

A MEZŐGAZDASÁGI TERMELÉS MINT ÖKOSZISZTÉMA-SZOLGÁLTATÁS ÉRTÉKE: HIDROLÓGIAI MODELLHEZ KAPCSOLT SZÁMÍTÁSI MÓDSZERTAN

KOZMA Zsolt, DERTS Zsófia, KARDOS Máté, KONCSOS László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3., e-mail: derts.zsofia@vkkt.bme.hu

Kulcsszavak: ökoszisztéma-szolgáltatások, mezőgazdasági hozam becslése, integrált hidrológiai modellezés, tájhasználat, WaterRisk.

Összefoglalás: Sajátos hidrológiai helyzetéből adódóan Magyarország egyszerre néz szembe a víztöbblet és vízhiány okozta kockázatokkal, amelyeket közvetlen és közvetett emberi hatások mellett tovább súlyosbít az éghajlatváltozás. A kockázatok enyhítése csak tájszintű tervezés segítségével lehetséges, amelyet nagyban megkönnyítene az egyes tájhasználati scenáriók természeti tőkéjének összehasonlítása. Egy tavaly (2011-ben) lezárult hazai K+F projekt (WaterRisk) egyik célkitűzése éppen ez volt. A három éves projekt során kifejlesztett döntéstámogató rendszer egyik kulcseleme a környezet-gazdaságtani almodul. Ez többek között lehetővé teszi, hogy megbecsüljük a mezőgazdasági termelés mint ellátó szolgáltatás hasznát. Jelen cikk célja utóbbi számítás elvi alapjainak bemutatása.

Bevezetés

Magyarország a Kárpát-medence mély fekvésű részén helyezkedik el, ami nagyban meghatározza hidrológiai helyzetét: hazánk vízháztartása jelentős mértékben ki van téve a felvízi hatásoknak. Az egy főre eső vízkészlet az országra jutó 118 km^3 -ból kiindulva igen jelentős volna, ám a kis vízfolyássűrűség miatt a vízbőség csak a nagyobb folyók mentén érvényes, és a rendelkezésre álló vízmennyiséget csökkentő tényezőket figyelembe véve átlagosan csupán $600 \text{ m}^3/\text{fő}/\text{évnvi}$ készlettel rendelkezünk, ami az egyik legkisebb érték Európában (SOMLYÓDY 2011).

A hasznosítható vízkészlet alacsony országos átlaga (SOMLYÓDY 2011) mellett annak területi és időbeli változékonysága és extrémításai okozzák a legnagyobb gondot: amellett, hogy Magyarország árvízi kockázata Európán belül a legnagyobb mértékű (BME VKKT 2006, KONCSOS 2011), rendszeresen előforduló belvizek és aszályok sújtják hazánkat (SOMLYÓDY 2011); a víztöbblet és vízhiány az érintett területek jelentős részén együtt, gyakran rövid (akár évszakos) időeltolással jelentkeznek. Az éghajlatváltozás várható helyi hatásainak következtében a jövőben ráadásul az időjárási szélsőségek gyakoriságának növekedése valószínűsíthető, és a száraz éghajlatú térségekben a hasznosítható vízkészlet összességében csökkenni fog (NOVÁKY 2009).

Az éghajlatváltozás mellett a tájhasználat és az emberi tevékenység közvetlen következményei is hatnak a vízkészlet állapotára, például a folyószabályozáson keresztül, vagy a felszínborítás módosítása miatt megváltozott lefolyási tényező és tényleges párolgás eredményeként. Ezzel párhuzamosan a hidrológiai viszonyok visszahatnak az ökoszisztémákra, pl. az éghajlatváltozás következtében gyengébb alkalmazkodóképességű fajok és víztől függő élőhelyek eltűnésével csökkenni fog a biodiverzitás (NOVÁKY 2009). Az árvíz, belvíz és aszály okozta kockázatok enyhítését ily módon (i) a kiváltó okok

mérséklésével, (ii) a kockázatokhoz történő alkalmazkodással, vagy (iii) a két elgondolás együttes alkalmazásával lehet elképzelni.

A hagyományos vízgazdálkodási szemlélettől eltérően a hidrológiai szélsőségek kezelése tájszintű tervezést is igényel, amelynek során a társadalmi (kockázatkezelési) szempontok mellett jelentős figyelmet kell szentelni az ökológiai rendszerek működésének is. Kutatásunk aktualitását is ennek az újszerű megközelítésnek az igénye adja.

A hazai finanszírozású K+F projekt keretében 2011-ben tanszékünk részvételével elkészült a WateRisk döntéstámogató rendszer (továbbiakban WR DSS), amelynek elsődleges alkalmazási területe a vízkészlet-gazdálkodási kérdések tudományos elemzése (lásd a Módszertan pontban). Ugyanakkor – ismerte az ágazatok közötti számos kereszthatást – a modellrendszer fontos eleme a területhasználatok és a vízkészletek kapcsolatának vizsgálatára alkalmas környezet-gazdaságtani modul. Utóbbi célja, hogy az egyes tájhasználati scenáriók, pl. az intenzív monokultúras termelés vagy az extenzív mozaikos tájszerkezet előnyben részesítése esetén kialakuló és folyamatosan változó természeti tőke összehasonlításával támogatást nyújtson a gazdasági szempontokat is figyelembe vevő tájszintű döntéshozatal során.

Cikkünk központi témája a hazánk területének kétharmadára kiterjedő mezőgazdasági (szántóföldi) termelés mint speciális ökoszisztéma-szolgáltatás gazdasági értékelése. Az elméleti megalapozást jelentő szakirodalmi pontban írunk a természeti tőkéről, majd azon belül az ökoszisztéma-szolgáltatásokról és azoknak a tájhasználattal való kapcsolatról; valamint ismertetjük a mezőgazdasági hozambecslés általános módszertanát. Ezek után rátérünk egy, a gyakorlatban megvalósult alkalmazás, a WR DSS mezőgazdasági almoduljának bemutatására: először röviden áttekintjük magát a döntéstámogató rendszert és annak környezet-gazdaságtani modulját; majd ismertetjük a mezőgazdasági haszon számítására általunk javasolt módszert. Következtetéseink között értékeljük a fejlesztett módszertan alkalmazási lehetőségeit, illetve kitekintünk a jövőbeli kutatási feladatokra.

