

NAPI INGADOZÁS A HIDROLÓGIAI JELLEMZŐKBEN

GRIBOVSZKI ZOLTÁN¹, KALICZ PÉTER², HERCEG ANDRÁS³,
GRIBOVSZKI KATALIN⁴, SZABÓ ANDRÁS⁵, BOLLA BENCE⁶,
ZAGYVAINÉ KISS KATALIN ANITA⁷

1. Bevezetés

A talajnedvesség, a talajvíz és a lefolyás időbeli változatosságában hosszú- (többéves vagy éven belüli változékonyság) és rövid periódusidejű (pl. napi) változásokat különböztethetünk meg. Az éves periódusú változásnál az ökoszisztéma évszakos ökológiai ritmusával különböző szacikkek sora foglalkozik.

¹ *Dr. Gribovszki Zoltán* okl. erdőmérnök, vízkészletfeltárás-vízrajz szakmérnök, DSc, egyetemi tanár, Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet (gribovszki.zoltan@uni-sopron.hu)

¹ *Dr. Kalicz Péter* okl. környezetmérnök, földmérő és földrendező mérnök, PhD, egyetemi docens, Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

¹ *Dr. Herceg András* okl. környezetmérnök, PhD, tudományos munkatárs, Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

¹ *Dr. Gribovszki Katalin* okl. környezetmérnök, térinformatikai szakmérnök, matematikus, PhD, tudományos főmunkatárs, HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

¹ *Dr. Szabó András* okleveles agrármérnök, talajtani szakmérnök, tudományos főmunkatárs, Soproni Egyetem, Erdészeti Tudományos Intézet

¹ *Dr. Bolla Bence* okl. természetvédelmi mérnök, árvíz- és belvízvédelmi szakmérnök, Soproni Egyetem, Erdészeti Tudományos Intézet

¹ *Dr. Zagyvainé Kiss Katalin Anita* okl. környezetmérnök, faipari mérnök, PhD, kutatási asszisztens, Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

A hidrológiai szakkönyvekben is hosszasan taglalják ezt a jelenséget, de a talajnedvesség, a talajvízjárás és az alapvízhozam rövid periódusidejű (pl. napi) jellemzőiről (ún. *diurnális ciklusáról*) a klasszikus szakkönyvekben alig találunk említést.

Példaként *Baumgartner–Liebschner* (1990) csak egy rövid bekezdést szentel a kérdésnek, ahol a jelenséget a levegő hőmérsékletének változásával magyarázza. Ez a megfigyelés a Harz-hegységbeni kísérleti terület eredményeihez kapcsolódik (*Delfs et al.* 1958). *Hewlett* (1982) „*Principles of Forest Hydrology*” című munkájában említi a jelenséget egy bekezdés erejéig és okának már az evapotranszpirációt (ET) adja meg. *Lee* (1980) „*Forest Hydrology*” című tankönyvében említi a talajvízben jelentkező szignált, és a talajvízszintekben jelentkező napi ingadozás alapján a talajvíz evapotranszpirációt számító *White* (1932) módszert be is mutatja, de részletesebben nem elemzi a problémát. Az evapotranszpiráció talajvízre gyakorolt hatásának tárgyalásánál *Dingman* (2002) elemzi a napi ritmusú talajvízszint-változást, és szintén a *White*-féle eljárást ismerteti, mint az evapotranszpiráció meghatározásnak egy módszerét a felszínközeli talajvízű területeken. A témával igen részletekbe menően foglalkozott *Pörtge* (1996), aki a rövid periódusú változások közül szintén a napi periódusidejű lefolyásváltozást vizsgálta behatóbban.

A hazai szakkönyvek közül *V. Nagy* (1965) és *Juhász* (2002) említi a talajvíz napi ciklusú járását, mindkettő *Ubellnek* (1960) a VITUKI kecskeméti kísérleti telepén végzett méréseire hivatkoznak. Az ingadozást a talajhőmérséklet napon belüli hullámzásához kapcsolják, és okának kizárólag a talajlevegő abszolút páratartalmában, a párolgás és kicsapódás folyamatai miatt bekövetkező változásokat tekintik. A talajvízszintekben jelentkező napi ciklusú változás megjelenését előbbi szerzők a vegetációs időszakhoz kötik és csak a felszínközeli talajvizeknél veszik jellemzőnek. Más hazai szakkönyvekben (pl. *Németh* 1954; *Szesztay* 1972; *Zsuffa* 1996; *Stelczer* 2000) nem is találtunk említést a jelenségről. A szakcikkek esetében, különösen napjaink irodalmát áttekintve, más a helyzet. A közelmúltban már egyre több cikk jelenik meg, melyek a hidrológiai jellemzőkben bekövetkező napi ciklusú változás alapján igyekeznek magyarázni és számszerűsíteni bizonyos vízháztartási jellemzőket. Magyarországi viszonylatban leg részletesebben *Gribovszki* (2023) tekintette át a hidrológiai jellemzőkben kimutatható napi hullámzás jellegzetességeit, okait és az ennek alapján nyerhető, a vízgazdálkodás számára fontos információkat.

A lefolyásban jelentkező napi periódusú ingadozás *Pörtge* (1996) szerint csak kisvízgyűjtőkön (kb. 40 km² nagyságig) kisvízi időszakban tapasztalható, és csak a rajzoló vízmércével rendelkező állomásokon mérhető értékelhető formában. A jelenség ritkábban magában a vízfolyás medrében vizuálisan is felismerhető.

Lundquist és Cayan (2002) vizsgálatai szerint azonban a napi periódusú hullámzás több ezer km²-es vízgyűjtő nagyságnál is tapasztalható. A napi periódusidejű hullámzás nagyobb vízgyűjtők lefolyásában való megjelenését igazolják Troxell (1936) és Meyboom (1965) korábbi vizsgálatai is, ahol a jelenséget 40 km²-nél jóval nagyobb vízgyűjtőkön elemezték.

Az a tény, hogy a napi periódusú talajnedvesség- és talajvízjárásnak, valamint vízhozam ingadozásnak a korábbi tudományos irodalomban csak kevés figyelmet szenteltek, azon alapulhatott, hogy az általa képviselt mennyiségi változás vízgazdálkodási szempontból kevésbé jelentős. Ehhez járult még az a tényező, hogy e jelenség sokszor egyszerűen ismeretlen volt a mérést végző számára. Közvetlenül a mederben sokszor alig felismerhető a napi ciklusú vízszintváltozás, a rajzoló nélküli vízmércéken és a régi típusú, nem megfelelő érzékenységű rajzolókon pedig ritkán kimutatható. A kimutathatóság korlátját jelentette a hidrológiai gyakorlatban a lefolyási adatok gyűjtésénél alkalmazott napi, vagy a talajnedvesség és talajvízszintek észlelésénél használt heti egyszeri észlelés, amellyel lehetetlen érzékelni ezeket a napi ciklusidejű változásokat.

