltöltődési értékek — közül a legnagyobbal (1. ábra).

A Rippl-módszer eddig vázolt mindkét — az $X(t)$ tömeggörbén és a $Z_0(t)$, ill. $Z^*(t)$ maradék-tömeggörbén alapuló — változata a K tározótérfogatot lényegében a tározó T időszakbeli működtetésének *szimulációjával* határozza meg. A módszer szemléletes, jól érzékelteti a tározó működését. Bár a módszer eredetileg grafikus eljárás, természetesen numerikus alakban is alkalmazható. Az is természetes, hogy a módszer nem csak az észlelt $x(t)$ időfüggvény jövőbeli megismétlődésének feltételezésével, hanem a jövőbeli T időszakban várható $x(t)$ időfüggvény tetszőleges — konstruált, ill. valószínűsített — modelljének a felvételével is alkalmazható. A módszerrel kapott K eredmény — feltéve, hogy a T tervezési időszakban valóban a felvett $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvény valósul meg — teljesen pontos, ill. megbízható.

3.2 *A tömeggörbe-módszer általánosított változatai*

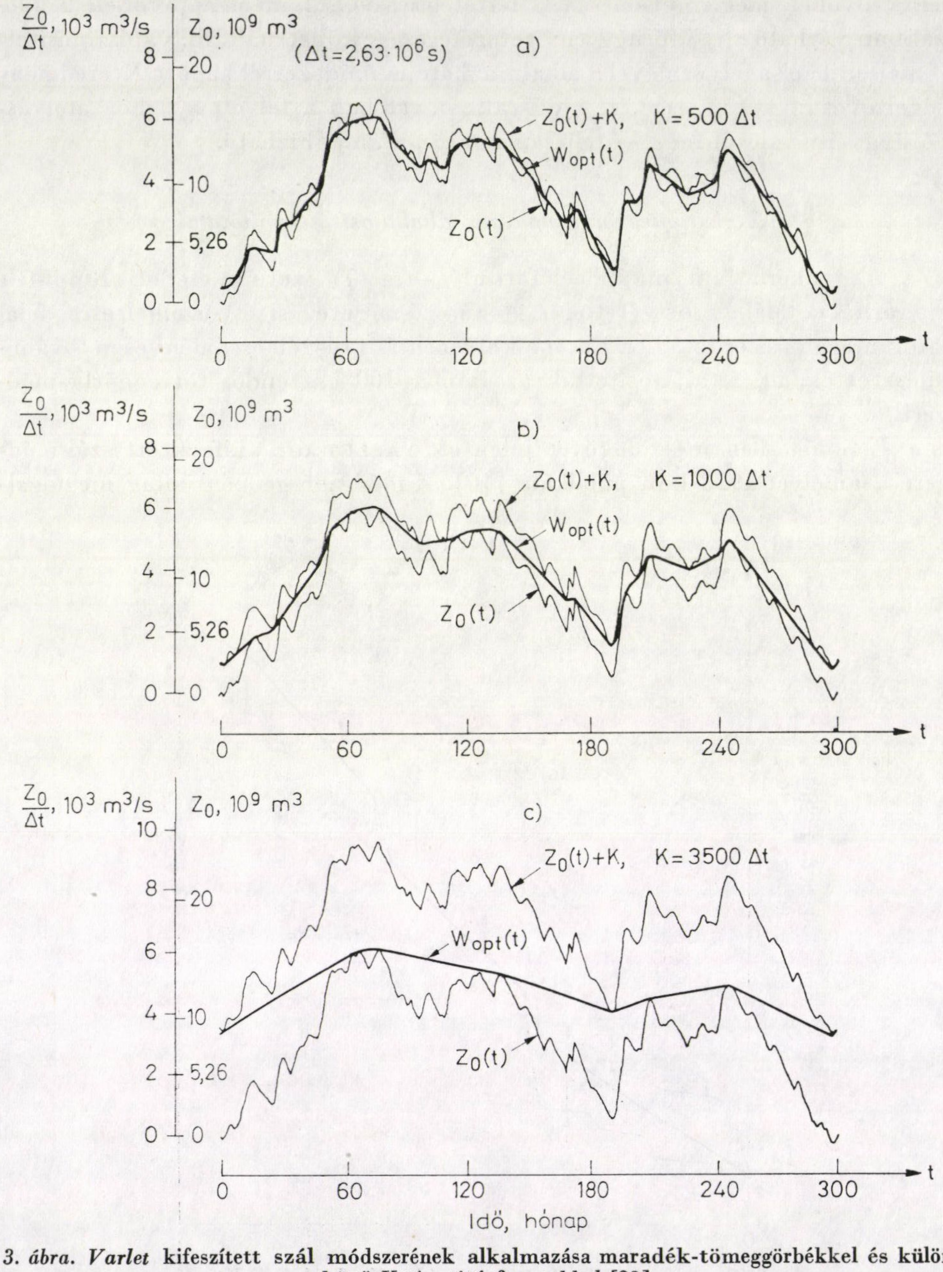
A gyakorlatban inkább előforduló — a (7) szerinti, eredeti Rippl-féle feladatnál általában összetettebb — tározó-méretezési és -üzemeltetési feladatok megoldása érdekében Európa kontinentális részén eredményesen továbbfejlesztették, ill. általánosították az immár 100 esztendős tömeggörbe-módszert.

E fejlődésben mérföldkövet jelentett VARLET ún. „kifeszített szál módszere", amelyet 1923-ban publikált [46]. E módszer geometriailag megfogal-



2. ábra. Varlet kifeszített szál módszerének elvi vázlata

mazott lényege a következő: a (6c) feladat megoldását jelentő $y_{opt}(t)$ víz-eresztés-időfüggvény $Y_{opt}(t)$ tömeggörbéjének képe nem más, mint az $X(t)$ és az $X(t)+K$ tömeggörbe alkotta „folyosó" belsejében a $t=0$ és a $t=T$ idő-



***3. ábra. Varlet* kifeszített szál módszerének alkalmazása maradék-tömeggörbékkel és különböző *K* tározótérfogatokkal [23]**

ponthoz tartozó S_0 és S_T végpontot összekötő legrövidebb út, ill. „kifeszített szál" (2. ábra). A módszer természetesen a $Z_0(t)$ maradék-tömeggörbe segítségével is értelmezhető; ezesetben a szerkesztés közvetlen eredménye az optimális vízeresztés $W_{\text{opt}}(t)$ maradék-tömeggörbéje (3. ábra). — Megjegyezzük, hogy a Varlet-féle $Z_0(t)$, $Z_0(t)+K$ „folyosó" segítségével a $q(t)$ = konst. esetben a (6b) feladat geometriailag szintén értelmezhető és rendkívül egyszerűen megoldható (4/e ábra).

A tömeggörbe-módszer továbbfejlesztett és napjainkban rendelkezésre álló változatai lényegében továbbra is a tározó tervezési időszakon belüli működését szimuláló eljárások, amelyekkel az általános tározóegyenlet (6a), (6b) vagy (6c) változata viszonylag egyszerűen — közvetlenül vagy iterációval — megoldható. Közös tulajdonságuk az is, hogy

— a bemenő információként ismertnek feltételezett $x(t)$ hozzáfolyás- és $q(t)$ vízigény-időfüggvény megvalósulása esetén teljesen pontos megoldást adnak,

— észlelt vagy mesterségesen előállított $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvényekre egyaránt alkalmazhatók,

— a tározó működésének folyamatát áttekinthetően, ill. követhetően mutatják be,

— akár grafikus, akár numerikus (programozott) alakjukban alkalmazhatók.

A tömeggörbe-módszernek a tározóegyenlet három változatára tetszőlegesen alkalmazható numerikus és grafikus változatai a magyar szakemberek számára is jól hozzáférhetők, nemcsak a műegyetemi tananyagban ([52], 8.1. fejezet), hanem kézikönyvszerű részletes útmutatásként is ([53], 3.4.4.4. fejezet). SZESZTAY K. a Balaton vízkészletgazdálkodására vonatkozó, immár klasszikus szimulációs vizsgálatait [43] tömeggörbe-módszerrel végezte, ezenkívül egy további kidolgozott alkalmazási számpélda is rendelkezésre áll [22], sőt, a VIZITERV-ben a bemenő adatsor szimulálását is tartalmazó tározó-méretezési és teljesítőképesség-vizsgálati programot is kidolgoztak ([50], 39. old.). E tanulmányban ezért nem ismertetjük e módszereket részletesebben, hanem megelégszünk kiragadott módszertani példák bemutatásával.

3.3 *Számpéldák a tömeggörbe-módszerekre*

Az *I. táblázat*ban — terjedelmi okokból kivonatosan — közölt és a 4. ábrával szemléltetett tározószámítási számpéldák bemutatásának fő célja annak érzékeltetése, hogy a tömeggörbén alapuló szimulációs módszerek a gyakorlatban előforduló tetszőleges — a (6a), a (6b) vagy a (6c) tározóegyenlettel adott — típusú feladat megoldására kiválóan alkalmasak. A számpéldák bemutatásának másik célja: a magyar nyelvű szakirodalomban [52], [53] található módszertani útmutatások kiegészítéseként egységes keretbe foglalt segédlet, ill. minta adása a módszerek gyakorlati alkalmazásához, ill. az eddiginél szélesebb körben való elterjesztéséhez.