Természeti tőke és tájhasználat

Az ökoszisztéma-szolgáltatások és a természeti tőke fogalma

A természeti rendszerek által nyújtott gazdasági haszon számbavételére az ökoszisztéma-szolgáltatások, és ezeken keresztül a természeti tőke fogalmát alkalmazzák (COSTANZA et al. 1997; MEA 2005; DE GROOT et al. 2010 stb.). Az ökoszisztéma-szolgáltatások fenntartó, ellátó, szabályozó, kulturális-spirituális és élőhelyet biztosító szolgáltatásokra bonthatók (MEA 2005; DE GROOT et al. 2010), és az emberi jólétet növelik (COSTANZA et al. 1997).

Mivel a természeti tőke elemeit jelentő fizikai és biológiai készletek korlátozottan állnak rendelkezésre, az ökoszolgáltatásokra érvényes a közgazdaságtanból ismert átváltás (*trade-off*) jelensége: az ellátás növelése a szabályozás csökkenésével jár, és fordítva; emellett egy ellátási szinten több szabályozási szint lehetséges, az ökoszisztéma állapotának megfelelően (ELMQUIST et al. 2010). A jelenséget alátámasztja, hogy globális léptékben az utóbbi évtizedekben az élelmiszer ellátás túlzott kiaknázása figyelhető meg, ami a szabályozó és kulturális szolgáltatások egyértelmű hanyatlását vonta maga után (MEA 2005). A WR DSS környezet-gazdaságtani modulja – többek között – ezeknek az átváltásoknak a vizsgálatára alkalmas.

Ökoszisztéma-szolgáltatások és tájhasználat

A különböző szolgáltatások eltérő mértékben vannak jelen minden ökoszisztémában, és értékelésüket megkönnyíti, hogy közülük bizonyosak dominánsak adott területeken: a mezőgazdasági termelés alatt álló mesterséges rendszerek legfontosabb ökoszisztéma-szolgáltatása értelemszerűen az élelmiszer ellátás, szemben a természetes állapotban lévő vizes vagy szárazföldi élőhelyekkel, amelyekhez főként szabályozó funkciókat társítunk. Az értékelést azonban megnehezíti, hogy bizonyos szolgáltatások nehezen számszerűsíthetők vagy becsülhetők. Emellett a térbeli léptéknek is jelentősége van: a szabályozó és fenntartó-szolgáltatásokat tekintve, míg 1–10 000 km² kiterjedésű ökoszisztémák szintjén pl. a tápanyagtöbblet és szennyezőanyagok megkötése, valamint a beporzás tartozik a kiemelt szolgáltatások közé, 10 000–100 000 km²-es, táji léptékben a folyók és felszín alatti vizek áramlása szabályozása, az árvíz hatásának enyhítése és az erózió elleni védelem játszik döntő szerepet (DE GROOT et al. 2009).

Természeti tőke mint a döntéshozatal egy lehetséges pillére

A természeti tőke pénzbeli kifejezésének a környezeti rendszerek ismeretszerzési célú értékelése mellett a döntéshozatal során van jelentősége. Az egyes alternatívák gazdasági összehasonlítása elméletben a természeti tőkét magában foglaló teljes gazdasági érték meghatározásával lehetséges (MARJAINÉ SZERÉNYI 2011). Annak ellenére, hogy a terület-használattal vagy annak megváltoztatásával kapcsolatos döntéshozatal során az érintett szereplők (önkormányzatok, gazdasági szereplők, civil társadalom stb.) köztudottan eltérő táji funkciókhoz köthető értékeket részesítenek előnyben, ez idáig nem állt rendelkezésre általánosan alkalmazható integrált módszer, amely az ökoszisztéma-szolgáltatások teljes figyelembevételével segítené a tájtervezési, döntéshozatali folyamatokat (DE GROOT et al. 2009).

COSTANZA et al. (1997) kutatási eredményei szerint a kontinentális élőhelyek közül a wetlandek természeti tőkéje fajlagosan a legmagasabb, és egyértelmű a természeti tőke és a biodiverzitás (illetve a vízellátottság) korrelációja. Ez a rangsor globális szinten érvényes, ugyanakkor adott vizsgálati területek tekintetében az ökoszisztémák pénzbeli értékének meghatározásakor alapvető fontosságú, hogy a számítások a helyi körülmények figyelembevételével történjenek.

Erre a feladatra megoldást jelentene olyan, a helyi körülmények szerint paraméterezett, integrált hidrológiai-tájhasználati modellek alkalmazása, amelyek segítségével különböző scenáriókra meghatározható lenne a természeti tőke hosszú távú változása. A kutatásunk célja a WateRisk modell rendszer használatával az ilyen jellegű scenárió összehasonlítások megvalósítása.

A mezőgazdasági hozambecslés

A mezőgazdasági – elsősorban szántóföldi – növénytermelés hatékonyságának előrejelzése, vagyis a várható hozam becslése rendkívül nehéz feladat. A növényi növekedés számos abiotikus (pl. időjárási, talajtani és vízháztartási viszonyok, tápanyagok jelenléte) és biotikus (pl. fajtatulajdonságok, gyomnövények, kártevők) tényező hatása alatt

áll. Emellett a kialakult agroökológiai viszonyokat az aktív mezőgazdasági gyakorlat (pl. tőtáv, öntözés, permetezés, trágyázás, elővetemény, talajművelés) is jelentős mértékben befolyásolja. A kérdéskör vizsgálata az 1970-es években egy új szakterület, az agroökológiai vagy termés-szimulációs modellezés kialakulását eredményezte (HUZSAI et al. 2005, PENNING DE VRIES et al. 1989).

Bár a terméshozam előrejelzésére ismertek tisztán empirikus-statisztikus jellegű módszerek, ezek általános alkalmazhatósága a hatótényezők és hatásfolyamatok nagy száma miatt számos korlátba ütközik. Így a hozam becslésére jellemzően a – legalább részben – folyamat alapú, determinisztikus modellek terjedtek el. Az irodalomban ezekre jó néhány igazolt és elismert példát találhatunk: ilyen a FAO AquaCrop modellje (STEDUTO et al. 2008), a Wageningen University és az EC JRC részvételével fejlesztett WOFOST (SUPIT et al. 1994), vagy a gazdaságok teljes körű menedzselésére is alkalmas APSIM moduláris modellező keretprogram (McCOWN et al. 1996).