A korszerű digitális adatgyűjtő eszközök fejlődésével egyre több lehetőség adódik nagyobb gyakoriságú adatgyűjtésre, így számos új információt nyerhetünk a napi periódusú hullámzásról.

A napi ciklusú ingadozásból levonható információk nemcsak a vízkészletek számszerűsítésére, az adott víztartó jellemzőinek becslésére alkalmasak, hanem nagyon jó *diagnosztikai mutatói a klímaváltozásnak* is.

A legtöbb esetben a *hidrológiai jellemzőkben tapasztalható napi ciklusú változás fő indukáló faktorainak a napsugárzást és a hőmérsékletet tekintjük*. Ezek szabályozzák a napi ciklusú vízfelvételt és vízleadást, a csapadék, az evapotranspiráció, az infiltráció és a hóolvadás vagy egyszerűen a hőmérséklet napon belüli fagypont alatti és fölötti változása révén. Egyes folyamatok (pl. hóolvadás) a vízfolyásokban vagy a felszínközeli talajnedvességben közvetlenül és szinte azonnal érzékelhetőek, míg a talajvíznél kisebb a jelentőségük, ill. bizonyos késleltetéssel jelentkeznek.

Bár a napi ciklus megjelenése lehet valamilyen vízgazdálkodási tevékenység eredménye is, különösen kifejezett pl. a vízerőművek környezetében, jelen munka azonban elsősorban a napi ritmusú hullámzás természetes megjelenési formáival foglalkozik. A természetes hatásokra jelentkező napi fluktuáció folyamatának értelmezése segít annak megértésében is, hogyan történik a vízkészletek utánpótlódása egy talajnedvesség profil, egy talajvíztest vagy egy vízfolyás esetében, és milyen formában számíthatunk a veszteségekre. Ezek az információk a hosszabb távú vízhozamnövekedések és csökkenések értelmezését könnyíthetik meg, és jól felhasználhatók vízgazdálkodási kérdések eldöntésében is.

2. A napi ciklusú változás típusai

Tekintsük át részletesebben azokat a mechanizmusokat, amelyek befolyásolják a talajnedvesség, a felszínközeli talajvízjárás és a kisvízfolyások alapvízhozamának napi ciklusú változását. *Lundquist és Cayan* (2002) ezen előbbi hidrológiai jellemzőkben jelentkező napi periódusú hullámzás vizsgálatánál többféle mechanizmust, többféle típust vettek alapul. Szolgáljon például erre a következő csoportosítás.

2.1. *Influens vízfolyás infiltrációs vesztesége*

Ez a jelenség csak a felszíni vízfolyásoknál érzékelhető. A víz viszkozitása és a hidraulikus vezetőképesség egyaránt hőmérsékletfüggő, így az influens (talajvízbe bepótló) vízfolyások, vagy influens vízfolyásszakaszok medren keresztüli elszivárgásban jelentkező vízvesztesége függ a vízfolyás hőmérsékletétől (*Lundquist és Cayan* 2002). Azokon a szakaszokon, ahol a vízfolyás vize bepótol a talajvízkészletbe, a legnagyobb vízveszteség a legnagyobb vízhőmérsékletnél következik be. A napi fluktuáció a patak hőmérsékletében a legnagyobb, amikor

- a patak vízhozama alacsony és/vagy nagy a vízfelszín-vízhozam arány, ill.
- a patak vize nagy hőforgalomnak van kitéve a napon belüli hőmérsékleti és sugárzási fluxusok változásai következtében (*Lundquist és Cayan* 2002).

A vízfolyások infiltrációs veszteségből származó, napi ciklusú vízjárása hasonló aszimmetriát mutat, mint az evapotranszpirációs típusé, hirtelen csökkenéssel és fokozatos emelkedéssel az egyes napokon.

Az erdőszült vízgyűjtőkön, árnyékolt vízfolyásmedernél általában olyan kicsi a napi vízhőmérséklet ingadozása, hogy az előbbi hatásnak nincs jelentősége.

Ugyancsak nincs jelentősége a hőmérsékletváltozásra bekövetkező sűrűségváltozásból eredő vízszintingadozásnak ($4,8 \cdot 10^{-4}$ [mm/(nap·K)]) egy a Földön reálisnak tekintett napi hőmérsékleti cikluson belül (*Czikowsky és Fitzjarrald* 2004).

2.2. *Rendszeresen megjelenő napi csapadék okozta ingadozás*

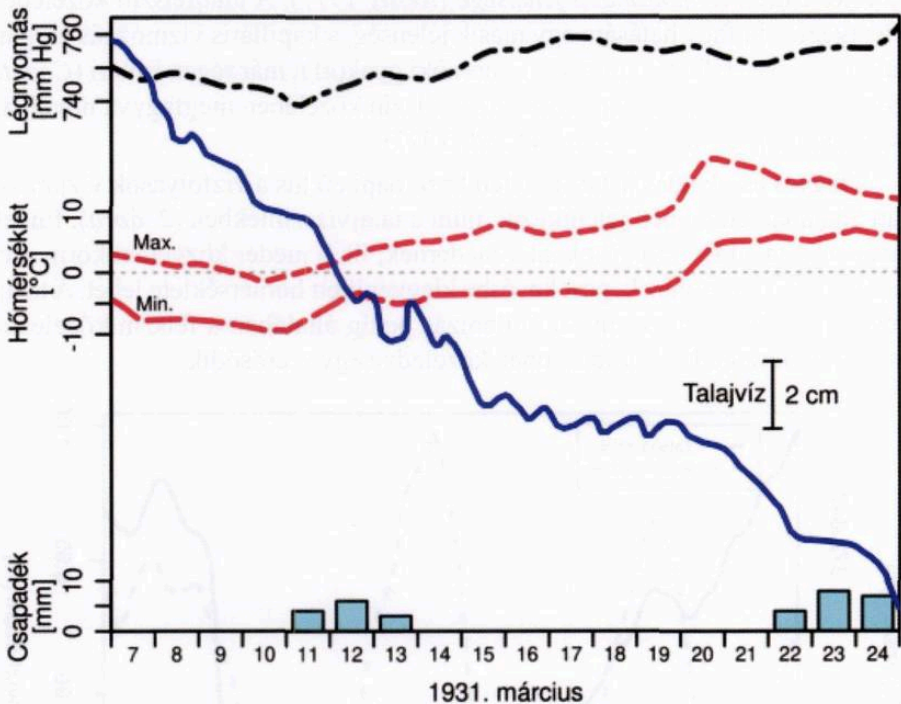
Egyes klímazónákban, például a trópusokon, az egyenlítő környékén, a szisztematikusan dél körül, kora délután megjelenő napi csapadék árhullámokat indít el a vízfolyásokon, amely árhullámok az összegyülekezéstől függően karakterisztikus napi jelleget kölcsönöznek a vízfolyások vízjárásának (*Wain* 1994). Mivel ez a típus klímáfüggő, a mérsékeltövi klímazónában nem jellemző.