A számpéldákat a Bódva folyó 37,9 fkm szelvényében, Perkupa községtől északra levő völgyszűkület elzárásával létesíthető tározóra dolgoztuk ki, amely tározási lehetőségekben szegény országunknak volumen és gazdasági hatások szempontjából is egyik legjelentősebb völgyzárógátas tározási lehetősége [47], [49]. Az elzárási szelvényhez tartozó vízgyűjtőterület nagysága 1167 km^2, amelyből 865 km^2 Csehszlovákia területére esik.

A számítások alapidőegységéül — az egyszerűségre törekedve, de a gyakorlati használhatóság igényét is szem előtt tartva — az átlagos hónapot választottuk, tehát $\Delta t = 2{,}63 \cdot 10^6$ s. A számításokban szereplő valamennyi (elvileg folytonos) időfüggvényt tehát értelemszerűen Δt időalapú lépcsős függvény helyettesíti.

$T = 47$ év (1932—1978) $n = 564$ hónapjának a tervezett elzárás szelvényében levonult x_i havi középvízhozamait vízhozam-kapcsolati összefüggések segítségével, egyrészt a Bódva szendrői vízmérce-szelvényének (vízgyűjtője: 1496 km^2) 1932—1978-ra vonatkozó, másrészt a szalonnai vízmérce-szelvényének (1235 km^2) 1961—1978-ra vonatkozó vízhozam-adatsorából állítottuk elő.

Az I. táblázatban, maradék-tömeggörbéken alapuló szimulációval, öt tározószámítási feladatot oldottunk meg: kettőt-kettőt a (6a) és a (6b) jelű, egyet pedig a (6c) jelű tározóegyenletre; pontos meghatározásuk a táblázat fejlécében olvasható. Az 1. feladat az eredeti, (7) szerinti Rippl-feladat: a teljes vízhozamkiegyenlítéshez — vagyis $y(t) = q_1 = \bar{x} = 7{,}01$ m^3/s állandó vízeresztéshez — szükséges K_1 tározótérfogat meghatározása. A 2. feladat a $q_2 = 5{,}5$ m^3/s állandó vízigény teljes biztonsággal való kielégítéséhez szükséges K_2 tározótérfogat meghatározása. A 3. feladat a $q_3 = 4{,}0$ m^3/s állandó vízigény $K_3 = 61 \cdot 10^6$ m^3 hasznos tározótérfogatból történő kielégítésének R_3 biztonságát számítja. A 4. feladat az 1 éves periódusú $q_4(t)$ vízigény-időfüggvény ($\bar{q} = 4{,}4$ m^3/s) ugyancsak $K_4 = 61 \cdot 10^6$ m^3 kapacitású tározóból való kielégítésének R_4 biztonságát határozza meg. Végül az 5. feladat $K_5 = 122 \cdot 10^6$ m^3 esetére a (6c) tározóegyenlet szerinti $y_{\mathrm{opt}}(t)$ optimális vízeresztés-időfüggvényt állítja elő.

Az 1—4. feladat számítása magában a táblázatban nyomonkövethető, az 5. feladatot — a kifeszített szál meghatározását — KLEMEŠ-től átvett [23] számítógépi programmal oldottuk meg,[4] a táblázat (18) és (19) oszlopába csak e számítás végeredményeként kapott $W_{\mathrm{opt}}(t)$ és $y_{\mathrm{opt}}(t)$ függvények értékeit írtuk be.

Számításainkban — mint említettük — az $x(t)$, $q(t)$ és az $y(t)$ időfüggvényeket m^3/s mértékegységű havi középértékeik $\{x_i\}$, $\{q_i\}$ és $\{y_i\}$ sorozata helyettesíti. A $Z_0(t)$, $Z(t)$ és $W(t)$ maradék-tömeggörbék m^3 mértékegységű ordinátái helyett — kizárólag kényelmi okokból — azok Δt-vel osztott, tehát szintén m^3/s mértékegységű értékeit használjuk (Pl. a $Z(t)$ maradék-tömeggörbe Δt_i végéhez tartozó

$$Z_i = \sum_{j=1}^{i} (x_j - y_j) \cdot \Delta t$$

[4] Az 5. feladatot számítógépen GILYÉNNÉ HOFER Alice okl. mérnök oldotta meg.

ordinátája helyett annak

$$Z_i/\Delta t = \sum_{j=1}^{i} (x_j - y_j)$$

változatával számolunk.) Ennek következtében a táblázatban előforduló — akár bemenő adatként szereplő, akár eredményként adódó — tározótérfogat-értékeket is azok Δt-vel osztott (vagyis m^3/s mértékegységű) mérőszámai helyettesítik, tehát az utóbbiakat még szorozni kell Δt-vel, hogy m^3-ben megkapjuk a keresett tározótérfogatot. (A táblázatban alkalmazott és a valóságos mértékegységek kapcsolatát közvetlenül érzékeltetik a 4. ábra grafikonjának bal és jobb oldalán feltüntetett, eltérő mértékegységű ordináta-osztások.)

A kiindulási feltevésként korlátlannak képzelt tározótérfogatra vonatkozó 1. feladatban a *vízeresztési utasítás* alapelve az, hogy a q_i vízigényt — elsősorban az x_i hozzáfolyásból, ennek elégtelensége esetén pótlólagosan a tározóból — mindig ki kell elégíteni. Ha az x_i hozzáfolyás nagyobb, mint a q_i vízigény, akkor viszont az $(x_i—q_i)$ különbséget nem telt tározó esetén részben, vagy egészben annak vízpótlására kell fordítani, telt tározó esetén pedig tovább kell engedni. Ennek az alapelvnek megfelelően az y_i havi vízeresztéseket ((6) oszlop) az alábbi — a szimuláció logikájából adódó — összefüggésből számítottuk [22] (figyelembe véve a Δt-vel való osztásról mondottakat):

$$y_i = \begin{cases} q_i, \text{ ha } x_i \leq q_i + |Z_{i-1}/\Delta t|, \\ x_i - |Z_{i-1}/\Delta t|, \text{ ha } x_i > q_i + |Z_{i-1}/\Delta t|. \end{cases} \tag{9}$$

A korlátos tározótérfogattal számoló 3. és 4. feladat vízeresztési rendje hasonló a 2. feladatéhoz azzal a kiegészítéssel, hogy e feladatban az (ezúttal nem végtelennek képzelt) tározó kiürülése is előfordulhat, s ezesetben q_i-nél kisebb y_i vízeresztésre (vagyis vízkorlátozásra) is sor kerülhet. Ennek az alapelvnek megfelelően az y_i vízeresztés-értékeket ((9) és (14) oszlop) a következő összefüggés szolgáltatta:

$$y_i = \begin{cases} q_i, \text{ ha } q_i + |Z_{i-1}/\Delta t| - K/\Delta t \leq x_i \leq q_i + |Z_{i-1}/\Delta t|, \\ x_i - |Z_{i-1}/\Delta t|, \text{ ha } x_i > q_i + |Z_{i-1}/\Delta t|, \\ x_i - |Z_{i-1}/\Delta t| + K/\Delta t, \text{ ha } x_i < q_i + |Z_{i-1}/\Delta t| - K/\Delta t. \end{cases} \tag{10}$$

(Nyilvánvaló, hogy a (9) vízeresztési utasítás a (10) utasításnak a $K = +\infty$ helyettesítéssel adódó különleges esete.)

Látható, hogy a (9) és (10) vízeresztési utasításban meghatározó szerepe van a (2a) szerinti $Z(t)$ maradék-tömeggörbének, más néven: tározó-igénybevételi görbének.[5]

[5] A (9), ill. (10) jelű vízeresztési utasítás szerinti $y(t)$ függvénnyel számított, nem-pozitív értékkészletű $Z(t)$ maradék-tömeggörbének az angol nyelvű irodalomban használatos neve: „storage depletion curve" szószerinti fordításánál („tározó-kiürülési görbe") szerencsésebb a „tározó-igénybevételi görbe" elnevezés, hiszen a nem-monoton $Z(t)$ függvény valójában a tározóból (telt állapotához képest) mindenkor hiányzó vízmennyiséget, vagyis a tárolt vízkészlet igénybevételének mértékét adja meg.

Megjegyezzük még, hogy a (9) és (10) képletben a nem-pozitív értékkészletű $Z(t)/\Delta t$ függvény $Z_{i-1}/\Delta t$ ordinátái mindenütt abszolút érték-jel nélkül és így ellenkező műveleti jellel is szerepelhetnének; a fenti írásmód csupán az esetleges előjelhibák megelőzését célozza.