A növényi növekedést a szakirodalom a tenyészidő során jelentkező limitáló vagy stressztényezők függvényében négy termésprodukción szinttel jellemzi (PENNING DE VRIES et al. 1989). Ezek röviden a következők:

- 1. szint: nincs limitáló hatás, ez a termőhelyre jellemző optimális termelési szint;
- 2. szint: limitáló tényező a párologtatható víz mennyisége;
- 3. szint: a víz mellett limitáló tényező az elérhető nitrogén és a kedvezőtlen időjárás;
- 4. szint: további korlátozást okoz a foszfor és egyéb ásványi tápanyagok hiánya.

VAN ITTERSUM és RABBINGE (1997) szerint célszerűbb a termésprodukción szintek alábbi értelmezése:

1. az időjárási körülményektől és növényfajtatól függő termőhelyi optimumot megadó potenciális,
2. a limitáló tényezők (elérhető víz és tápanyagok) mellett megvalósítható, illetve
3. a biotikus károsító tényezők (gyomok, kártevők, betegségek) miatt bekövetkező tényleges termelési szint.

A termés-szimulációs modellek kategorizálásának egyik szempontja az, hogy a fent bemutatott termésprodukción szintek közül az adott módszer melyiket veszi figyelembe. Így összetettségüktől függően a modellek kitérhetnek a talajon és/vagy a növényen belüli víz-, tápanyag-, hő- és biomassza-forgalom, valamint a fotoszintézis jelenségének leírására is. Ez matematikailag történhet (i) teljes mértékben a biokémiai és fizikai folyamatokra érvényes differenciálegyenletek kezdeti és peremfeltételektől függő, jellemzően 1–10 napos időlépésű numerikus megoldásával, de (ii) bizonyos tényezők esetében egyszerűsített, empirikus összefüggések segítségével is. A termés-szimulációs modellek komplexitását jól mutatja, hogy az alkalmazott paraméterek száma a néhány tíztől több százig is terjedhet (HUZSAI et al. 2005).

A termés-szimulációs modellezés eredményességének feltétele a komoly munka- és időráfordítás, a megfelelő adatellátottság, valamint a szerteágazó agroökológiai ismeretek megléte. A több évtizedes kutatási tapasztalatok ellenére a – modellezés során determinisztikus összefüggésekkel figyelembe vett – hatótényezők gyakorlati szerepe sok esetben a mai napig nem tisztázott vagy számszerűsíthető egyértelműen (TARNAWA et al. 2010, DÓKA 2010).

Módszertan

A tanszékünk részvételével kifejlesztett WateRisk döntéstámogató rendszer olyan komplex, moduláris felépítésű hidrológiai-hidrodinamikai-környezetgazdasági algoritmus és szoftver, amely a felszíni vízkészlethez és talajvízhez kapcsolódó vízgazdálkodási forgatókönyvek kockázatalapú értékelését teszi lehetővé. Az elemzés alapját a hidrológiai ciklus folyamatainak szimulálása, majd az eredményül kapott vízkészlet-állapotokhoz rendelhető gazdasági hasznok és károk becslése adja (KOZMA és KONCSOS 2011, KONCSOS et al. 2012).

Célunk a mezőgazdasági haszon becslésére kidolgozott módszertan bemutatása, amelynek könnyebb megértése érdekében először röviden ismertetjük a számítások alapjául szolgáló hidrológiai-hidrodinamikai modellt és a gazdasági modult.

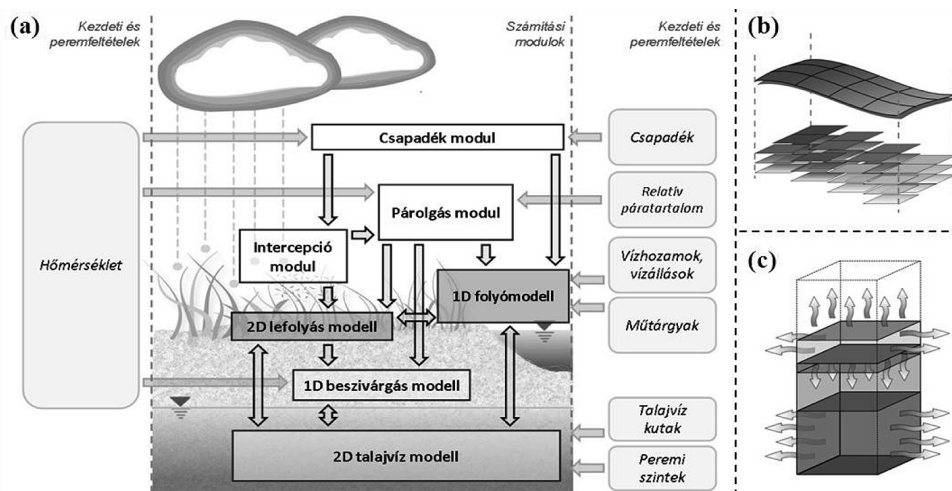
A WateRisk integrált hidrológiai modell

A WR DSS központi eleme egy osztott paraméteres integrált hidrológiai modell (WR IHM), amely a lokális-regionális vízkörforgás fizikai folyamatait térinformatikai és matematikai eszközök segítségével írja le (KONCSOS et al. 2011, KOZMA és KONCSOS 2011, JOLÁNKAI et al. 2011). A modell fontos előnye, hogy számos hidrológiai jellemző változását képes meghatározni (a zárójeles megjegyzések mintaterületi tapasztalatainkra vonatkoznak):

- nagy kiterjedésű területekre ($\sim 50\text{--}5000\text{ km}^2$) és hosszabb időszakokra (1–30 év) vonatkozóan,
- ugyanakkor kellően részletes tér- és időbeli (0,25–25 ha, illetve perc-óra) felbontással,
- mindezt nagy számítási sebességgel (cellaszámtól függően a futásidő/szimulált idő arány 1:1000–1:5000 tartományban mozog).

A víz természetes körforgásának meghatározó felszíni és felszín közeli elemeit (csapadék, intercepció, evapotranszpiráció, beszivárgás, felszíni lefolyás és tározódás, mederbeli áramlás valamint talajvízmozgás) önálló, az adott jelenségre és közegre érvényes részmodellek szimulálják. Mivel a valós fizikai jelenségek egymással összefüggésben zajlanak le, az azokat leíró matematikai modulok is folyamatos, algoritmus-szintű kapcsolatban állnak egymással: az egyes részmodellek által számított eredmények más számítások bemeneti adataként (peremfeltételként) szolgálnak (1. ábra).

