

A VÁROSI ZÖLD INFRASTRUKTÚRA VÍZGAZDÁLKODÁSI SZEREPÉNEK VIZSGÁLATA A CSAPADÉK INTERAKCIÓJÁN KERESZTÜL, SZEGEDI PÉLDÁN

THE ROLE OF URBAN GREEN INFRASTRUCTURE IN SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT THROUGH THE INTERACTION OF PRECIPITATION, CASE STUDY IN SZEGED

Csete Ákos Kristóf¹, Gulyás Ágnes²

¹Urban Climate Research Group-University of Szeged, cseteakos@geo.u-szeged.hu;

²SZTE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Szeged, Egyetem utca 2., agulyas@geo.u-szeged.hu

Összefoglalás. A városok fenntartható vízgazdálkodásában fontos szerepet tölthet be a zöld infrastruktúra, a „természet-alapú megoldások” elemeként. A csapadék mennyiségének szélsőséges időbeli eloszlása, illetve a városi területek növekedése egyre aktuálisabbá teszi a kérdéskör vizsgálatát. A zöld infrastruktúra városi vízgazdálkodási rendszerekbe történő minél hatékonyabb integrálását segíti, ha megalapozott adatokkal (pl. modellszámításokkal) támasztjuk alá a rendszerben betöltött szerepét. Munkánkban – amelyben egy széleskörűen alkalmazható modell (UFORE-Hydro) adaptálását kezdtük el hazai viszonyokra – a növényzet lefolyásra gyakorolt hatását, illetve az azt befolyásoló tényezőket vizsgáltuk egy szegedi mintaterületen. Munkánk célja, hogy a magyar döntés-előkészítés és döntéshozás figyelmét a növényzetben rejlő sorstű lehetőségekre is ráirányítsuk.

Abstract. Green infrastructure can play an important role in sustainable urban water management as part of ‘nature-based solutions’. The uneven temporal distribution of the amount of rainfall and the increasing urban areas make the issue of sustainable urban water management ever more relevant. The integration of green infrastructure into urban water management systems can only be supported by substantiated data (e.g. model calculations). In our study – we started adapting a widely applicable model (UFORE-Hydro) to Hungarian conditions – we examined the effect of vegetation on the runoff and other influencing factors, in the area of Szeged. The aim of our work is to draw the attention of Hungarian decision-makers to the various potential in vegetation.

Bevezetés. A városokban a víz, mint környezeti elem rejtettségének és időszakosságának köszönhetően, csak akkor kap nagyobb figyelmet, amikor jelentősebb problémát vagy fennakadást okoz a város működésében (Gayer, 2007). Az urbánus területek méretének és lakosság számának növekedése egyre fontosabbá teszi az ésszerű és fenntartható városi vízgazdálkodás alkalmazását, hiszen a víz kapcsán egyre gyakrabban szembesül mennyiségi és minőségi problémákkal a modern településstervezés. A hirtelen, nagy mennyiségben felszínre jutó csapadék ugyanúgy problémákat okozhat a város életében, mint a több hónapig tartó aszályos időszak. A városokban a jelentősen átalakított felszín miatt kimondottan fontos megteremteni az egyensúlyt a természetes és a mesterséges elemek között (Berland et al., 2017). A zöld infrastruktúra ennek fontos eleme, hiszen összeköttetést teremt a vegetáció által nyújtott szolgáltatások és a mérnöki tervezés elemei között (Hancz, 2013). A természetközeli városi vízgazdálkodáshoz kapcsolódóan három főbb gyakorlat létezik: az ún. LID (Low Impact Design), WSUD (Water Sensitive Urban Design) és a SUDS (Sustainable Drainage). Közös jellemzőjük a természetes hidrológiai ciklus elemeinek helyreállítása, minél kisebb mesterséges beavatkozás és a városi vizek környezeti szempontú kezelése (CVC, 2010; Department of Water, 2007; U.S. EPA, 2007). Mindhárom rendszer alapelveiben kulcsszerep jut a zöld infrastruktúra megfelelő integrálásának (Buzás, 2012; Romnée, 2015). Az utóbbi években a nemzetközi terminológia is kiemelten kezeli azokat a rendszereket, amelyek kihasználva a természetes folyamatok előnyeit a városok renaturalizálására törekkeznek, javítva ezzel a környezet és az élet minőségét. Ezekben az ún. természet-alapú megoldásokban (nature-based solutions/NBS) alapvető szerep jut a zöld infrastruktúrának, amelyen belül a fás vegetációnak különö-