A 2—4. feladat megoldásához ismernünk kellett a tározó-igénybevétel $t = 0$-hoz tartozó kezdeti értékét. Ezt úgy határoztuk meg, hogy feltettük az $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvény T hosszúságú szakaszának egymás utáni kétszeri előfordulását és a tározó működését (elvileg) két, egyenként T hosszúságú ciklusra szimuláltuk. Az első ciklus számításait $Z^{(1)}(t = 0) = 0$, ill. $S^{(1)}(0) = K$ (vagyis telt tározó) feltevésével kezdtük, a második ciklust viszont az első ciklus végére adódott $Z^{(2)}(t = 0) = Z^{(1)}(t = T)$ értékkel kezdtük és az eredmények szempontjából a második ciklust tekintettük mértékadónak.[6]

Az 5. feladat megoldásához, kiindulási adatként, az S tározóteltség $t = 0$-hoz és $t = T$-hez tartozó értékét is fel kellett vennünk. A felvétel, vízháztartási megfontolás alapján, [23] nyomán, az

$$S(0) = S(T) = K_5 \cdot \frac{|Z_{\min}|}{Z_{\max} + |Z_{\min}|} \tag{11}$$

értékkel történt.

Az 1. feladat megoldásának egyetlen ciklus szimulálásával kapott eredménye, a 3.1 szakaszban mondottak szerint: $K_1 = Z_{0,\max} + |Z_{0,\min}|$[7], a 2. feladaté: $K_2 = |Z_{\min}|$, ahol a szélsőértékek a táblázat (5), ill. (8) oszlopában szereplő mennyiségek szélsőértékeinek Δt-szeresei. A 3. és a 4. feladat megoldásának eredménye a vízkorlátozásos hónapokra a (12), ill. (17) oszlopban kimutatott $\Delta q_k \leq 0$ mennyiségek összegéből levezethető R vízigénykielégítési biztonság, amelyet az (5) képlet alábbi diszkretizált, értelemszerűen átalakított és Δt-vel egyszerűsített változatával számítottunk:

$$R\,[\%] = 100 \left[1 + \frac{\sum_T \Delta q_k}{n \cdot \bar{q}} \right]. \tag{12}$$

Végül az 5. feladat megoldásának eredménye az optimális vízeresztés — számítógéppel előállított — $W_{\text{opt}}(t)$ maradék-tömeggörbéjét (a „kifeszített szálat") helyettesítő diszkrét $\{W_i\}$ ordináta-sorozat (18. oszlop), amelyből az optimális vízeresztés $y_{\text{opt}}(t)$ időfüggvénye általában az

$$y_{\text{opt}}(t) = \frac{dW_{\text{opt}}(t)}{dt} + \bar{x} + \frac{S(0) - S(T)}{T} \tag{13}$$

[6] A gyakorlati számítás során a második ciklust természetesen elég addig számítani, amíg annak $Z(t)$ értékei eltérnek az első cikluséitól, hiszen az első megegyező $Z(t)$ érték után a második ciklus megismétli az elsőt. Ez a 2. feladat esetében a 75. hónapban, a 3. feladat esetében már a 4. hónapban bekövetkezett.

[7] Megjegyezzük, hogy az 1. feladat természetesen a 2. feladat különleges változataként, a (9) vízeresztési utasítás alkalmazásával, kétciklusos szimulálással is megoldható lett volna (4/c ábra).

képlettel, ill. esetünkben e képletnek a (11) szerinti $S(0) = S(T)$ kiindulási feltétel és az idő-diszkretizálás figyelembevételével átalakított

$$y_i = \frac{W_i - W_{i-1}}{\Delta t} + \bar{x} \tag{14}$$

változatával számítható.[8]

Az *I. táblázat*ban numerikusan bemutatott tározószámítási feladatmegoldásokat a 4. ábra szemlélteti.

Az ábrán a klasszikus *1. feladatra* a 3.1 szakaszban említett mindkét — az $X(t)$ és a $Z_0(t)$ görbén alapuló — grafikus megoldást bemutattuk. A *2. feladatra* viszont nem a klasszikus — az 1. ábra szerinti elven, vagyis a $Z^*(t)$ feltöltődési görbén alapuló — megoldást, hanem a $Z_0(t)$ maradék-tömeggörbén alapuló szerkesztő eljárást mutatjuk be. (A szerkesztés lényege: a $Z_0(t)$ görbéhez $q_2 - \bar{x}$ iránytangensű felső érintőket kell húzni; a keresett K_2 tározótérfogat a második ciklushoz tartozó érintőszakaszok és a $Z_0(t)$ görbe közötti legnagyobb ordinátametszékkel egyenlő.) A *3. feladat*nak a 4/e ábrán szerkesztett megoldása a $\{Z_0(t), Z_0(t)+K\}$ folyosó belsejében húzott $q_3 - \bar{x}$ iránytangensű szakaszokon alapul. A vízeresztés $W(t)$ maradék-tömeggörbéjét e szakaszok, valamint az őket összekötő — a korlátos tározótérfogatból adódó kényszernek megfelelően — náluk nagyobb és kisebb iránytangensű szakaszok alkotják. Az ábrának a bemutatottnál jóval nagyobb eredeti változatáról kellő pontossággal leolvashatók a $W(t)$ görbe $(q_3 - \bar{x})$-nél kisebb iránytangensű szakaszaihoz tartozó ΔQ_k vízhiányok, ill. az utóbbiakból számítható a keresett R_3 biztonság. A *4. feladat*ra nem mutatunk be ábrát, mivel e feladatnak nincs egyszerű grafikus megoldása. Végül az *5. feladat*nak a kifeszített szál módszerével való megoldása tipikusan szerkesztési feladat (4/f ábra), amely azonban természetesen numerikusan is megoldható.

Hangsúlyozzuk, hogy a 4. ábrán szereplő 1, 2, 3, és 5. feladat a tömeggörbe módszerek segítségével *grafikusan* (szerkesztéssel) *is megoldható* (a 4. ábra rész-ábrái a megoldás módjaira is eligazítást adnak). A grafikus megoldás pontossága természetesen nem vetekedhet a numerikus szimulációéval, viszont szemléletességével sokat segíthet a tározóműködési folyamat érzékelésében. Az 5. feladatot megoldó Varlet-féle módszert pl. sokkal egyszerűbben és eredményesebben lehetett a módszer geometriai megfogalmazása alapján programozni, mint rendszertechnikai megfontolások alapján (l. még az 5.1 szakaszban).

[8] Egyébként könnyű belátni [23], hogy a kifeszített szál két-két szomszédos sarokpontja közötti ΔT_i időszakban állandó értékű $y_{opt}(t)$ optimális vízeresztés-időfüggvénynek — a kifeszített szál-szakasz „folyosó"-beli helyzetétől függően — csak három értéke lehetséges.

$$y_{\mathrm{opt},j} = \begin{cases} \bar{x}_{\Delta Tj} + K/\Delta T_j, \\ \bar{x}_{\Delta Tj}, \\ \bar{x}_{\Delta Tj} - K/\Delta T_j. \end{cases} \tag{15}$$

Az 5. feladat megoldását szemléltető 4/f ábrával kapcsolatban meg kell még jegyeznünk, hogy a módszer — pl. árvízbiztonsági és üdülési érdekek miatt — időben (évszakosan) változó nagyságú hasznosítható tározóterű tározókra is jól alkalmazható, ehhez csupán a kifeszített szálat közrefogó folyosó-határokat kell megfelelőképpen módosítani (aminek eredménye a gyakorlatban a folyosó periodikus szűkítése).

3.4 *A tömeggörbe-módszer bírálata az Egyesült Államokban*

Az angol nyelvterületen szinte napjainkig nem vettek tudomást a tömeggörbe-módszer Rippl által immár 100 éve közzétett első változatának Európa kontinentális részén bekövetkezett jelentős fejlődéséről, amelynek következtében a tömeggörbe-módszer — amint azt a 3.3 szakasz számpéldái bizonyították — a tározókkal kapcsolatos legkülönbözőbb számítási feladatok megoldásának általánosan használható, pontos és szemléletes eszközévé lett. Az Egyesült Államokban például a tömeggörbe-módszert szinte napjainkig azonosítják a teljes vízhozamkiegyenlítést célzó, eredeti, (7) szerinti Rippl-féle tározókapacitás-meghatározási feladat megoldásával, még tovább szűkítve használhatóságát azzal a hiedelemmel, hogy a módszer csakis észlelt $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvénnyel használható, generált $x(t)$ függvénnyel nem alkalmazható. A tömeggörbe-módszer e hitelét vesztett, megkövesült torzképét egyik amerikai tankönyv a másikra örökítette [1], [26], [27], [30], a szakirodalom pedig harcosan bírálta.[9] Méltán állapította meg az amerikai viszonyokról Fiering 1966-ban: „Rippl 1883-ban publikálta tömeggörbe-módszerét és a tározóméretezés módszertana azóta is stagnált, kivéve A. Hazen és Ch. Sudler néhány újítását, egészen a legutóbbi évekig" [13].