A szimulációk alapja térben a számítási cella, ami egy felszín közeli (jellemzően 10–50 méteres, ideális esetben az első vízrekesztő rétegig tartó) talajszelvényt és az ott alkalmazott területhasználatot reprezentálja. A vizsgált terület így számítási szempontból lefedhető egy kétdimenziós rácshálóval. Ez alól a vízfolyásokban lezajló vízmozgást leíró hidrodinamikai modell jelent kivételt (a mederbeli áramlási jellemzők számítása egy dimenzióban történik, ez a modell azonban az elárasztási, tározási, ill. talajvíz megcsapolási és utánpótlási folyamatok leírása során kommunikál a kétdimenziós hidrológiai-hidrodinamikai modulokkal).



1. ábra (a) A WaterRisk integrált hidrológiai modell felépítése, (b) a vízgyűjtő lefedése osztott paraméteres rácshálóval, és (c) egy számítási cellában a vízforgalom elvi vázlata

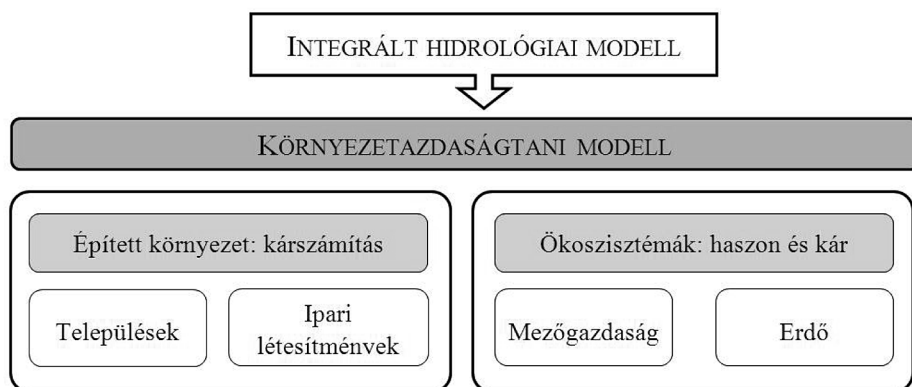
Figure 1. (a) Structure of the WaterRisk integrated hydrological model, (b) distributed parameter representation of watershed, (c) conceptual scheme of the water flow in a computation cell

Mivel folyamat alapú modellről van szó, segítségével a valóságban megfigyelt körülmények mellett tetszőleges tervezési változat is vizsgálható – tulajdonképpen ez jelenti a forgatókönyv-elemzés alapját. Így például az egyes cellákban érvényes területhasználatot mint bemeneti adatot megadhatjuk terepbejárás vagy pl. a CLC50 adatbázis alapján (EEA 2006), de felépíthetjük az általunk optimálisnak vélt alternatív tájhasználat modelljét is (pl. JOLÁNKAI et al. 2011 és JOLÁNKAI et al. 2012). Emellett a vízgazdálkodási beavatkozások (belvízrendezés, öntözés, árvédekezés, tározás) vagy globális trendek (pl. éghajlat-változás) hatásai is számszerűsíthetők.

A számítások eredményeként nagy mennyiségű, térben és időben változó, valamint aggregált vízháztartási adat áll elő (grid-sorozatokat, hossz-szelvények és idősorok formájában). Többek között ilyen adatok az 1. ábrán nyilakkal jelölt anyagáramok. A teljesség igénye nélkül néhány, a mezőgazdasági számítások szempontjából lényeges jellemző: potenciális és tényleges evapo-transzspiráció (mint a több lépésben számított evaporáció és transzspiráció összege), felszíni vízborítás kiterjedése és tartóssága, gyökérszóna/termőréteg telítettsége, a talajvíztükör helyzete, valamint a kiöntözött vízmennyiség.

A döntéstámogató rendszer környezet-gazdaságtani modulja

A WR DSS környezet-gazdaságtani modulja segítségével lehetőséget biztosít a hidrológiai modell eredményeinek gazdasági szempontú utófeldolgozására. A gazdasági értékelés egyik célja lehet a hosszú távú tájhasználati alternatívák összehasonlítása azok lehető legteljesebb gazdasági értékének számításán keresztül. Az értékelés egyrészt a víztöbblet és vízhiány okozta károk (mint költségek) meghatározására, másrészt az ökológiai rendszerek nyújtotta szolgáltatások (mint hasznok) figyelembevételére terjed ki. A gazdasági modell vázlatos felépítését a 2. ábra mutatja be.



2. ábra A WaterRisk döntéstámogató rendszer gazdasági modelljének felépítése

Figure 2. Structure of the economic model attached to the WaterRisk DSS

Az épített környezet tekintetében a környezet-gazdaságtani modell a víztöbbletből – jellemzően katasztrofális árvizekből – származó károk becslésére alkalmas, amelyek a vízborítás időtartamától és mértékétől, valamint egyéb tényezőktől függő helyreállítási költségekkel egyeznek meg. A települési kárszámítás módszertana KSZI-BME (2009) és PENNING-ROWSELL et al. (2005) munkáin alapul.

A kidolgozott gazdasági számítások másik fő területe a bizonyos ökoszisztémákból származó haszon és az azokat ért kár meghatározása. Ez jelenleg mezőgazdasághoz és erdészethez köthető ökoszisztéma-szolgáltatásokat foglal magában. A mezőgazdasági haszon számítási módszerét alább részletesen bemutatjuk.

Az erdők ökoszisztéma-szolgáltatását a modell a következő algoritmus keretében számítja: a faállomány vizsgált időszakra vonatkozó növekményét a modul a termőhelyi sajátosságok (klimatikus, talajtani és a modell által szimulált hidrológiai tényezők), valamint az erdészeti gyakorlatban alkalmazott fatermési táblák alapján becsüli meg. A gazdasági értékelés során a hagyományos megközelítés szerinti profit (az eladott fából származó bevétel) mellett a modellben szintén haszonként szerepel az erdőnek, mint ökoszisztémának az éghajlat szempontjából nyújtott szabályozó szolgáltatása, a széndioxid-megkötés; költségként pedig a szélsőséges hidrológiai helyzetek (tartós vízborítás vagy aszály) miatt fellépő esetleges kár (faállomány pusztulása) jelenik meg (KONCSOS et al. 2012).