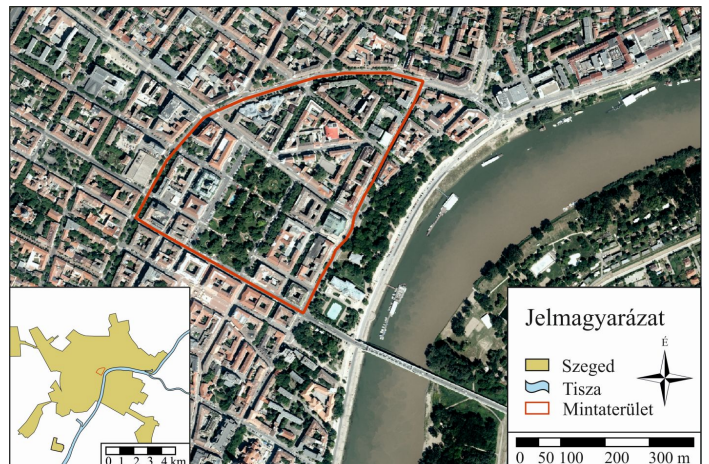
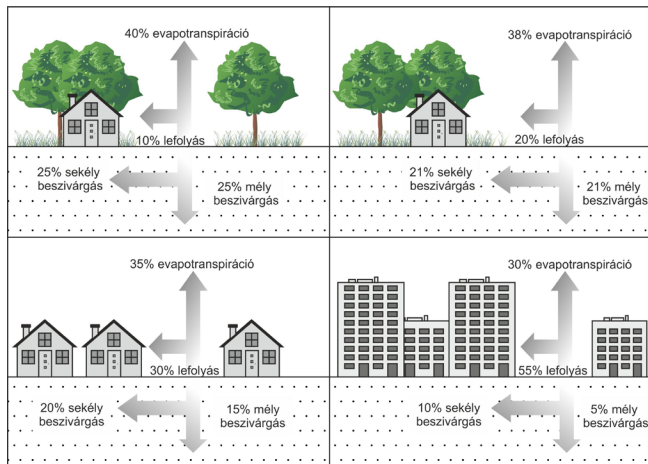
sen nagy a városökológiai jelentősége (Raymond et al., 2017).

Többek között részt vesz a csapadék hatékonyabb hasznosulásában (pl. lefolyás-csökkentés), pozitív irányba befolyásolhatja a város mikroklímáját és a szennyezőanyagok megkötésében is jelentős szerepet játszhat (Berland et al., 2017; Xiao and McPherson, 2002). Méretbeli és fiziológiai tulajdonságai révén jelentősége kiemelkedik a vízgazdálkodásban a többi növényzeti típushoz képest, mivel nagy felületen képes interakcióba lépni a csapadékkal. Ennek egyik szegmense az, hogy a fa **evaporáció** (levél-, ág- vagy törzsfelszínről történő párolgás) és **transpiráció** (a talajból felszívott víz sztomán, kutikulán vagy száron keresztül történő elpárologtatása) révén aktívan befolyásolja a mikroklimatikus körülményeket (pl. páratartalmat) a környezetében (Berland et al., 2017). Másrészt a fás vegetáció alatti – jobbra vízáteresztő – felület megnöveli a beszivárgás esélyét a felszíni lefolyás rovására, amely a túlnyomórészt vízzáró felszínekkel fedett városi térszínnek esetében kulcskérdés (1. ábra).

A csapadék és a fa interakciója sokféleképpen létrejöhethet, melynek egyik legjelentősebb tényezője az **intercepció**. Ez lényegében egy fékező folyamat, amely során a fák lombzata és törzse csökkenti a leérkező csapadék csúcsvízhozamát azáltal, hogy nagy mennyiségű ideiglenesen visszatartott vízmennyiség halmozódik fel a fa különböző részein (Xiao et al. 1998). A nagyobb lombkorona tömeg és tagoltság, illetve a magasabb törzs érdeség hozzájárul a hatékonyabb intercepcióhoz. Különbséget kell tenni a lombhullató és tűlevelű fajok között is, mivel utóbbi fajok esetében a tűlevelek felépítéséből adódóan nagyobb lehet a levelek összfelülete. Továbbá annak köszönhetően, hogy egész évben van levézetük (örökzöld tűlevelűek esetén), összességében több csapa-

déket foghatnak fel, mint a lombhullató fajok. (Xiao and McPherson, 2011). Az intercepció során felfogott csapadék egyrészt egy ideig eltárolódhat a lombkoronában és törzsön, a tározási kapacitás elérése után lecsepeghet a felszínre (**lecsepegő csapadék/canopy drip**), vagy evaporáció során a levegőbe juthat (Móricz et al., 2009; Zagyvainé, 2014). Ezek a folyamatok jelentős mértékben függenek az aktuális környezet hőmérsékletétől, páratartalmától és a szélviszonyoktól (a potenciális evapotranspiráció mértékétől). Az interakció további lehetősége az ún. **áthullás** (throughfall), amely a lombkoronán akadály nélkül, közvetlenül átjutó (és a felszínre kerülő) csapadékot jelenti. A fatörzs felszínére jutó csapadékvíz egy része az evaporáció során elpárolog, más része bizonyos ideig eltárolódik a törzs felszínén (annak strukturális tulajdonságától függően), majd végső soron a gravitáció hatására folytathatja útját a talaj felé **törzsi lefolyást** (stemflow) képezve. A fák és csapadék interakciójának utolsó állomása az **infiltráció**, azaz a beszivárgás. A városokban található vízzáró felületek és az antropogén hatásra bekövetkező tömörödés megnehezítik a csapadék beszivárgását, ugyanakkor a fák gyökérzete a növekedés