„A legutóbbi évek": az 1960-as évek kezdete, amikoris megjelentek az amerikai szintéren a rendszertechnikai módszerek első tározószámítási alkalmazásai, amelyek azóta elárasztották a nemzetközi szakmai fórumokat és ott általános divattá válva, szinte egyeduralmat vívtak ki maguknak olyannyira, hogy „ott tartunk, hogy a tározóhidrológiában a tömeggörbe-módszer puszta említését általában az előrehaladott szenilitás jelének tekintik" [23].

[9] E kritikákra két példát idézünk: „A tömeggörbe-módszer nem alkalmas arra, hogy a tervező a módszer segítségével megbecsülje a kisvízi időszakokban jelentkező vízhiányokkal járó kockázatot" ([14], 7. old.). „Ez a módszer csak észlelt vízhozam-sorozatot használ a tervezett tározó értékelésére" [20]. Nyilvánvaló, hogy ezek a kritikák nem az eredeti tömeggörbe-módszerre, hanem annak az amerikai szakmai köztudatban kialakult torzképére vonatkoznak.

4. A tározószámítási feladatok megoldása rendszertechnikai módszerekkel

A tározószámításra alkalmazott rendszertechnikai eljárások két legsikeresebb és legnépszerűbb képviselője: a ReVelle és társai nevéhez fűződő, lineáris programozást alkalmazó ún. lineáris döntési elv [18], [35], [36], [37] és a Young által kidolgozott dinamikus programozási modell [54]. Mindkét módszer leírása magyar nyelven is megtalálható: a dinamikus programozási modellé pl. a [40] mű VI. I. 3. fejezetében, a lineáris döntési elvé pedig a [10] mű 4. fejezetében, sőt, az utóbbit eljárást Magyarországon is alkalmazták már konkrét feladat megoldására [45].

5. A tömeggörbén alapuló módszerek és a rendszertechnikai módszerek összehasonlítása

A tározóhidrológia rendszertechnikai módszereinek apostolai szerint a tározási feladatok rendszertechnikai megközelítése valóságos ugrást jelent a kőkorszakbeli tömeggörbe-módszerhez képest. E vélekedések terjesztőinek dolgát jelentősen könnyítette a tömeggörbe-módszerekről az amerikai szakemberek tudatában kialakult — a 3.4 szakaszban már vázolt — *torzkép*, továbbá az is, hogy a százesztendős tömeggörbe-módszer elnevezéséhez — legalábbis a felületes ítélkező tudatában — óhatatlanul társult a grafikus eljárások velejáró pontatlanságának képzete. Elterjedt tehát a mítosz, hogy a tömeggörbe-módszerek lényegükben grafikus eljárások, amelyek a számítógépre alapozott rendszertechnikai módszerek megjelenésével egyszeriben elavultak. A tározóhidrológia kutatói között ezért az 1960-as évek kezdete óta szinte rítussá vált a tömeggörbe-módszer látványos elvetése és a konjunktúrával kecsegtető rendszertechnikai iskolákhoz való csatlakozás.

1979-ben azonban megjelent egy tanulmány [23], nem kisebb szaktekintély, mint a 2.2. szakasz (4) csoportját alkotó sztochasztikus tározószámítási eljárások egyik legeredményesebb fejlesztője, V. Klemeš tollából, aki ugyancsak megkérdőjelezi a rendszertechnikai eljárások vitathatatlannak híresztelt fölényét és a tömeggörbén alapuló tározószámítás reális megvilágítására törekszik a rendszertechnika tükrében. A következőkben főleg ebből — a hidrológiai tudományos közlemények szürke tömegéből érvelésének szenvedélyességével és stílusának iróniájával is kitűnő — tanulmányból ragadunk ki a szükséges tisztánlátás megteremtéséhez fontosnak ítélt megállapításokat.

Röviden összefoglalva, Klemeš tagadja, hogy a „kőkorszakbeli" tömeggörbe-módszertől a tudomány modern szakaszába való, sokat emlegetett ugrás valójában valaha is bekövetkezett volna, éspedig azon egyszerű oknál fogva, hogy a tömeggörbe-módszert — a rendszertechnika apostolainak minden híresztelése ellenére — valójában sohasem küszöbölték ki a tározóhidrológiából; nem is lehet kiküszöbölni. A tározóhidrológia területén különösen agresszíven fellépő rendszertechnikai kultusz csupán a kulisszát változtatta: az eredetileg egyszerű fogalmakat mesterkélt dagályos nyelvezet („terminológiai bozót") alkalmazásával elködösítette,[10] valamint a sokszor csak dekoratív jelentőségű matematikai apparátust és „az igen-igen szerény kutatási eredményeket igen mély és szerteágazó problémák megoldásaiként tálalta" [2]. Így például $Z(t)$ tározó-igénybevételi görbéből (I. táblázat (8), (11) és (16) oszlopa) „a rendszer-viselkedés jelleggörbéje" lett, a tömeggörbe-módszer számítását pedig „az egymást követő csúcsok algoritmusá"-nak nevezik és mint valami teljesen új, sosemlátott módszert tálalják [29].[11]

A tömeggörbe-módszert és a rendszertechnikai módszert alkalmazó tározóhidrológiai irányzat fentiekben érzékeltetett vitájában állást foglaló [23] tanulmány fő állításai a következők:

(a) Egyedi, vízhasznosítási célú tározók vonatkozásában a (6a) és (6b), többcélú tározók vonatkozásában a (6c) tározóegyenletekkel determinisztikusan megfogalmazott feladatok megoldása a tömeggörbe-módszer megfelelő változatával érhető el. E megoldáshoz mind a dinamikus, mind a lineáris programozással nyerhető megoldások szerencsés esetben is csak konvergálhatnak.

(b)A tömeggörbén alapuló — akár grafikus, akár numerikus — módszereknek további nagy előnye a rendszertechnikai módszerekkel szemben, hogy a tározó működését áttekinthetően, követhetően érzékeltetik.

(c) A számítástechnikai hatékonyság szempontjából összehasonlítva a két módszercsoportot, megállapítható, hogy a tömeggörbe módszerek számítási (gép)időigénye nagyságrendekkel kisebb, mint a rendszertechnikai módszereké.

[10] A rendszertechnika ürügyén terjedő dagályos zsargon egyébként a magyar vízügyi tudományos dolgozatokban is felbukkant már. Olyannyira, hogy egy 1980-ban elhangzott opponensi véleményben a következő intelem próbálja gátolni további terjedését: „. . . a tudomány bármely területén bármiféle szemlélet és elmélet alkalmazása soha nem lehet cél, hanem csak eszköz. Eszköz, melynek hasznossága, vagy kevésbé hasznossága az adott, megoldandó feladattól függ. Közismert tény viszont, hogy a tudományos feladatok megoldásánál mindig törekedni kell a feladat jellegéhez igazodó legegyszerűbb út követésére. Egy egyszerűen is megoldható kérdés bármilyen szemléleten alapuló és bármilyen elméletet is igénybe vevő túlzott elbonyolítása nem erény, hanem hiba. Hiba, mivel arra utal, hogy az ezt az utat követő kutató előtt nem kizárólag a megoldandó cél lebeg, hanem burkoltan, vagy nyíltan arra törekszik, hogy bizonyos eszközök használatában bizonyos fogalmak alkalmazásában való jártasságát bemutassa" [44].

[11] Egyébként a (2a) szerinti $Z^*(t)$ maradék-tömeggörbén alapuló Rippl-feladat (1. ábra) is meghatározható — ha éppen úgy tetszik — rendszertechnikai zsargonban, mint „hátraléptető, előretekintő, rekurzív szekvenciális maximálás", ami is a dinamikus programozás egyik alapvető módszere. RIPPL eljárása ugyanis a következő alakban is felírható [23]:

$$K_i = \max(K_{i-1}, C_i), \quad i = 1, 2, \ldots, n,$$

az eredmény pedig:

$$K = K_n ,$$

ahol az i index az időben hátrafelé lépeget, C_i az i-edik száraz időszakban szükséges feltöltés mértéke, végül K_i az i-edik száraz időszak kezdetétől a teljes T időszak végéig tartó időszak alatt a korlátozás nélküli vízigény-kielégítéshez szükséges minimális tározókapacitás.

(d) A tömeggörbe-módszer fölényét kimondó fenti (a)—(c) megállapítások a tározószámítási feladatoknak csak egy meghatározott — bár a gyakorlatban legelterjedtebb — körére: a vízhasznosítási célú egyedi tározók (6a) és (6b) típusú méretezési feladatára, továbbá a többcélú — egyedi vagy együttműködő — tározók (6c) típusú üzemrend-optimálási feladatára érvényesek.