A fentiekből kitűnik, hogy a gazdasági modul az ökoszisztéma-szolgáltatásoknak csak egy részét veszi figyelembe. Erre magyarázatot ad, hogy a témában jártas szakemberek véleménye (UNGVÁRI 2011, szóbeli közlés) szerint csak a kiválasztott funkciók tekinthetők az általunk alkalmazott eszközrendszer mellett gazdasági értelemben is számszerűsíthetőnek (a figyelmen kívül hagyott szolgáltatások értékelése csak egészen más módszerekkel, pl. egyéni preferenciákat figyelembe vevő több szempontú döntéstámogatással lehetséges).

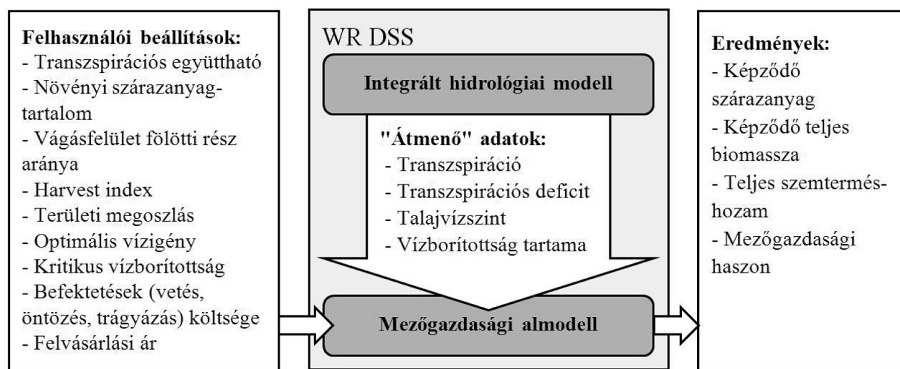
A mezőgazdasági haszon számítása

A WateRisk projekt anyagi és időkerete mellett nem volt reális a fentebb bemutatott komplex agroökológiai modellezési módszertan alkalmazása, beépítése a WR DSS-be. Ezért egy saját, egyszerűsített hozambecslési eljárás kidolgozását tűztük ki célul. A mezőgazdasági haszon számszerűsítését végző modul fejlesztése az alábbi szempontok szerint zajlott:

- A mezőgazdasági haszon számításának alapja a területegységre vetített tenyészidőszaki terméshozam becslése. Az éves gazdasági bevételről feltételezzük, hogy az a becsült terméshozammal egyenesen arányos.
- A termelésbe investált tőkét csak a termés kipusztulása esetén értelmezzük kárként. Az így keletkező gazdasági kár számításáról bővebb információ található itt: KSZI-BME (2009).
- A hozambecslés kialakítása során alapul vettük a már bemutatott termés-szimulációs ismereteket is, de saját eljárásunkat elsősorban a gyakorlatban beszerezhető, hazai vonatkozású adatok, valamint a WR IHM által szimulált vízháztartási jellemzők alapján állítottuk össze.
- Ennek megfelelően:
 - A tisztán folyamatalapú megközelítés helyett a növényfejlődést és a termésképződést is empirikus összefüggések segítségével írjuk le.
 - A mezőgazdasági hozambecslés pontban leírtak szerinti 2. szintű illetve *megvalósítható* termésprodukciós szintű módszer felállítása mellett döntöttünk, ami a biotikus és abiotikus stressztényezők közül egyedül a víz korlátozó hatását veszi figyelembe. Minden más tényezőről azt tételezzük fel, hogy azok a növény növekedése szempontjából optimálisak.
 - Az egyszerűsített, részben empirikus megközelítés, valamint a figyelmen kívül hagyott hatótényezők várhatóan pontatlanabb számítási eredményekre vezetnek, mint amit termés-szimulációs modellekkel elvben el lehetne érni. Feltevésünk szerint ugyanakkor a meteorológiai, termőhelyi és agrotechnikai adatellátottság hiányosságaiból adódó bizonytalanságok nagymértékben meghaladják a módszertani elhanyagolások hatását.
 - A hazai gyakorlatban fellelhető tapasztalati adatok – gyakorlati okok miatt – a növény optimális vízigényét jellemzően a tenyészidőszaki, esetleg az azt megelőző időszakra is vonatkozó csapadékösszeggel, illetve a gyökérzóna nedvességtartal-mával hozzák összefüggésbe. A növényi párologtatás mértékét az irodalom elsősorban csak a növényi szárazanyag-termelést megadó transzspirációs együtthatón keresztül veszi figyelembe. Mivel esetünkben a hidrológiai számításokból adott a növényi vízelvétel, így a közvetett vízellátottsági adatok (csapadék) helyett a növényi működés leírását teljes mértékben erre alapozzuk.
 - A szántóföldi termesztés keretein belül növény-független hozambecslő eljárás volt a cél. Azaz a növényfajtát jellemző paraméterek módosításával az algoritmus alkalmazható a szántóföldi művelésben elterjedt termények többségére (a program jelenlegi adatbázisa árpa, búza, kukorica, rozs és zab termelésére vonatkozó számításokat tesz lehetővé).

Adatellátottság

A hozambecslés során alkalmazott adatok két csoportra bonthatóak: (i) a WR IHM által meghatározott vízháztartási változók, illetve (ii) a növényt jellemző mezőgazdasági paraméterek (3. ábra). Előbbi adatok a vízhiány (transzspiráció és transzspirációs deficit) és víztöbblet (talajvízszint és vízborítottság) jellemzésére szolgálnak. Az alapértelmezett vagy felhasználó által megadott mezőgazdasági paraméterek a növények vízigényét és víztűrését, valamint biomassza produkciós sajátosságait írják le. A vizsgált növényfajta aránya/kiosztása a mintaterületen és a termés felvásárlási ára szintén a felhasználó által bevitt információ. A növények alapvető fenológiai tulajdonságai (gyökérzóna mélysége, levélfelületi index időbeli alakulása) a hidrológiai számítások bemeneti adatai, ezért azokat külön a mezőgazdasági számításokhoz nem kell megadni.



3. ábra A WateRisk mezőgazdasági moduljának adatforgalma
 Figure 3. Data management of the agricultural module of the WateRisk DSS

Mivel a mezőgazdasági számítások nagyban támaszkodnak a hidrológiai modell cel-laszintű eredményeire, a terméshozam meghatározása is ezen a léptéken zajlik: az algorit-mus a hozambecslést a mintaterület minden cellájában elvégzi, így a teljes terület becsült terméshozama az ezekre vonatkozó eredmények összegeként adódik.