2.3. *A hóolvadás és a fagyás-olvadás indukálta napi ingadozás*

A hóolvadás és a fagyás-olvadás okozta napi periódusú hullámzás azokon a fagyos napokon jelenik meg, ahol a hőmérsékleti amplitúdó 10 °C körüli és a maximális hőmérséklet fagyponthoz közelebb van. A talajvízállás és a lefolyás menete ebben az esetben a levegőhőmérséklet menetével korrelál, tehát általában egy hajnali,

reggeli minimummal és egy kora délutáni maximummal jellemezhető (1. ábra).

Ez a főként *hőmérséklet által vezérelt típus* azokon a területeken és időszakokban a legjellemzőbb, ahol a téli hótakaró olvadása jelentős változásokat okoz a vízfolyások vízhozamában, ill. a felszínközeli talajvízszintekben. A hóolvadás kis vízgyűjtőkön való tanulmányozása során egy aszimmetrikus napi ritmus megjelenése tapasztalható a vízfolyások hozamában. A napi ritmus jellemzője az éles emelkedés és a fokozatos csökkenés (Lundquist-Cayan 2002). Az aszimmetria magyarázata a hóolvadás és a hólé függőleges irányú szivárgási dinamikájában keresendő.



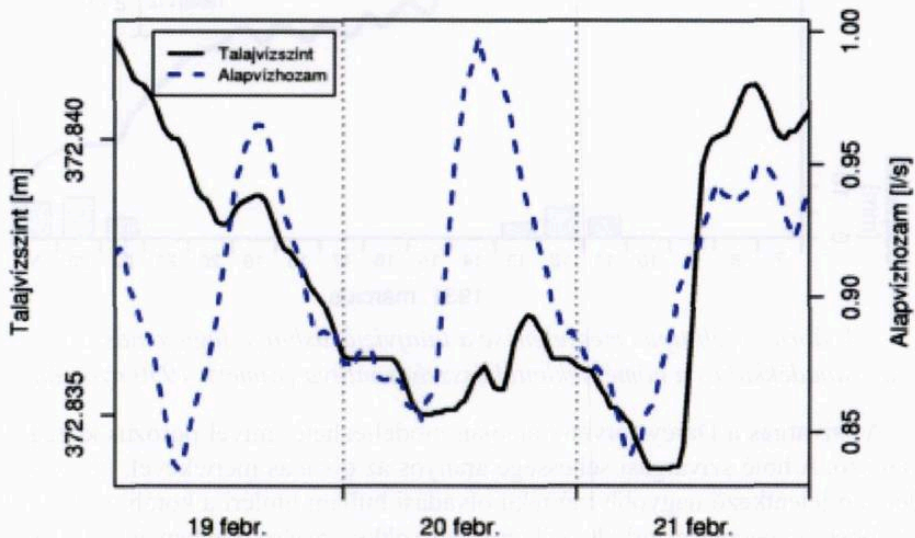
1. ábra. A téli típus megjelenése a talajvízjárásban a légnyomással, a csapadékkal és a hőmérséklettel összehasonlítva (Eimern 1950 nyomán)

A szivárgás a Darcy-törvény alapján modellezhető, mivel porózus közegről van szó. A hólé szivárgási sebessége arányos az olvadás mértékével, így a kora délután jelentkező nagyobb mértékű olvadási hullám utoléri a korábbi, délelőtti kisebbet. Az egymásra torlódó hullámok egy sokszerű éles frontként jelennek meg a hóréteg alján vonuló olvadt hólé vízjárásában és így a befogadó vízfolyás hidrog ráfjában is. A késő délutáni, esti csökkenő olvadási fluxusok viszont egyre inkább lemaradnak egymáshoz képest, így egy graduálisan csökkenő tendenciát hoznak létre a vízjárásban (Lundquist-Cayan 2002). A folyamat numerikus modellezésének

eredményei szerint a maximális vízhozam időpontja egyre korábbra tolódik, ahogy a hóréteg vékonyodik és egyre „érettebbé” válik. Caine (1992) és Jordan (1983a, 1983b) módszereket is javasolnak, amelyek segítségével a vízjárásban jelentkező napi periódusú hullám alakjának és a maximális vízhozam idejének alapján becsülhető a hóréteg vastagsága és hidraulikus vezetőképessége, főként kisvízgyűjtőkön.