5.1 *Az eredmény pontossága*

A fenti (a) állítást a [23] tanulmány a tározóegyenletek közül legösszetettebb (6c) tározóüzemelési feladattal kapcsolatban mind YOUNG dinamikus programozási eljárására, mind pedig a REVELLE és társai által javasolt lineáris döntési elvre vonatkozóan, részletesen bizonyítja. A bizonyítás — alapvető fontossága ellenére — terjedelmi okokból itt még kivonatosan sem ismertethető, csupán a levezetés gondolatmenetének főbb lépéseit idézzük:

— Bizonyítható, hogy amennyiben a vízigény-kielégítés elégtelensége okozta L gazdasági veszteség a tározóból történő y vízeresztés *konvex* függvénye (pl.: $L = y^a$, $a < 0$ vagy $a > 1$) — továbbá tökéletesen ismerjük a T-beli $x(t)$ hozzáfolyás-időfüggvényt, — akkor a tározó gazdaságilag legkedvezőbb üzemrendjét a (6c) feladat írja le, vagyis az $y(t)$ vízeresztés minél teljesebb kiegyenlítésére kell törekedni. Ez a matematikailag bizonyított megállapítás megegyezik a szakemberek között évtizedek óta elfogadott, intuíción alapuló, néha meg is fogalmazott általános nézettel [25]. A $\mathrm{Var}[y(t)] = \min$ követelményt egyébként a lineáris döntési elv célfüggvényeként is érvényesítették [36].

— Bizonyítható, hogy a (6c) feladat a legpontosabban a Varlet-féle „kifeszített szál módszerével" oldható meg (3.2 szakasz, 3. és 4/f. ábra), amely lényegében a véges tározóból való vízeresztés optimális feladatát variációszámítás útján közelíti, és amely numerikusan (számítógéppel) is egyszerűen megoldható.

— Matematikailag bizonyítható, hogy mind a Young-féle — az Euler-Lagrange-féle differenciálegyenleten ([4], 669—672 old.) — alapuló dinamikus programozási eljárás, mind pedig a REVELLE és társai által kidolgozott lineáris programozási eljárás — hatalmas matematikai apparátussal ugyan, de — ugyancsak a Varlet-féle feladatot oldja, ill. közelíti meg.

— Végül rá kell mutatni, hogy — feltéve a bemenő $x(t)$ függvény jövőbeli tényleges megvalósulását — a kifeszített szál módszere teljesen pontos megoldásra vezet, míg a rendszertechnikai módszerek eredményeit — egyes változók kényszerű diszkretizálása miatt, de egyéb okok miatt is[12] — mindig valamekkora pontatlanság terheli.

[12] *Loucks és Dorfman* [28] szerint például a *ReVelle* és társai által kidolgozott valószínűség-kényszerű lineáris döntési elv módszerének alkalmazásával a valóban szükségesnél nagyobb tározótérfogat adódik, elsősorban azért, mert az eljárás — implicit módon — felteszi a kritikus vízhozamok és tározóteltség-értékek egyidejű előfordulásának lehetőségét, aminek valószínűsége a valóságban elhanyagolható. A lineáris programozást alkalmazó eljárások közül HOUCK [19] modellje közelíti meg a legjobban az explicit megoldást.

A fentiekben csak vázlatosan ismertetett bizonyítás alapján KLEMEŠ [23] nem minden él nélkül jegyzi meg: „Kiváló képességű kutatók regimentjének több, mint egy évtizednyi összpontosított erőfeszítései után, valamint dagályos és homályos zsargonban írt disszertációk tornyosuló tömege után (amelyekben fölös mennyiségben hemzsegnek az egyenletek, többszörösen kimerítve két ábécé jelölési lehetőségeit és számos számítógép csődjét okozva), a tározóüzemelés optimálására használt két legnépszerűbb rendszertechnikai módszer — a lineáris és a dinamikus programozás — mostanára lassanként eljutott odáig, hogy eredményei egyenértékűek egy csaknem 60 éves tömeggörbe-módszer, az igénytelen nevű „kifeszített szál módszere" segítségével kapható eredményekkel."

5.2 *A tározó-működés folyamatának áttekinthetősége*

Alapvetően egyet kell értenünk REVELLE és társa [35] véleményével, amely szerint: „A számítógépektől és a matematikai optimálástól függetlenül is ... a tározótervezés alkotó tevékenység és ... a tervezés minősége nagyrészt attól függ, hogy a tervezőnek sikerül-e a tervezett rendszer valamennyi összetevője közötti kölcsönhatásokat átlátnia." Ugyanakkor meglepő, hogy REVELLE és társa a lineáris programozási megfogalmazást olyannak tekintette, amely e vonatkozásban segíthet a tervezőnek. Azt, hogy e megközelítés révén mennyire nehéz átlátni a feladatot, a legcsattanósabban magának a lineáris döntési elven alapuló eljárásnak a fejlődéstörténete igazolja. A kutatócsoportnak 6 évre volt szüksége ahhoz, hogy a [35] szerinti — [10]-ben is ismertetett — eljárás alapjául elfogadott tározóüzemelési utasítástól több szakaszban eljusson a [18] szerinti, árnyaltabb utasításig. Az utóbbi utasítás azonban egyrészt még mindig messze elmarad a Varlet-féle megoldás pontosságától, másrészt a tározóműködés mechanizmusába semmiféle használható betekintést nem tesz lehetővé, leszámítva azt az eléggé triviális felismerést, hogy a jelenlegi vízeresztés a múltbeli hozzáfolyás-értékektől függhet. Nem tűnik ki belőle, hogy ez a függőség a múlt mekkora szakaszára terjed ki, milyen sebességgel lazul, lazul-e egyáltalán, hogy minderre van-e a tározó méretének valamilyen hatása stb. Az egész „masszát" a $\mathrm{Var}[y(t)] = \min$ feltételen kell keresztülsajtolni és ez, bármilyen egyszerű legyen is, a [18] szerinti lineáris programozási megfogalmazásban a parciális differenciálegyenletek dzsungelén keresztül egy hatalmas lineáris egyenletrendszerhez vezet. REVELLE és társai [35] előbb idézett vélekedésének tükrében a módszer egyszerűen önmaga dugájába dől: a tervező mindenfajta betekintés lehetőségétől meg van fosztva és kénytelen a számítógép adta eredményeket valamiféle isteni kinyilatkoztatásként fogadni.

Hozzá kell tennünk: nemcsak a lineáris döntési elv, hanem mindkét rendszertechnikai módszer esetében problémát okoz, hogy mind az eredményt, mind a számítási folyamatot kivonják a közvetlen ellenőrzés („utánaszámolás") lehetősége alól: a tervezőnek nincs más választása, mint hogy higgyen a programozónak és — mindenek fölött — a számítógépnek (amint arra FIERING is rámutatott [15]). Ennek viszont súlyos következményei lehetnek.[13]

[13] E dilemma megoldása, vagyis a „kutató-számítógép" ciklus rövidre zárása, bizonyos mértékig talán a *kisszámítógépek* elterjedésétől várható.

A tározóműködési folyamatot szimuláló tömeggörbe-módszerek különböző — akár numerikus, akár grafikus — változatainak szemléletessége, közvetlen követhetősége nem kíván bizonyítást; elég, ha tanulmányunk 3.3 szakaszának számpéldáira utalunk. A (6c) feladatot a kifeszített szál módszerével megoldó számpélda (I. táblázat (18), (19) oszlopai, 4/f ábra) például egyértelműen érzékelteti, hogy a vízeresztés optimális értéke szakaszonként (a kifeszített szál két-két sarokpontja között) állandó, a pillanatnyi tározóteltségtől független, a $W_{opt}(t)$ tömeggörbe sarokpontjaiban viszont hirtelen változik. E tények elégségesek a lineáris döntési elv alapfeltevésének megingatásához, amely szerint az optimális vízeresztési értékek a jövőbeli vízhozamok ismerete nélkül is jól becsülhetők.

A kifeszített szál módszerének talán éppen abban áll a legfőbb gyakorlati haszna, hogy megérteti velünk ezt a kellemetlen igazságot azáltal, hogy az optimális tározóműködés mechanizmusát a legmeztelenebb alakjában, álmatematikai csomagolás és dagályos zsargon nélkül mutatja be. A lehető legvilágosabban bizonyítja az észlelt (történelmi) vízhozamsorozat értékét és a vízhozam-előrejelzés fontosságát: nyilvánvalóvá teszi ugyanis, hogy előrejelzés nélkül a vízeresztés rendje operatív szinten érdemben nem optimálható, s ezt semmilyen rendszertechnikai bűvészkedés nem pótolhatja. Érzékelteti, hogy a kis tározók miért igényelnek rövidebb időelőnyű előrejelzéseket, mint a nagy tározók; demonstrálja a nagy tározók működésének robusztusságát (3. ábra), ami miatt az optimális vízeresztést legjobban a középvízhozammal lehet megközelíteni; és azt is megvilágítja, hogy az éves szabályozású tározók esetében miért lehet nagyonis hasznos a működtetési nomogramokon alapuló vízeresztés és miért nincs e nomogrammoknak semmi értelme a hosszúidejű szabályozást célzó nagy tározók esetében. Azt is megmagyarázza, hogy miért nem annyira a pillanatnyi vízhozamok, mint inkább a tározó egyes „működési ciklusai” alatt érkező vízhozam-összegek meghatározó jelentőségűek az optimális működtetés számára, minthogy éppen ezek a víztömegek határozzák meg az optimális vízeresztés számára döntő jelentőségű sarokpontok elhelyezkedését.