és a szerkezet formálás által nagyban hozzájárul az infiltráció hatékonyságához (Móricz et al., 2009). Az intercepciós tározás folyamatát három nagy szakaszra oszthatjuk, melyek ismerete elengedhetetlenül fontos ahhoz, hogy a fásszárú vegetáció csapadékesemények alatti interakcióiról pontos képet kaphassunk (Móricz et al., 2009). Az első ún. nedvesítési szakaszt a csapadékhullás kezdete és a faállomány teljes telítettségének időpontja határolja. Az ezt követő telítettségi szakaszban a korona nem képes plusz vízmennyiséget tárolni, ezért a felesleg lecsepeg, vagy pedig lefolyik a törzsön. Az utolsó szakaszban (száradási szakasz) a csapadék megszüntetése követően a többlet víz a gravitáció hatására lecsepeg, illetve működésbe lépnek az evaporációs folyamatok. Kis mennyiségű csapadék esetén sok esetben a víz el sem jut a talaj szintjéig, teljes egészében felfogja a fás vegetáció. Nagyobb mennyiségű csapadék alkalmával viszont a lombkoronában és a törzsterben ideiglenesen tárolt vízmennyiségnek jelentős szerepe lehet a csatornarendszer túlterheltségének csökkentésében, extrém csapadékok idején pedig a villámárvizek mértékét és károkozását csökkentheti. Éppen ezért a vegetáció városi vízgazdál-

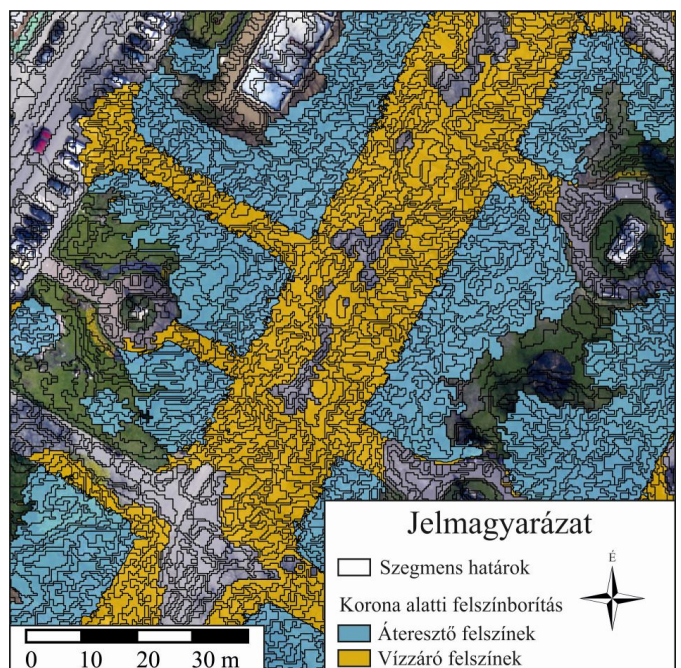


1. ábra: A megváltozott felszínborítás hatása a vízgazdálkodásra (U.S. EPA, 2007)

2. ábra: A vizsgálat belvárosi mintaterülete



3. ábra: A felszínborítási osztályok



4. ábra: A fakorona alatti felszínborítás

kodásban betöltött szerepkörének vizsgálata kifejezetten aktuális kérdés. A növekvő városi lakosság és a gyakoribbá váló extrém csapadékesemények fényében egyre nagyobb szükség van a hagyományos városi vízgazdálkodási szemléletmód megváltoztatására (amely a múltban a vegetációra nem helyezett megfelelő hangsúlyt), hiszen a globális trendek egyre inkább arra mutatnak, hogy a városi vegetációban rejlő potenciálokat is ki lehet/kell aknázni. Ezt bizonyítják az egyre széleskörűbben alkalmazott modern vízgazdálkodási elvek (pl. WSUD Ausztráliában) illetve a vízvisszatartásra koncentráló tervezési módszerek (pl. „Sponge city” projekt Berlinben, Kínában és Tajvanon) (Liu et al., 2015). Magyarországon még viszonylag ritka az ezzel kapcsolatos kutatás, ezért is fontos, hogy hazai viszonyokra érvényes pontosabb adatokkal, modellszámításokkal tudjuk alátámasztani az állításokat, amelyek elősegíthetik, hogy a zöld infrastruktúrára, mint lehetőségre tekintsenek lokális szintű döntéshozók folyamatokban (Buzás, 2012). Ezért vizsgálatunk központi eleme egy széleskörűben is alkalmazható modell (UFORE-Hydro) magyarországi mintaterületre való adaptálása. A modell az USA-ban kidolgozott *i-Tree* (2017) programcsalád részeként érhető el és több tekintetben is hiánypótló, mivel a vegetáció városi hidrológiára kifejtett hatása áll a középpontjában. Munkánk célja, hogy a hazai döntéshozók és a döntéshozás figyelmét ráirányítsuk a városi vízgazdálkodás szempontjából a növényzetben rejlő sokrétű lehetőségekre.