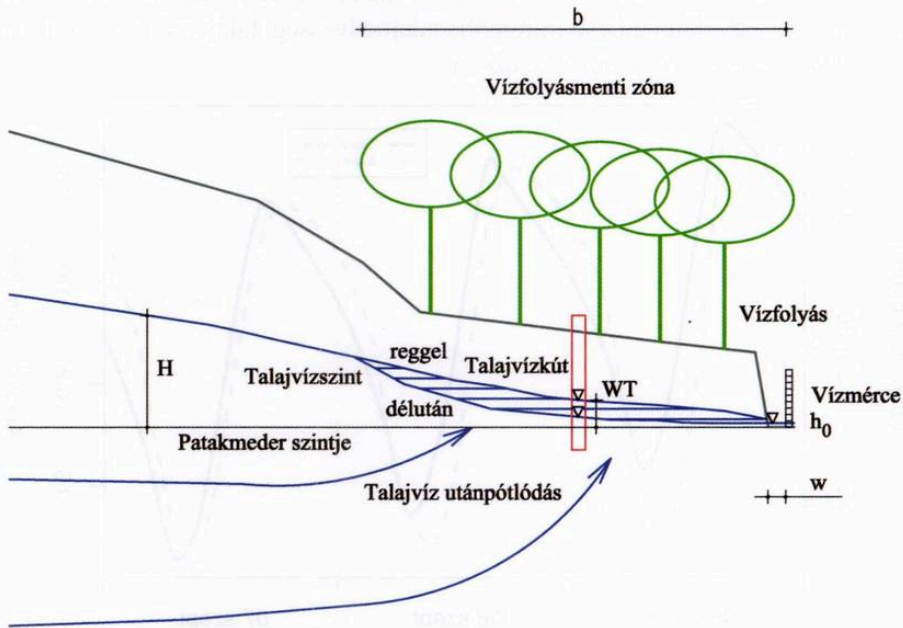
Hómentes területeken vagy időszakokban is előidéz a fagyás-olvasadás jelensége egy hasonló napi ritmust. Már Bouyoucos (1915) följegyezte, hogy a talajnedvesség páraalakban a meleg helyről a hidegebb és szárazabb hely felé mozog. Ez a jól ismert *termoozmózis jelensége* (Kézdy 1977). A talajfelszín közelében jelentkező talajfagy hatására egy másik jelenség, a kapilláris vízmozgás megindulása is tapasztalható, amint ezt a mérnöki gyakorlat már régen ismeri (Coduto 1999). A kapillárisan utánpótlódó víz a felszín közelében megfagyva növeli az ott kialakult jéglencsék méretét (Kézdy 1977).

A fagyás és olvasadás hatására jelentkező napi ciklus a vízfolyások vízjárásában általában élesebben jelentkezik, mint a talajvízszintekben (2. ábra). Ennek magyarázata a kisvízfolyásoknál a medernek, ill. a meder közvetlen környezetének a talajvíztartóhoz képest kevésbé kiegyenlített hőmérséklete lehet. A talajvízben jelentkező ilyen típusú hullámozás pedig általában a felszín közelében lévő talajvízszinteknél, a felszínhez közeledve egyre erősödik.



2. ábra. A téli ún. hőmérsékleti típus menete a Hidegvíz-völgyi mintavízgyűjtő vízhozam és egy vízfolyás menti talajvízkút vízállás idősorában a 2007. évben

A felszínközeli talajfagy kihatása általában 1-2 m. A folyamatos állandó fagyhatásra nem tapasztalható a napi ritmusú hullámzás csak a talajvízszint folyamatos süllyedése és ugyanez detektálható a vízfolyások alapvízhozamában is. A periodikusan változó szívóerő és a vele kapcsolatban megjelenő napi ritmus akkor jelentkezik, ha mind a fagypont feletti, mind az az alatti hőmérséklet egyaránt előfordul a nap során (Eimern 1950) (3. ábra). A jelenséget először Pörtge írta le részletesen és az előbbieket szerint magyarázta az okait (Pörtge 1996).



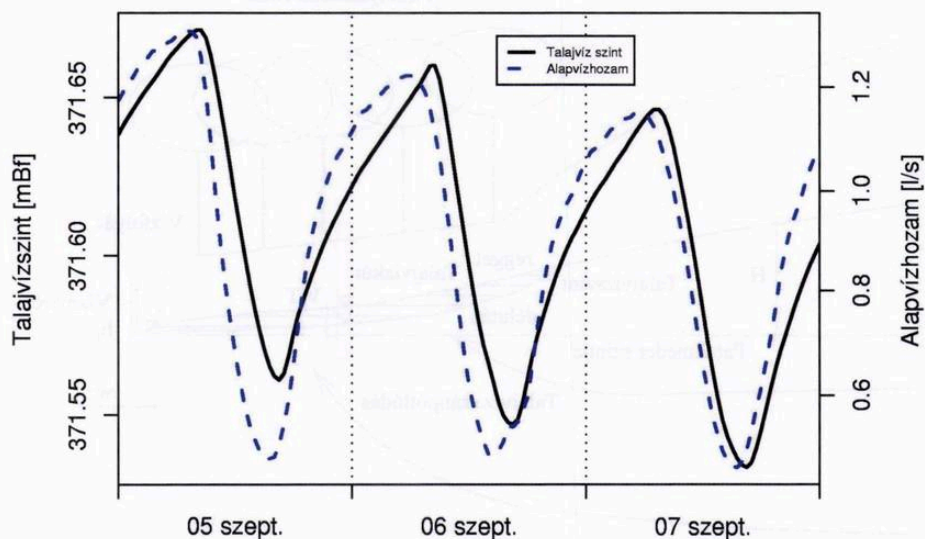
3. ábra. A vegetáció indukálta napi talajvízszint-ingadozás koncepcionális modellje egy kisvízgyűjtő vízfolyás-menti zónájában

Egy szép példa a jég és hó olvadása, valamint az evapotranszpiráció okozta napi hullámzás párhuzamos elemzésére Mutzner *et al.* (2015) munkája. Vizsgálataik során a vegetációs időszak kezdetén a hóolvadás és az evapotranszpiráció által okozott ingadozás átmenetét vizsgálták az Alpok két magasabban fekvő kisvízgyűjtőjében. Az egyik vízgyűjtőben a kétfajta ok által előidézett ingadozás hasonló amplitudókkal volt jellemezhető és az átmeneti időszak a kétféle típusú ingadozás között több napon keresztül jellemző volt, de az átmeneti időszakon kívül a két fő típus jól elkülönült. A másik vízgyűjtőben egy gleccser olvadása az egész vegetációs időszakon keresztül indukálta a téli típus megjelenését, párhuzamosan a párolgás okozta napi hullámzás mellett, de a kétféle hullámzás amplitudója eltérő volt, és természetesen fázisban is eltérően jelentkeztek.

Kutatásaik alapján megállapították, hogy a vegetációs időszak nagy részében a párolgás okozta napi hullámzás hatása felülmúlja a gleccser olvadásából származó másodlagos hatást, de a mért evapotranszpiráció és a vízfolyás menti zóna nagyságának ismeretében a kétféle ingadozás elkülöníthető volt egymástól.