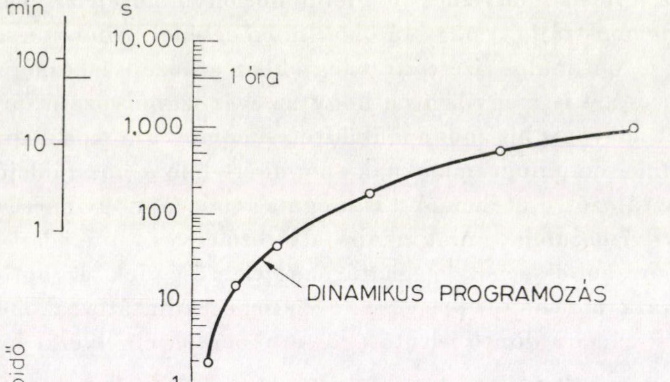
A $Z_0(t)$ maradék-tömeggörbe s vele a $W_{opt}(t)$ vízeresztési görbe markánsan kirajzolódó kb. 13 éves periódusait (4/f ábra) szemlélőben még az a gondolat is felvetődhet, hogy a K_5 hasznos térfogatú tározóból biztosítható $y(t)$ vízeresztés mértéke egyetlen ilyen jól kiválasztott periódus alapján is eléggé pontosan lenne becsülhető, ill. az a gondolat, hogy vízhozamészlelés hiányában az x sokévi középvízhozam és a $Z_0(t)$ görbe karakterének — valamilyen földrajzi általánosításon alapuló — ismerete is meglehetősen jó alapot biztosíthatna a tározószámításhoz.

A tömeggörbe-módszerek érzékletes, áttekinthető voltára vonatkozó megállapítás természetesen nem csak a kifeszített szál módszerére, hanem a (6a) és (6b) feladatot megoldó — az I. táblázat (4)—(17) oszlopában, ill. a 4/b—4/e ábrán bemutatott — valamennyi eljárásra érvényes. A 4/e ábra pl. egyebek között jól érzékelteti a vízhiányos részidőszakok halmozódását a T időszak kezdetén s ezzel ráirányítja a figyelmet a tározóból R_3-nál kisebb biztonsággal kielégíthető további vízhasználatok engedélyezésének lehetőségére.

5.3 *Számítástechnikai hatékonyság*

A tározó-optimálás dinamikus és lineáris programozási módszereinek számítástechnikai hatékonyságára vonatkozó (*c*) megállapítás egyik forrása Gablinger és Loucks [16] vizsgálata, amely szerint a dinamikus programozási módszer a lineáris programozási módszerhez szükséges gépidő 1/20 részét igényli. Klemeš [23] viszont egyrészt Young [24] előre-léptető dinamikus programozási algoritmusával, másrészt a kifeszített szál módszer számítógépre alkalmazott algoritmusával, a havi középvízhozamok 25 éves sorozata alapulvételével optimálta egy egyedi tározó vízeresztéseit. Az optimálást a tározókapacitás különböző értékeire végezte el (3. ábra) úgy, hogy a dinamikus programozással különböző *K* tározókapacitásokra kapott eredmények kb. ugyanolyan pontosak legyenek ($\pm 5\%$) és hogy a legnagyobb vizsgált tározókapacitást vizsgálata során a rendelkezésre álló (CDC 6000-CYBER 74 rendszerű) számítógép kapacitása teljesen ki legyen használva. Az 5. ábrán a tározókapacitás függvényeként feltüntettük a két összehasonlított módszer által az optimális vízeresztések meghatározására igényelt gépidőt. Látható, hogy

— a kifeszített szál módszerével való megoldás $1 \div 5$ nagyságrenddel kevesebb gépidőt igényel, mint a dinamikus programozás,



5. ábra. Ugyanazon vízeresztés-optimálási feladatnak dinamikus programozással és a *Varlet*-módszerrel történő megoldásához igényelt gépidő [23]

— míg a dinamikus programozással (akárcsak a lineáris programozással) való megoldást sújtja a „méretnövelés átka", vagyis a tározókapacitással együtt rohamosan nő a gépidő-igény (az állapotváltozók, ill. a megoldandó egyenletek számának növekedése miatt), addig VARLET módszere esetében a kapcsolat éppen fordított jellegű (a kifeszített szál töréspontjai számának csökkenése miatt).

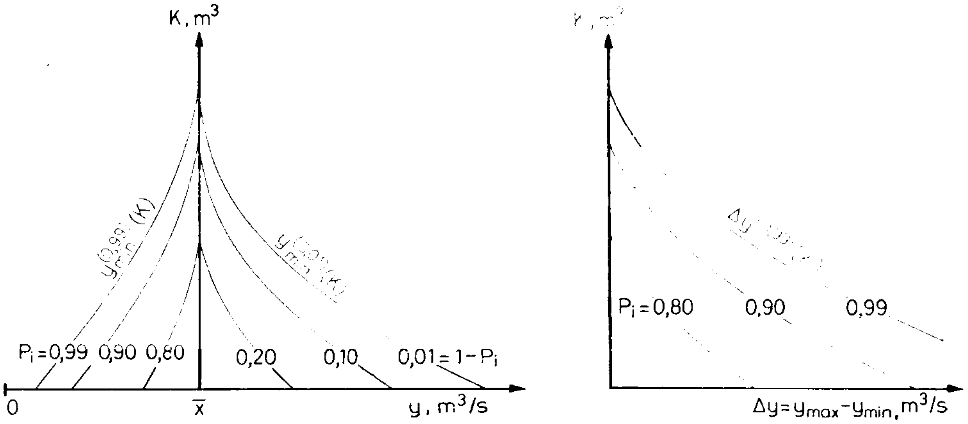
5.4 *A tömeggörbe módszerek szűkebb alkalmazási területe*

A (d) megállapítással kapcsolatban csak arra mutatunk rá, hogy a Varlet-módszer s általában a tömeggörbe-módszerek felsorolt nagy előnyeiért fizetni is kell. A Varlet-módszer egyszerűségének és eleganciájának például az az ára, hogy csak egy eléggé speciális — a jövőbeli hasznok zérus kamatlábával és egyszerű alakú, egyváltozós veszteségfüggvénnyel jellemezhető — optimálási feladat megoldására használható. (Hozzátehetjük, hogy a gyakorlati feladatok, elsősorban a jövőre vonatkozó információk nagyon is bizonytalan volta miatt, igen sokszor ilyen egyszerű alakban jelentkeznek.) A (6a) és (6b) típusú feladatok megoldására bemutatott tömeggörbe-módszerek (4/d, 4/e ábra) viszont kizárólag vízhasznosítási célú egyedi tározók méretezésére használhatók.

A lineáris és dinamikus programozási megközelítések számítástechnikai esetlenségéért és intuitív szemléltetőerő-hiányáért általánosabb és rugalmasabb voltuk kárpótol.

Együttműködő tározók alkotta többcélú rendszerek üzemének diszkontálás figyelembevételével való optimálására ezért elsősorban a rendszertechnikai módszerek ajánlhatók [5], [10], [39]; eredményes alkalmazhatóságukat kiváló hazai példa [24] is igazolja.

E helyen érdemes még megemlítenünk, hogy újabban DYCK [11] kitűnő példát mutatott be arra, hogy a Varlet-módszernek egy-egy tározási szelvény nagyszámú generált hozzáfolyás-adatsorára való ismételt alkalmazásával és a kapott eredmények statisztikai értékelésével hogyan lehet az adott szelvény — vagy akár egy földrajzi régió — tározási lehetőségeire *általánosított információkat* előállítani: Egy-egy adott tározószelvényben $n = 1000$ darab T terjedelmű generált $x(t)$ adatsorra, s minden egyes adatsor esetében a tározótérfogatok ugyanazon $K = 0, K_1, K_2, \ldots, K_j, \ldots K_N$ sorozatára VARLET módszerével előállította a (6c) szerinti $y_{opt}(t)$ vízeresztés-időfüggvényt. (K_N értelemszerűen mind az n adatsorozat esetében teljes kiegyenlítést biztosító tározótérfogatot jelöli.) Ezzel minden K_j értékhez n darab $y_{opt}^{(j)}$ függvényt, ill. n—n darab $y_{max}^{(j)}$ és $y_{min}^{(j)}$ értéket kapott. Az utóbbi értékek tapasztalati eloszlásfüggvényeiből, meghatározott $P_l = 0{,}99$; $0{,}90$; $0{,}80$; stb. meghaladási valószínűségekhez (P_l, y_{min}, K_j) adatcsoportokat, valamint a megfelelő $1 - P_l = 0{,}01$; $0{,}10$; $0{,}20$; stb. meghaladási valószínűségekhez $(1 - P_l, y_{max}, K_j)$ adatcsoportokat határozott meg. Ezután (y, K) koordinátarendszerben ábrázolta és összekötötte az azonos P_l valószínűséggel jellemzett (y_{min}, K) és az azonos $1 - P_l$ valószínűséggel jellemzett (y_{max}, K) pontokat. Az $y_{max}^{(Pl)}(K)$ és az $y_{min}^{(1-Pl)}(K)$ görbék serege az adott szelvény tározási hatásmezőjét alkotja. Ebből a $\Delta y = y_{max} - y_{min}$ értékek $K = f(\Delta y, P)$ tározáshatásmezője is előállítható (6. ábra). Hasonlóképpen egy adott földrajzi régióban levő különböző tározószelvények valamely rögzített P_0 valószínűséghez tartozó $y^{(P_0)} = f^{(P_0)}(K)$ görbéinek serege is értékes áttekintő információt szolgáltat a régió tározási lehetőségeiről.