Hozambecslés adott növényre és cellára

Egy kiválasztott növény esetén a terméshozam-számítások a tenyészidőszak történéseit két lépésben írják le: (1) a hozambecslés alapesete a teljes időszakra összegzett transz-spiráció alapján történik, (2) majd az algoritmus az így kapott potenciális terméshozamot a tenyészidőszak részintervallumaira vonatkozó korlátozások alapján módosítja. E két lépés eredményeként adódik a becsült tényleges terméshozam.

(1) A növények által előállított összes szárazanyag mennyisége a tenyészidőszaki teljes transzspiráció és a növényfajta jellemző transzspirációs együttható szorzataként adódik (ANTAL 2005, BOCZ et al. 1996, MENYHÉRT 1979). A szárazanyag mennyisége alap-ján szintén szakirodalmi arányossági tényezőkkel (RADICS 1994) meghatározható a teljes biomassza (gyökér, szár, levél, termés). A vágásfelület feletti rész biomasszához mért

arányát (HUZSVAI et al. 2005) ismerve megkapható a szem és szalma együttes tömege. Utóbbiból a harvest index vagy szem/szalma arány alkalmazásával számítható a szemtermés teljes potenciális hozama.

(2) Ha a tenyészidőszak folyamán időszakosan szélsőségesen kevés (pl. fiziológiai aszály) vagy sok (pl. belvíz) víz áll a növény rendelkezésére, akkor ezt a stresszhatást mint irreverzibilis folyamatot az algoritmus a kiindulási növényborítottságot csökkentő, és így a potenciális termést korlátozó tényezőként kezeli.

Korlátozott növényi nedvességfelvétel esetén vízhiányról beszélhetünk. A részben az AquaCrop modellben alkalmazott megoldáson alapul (STEDUTO et al. 2008), részben saját módszerrel kialakított algoritmusban a korlátot a WR IHM által szimulált felszín alatti háromfázisú áramlási rendszer gyökérszónába eső részének lecsökkent víztartalma jelenti. Ennek eredményeként a tényleges transzspiráció ($T(t)$) a potenciálisnál ($PT(t)$) kisebb lesz. Az eltérés pillanatnyi értéke a transzspirációs deficit ($TD(t)$) – mindhárom mennyiség dimenziója mm/nap:

$$TD(t) = PT(t) - T(t) \quad (1)$$

A vízhiány mértékét a vízhiánymutató (VHM) adja meg:

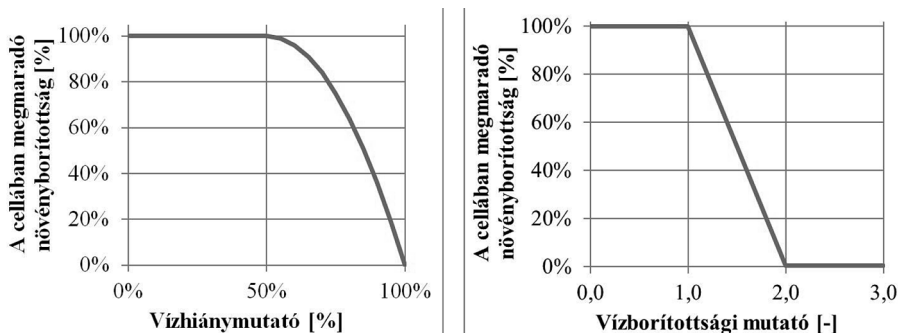
$$VHM_i = \frac{TD_{\text{időszaki}}(i)}{PT_{\text{időszaki}}(i)} \quad (2)$$

A vízhiány hatása a mezőgazdasági algoritmusban jelenleg dekádszinten jelenik meg: az (1) összefüggésben szereplő időszaki mennyiségek a hidrológiai modell által számolt pillanatnyi adatok tíznapos intervallumokra összegzett, mm-es értékei. A vízhiány növényborítottságra gyakorolt hatását a 4. ábra adja meg.

A víztöbblet miatt a gyökérzet gázcsere-folyamatai válnak gátolttá. Információval egyes növényfajták 100%-os pusztulásáig eltelt időt illetően rendelkezünk, így – adathiány miatt – becslésre kényszerültünk a számítás paramétereinek megállapításakor. Az algoritmus ezzel jelenleg akkor számol, ha a hidrológiai modellben a talajvíztükör eléri a talajfelszínt, vagy a felszínen egyéb okból vízborítás alakul ki (a gyökérszónában kialakuló telített körülmények pontosabb leírása folyamatban van). A korlátozó eljárás feltételezi, hogy a különböző növények bizonyos ideig tolerálják ezt az állapotot, pusztulásuk csak egy kritikus időtartamot meghaladó vízborítás fölött indul meg. Ezt fejezi ki a vízborítási mutató (VBM):

$$VBM_i = \frac{VB_{\text{tényleges}}(i)}{VB_{\text{kritikus}}(i)} \quad (3)$$

A víztöbblet figyelembevétele hónapos időléptékű: a tényleges (szimulált) és a kritikus (bemenő adat) vízborítás (VB) értékek napban kifejezve adják meg az adott hónapra vonatkozó leghosszabb egybefüggő időszakokat. A növényborítottság csökkenése és a vízborítási mutató között feltételezett kapcsolatot a 4.b. ábra mutatja be.



4. ábra A (a) vízhiány és (b) a vízborítás hatása a növényborítottságra egy limitációs lépésben
Figure 4. Effect of (a) water deficit and (b) water coverage on canopy cover for a limitation period

Mindkét korlátozó hatásra érvényes, hogy az algoritmus a vizsgált i -edik limitációs időszak kiindulási növényborítottságát ($cover_{i-1}$) a hatást jellemző mutató (M) és a 4. ábrán megadott korlátozó függvény szerint módosítja:

$$cover_i = cover_{i-1} F(M_i) \quad (4)$$

Ily módon a rövid idejű szélsőségek hatása az n darab limitációs időszakra osztható tenyészidőszakra vonatkozóan aggregált módon az alábbi összefüggéssel vehetők figyelembe ($cover_0$ a modellcella által leírt terület bevetett hányadát jelenti):

$$cover_n = cover_0 \prod_{i=1}^n F(M_i) \quad (5)$$

A teljes időszakra vonatkozó potenciális hozamot az időszak végi növényborítással megszorozva adódik a becslő tényleges terméshozam. Az algoritmus gondoskodik a korlátozó hatások eltérő időlépésének összehangolásáról.