Mintaterület. Szeged a Dél-Alföld központja, amely sajátos klimatikus adottságokkal rendelkezik. A területre jellemző az alacsony évi csapadék (497 mm), a magas napfénytartam és az ennek következtében fellépő gyakori aszály (Balázs, 2008). A viszonylag alacsony csapadék mennyiség mellett ugyanakkor a csapadék intenzitása nagyon változó, a hosszú aszályos periódusok mellett gyakoriak a nyári hirtelen lezúduló villámcsapadékok, amelyek nagy túlterhelést jelentenek az elavult csatornahálózatra és nagy területeken okozhatnak elöntést és károkozást. Mindkét tényező komoly kihívást jelent a városi víz- és zöldfelület gazdálkodás számára (Unger és Gál, 2017). A vizsgálat színteréül Szeged egyik legnagyobb zöldfelülete a Széchenyi tér és az azt körülölelő belvárosi épülettömbök szolgálták (2. ábra). A mintaterületen a tér zöldfelületét (amelyet aszfalt utak kereszteznek) kivéve magas a vízzáró burkolatok aránya és elenyészőek az átteresztő térkő burkolatok. Az épülettömbök közötti magas és keskeny utcakanyonokban a járdaszegély és az úttest éles peremmel válik el egymástól, ahol a felgyülemlt csapadék nem tud elszivárogni, ezért többletvízként a felszínen marad.

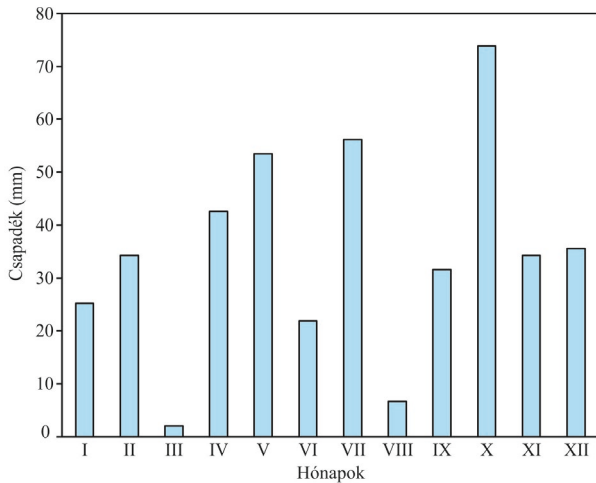
A mintaterület fás vegetációja „tipikus” városi fafajokban gazdag. A juharlevelű platánt (*Platanus x hybrida*) nagy egyedszámban ültették a Széchenyi teret keresztül szelő aszfaltút mentén. A hársfajok közül a nagylevelű hárs (*Tilia platyphyllos*) és az ezüst hárs (*Tilia tomentosa*) a jellemző fajok. Idegenhonos fajként a nyugati osztorfa (*Celtis occidentalis*) és a fekete fenyő (*Pinus nigra*) képviselteti magát. A téren az örökzöldek közül a fenyőfajokon kívül a tiszafát (*Taxus baccata*) érdemes kiemelni. A modell nemzetközi használata egyelőre úgy oldható

meg, hogy szükséges kijelölni egy Szegedhez hasonló klimatikus viszonyokkal rendelkező referencia várost az USA területén, ahol a legfontosabb klimatikus paraméterek idő- és térbeli eloszlása Szegedhez hasonlóak. Több klímaméter és a Köppeni beosztás (Szeged a *Cfa* és a *Cfb* területek határán található (Szelepcsényi et al., 2009)) figyelembevételével, a Kansas állam északnyugati részén található Goodland városa lett a projekt referencia települése.

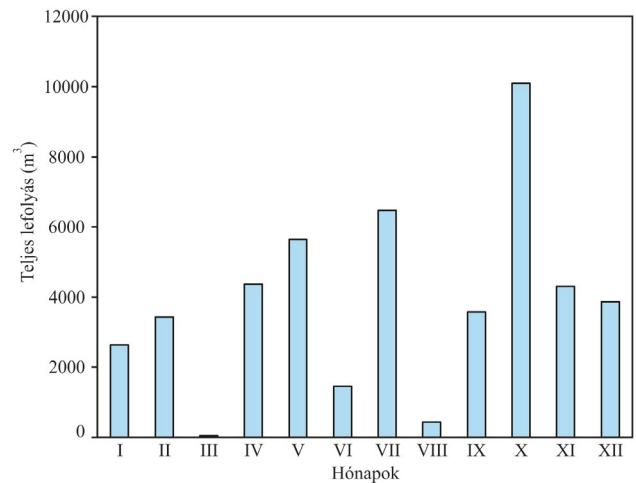
Módszerek. Az UFORE-Hydro modellt a többi vízháztartási modellhez képest sokkal részletesebb információt szolgáltat a növényzet rendszerre gyakorolt hatásáról: pl. a teljes lefolyásról, az intercepcióról, az evaporációról, és a beszivárgásról. A modellezés segítségével lehetőségünk nyílik a valós felszínborítás mellett alternatív felszínborítási arányokkal is dolgozni, amely a várostervezés fontos eszköze lehet. A modell az *i-Tree Hydro* program számítógépes felületén keresztül futtatható (a modellre továbbiakban Hydro-ként hivatkozunk).