2.4. Evapotranszpiráció, mint az ingadozás kiváltó oka

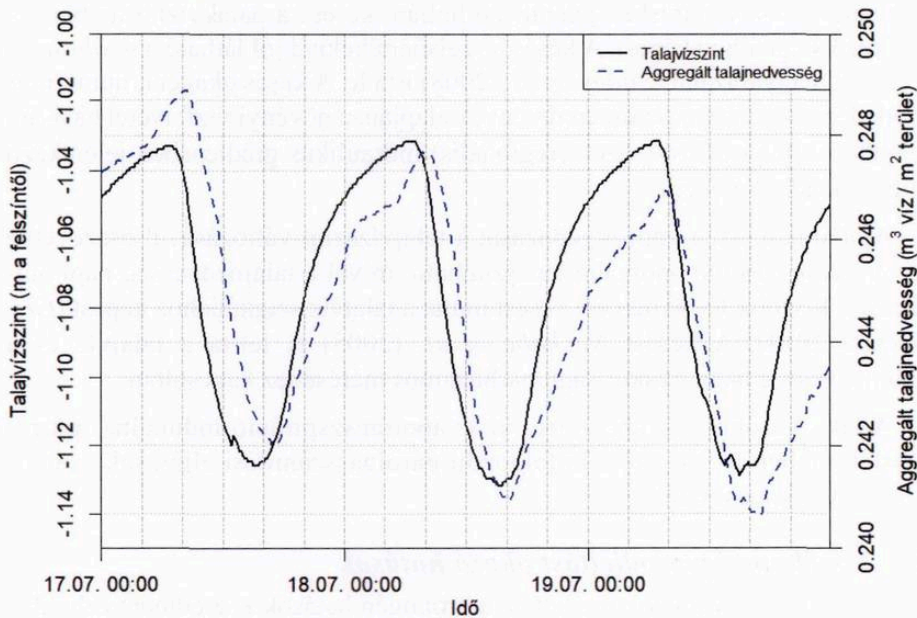
A napi ingadozás okai közül a mi klímánkon a párolgási típus általában a domináns a vegetációs időszakban. Ez a típusú ingadozás egy reggeli/kora délelőtti maximális és egy délutáni/esti minimális talajnedvesség, talajvízállás és lefolyás értékkel jellemezhető (4. ábra, 5. ábra).



4. ábra. A nyári ún. párolgási típus menete a Hidegvíz-völgy vízhozamának és egy vízfolyás menti talajvízkút vízállásának az idősorában

Ennél a típusnál általában világos összefüggés mutatható ki a hidrológiai jellemzők napi ritmusa és a relatív légnedvesség napi menete között, ami döntő mértékben a besugárzástól függ. A jelenség azonban nem közvetlenül a sugárzással és a relatív légnedvességgel, hanem a sugárzás, a légnedvesség és egyéb meteorológiai paraméterek által vezérelt evapotranszpirációval hozható összefüggésbe. Az összefüggés alapja, hogy a növények a gyökerükön keresztül nyelik a vízutánpótlásukat a talaj vízkészletéből, aminek hatására mind a talajnedvesség, mind a talajvízszint csökken. Ez a depresszió azonban a háttérből fokozott utánpótlódást indukál, amivel a növényzet tulajdonképpen a saját többletvíz-beszerzési forrásait hozza létre, vagy más szóval kialakítja a saját vízgűjtőjét. Példaként a talajvíztérben jelentkező napi ingadozás bemutatására

szolgáljon a koncepcionális modell (3. ábra), amely egy kisvízgyűjtőben elhelyezkedő vízigényes erdőtársulás talajvízből származó többletvízfelvételének dinamikáját mutatja be.



5. ábra. A talajnedvesség és a talajvíz napi ingadozása egy vízfolyás menti égeres erdőtársulásában (Sopron, Hidegvíz-völgy)

A vízfolyás menti talajvízszintekben és talajnedvességben, valamint a vízfolyások alapvízhozamában az evapotranszpiráció hatására megjelenő napi hullámzás leírásával és okainak vizsgálatával többen foglalkoztak (csak a legfontosabbakat említve: Troxell 1936, Croft 1948, Tschinkel 1963, Pörtge 1996, Bond et al. 2002, Lundquist-Cayan 2002, Boronina et al. 2005, Loheide et al. 2005, Gribovszki et al. 2006, 2010a, 2011, 2013, Butler et al. 2007, Shah et al. 2007, Wondzell et al. 2007, Lautz 2008, Szilágyi et al. 2008, 2011, Fahle-Dietrich 2014, Móricz et al. 2016, Csáfordi et al. 2017, Gribovszki 2018a, 2018b).

A hullám formájában megjelenő aszimmetriára (erőteljes csökkenés és fokozatos emelkedés) már csak néhányan hívják fel a figyelmet (Lundquist-Cayan 2002). Már kevesebb irodalomban találunk kidolgozott módszereket a vízfogyasztás (evapotranszpiráció) számítására a karakterisztikus szignál alapján (White 1932, Meyboom 1965, Reigner 1966, Bauer et al. 2004, Engel et al. 2005, Nachabe et al. 2005, Schilling 2007, Gribovszki et al. 2008, 2010b, Loheide 2008, Kirchner 2009, Soyly et al. 2012, Gribovszki 2014), ill. a szignál analitikus leírására (Czikowsky-Fitzjarrald 2004).

A Hidegvíz-völgy kísérleti vízgyűjtőjében, *Gribovszki et al.* (2006) szerint, a vegetációs periódusban a talajvízszintekben és a vízgyűjtő patakjainak vízhozamában jelentős, evapotranszpiráció okozta ingadozás mutatható ki. Érdekes anomália a talajvízjárásban jelentkező hullám késése a patakvízhozamban jelentkező szignálhoz képest. A késés a szélsőértékeknel jól látható a 4. ábrán. A jelenség magyarázatát *Szilágyi et al.* (2008) írta le. A késés okaként, numerikus modellezéssel alátámasztott eredmények alapján, a növényi vízfelvétel hatására jelentkező helyi és összegzett (regionális) hidraulikus gradiensben jelentkező eltérések adhatók meg.

A talajnedvesség napi ingadozását a talajvízszint változásával összevetve (5. ábra) is hasonló anomália tapasztalható, mivel a talajnedvesség napi hullámzása kisebb (30-60 perces) késést mutat a talajvíz szignáljához képest (*Gribovszki* 2014). A késést *Nachabe et al.* (2005) is leírta a talajvíz és a talajnedvesség nagy gyakoriságú párhuzamos méréséhez kapcsolatan.

A cikk későbbi részében erről az evapotranszpiráció indukálta típusról részletesebben is lesz szó a kidolgozott párolgásszámítási eljárások csoportosításával kapcsolatban.