6. ábra. Adott tározási szelvény nagyszámú generálthozzáfolyás-adatsoraira VARLET módszerével előállított y_{opt} (t) vízeresztés-időfüggvények statisztikai feldolgozásával kapott tározóhatásmezők [11]

5.5 *A két módszer-csoport összehasonlításának célja*

KLEMEŠ [23] tanulmányának korántsem az volt a célja, hogy a tározóméretezés gyakorlatából kiküszöbölje a rendszertechnikai módszereket, hanem az, hogy hamis dicsőségük piedesztáljáról a földre szállítsa le őket, rámutatva a tömeggörbén alapuló hagyományos mérnöki eljárásokkal szükségszerűen fennálló lényegi kapcsolatukra. Az e kapcsolatokra való ráébredés csak hasznára válhat a tározótervezés tudományának azzal, hogy egyrészt lehűti a rendszertechnikai vakbuzgalmat, másrészt pedig visszaadja a mérnökök önbizalmát.

A [23] tanulmány másik célja az volt, „hogy fokozza annak a veszélynek a tudatát, amellyel a számítógép és rendszertechnika különösen a lelkes újoncot fenyegeti, akinek még nem volt alkalma kitermelni önmagából a szükséges ellenanyagokat a nagyonis fertőző két vírus: a rendszertechnikai sznobizmus és vakbuzgóság ellen, amelyek közül az első a rendszertechnikai megközelítést a hagyományos bölcsesség merev elutasításával, a második pedig a haladást a számítástechnikával és egyszerű dolgok elködösítésével azonosítja." Legutóbb BERLINSKI [2] intézett frontális támadást a modern tudomány e pestisei ellen. Habár nem lehet vele mindenben egyetérteni, amikor szinte az egész rendszertechnikát, mint valami gyalázatot, mint a trivialitásoknak és a tartalmatlanságnak a matematika és a számítástechnikai dekoráció segítségével való elfedésére irányuló „rámenős és' botrányos kísérlet"-et elveti, FIERING [15] alábbi megjegyzéseit aligha vitathatjuk:

„A mérnöki szakirodalom tömve van matematikai modellekkel, optimálási eljárásokkal, Bayes-elemzésekkel, mesterséges vízhozamok egzotikus formuláival és mindenféle számítástechnikai tanulmányokkal. Optimális terveket, optimális működtetési rendeket, optimális mindenfélét keresünk. Kórusban zengjük az automatizált számítástechnika, érzékenységelemzés és modellalkotás litániáját. Mindez valamiféle új vallássá vált... És a hagyományos mérnöki módszerek elvetésének jelenleg népszerű hullámában ... könnyen megfeledkezhetünk arról a tényről, hogy a hagyományos bölcseség esetleg nem-optimális, de jóval megbízhatóbb eredményeket választhat, mint törékeny matematikai modelljeink ..."

6. Következtetések

A (6a), (6b) és (6c) egyenlettel kitűzött tározószámítási feladatok megoldására kidolgozott módszereknek a 2.2. szakaszban felsorolt öt csoportja közül a legrégibb módszer, a hozzáfolyás tömeggörbéjén (vagy maradéktömeggörbéjén) alapuló szimuláció biztosítja e feladatok legegyszerűbb és általában legmegbízhatóbb megoldását. A tanulmány 5. szakaszában ismertettük KLEMEŠ [23] részletes vizsgálatait, amelyeknek eredménye szerint a 2.2. szakasz (1) csoportjába sorolt, immár klasszikus tömeggörbe-módszerek pontosabbak, áttekinthetőbbek és számítástechnikailag is hatékonyabbak, mint az (5) csoportba sorolt — legújabb és legdivatosabb — rendszertechnikai módszerek.[14] Csak egyetértőleg idézhetjük a [23] tanulmány bevezető mondatait:

„Az utóbbi évtized folyamán azt híresztelték, mintha a tározóméretezési feladatok rendszertechnikai megközelítése valamiféle ugrást jelentene a kőkorszakbeli tömeggörbemódszertől a tudomány modern szakaszába. Ez az ugrás azonban valójában sohasem következett be. Volt ugyan néhány kisebb ugrás, de ezek legtöbbje, a közhiedelemmel ellentétben, nem távolodott el a tömeggörbe-módszertől, sőt még az sem mondható, hogy valamennyi ugrás előrehaladást jelentett volna . . ."

A tömeggörbe-módszerekkel kapcsolatban egyetlen érdemi *ellenvetés* tehető: az, hogy a völgyzárógát szelvényére vonatkozó, kellő hosszúságú és megbízhatóságú hozzáfolyás-idősort igényelnek, amely viszont többnyire nem áll közvetlenül rendelkezésre. Ez az ellenvetés azonban a tározószámítási módszerek valamennyi csoportjára érvényes, mert a tározót tápláló hozzáfolyásra vonatkozó — észlelt vagy spekulatív úton származtatott — információ nélkül semmilyen tározószámítás nem végezhető el. Az észlelt adatsor hiánya esetén az azt pótló, hidrológiai-matematikai eszközökkel előállított mesterséges vízhozam-idősor alkalmazása viszont semmivel sem okozhat nagyobb bizonytalanságot, mint a többi tározószámítási módszerbe — közöttük a (3) csoport általánosított tapasztalati összefüggéseibe — is szükségképpen beépült adathiány-pótló mechanizmus.

A fentiek miatt a tározószámítás tömeggörbe-módszereinek a magyar vízgazdálkodási gyakorlatban való szélesebb körű alkalmazása is feltétlenül ajánlható a vízhasznosítási célú egyedi tározók (6a) és (6b) típusú méretezési feladatainak és a többcélú — egyedi vagy együttműködő — tározók (6c) szerinti üzemrend-optimálási feladatainak a megoldására.

A magyar szakemberek számára a tömeggörbén alapuló tározószámítások gyakorlati végrehajtásához — a hivatkozott magyar nyelvű módszertani szakirodalmon [22], [52], [53] kívül — az e tanulmány I. táblázatában és 4. ábráján közölt számpéldák nyújthatnak eligazítást. A (6c) képlet szerinti üzemrend-optimálási feladat megoldására használható „kifeszített szál módszer" FORTRAN IV. nyelven írt számítógépi programja a szerzőtől beszerezhető.

[14] KLEMEŠ idézett megállapításának kiegészítéseként érdemes megjegyezni, hogy SCHULTZ a [40] mű VII. 1.2 fejezetében, konkrét számpélda kapcsán a tanulmányunk 2.2 szakaszának (4) csoportjába tartozó sorbanállási elmélet alapján történő tározószámítást hasonlítja össze a tömeggörbén alapuló szimulációval. Ez az összehasonlítás is a szimulációs eljárás megbízhatóbb voltát mutatta ki.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány egyes részleteinek pontosítására, kiegészítésére vonatkozó tanácsokért a szerző köszönettel tartozik KOVÁCS Györgynek, a MTA levelező tagjának, a VITUKI főigazgatójának; SZESZTAY Károlynak, a műsz. tud. doktorának, a Vízgazdálkodási Intézet főmunkatársának és V. NAGY Imrének, a műsz. tud. doktorának, a Budapesti Műszaki Egyetem tanszékvezető tanárának.