A modell a Penman-Monteith egyenletet veszi alapul a vegetáció és a nyílt vízfelületek potenciális evapotranspirációjának megadására (Ács és Hantel, 1999; Wang et al., 2008). A növényzet csapadékkal kapcsolatos interakciói nagyban függenek az adott vegetáció levélzetének felületétől. A modell erőteljesen épít a levélfelületi indexre (Leaf-Area Index, LAI), mivel ennek a mutatónak a mértéke nagyban befolyásolhatja a vegetáció intercepció hatékonyságát (Hirabayashi, 2013; Móri et al., 2009). A LAI és a BAI (Bark-Area Index) kombinációjából származtatott TAI (Total Tree Area Index) is fontos mutatója a növényzetnek. Ennek köszönhetően a modell sokkal összetettebben kezeli az intercepció folyamatokat, mintha csupán a LAI-t venné figyelembe. Az infiltráció számításához a modell a Green-Ampt formulát használja, míg a teljes lefolyás számításához egy TOPMODEL alapú egyenletet alkalmaz, amely magában foglalja az alapvízhozamot (csapadékmentes időszakban a felszín alatti vizekből táplálkozó alapvízhozam), a felszíni áteresztő és nem áteresztő lefolyást.

A modell legfontosabb input paramétere a csapadék. Jelen vizsgálat alapját a 2012. január 1. és december 31. közötti órás felbontású csapadékadatok képezik, amelyet az Országos Meteorológiai Szolgálat Dél-magyarországi Regionális Központ Szinoptikus állomása szolgáltatott. A felszínborítási kategóriák lehatárolását eCognition 9.1 Developer program segítségével végeztük. A Hydro a mintaterületen található fás és gyepek vegetáció arányát, a cserje borítást, a talajok felszíni arányát, illetve a vízzáró burkolatokkal fedett területek százalékos arányát igényli. További szükséges kiegészítő adat a fás és cserje vegetáción belüli örökzöld egyedek aránya. Nehezen előállítható, de szükséges adat a fás vegetáció lombkoronája alatt található áteresztő és vízzáró felszín aránya. A kategóriák előállításához egy 2015. júniusi 4 sávú Ultra Cam X légi felvételt használtunk, amely 0,4 m-es geometriai felbontással rendelkezett. A fák koronája alatti felszínborítás lehatárolását egy 2011. márciusi lombtalan légi fotó felhasználásával végeztük (SZTE TTIK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék Alkalmazott Geoinformatikai Labor). Ezekből a képekből származtatott má-



5. ábra: A csapadék havi eloszlása (2012)



6. ábra: A havi teljes lefolyás (2012)

sodlagos adatforrások (NDVI) és egy terepmodell segítségével készült el a valós felszínborítási térkép.

A felszínborítási kategóriák elkülönítését szegmensalapú osztályba sorolással végeztük. Vízzáró felszíneket és a növényzetet a már említett NDVI és egy épület adatbázis segítségével soroltuk osztályokba. A növényzeti típusok elkülönítését magassági határértékek, spektrális tulajdonságok és maximális differencia figyelembevételével végeztük. Az osztályozás pontosságát manuális osztályba sorolással javítottuk, ennek megfelelően minden egyes osztály teljes pontossági értéke 85% felett alakult

1. táblázat: A felszínborítási típusok százalékos aránya

Felszínborítási típusok	Fa	Gyep	Cserje	Vízzáró felszín/épület	Talaj	Víz-felszín
Százalékos arány	22,46%	3,12%	0,11%	73,65%	0,53%	0,13%

(Congalton, 1991). Az osztályozás eredménye a teljes mintaterületet 100%-ban lefedő felszínborítási kategóriatérkép lett (3. ábra; 1. táblázat). Hasonló módszerekkel készült a fakorona borítás alatti felszínborítás lehatárolása (4. ábra).

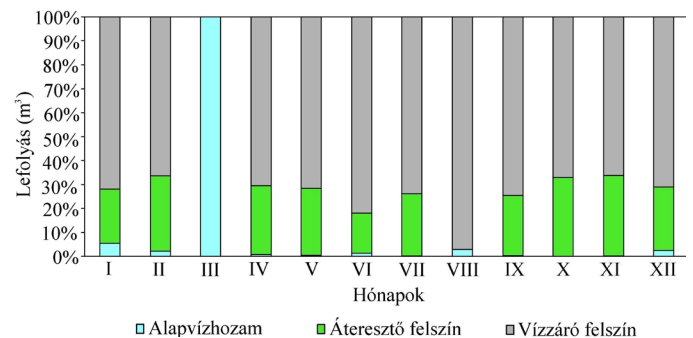
A mintaterületen az örökzöld fák aránya viszonylag alacsony, a cserje állomány közel egynegyedét örökzöld cserjék alkotják. A területen található növényzet levélfelület-indexe: fák (4,7), cserjék (2,2), gyep (1,6). További fontos paraméter a „Directly Connected Impervious Area” (DCIA) definiálása, amelyet a vízzáró felületeken belüli százalékos arányban kell megadni. A mintaterületen ez az érték 63% a Sutherland-féle egyenlet alapján (U.S. EPA, 2010). További lépésekben talajtani és egyéb hidrológia paraméterekkel is bővíthetjük a modellünket, amelyek mintaterülettől függően kiemelt fontosságúak lehetnek a feldolgozás szempontjából (Wang et al., 2008).

A Hydro alkalmazásának egyik kiemelt szempontja, hogy lehetővé teszi alternatív felszínborítottsági arányok alkalmazását is, így lehetőség nyílik egy-egy zöld infrastrukturális fejlesztés vagy térrekonstrukció hatásának szemléltetésére. Jelen vizsgálat során két módosított forgatókönyvet alkalmaztunk. Az *alternatív scenárió 1*-ben (továbbiakban *asz1.*) a növényzet növelésének hatására helyeztük a hangsúlyt (a növényzet arányát 25%-al nö-

veltük, amelyből 12,5% a fakorona borítás növelése), míg az *alternatív scenárió 2*-ben (továbbiakban *asz2.*) a vízzáró felszínnek növelésének hatását elemeztük (a növényzet arányát csökkentettük 6%-al, a vízzáró felszínnek arányát 6%-al növeltük).