2.5. Egyéb napi periodicitást okozó hatások

A természetes folyamatok mellett az antropogén hatások is eredményezhetik a talajvízállás változását a napi periódusnak megfelelő léptékben. Így hasonló jelenséget figyelt meg *Bousek* (1933) a vízművek szivattyúzási teljesítményének változása következtében Magyarországon. Napjainkhoz közelebbi példaként *Morgenschweis* (1995) vízkivétellel összefüggő napi periódusváltozás-vizsgálatait említhetjük meg. Hasonló jelenséget idéz elő a vízerőművek csúcsrajrása a Dráva folyón, akár méteres napi vízszintingadozást okozva.

A talajvízkivétel okozta mesterséges vízszintingadozások sokkal nagyobbak (lokálisan több métereseek) is lehetnek, mint a természetes hatások okozta napi hullámzás (az ET okozta napi ingadozás a *Gribovszki et al.* (2008) által vizsgált területen maximum 20 cm volt a legforróbb nyári napokon). Az előbbieket szerint a mesterséges hatások képesek elfedni a természetes hatások okozta napi ingadozást, ha azonos területen és időszakban jelentkeznek.

A 24-órás periódustól eltérő rövid időtartamú változások (pl. 12 órás periodicitás) okai általában a hasonló periódusidejű (pl. árapály) jelenségekre utalnak (*Senitz* 2001), de ez elsősorban a mélyebb talajvízszintekben és rétegvizekben tapasztalható.

3. A párolgási típpal kapcsolatos módszerek

A lefolyásnak a párolgás indukálta napi periódusú változásai is általában visszavezethetők a talajnedvesség és a talajvíz hasonló periódusú változásaira, illetve másképpen a telített és telítetlen zóna vízkészletének változására, így célszerű az előbbi rendszert komplexen vizsgálni. A párolgási típpal kapcsolatos vizsgálatok részletes bemutatása *Gribovszki (2023)* MTA doktori értekezésében található meg.

A párolgási típus mind a talajnedvességben, mind a talajvízszintekben és a lefolyásban megjelenhet, amennyiben a terület adottságai szerint a felszín alatti vízkészletek az ET által érintettek lehetnek. A klasszikus szinuszhullámhoz hasonló szignál kialakulása, a hidrojeológiai értelemben vett feláramlási (discharge) zónákban jellemző. A beszivárgási (recharge) zónákban a szignál egylépcsős függvényként jelentkezik (elsősorban a talajnedvességben, hiszen ezeken a helyeken a talajvízszint általában mélyebben van) mivel a háttérből származó utánpótlódásra nem lehet számítani. Amennyiben a recharge zónában a talajvízszint közel lenne a felszínhez, az ET hatására a talajvízszintekben szintén lépcsős függvény megjelenése várható.

A szakirodalmat áttekintve megállapítható, hogy elsőként a talajvízszintekben és a lefolyásban észlelt napi ingadozás megjelenéséről számol be a legtöbb publikáció. Csak a talajnedvesség mérésének automatizálásától kezdve találunk olyan irodalmat, amely a talajnedvességben is értékeli a szignált, így a talajnedvességre kidolgozott módszerek is később jelennek meg. A következő felsoroláshoz kapcsolva érdemes a talajvízre, a lefolyásra és a talajnedvességre kidolgozott diurnális alaplómódszereket röviden bemutatni, hiszen ezekből indultak ki az összetettebb eljárások.

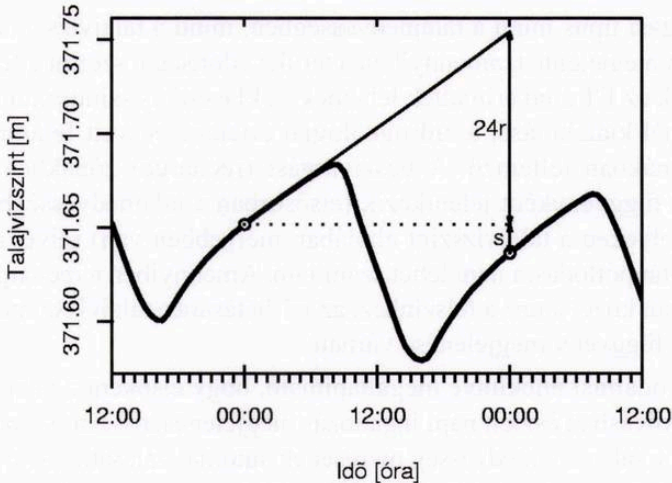
A talajvízben jelentkező szignál alapján ET-t számító módszerek alapjául szinte minden esetben a *White-féle eljárás (1932)* szolgál. A White-módszer – egyszerűsége miatt, bár többször kiegészítették és pontosították – a továbbiakban is jól felhasználható előzetes, tájékoztató vizsgálatokra.

A klasszikusnak számító White-féle eljárás lényege a következő. *White (1932)* szerint, ha az evapotranszpirációt elhanyagolhatónak tételezzük fel, a késő éjjeli, kora hajnali órákban (jellemzően 0-4 h. között), akkor a talajvízállás emelkedési sebessége ebben az időszakban arányosnak vehető a terület talajvíz utánpótlódásával. A görbéhez ebben az időszakban húzott egyenes iránytangense ($r [L]$), tehát az egységnyi idő (pl. 1 óra) alatti talajvíz utánpótlódás. Ha ezt az talajvízszint emelkedést meghosszabbítanánk 24 órán keresztül (a párolgás hatását nem figyelembe véve), akkor a talajvízszint $24r$ magasságra emelkedne. Mivel azonban az evapotranszpiráció jelen van, általában a növekedés helyett, egy nap alatt még egy $s [L]$ értékkel jellemezhető csökkenés is beáll a talajvízszintben (6. ábra).

Mindezek alapján White (1932) szerint a talajvízből származó evapotranszpirációs vízfogyasztás a következőképpen kalkulálható (1. egyenlet).

$$ET_{gw} = S_y \cdot (24 \cdot r \pm s) \quad (1)$$

ahol, S_y az adott talajrétegre jellemző fajlagos hozam (leürülő gravitációs pórustér).