Hozambecslés a teljes modellezési területre

A fentiekben láttuk, hogyan zajlik a számítás egy olyan modellcella esetén, amelyben egy növényfajta hozamát kell becsülni. A következőkben áttekinjtjük, hogy többfajta termesztett növény, és nagyszámú cellával lefedett mintaterület esetén hogyan működik az algoritmus.

Egyrészt lehetőség van arra, hogy a felhasználó a vizsgált terület minden cellájára vonatkozóan megadja az ott termesztett növényt. Ilyenkor az algoritmus a fenti eljárásnak megfelelően fajtánként végighalad a területen, és minden cellára előállítja az ott érvényes hozamot.

A gyakorlatban valószínűbb, hogy cellaszinten csak a művelési ág ismert, ugyanakkor a termesztett növény fajtájára vonatkozóan már nincs térbeli információ (pl. CLC50 alkalmazása esetén). Ebben az esetben a felhasználó több, általa lehatárolt régióra megadhatja, hogy ott a különböző növények termesztésére használt területek nagysága hogyan aránylik egymáshoz. Így például a KSH megyei bontásban megadott termelési arányainak segítségével tetszőleges mintaterület lefedhető. Az algoritmus ezek után a régió összes cellájában becslést tesz külön-külön minden növény hozamára, így az összes termesztett növényre adódik a területre vonatkozó becsült hozam. A tényleges terméshozamok ebből állíthatók elő a területi megoszlás (hányad) figyelembevételével.

A mezőgazdasági modul értékelése és továbbfejlesztési lehetőségei

A WateRisk rendszerhez kapcsolt gazdasági modul a tájhasználati-vízgazdálkodási forgatókönyvek, alternatívák gazdasági összehasonlításában nyújt segítséget a döntéshozóknak. A területhasználatok és a vízkészlet-állapotok kölcsönös egymásra hatásának leírása a gazdasági elemzés egyik kulcseleme. Cikkünkben ennek fényében tekintettük át a szántóföldi mezőgazdasági hozambecslés és haszon számításának javasolt módszertanát.

A bemutatott algoritmus több szempontból előnyös:

- (i) gyors és viszonylag egyszerű számításokkal biztosítja a folyamatalapú megközelítés néhány kedvező sajátosságát (pl. könnyen átparameterezhető; a területre jellemző potenciális hozam és a korlátozó vízhatások külön számítása);
- (ii) a hazai gyakorlatban megszerzett mezőgazdasági tapasztalatok arányszámok formájában vehetők figyelembe;
- (iii) a koncepció akár a hidrológiai számítások elvégzése nélkül is alkalmazható terméshozam és haszon becslésére.

Az eljárással kapcsolatban ugyanakkor több kérdés, fejlesztési irány is felmerült. Utóbbira példa a hidrológiai és mezőgazdasági számítások párhuzamosítása. Jelenleg ugyanis a terméshozam becslésére – így a vízhatások miatti növénypusztulás számítására is – az utófeldolgozási fázisban kerül sor, nincs visszacsatolás a hidrológiai modellre. Továbblepést jelentene még, ha a növényi növekedés során a léghőmérsékletet hatótényezőként vennénk figyelembe. Emellett a gazdasági elemzésekbe a szántóföldi művelés mellett érdemes lehet egyéb mezőgazdasági ágazatokat (pl. legelőgazdálkodást) is bevonni. További lehetőség a bemenő adatok pontosítása, kalibrálása valós, a számítási területre jellemző statisztikai adatok alapján.

A felvezetett módszertan a gyakorlatban is megvalósult, segítségével a WR DSS részeként, különböző éghajlati-területhasználati forgatókönyvekre végeztünk számításokat, a Szamos-Kraszna-közben, a Duna-Tisza-közén és Nagykőrű térségében található mintaterületeinken (JOLÁNKAI et al. 2011, JOLÁNKAI et al. 2012, KONCSOS et al. 2012).

Köszönetnyilvánítás

A cikk tárgyát képező kutatás a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszékén, a WaterRisk projekt keretein belül fejlesztésre kerülő döntéstámogató rendszerhez készült. A fenti eredményeket a TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 projekt támogatta. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

Irodalom

- ANTAL J. (szerk.) 2005: A növénytermesztés alapjai. In: Növénytermesztéstan 1–2. Mezőgazda Kiadó, Budapest
- BME VKKT 2006: A Tisza árvízi szabályozása a Kárpát-medencében. Zárójelentés. BME, Budapest
- BOCZ E. et al. 1996: Szántóföldi növénytermesztés. 3., változatlan kiadás. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- COSTANZA R., D'ARGE R., DE GROOT R., FARBER S., GRASSO M., HANNON B., LIMBURG K., NAEEM S., O'NEILL R. V., PARUELO J., RASKIN R. G., SUTTON P., VAN DEN BELT M. 1997: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *NATURE*, 387: 6630: 253–260.
- DE GROOT R. S.; ALKEMADE R., BRAAT L., HEIN L., WILLEMEN L. 2009: Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity* 7(3): 260–272.
- DE GROOT R., FISHER B., CHRISTIE M., ARONSON J., BRAAT L., GOWDY J., HAINES-YOUNG R., MALTBY E., NEUVILLE A., POLASKY S., PORTELA R., RING I. 2010: Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem services valuation. In: KUMAR P. (editor) 2010: The economics of ecosystems and biodiversity (TEEB): ecological and economic foundations, Chapter 1. Earthscan, London and Washington.
- DÓKA L. F., 2010: Ökológiai és agrotechnikai tényezők hatása a növénytermesztési tér vízháztartására és a kukorica terméshozamára (Doktori értekezés). Debreceni Egyetem, Hajnóczy Jenő Növénytermesztési, Kertészeti és Élelmiszertudományi Doktori Iskola.
- ELMQUIST T., MALTBY E., BARKER T., MORTIMER M., PERRINGS C., ARONSON J., DE GROOT R., FITTER A., MACE G., NÖRBERG J., SOUSA PINTO I., RING I. 2010: Biodiversity, ecosystems and ecosystem services. In: KUMAR P. (editor) 2010: The economics of ecosystems and biodiversity (TEEB): ecological and economic foundations, Chapter 2. Earthscan, London and Washington.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) 2006: CLC50 CORINE Land Cover data base. GIS layer.
- HUZSVAI L., RAJKAI K., SZÁSZ G., 2005: Az agroökológia modellezés technikája. Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum. <http://www.tankonyvtar.hu/mezogazdasag/agrookologia-080904-87>
- VAN ITTERSUM M. K., RABBINGE R. 1997: Concepts in production ecology for analysis, quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52 (3): 197–208.
- JOLÁNKAI ZS., KARDOS M., KONCSOS L., KOZMA ZS., MUZELÁK B., 2012: Pilot area studies in Hungary with a novel integrated hydrologic model – Waterisk. Accepted for the 6th International Conference for Young Water Professionals, 2012, Budapest.
- JOLÁNKAI ZS., KOZMA ZS., MUZELÁK B., KONCSOS L. 2011: Alternatív tájgazdálkodási forgatókönyvek vizsgálata Nagykőrű térségében a WaterRisk hidrodinamikai modellrendszer segítségével. A Magyar tudomány ünnepe „Összhang – Tudomány a gazdaságban és a társadalomban” VII. Alföldi Tudományos Tájgazdálkodási Nap, BARANCSI Á. és HERNYÁK G. (Szerk.), Szolnoki Főiskola, Szolnok. 35–40. pp.
- KONCSOS L. 2011: Árvízvédelem és stratégia. In: SOMLYÓDY L. (Szerk.) Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok. Köztisztületi Stratégiai Programok, Magyar Tudományos Akadémia.
- KONCSOS L., JOLÁNKAI ZS., KOZMA ZS., 2011: A WaterRisk integrált vízkészlet-gazdálkodási modellrendszer egydimenziós hidrodinamikai almodelljének összehasonlító tesztelése a HEC-RAS modellel – Hidrológiai Közöny 91:(4): 50–56.
- KONCSOS L., KOZMA ZS., KARAKAI T., DERTS ZS., UNGVÁRI G., TÍMÁR G. 2012: Enrichment of the natural capital by reforestation: case study for the Tisza Valley. Accepted for the 6th International Conference for Young Water Professionals, 2012., Budapest.
- KOZMA ZS., DERTS ZS., FONYÓ GY., JOLÁNKAI ZS., KARDOS M., KONCSOS L., MUZELÁK B., LISKA B., PARDITKA G. 2012: Overview of risk based water resources scenario analysis – the WaterRisk decision support system. Accepted for the 6th International Conference for Young Water Professionals, 2012., Budapest.