Eredmények. Alapeset eredményei. Szeged területére 2012-ben 417,7 mm csapadék hullott, amely a vizsgálat mintaterületére vetítve 82 350 m³-t vizet jelent. A téli hónapokban a csapadék eloszlása viszonylag egyenletesnek volt tekinthető, szemben a tavaszi és nyári hónapokkal. A nyári hónapok jelentették a legszárazabb periódust (mindössze 85 mm csapadékkal), míg az ősz során hullott a legnagyobb mennyiségű csapadék (140 mm). Az év során a havi átlagos csapadék 35 mm környékén alakult, amelytől az egyes hónapok értékei jelentősen eltértek (5. ábra).

Teljes lefolyás. A teljes lefolyás – ami a modell egyik fő outputja – különböző komponensekből épül fel. Egyrészt tartalmazza az alapvízhozamot, amelyet a csapadékmentes időszakban a felszín alatti vizekből táplálkozó vízhozamként (lefolyás) definiálhatunk (Wang et al., 2008). Másrészt a felszíni lefolyás két összetevőjét a vízzáró felszín lefolyását és az átteresztő felszín lefolyását is magában foglalja. Ez utóbbi két összetevő értékében jelentkező különbség jól szemléltetheti a növényzet és a mesterséges burkolatok közötti eltérést, így fontos szereppel bír a városok hidrológiai folyamatainak vizsgálatakor. A teljes lefolyás mennyisége nagyban függ a vizsgált időszak csapadékmennyiségétől, illetve a felszínborítástól, mivel a vegetációval borított felszínnek jelentős csapadékmennyiség módosító hatással bírhatnak (intercepció, evaporáció).



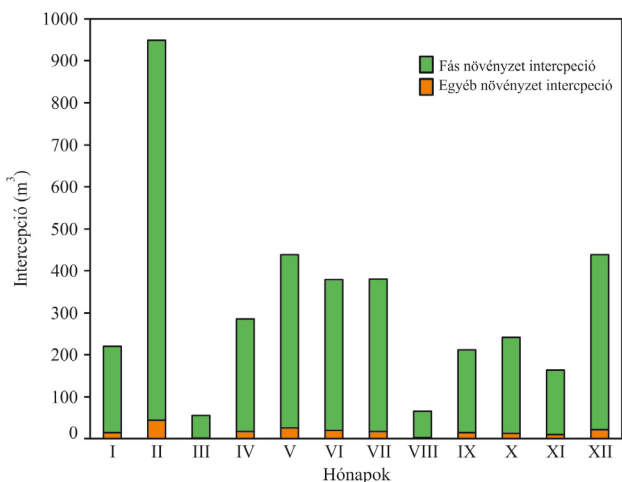
7. ábra: A lefolyás komponensek havi bontásban (2012)

A mintaterületen a vizsgált időszakban a teljes lefolyás mennyisége 46 336 m³ volt, ami az évi csapadékmennyiség 56%-át tette ki. A teljes lefolyás értékei szorosan kapcsolódnak a csapadék mennyiségéhez, ennek köszönhetően az évszakos trendek is nagyban hasonlítanak. Az őszi hónapok során jelentkezett a legnagyobb mennyiségű lefolyás, míg a nyári hónapok rendelkeztek a legkevesebb mennyiséggel. Az október kiemelkedik a többi hónap közül, az évi lefolyás közel egynegyedével (10 100 m³), de a május és a július is jelentős mennyiséggel bír (6. ábra).

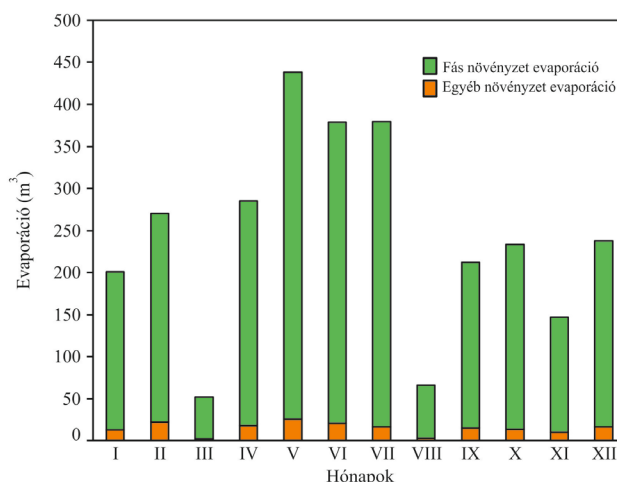
A lefolyás komponensek alakulására jelentős befolyása van a felszínborításnak, amely kihat a teljes lefolyáson belüli arányok alakulására. Az alapvízhozam 500 m³ volt évente. Egyedül március hónapban képvisel jelentősebb arányt a teljes lefolyáson belül, ami annak köszönhető, hogy ebben a hónapban minimális csapadék hullott, így a lefolyás csak az alapvízhozamból tudod pótlódni. A három komponens közül a legjelentősebb mennyiséggel a vízzáró felszínnek lefolyása rendelkezik (32 000 m³), így a területre érkező csapadék közel 39,7%-a burkolt, mesterseges felszíneken folyt le. Az átteresztő felszínre ennek a mennyiségnek kevesebb, mint a fele (13 000 m³), a csapadék 15,9%-a került. Mindkét típusú felszín lefolyása a nyári évszakban érte el a minimumát, míg az őszi évszakban a maximumát. Ehhez az is hozzájárul, hogy a vegetáció nyáron magas hatásfokkal működik, szemben a téli nyugalmi periódust előkészítő őszi hónapokkal (7. ábra).