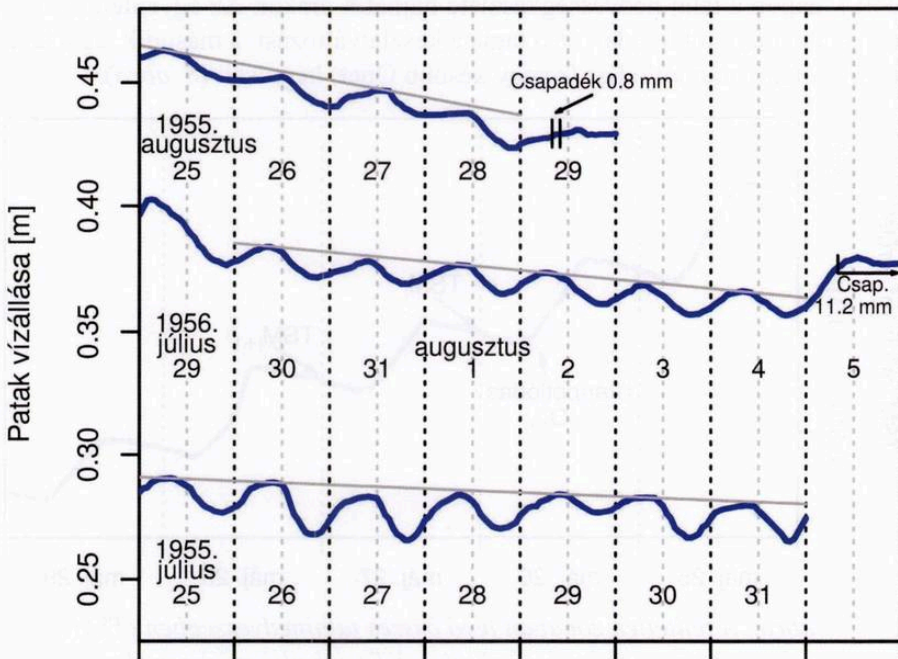


6. ábra. A White-módszer alapelve

A lefolyás esetében a becslés alapjául legtöbbször a napi maximumok burkológörbéje és az aktuális vízhozamok közötti különbségek szolgálnak. A talajvízszint és az előbbi vízhozammérések napi ingadozása alapján meghatározott ET értékek között nagyságrendi különbségek lehetnek. Feltételezhetően a talajvízből történő meghatározás a pontosabb, mivel ez mutat közelebbi értékeket a meteorológiai mérések alapján számított ET értékekkel. Az újabb, tározómodellel dolgozó, a lefolyás napi ingadozásán alapuló eljárások ET értékei közelebbiek, mind a talajvíz alapú becslésekhez, mind a meteorológiai mérések alapján számított ET értékekhez. Hátrányuk viszont, hogy alkalmazásukhoz igen pontos vízhozammérések szükségesek.

A lefolyás napi ingadozása alapján párolgást számító eljárások közül az egyik klasszikus a Reigner-féle, amelynek lényege a következő. Reigner (1966) a Pennsylvania-i Dilldown-patak vízgyűjtőjén végzett a vízfolyás vízhozamában jelentkező napi periódusú hullámzással kapcsolatos vizsgálatokat. A vízfolyás hidrográfjának analízisében, a csapadékmentes periódusokban jelentkező napi hullámzás azon maximális (reggeli) értékeit használta egy potenciális kiürülési görbe pontjaiként, amelyeknek környezetében legalább 8h időtartamig 95%-os

vagy nagyobb relatív páratartalom volt jellemző. Vizsgálatai szerint ezek a maximális értékek ideális esetben 5 napos gyakorisággal követték egymást. Az így kapott potenciális kiürülési görbe és az aktuális, napi periódusú hullámzást mutató hidrográf vízhozamértékeinek különbség-képzésével és napi összegzésével számította a vízfolyás menti zóna vízvesztését (7. ábra). A vízvesztés okának a vízfolyás menti zóna növényállományainak vízfogyasztását látta.

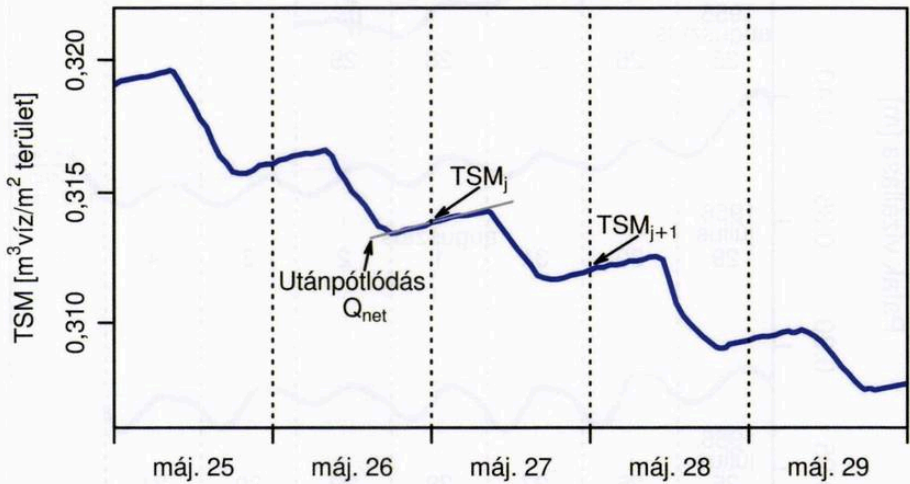


7. ábra. Lefolyásban jelentkező napi ingadozás és a vízjárási görbére fektetett burkoló egyenes, mint a potenciális kiürülést jellemző vonal (Reigner 1966 nyomán)

Az egyre pontosabb, nagy időbeli felbontású talajnedvességprofil-mérések az S_y (fajlagos hozam vagy más néven gyorsan leürülő gravitációs pórustér) ismerete nélkül is alkalmasak az ET becslésére. *Gribovszki* (2018b) alapján azt is láthatjuk, hogy a napi hullámzás elemzése alkalmas lehet talajfizikai paraméterek meghatározására is. A talajnedvesség napi ingadozásán alapuló első párolásbecslési módszer (*Nachabe et al.* 2005) viszonylag későn jelent meg. A módszer lényege a következő: *Nachabe et al.* Floridában végzett nagy gyakoriságú talajnedvesség-érzékelés adataira alapozva, a White-módszert a talajnedvességre adaptálva határozták meg az ET-t (2. egyenlet).

$$ET = TSM_j^{0h} - TSM_{j+1}^{0h} + \left(24 \cdot \frac{TSM_j^{4h} - TSM_j^{0h}}{4} \right) \quad (2)$$

ahol, TSM_{0h_j} , a teljes talajnedvesség készlet a j . napon 0h-kor, $TSM_{0h_{j+1}}$, a teljes talajnedvesség készlet 24h-val később a $j+1$. napon 0h-kor, TSM_{4h_j} , az adott j . napon a talaj nedvességekészlete hajnal 4 órakor. Az egyenlethez megjegyzendő, hogy jobb oldali első tagja a készletváltozást, a második tag a talajvízből történő utánpótlódást (r vagy később Q_{net}) képviseli (8. ábra).