IRODALOM

1. BABBIT, H. E.—DOLAND, J. J.—CLEASBY, J. L.: Water Supply Engineering. McGraw Hill, New York 1955
2. BERLINSKI, D.: On Systems Analysis, MIT Press, Cambridge, Mass. 1976
3. BUKOVSZKY Gy.: Kis tározók létesítése. *Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató*, 42. sz. VIZDOK, Budapest 1972
4. CSÁKI F.: Korszerű szabályozáselmélet. Akadémiai Kiadó, Budapest 1970
5. CSERMÁK B.: A vízhasználatokkal kapcsolatos időszerű hidrológiai és vízkészletgazdálkodási kérdések. Kandidátusi értekezés (Kézirat). Budapest 1968
6. CSERMÁK, B.: Ermittlung des zukünftigen Wasserbedarfs. *gwf-wasser/abwasser*, **114.** H. 11, (1973)
7. DÁVID L.—DUCKSTEIN, L.: Vízgyűjtőfejlesztési alternatívák értékelése költséghatékonyság-elemzéssel. *Vízügyi Közlemények* (1976), 3. sz.
8. DOMOKOS M.: A vízkorlátozás mutatói. *Műszaki Tudomány*, **46.** (1973)
9. DOMOKOS M.: A vízkészletgazdálkodási rendszertervezés bevezetésének problémái. Beszámoló a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet (VITUKI) 1971. évi munkájáról. Budapest 1974
10. DOMOKOS M.: Vízkészletgazdálkodási rendszerek modellezése. *Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató*, 72. sz. VIZDOK, Budapest 1975
11. DYCK, S.: Zur Bemessung und Bewirtschaftung von Speichern. (Als Manuskript gedruckt). Informationen der Technischen Universität Dresden, 1980
12. DYCK, S.—SCHRAMM, M.: Stochastische Methoden der Speicherwirtschaft. *Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft*, Nr. 28. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1968
13. FIERING, M. B.: Synthetic Hydrology: An Assessment, in Water Research, edited by A. V. Kneese and S. C. Smith, pp. 331—341, John Hopkins Press, Baltimore, Md. 1966
14. FIERING, M. B.: Streamflow Synthesis, Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1967
15. FIERING, M. B.: Reservoir Planning and Operation, in Stochastic Approaches to Water Resources, vol. II, edited by H. W. Shen, pp. 17—1 to 17—21; H. W. Shen, Fort Collins, Colo. 1976
16. GABLINGER, M.—LOUCKS, D. P.: Markov Models for Flow Regulation. *J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, **96** (HY1), (1970), 165—181
17. GILYÉNNÉ HOFER A.: A tiszavölgyi tározás szimulációs vizsgálata. Beszámoló a VITUKI 1977. évi munkájáról. Budapest 1980
18. GUNDELACH, J.—REVELLE, C.: Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, 5, A general algorithm, *Water Resour. Res.*, **11** (2), (1975), 204—207
19. HOUCK, M. H.: A method to include risk explicity in optimal river basin planning, in Proceedings, *International Symposium on Risk and Reliability in Water Resources*, **1.** pp. 119—126, University of Waterloo, Waterloo, Ont. 1978
20. JACKSON, B. B.: The use of streamflow models in planning. *Water Resour. Res.* **11** (1), (1975), 54—63
21. KARDOS M.: Mesterséges vízhozamsorozatok előállítása. Monte-Carlo elven alapuló szimulációs eljárások. *Hidrológiai Közlöny*, (1973), 9—10. sz.
22. KEBEDE, A.: Dimensioning of Water Storage Reservoir for Irrigation on the Kessem River near Awara Melka (Ethiopia). *International Post-Graduate Course* on *Hydrology*, closing paper, Budapest 1979
23. KLEMEŠ, V.: Storage mass-curve analysis in a system-analytic perspective. *Water Resources Research*, V. **15.** No. 2. (1979.) April
24. KORIS K.—NAGY B.—SZILVÁSI M.: A Velencei-tó vízszintszabályozási modellje. *Hidrológiai Közlöny*, (1978) 5
25. KRICKIJ, S. N.—MENKEL, M. F.: Vodohozjajsztvennüe raszcsotü. *Gidrometeorologicseszkoe Izdatel'sztvo*, Leningrad 1952

26. LINSLEY, R. K.—FRANZINI, J. B.: Water Resources Engineering. McGraw-Hill, New York 1972
27. LINSLEY, R. K.—KOHLER, M. A.—PAULHUS, L. H.: Applied Hydrology, McGraw-Hill, New-York 1949
28. LOUCKS, D. P.—DORFMAN, P. J.: An evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning and operation. *Water Resour. Res.*, **11** (6), (1975), 777—782
29. LOUCKS, D. P.: Surface-water quantity management models, in Systems Approach to Water Management, edited by A. K. Biswas, pp. 156—218. McGraw-Hill, New York 1976
30. MEAD, W. E.: Hydrology, McGraw-Hill, New York 1950
31. MORAN, P. A. P.: The theory of storage. Methven, London 1959
32. MOSONYI E.: Hegyvidéki nagyobb víztározó medencék hidrológiai méretezése. *Vízügyi Közlemények*, (1947) 1—4. szám és (1948) 1. szám
33. PAPP G.: Szimulációs modell a tározók hidrológiai méretezésére. *Hidrológiai Közlöny*, (1976), 1
34. PUSKÁS T.: Tározómedencéink hidrológiai méretezése. Kandidátusi értekezés (kézirat). Budapest 1960
35. REVELLE, C.—JOERES, E.—KIRBY, W.: The linear decision rule in reservoir management and design. 1. Development of the stochastic model, *Water Resour. Res.*, **5** (4), (1969), 767—777
36. REVELLE, C.—KIRBY, W.: Linear decision rule in reservoir management and design. 2. Performance optimization, *Water Resour. Res.*, **6** (4), (1970), 1033—1044
37. REVELLE, C.—GUNDELACH, J.: Linear decision rule in reservoir management and design. 4. A rule that minimizes output variance, *Water Resour. Res.*, **11** (2), (1975), 197—203
38. RIPPL, W.: The capacity of storage-reservoirs for water-supply. *Minutes Proc. Inst. Civil Eng.*, **71** (1883), 270—278
39. SALAMIN A.: Komplex hasznosítású tározórendszerek tervezése és üzemelése. *Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató*, 103 sz. VIZDOK, Budapest 1979
41. SOMOGYI M. (szerk.): Vízgazdálkodási Tájékoztató, 2. szám. (Kézirat). Középdunavölgyi Vízügyi Igazgatóság, Budapest 1964
42. SZESZTAY K.: A sokéves tározótérszükséglet meghatározása Krickij Sz. N. és Menkel N. F. statisztikai módszerével. *Hidrológiai Közlöny*, (1952) 7—8
43. SZESZTAY K.: A Balaton vízkészletgazdálkodásának szimulációs vizsgálata. *Hidrológiai Közlöny* (1972) 10
44. SZIGYÁRTÓ Z.: Opponensi vélemény egy kandidátusi értekezésről. (Kézirat). MTA Budapest 1980
45. TOKÁR TNÉ: A lineáris programozás módszerének alkalmazása a tatai Nagy-tó vízgazdálkodási helyzetének jellemzésére. Magyar Hidrológiai Társaság Vándorgyűlése, 4/7 sz. dolgozat, Sopron, 1976. okt.
46. VARLET, H.: Étude graphique des conditions d'exploitation d'un reservoir de régularisation. *Ann. Ponts Chaussés Mém. Doc.*, Partie Techn., **93.** (1923), 61—79
47. VARSA E.: Összeállítás a Bódva völgyében Perkupa közelében levő tározási lehetőségről. (Kézirat). Budapest 1976
48. VITUKI (PUSKÁS T.): Magyarország vízkészlete, III., Víztározási lehetőségek. Budapest 1968
49. VITUKI (VARSA E.): Tározási lehetőségek Magyarország hegy- és dombvidékein. Budapest 1976
50. *Vízgazdálkodási Intézet:* 3. sz. kiegészítés a „Program-katalógus a Központi Vízügyi Programkönyvtár programjairól" c. kiadványához. Budapest 1980
51. VOTRUBA, L.: Uplatněni ekonomickych hledisĕk při dodávce vody. Práce ČVUT, Praha (1963) 3.
52. V. NAGY I.: Hidrológiai III. Tankönyvkiadó, Budapest 1974
53. *WMO* (V. KLEMEŠ): A hidrológia vízgazdálkodási alkalmazásai. Nemzetközi Vízgazdálkodási sorozat, 1. sz. Országos Vízügyi Hivatal, Budapest 1975
54. YOUNG, G. K., JR.: Finding reservoir operating rules. *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, **93** (HY5), (1967), 297—321
55. ZSUFFA, I.: Matrix arithmetical relations in the dimensioning of dams and in the study of the operation of large lakes, in.: Inventory Control and Water Storages (Ed.: A Prékopa), North Holland, Amsterdam 1973

Mass-curve Methods for Calculating Storage Basins and their Comparison by System-technique Methods. — Also in our days, one of the most significant part of tasks to be solved in connection with the actual hydrological water resources development, is the calculation to determine partly the storage capacity required, partly the convenient order of their operation; both of these functions are often jointly solved. A reservoir can be operating either individually, as an independent project or as an element of a system of co-operating reservoirs. Considering its principal purpose, it can be applied to water utilization, streamflow control or also to several purposes.

Massenkurvenmethoden der Speicherberechnung und Vergleich derselben mit den systemtechnischen Methoden. — Auch heutzutage bilden auf die Speicherbecken bezogenen Berechnungen eine der wichtigsten Aufgaben der praktischen hydrologischen Wasserwirtschaft. Das Anliegen derselben ist die Ermittlung teils des erforderlichen Fassungsvermögens, teils der zweckmäßigen Betriebsordnung der Speicher; oftmals werden beide Aufgaben paralell gelöst. Ein Speicher kann selbstständig (unabhängig) oder als ein Teil eines zusammenarbeitenden Speichersystems funktionieren. Die Speicher können zur Wasserausnutzung, zum Ausgleich des Abflußes und auch zu mehreren Zwecken dienen.