Intercepció, evaporáció. Az intercepció és az evaporáció folyamatáról órás felbontású adatokkal szolgál a modell. E két folyamat vizsgálata során a növényzetet két kategóriába csoportosítottuk: fás vegetáció és egyéb növényzet (cserjék, gyepek). A növényzet összfelületére a teljes csapadékmennyiség 25,6%-a hullott, ebből a fák koronáját a teljes csapadék 22,5%-a érte el. Ebből is kitűnik, hogy az egyéb növényzeti típusok hatása a vizsgált vízgazdálkodási folyamatokra a mintaterületen kevésbé jelentős.

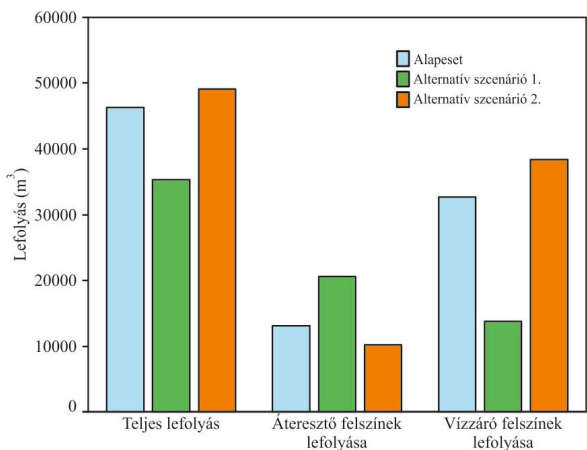
A fás vegetáció az intercepció során, az év teljes csapadékmennyiségének közel 4%-át (3600 m³) fogta fel, ami a területi arányhoz viszonyítva jelentősnek számít (8. ábra). A fennmaradó csapadékmennyiség lefolyik, akadály nélkül áthullik a lombkoronán, illetve a talaj mélyebb rétegeibe szivárog. A vegetáció intercepciós hatékonysága áprilisban és júliusban volt kiemelkedő. Ehhez hozzájárul, hogy a tavasz vége és nyár eleje jelenti a növényzet számára a legaktívabb periódust és egyben a levélzet felületi kiterjedése is ekkor éri el a maximumot. Ugyanakkor az intercepció mértéke jelentősen függ az időszak csapadékmennyiségétől és annak halmazállapotától is. A téli időszak intercepciójának (február) magas értékei a vizsgált évben hullott nagymennyiségű hó formájú csapadéknak köszönhetőek. A téli hónapokban alapvetően is alacsonyabb a párolgás és ha ez hó formában hulló csapadékkal párosul, akkor ez a fák törzsén és ágain megtapadva annak ellenére is megemeli az intercepciós tényezőt, hogy a lombkorona jó része hiányzik.



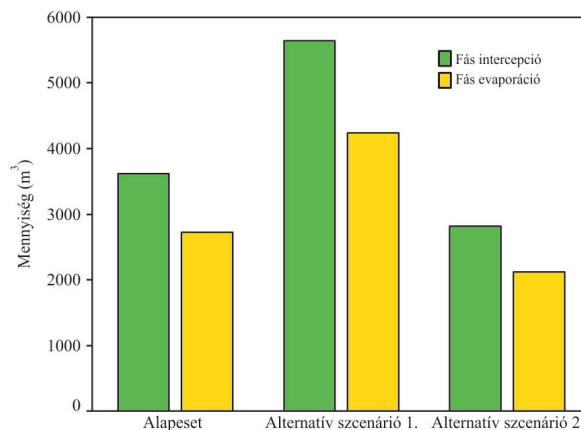
8. ábra: A növényzet intercepciója



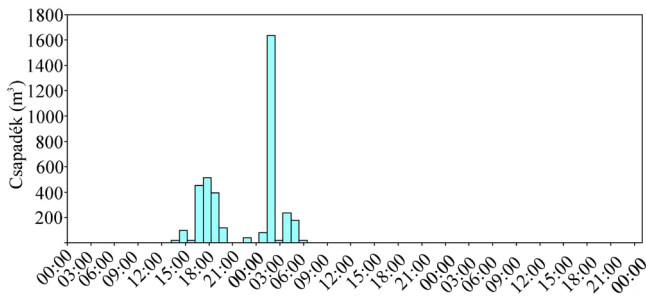
9. ábra: A növényzet levélfelületi evaporációja



10. ábra: A három scenárió összehasonlítása



11. ábra: A scenáriók fás intercepciója és evaporációja



12. ábra: A július 24-26 között vizsgált periódus

A növényzet levélfelületi evaporációját jelentősen befolyásolhatja a vizsgált időszak csapadékmennyisége és hőmérséklete. A vegetációs periódus legaktívabb hónapjaiban (április és július között) a fás vegetáció teljes lombzatban van, így az intercepciós és az evaporációs folyamatok is hatékonyan működnek. Az őszi és téli hónapok kiegyenlítettnek tekinthetők, ekkor az átlagos evaporáció 150–250 m³ között alakul (9. ábra).