8. ábra. A telítetlen zónában lévő összes talajnedvességben (TSM) jelentkező napi fluktuáció alapján ET-t számító módszer elve. A felszín alatti utánpótlódás (Q_{net}), a 0h és 4h közötti éjszakai időszak talajnedvesség változása alapján becsült (Nachabe et al. 2005 nyomán)

Az 1. táblázatban összegezve található meg azok a kutatások, amelyek új folyamatra hívták fel a figyelmet, vagy legalábbis lényegesen hozzájárultak a napi ingadozáson alapuló ET becslés fejlődéséhez. Az egyes módszerek részletesebb bemutatása Gribovszki (2023) MTA doktori értekezésének függelékében található meg.

1. táblázat. A talajnedvesség, a talajvíz és a lefolyás napi ingadozásán alapuló legfontosabb ET-t számító eljárások →

| Szerző (publikálás) | Alapinformációk az eljárásról |
|---------------------------|--|
| TALAJNEDVESSÉG | |
| Nachabe et al.(2005) | A White (1932) módszer adaptálása talajnedvesség adatokra. |
| Gribovszki (2014) | A Gribovszki et al. (2008) empirikus technikájának adaptálása talajnedvesség adatokra. |
| TALAJVÍZSZINT | |
| White (1932) | Az eredeti talajvíz napi ingadozásán alapuló módszer. |
| Troxell (1936) | Javaslat (elméleti szinten) a napon belül is változó utánpótlódás becslésére. |
| Meyboom (1965) | Az Sy 50%-ának figyelembevétele az ETgw számításánál. |
| Dolan et al. (1984) | Az utánpótlódás figyelembevétele az adott napra a megelőző és a követő éjszaka adatai alapján. |
| Hays (2003) | Utánpótlódás számítása az éjszakai időszak alapján, de értéke csak a nap közbeni időszakban figyelembe véve. |
| Engel et al. (2005) | A White-módszer módosítása a regionális talajvízszint változás, mint aditív konstans figyelembevételével. |
| Loheide et al. (2005) | A White-módszerhez alkalmazandó Sy becsléséhez talajfizika függő nomogram kidolgozása. |
| Schilling (2007) | ETgw becslése a talajvíz lépcsős napi ingadozása alapján. |
| Gribovszki et al. (2008) | ETgw becslés az utánpótlódás napi ingadozásának figyelembevételével (empirikus és hidraulikus módszer). |
| Loheide (2008) | Regresszió alapú ETgw-t becsülő eljárás a trendmentesített talajvíz-ingadozásokat felhasználva. |
| Soylu et al. (2012) | Fourier-transzformáció alapú ETgw számítás |
| Wang és Pozdniakov (2014) | Statisztikai ETgw becslés a trend- és mérésizaj-mentesített napi ingászórása alapján |
| Szabó et al. (2023) | A White-módszer utánpótlódásra vonatkozó tagjának használata erdőállományok talajvíz-utánpótlódásának vizsgálatára többéves trendek és szezonális változások elemzésével |
| LEFOLYÁS | |
| Meyboom (1965) | Vízfolyás menti ETgw becslése a napi maximális alapvízhozamok burkológörbéje és az aktuális vízhozamidősor különbségeként |
| Reigner (1966) | Csak a telítettségközei légnedvességű hajnali időszakok használata a maximális vízhozamok burkológörbéjének előállítására. |
| Kirchner (2009) | Vízgyűjtőszintű ETgw becslése az utánpótlódásra nemlineáris tározómodellt felhasználva. |
| Gribovszki et al. (2010b) | Vízfolyás menti ETgw becslése az utánpótlódásra naponta más paraméterű lineáris tározómodellt felhasználva. |
| Cadol et al. (2012) | Vízfolyás menti ETgw becslése a vízfolyás menti zónára átszámított trendmentesített vízállás és a vízállásváltozás kapcsolata alapján |
| Széles et al. (2018) | Vízfolyás menti ETgw becslése a diurnális lefolyásingadozást a sugárzási bevételnek megfelelő exponenciális válaszfüggvénnyel közelítve. |

4. Összefoglalás

A hidrológiai jellemzőkben, így a talajnedvességben, a talajvízszintekben és a lefolyásban észlelhető napi ingadozás sok fontos információt tartalmaz. A fluktuáció okai sokfélék lehetnek, de az okozó hatások közül az egyik legjelentősebb és legjellemzőbb a mi klímánkon a vegetáció vízfogyasztása. A napi ingadozás okainak áttekintése után a vegetáció által indukált szignál alapján párolgásszámításra kidolgozott módszerek rendszerezését tűzte ki célul jelen cikk, a különböző módszerek rövid jellemzését, egymásra épülését és a kiinduló alapeljárások rövid bemutatását is felvállalva.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az 143972SNN azonosítószámú OTKA pályázat, a Slovenian Research and Innovation Agency (N2-0313) pályázata és a kapcsolt TKP2021-NKTA-43 számú projekt támogatásával valósult meg. A TKP2021-NKTA-43 és a 143972SNN számú projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH támogatásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

Bauer, P., Thabeng, G., Stauffer, F., Kinzelbach, W. (2004). „Estimation of the evapotranspiration rate from diurnal groundwater level fluctuations in the Okavango Delta, Botswana”. *Journal of Hydrology*, 288, 344-355.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.10.011>

Baumgartner, A., Liebschner, H.-J. (1990). „Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie”. Gebrüder Borntraeger.

Bond, B.J., Jones, J.A., Moore, G., Phillips, N., Post, D., McDonnell, J.J. (2002). „The zone of vegetation influence on baseflow revealed by diel patterns of streamflow and vegetation water use in a headwater basin”. *Hydrological Processes*, 16, 1671-1677. <https://doi.org/10.1002/hyp.5022>

Boronina, A., Golubev, S., Balderer, W. (2005). „Estimation of actual evapotranspiration from an alluvial aquifer of the Kouris catchment (Cyprus) using continuous streamflow records”. *Hydrological Processes*, 19, 4055-4068.

<https://doi.org/10.1002/hyp.5871>

Bousek, R. (1933). „Das tägliche periodische steigen und fallen des grundwasserspiegels”. *Die Wasserwirtschaft*, 31, 427-429.

Bouyoucos, G.J. (1915). „Effect of temperature on movement of water vapor and capillary moisture in soils”. *Journal of Agricultural Research*, 5, 141-172.