- KOZMA Zs., KONCSOS L. 2011: Methodological overview of a coupled water resources management model system. In: Topping B. H. V., Tsompanakis Y. (Editors) Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering, Computing. Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 157.
- KSZI-BME KONZORCIUM 2009: Módszertani útmutató az „Árvízi veszély- és kockázati térképezés és kockázatkezelési tervezés tartalmi és formai követelményeinek meghatározása, a végrehajtás megalapozása és eszközrendszerének kialakítása” című metodikai projekthez. Árvíz kockázati térképek és árvízi kockázatkezelési tervek módszertani előkészítése (Kockázati alprojekt). Budapest.
- MAJRAINÉ SZERÉNYI Zs. 2011: Az ökoszisztéma-szolgáltatások közgazdaság-tudományi megközelítése. Magyar Tudomány 172(7): 788–794.
- MCCOWN R. L., HAMMER G. L., HARGREAVES J. N. G., HOLZWORTH D. P., FREEBAIRN D. M., 1996: APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. Agricultural Systems 50: 255–271.
- MENYHÉRT Z. (szerk.) 1979: Kukoricáról a termelőknek. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT 2005: Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC. ISBN: 1-59726-040-1 <http://www.maweb.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- NOVÁKY B. 2009: Az éghajlatváltozás, hatásai és az intézkedések az IPCC Negyedik Értékelő Jelentése tükrében. Tájökológiai Lapok, 7(1): 241–268.
- PENNING DE VRIES F. W. T., JANSEN D.M., TEN BERGE H.F.M., BAKEMA A. 1989: Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PuDoc), Wageningen, Hollandia.
- PENNING-ROWSSELL E. C., JOHNSON C., TUNSTALL S., TAPSELL S. M., MORRIS J., CHATTERTON J., GREEN C. 2005: The benefits of flood and coastal risk management: A handbook of assessment techniques. Middlesex University Press, London.
- RADICS L. (szerk.) 1994: Szántóföldi növénytermesztés. Kertészeti és Élelmiszeripari Egyetem Kertészeti Kar Budapest
- SOMLYÓDY L. 2011: Quo vadis hazai vízgazdálkodás? Stratégiai összegzés. In: SOMLYÓDY L. (Szerk.) Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok. Köztisztületi Stratégiai Programok, Magyar Tudományos Akadémia. 9–83. pp.
- STEDUTO P., RAES D., HSIAO C., FERERES E., HENG L., IZZI G., HOOGVEEN J. 2008: AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. Options Méditerranéennes, Séries A. (80). pp. 285–292. FAO, Róma.
- SUPIT I., HOOIJER A. A., VAN DIEPEN C. A., 1994: System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS, Volume 1: Theory and Algorithms. EUR 15956 EN, Joint Research Center, Commission of the European Communities, Luxembourg.
- TARNAWA Á., KLUPÁCS H., BALLA I., JOLÁNKAI M., 2010: Szántóföldi növények termésszabályozásának klimatikus tényezői. A XX. Keszthelyi Növényvédelmi Fórum kiadványa, 152–156.

THE VALUE OF AGRICULTURAL CROPS AS AN ECOSYSTEM SERVICE:
CALCULATION METHODOLOGY CONNECTED TO A HYDROLOGICAL MODEL

Zs. KOZMA, Zs. DERTS, M. KARDOS, L. KONCSOS

Budapest University of Technology and Economics
Dept. of Sanitary and Environmental Engineering
Műegyetem rakpart 3. Budapest, Hungary H-1111
e-mail: derts.zsofia@vkkt.bme.hu

Keywords: ecosystem services, agricultural yield estimation, integrated hydrological modeling, land use, WaterRisk

Due to its specific hydrologic/hydro-geologic situation, Hungary is risked by extremities in water resources aggravated by direct and indirect anthropogenic effects and climate change. The mitigation of these risks could only be feasible by means of landscape scale planning. Latter would be advanced by comparing the natural capital of the possible land use scenarios. A fundamental aim of an R&D project (WaterRisk) finished in 2011 was to elaborate a tool for these kinds of studies. A complex decision support system (DSS) was developed during the three year long project. A key element of the DSS is the environmental-economic module, which is able to estimate the profit of agricultural crops. The main topic of this article is the presentation of this calculation methodology.