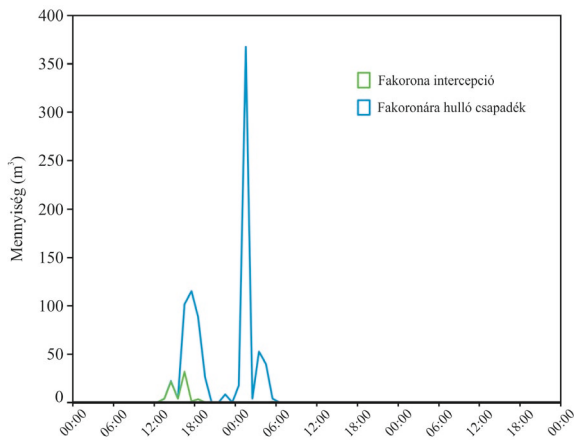
Alternatív scenáriók (asz). Az *asz.1*-ben a teljes lefolyás évi értéke 35 000 m³-ra csökkent, ezzel szemben az *asz.2*-ben 49 000 m³ fölé emelkedett (10. ábra). A növényzet növelésének lefolyáscsökkentő hatásai legerőteljesebben a teljes lefolyás évi mennyiségének változásán jelentkeznek.

Az alapeset során az áteresztő felszínek lefolyása 13 000 m³-v volt, amely az *asz.1*-ben 20 000 m³-re nőtt. Az áteresz-

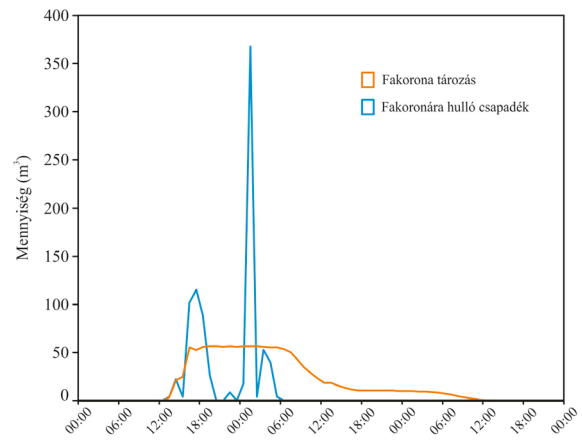
tő felszíneken történő lefolyás növekedése a magasabb növényzeti arányhoz kapcsolódik és alapvetően pozitív hatást gyakorol városi hidrológiai körforgásra, hiszen ezen a felszíneken a tározódás, az infiltráció és az evaporáció folyamata is jelentős mértékű lehet. A növényzet lefolyásra gyakorolt pozitív hatását jól szemlélteti, hogy a víz-záró felszínek lefolyása az *asz.1*-ben közel harmadára (14 000 m³) csökkent, míg az *asz.2*-ben jelentős növekménnyel számolhatunk (38 000 m³; 11. ábra).

A fák intercepciója az *asz.1*-ben a fakorona borítás növelésének hatására 5600 m³-re növekedne, ennek köszönhetően pedig a teljes mintaterületre érkező csapadék 6,4%-át foghatná fel a növényzet az alapeset 4,4%-ával szemben. A nagyobb intercepció hozzájárulna az evaporáció mértékének növekedéséhez, amely így megközelítené a 4200 m³-t. Az *asz.2*-ben a növényzet csökkenése kihatna a kevesebb felfogott csapadéokra (3,4%) és az alacsonyabb evaporációra (2100 m³) is (11. ábra).

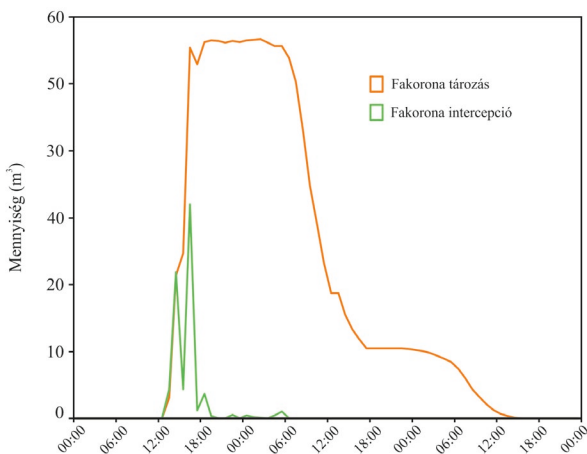
Növényzeti interakciók egy csapadékesemény alatt. Mivel az Hydro modell lehetővé teszi a csapadék és a hozzá kapcsolódó folyamatok (intercepció, evaporáció, stb.) órás bontású elemzését, így lehetőség nyílik nagyintenzitású csapadékesemények elemzésére is. Példánkban egy 72 óra időtartamú szakaszt vizsgáltunk, 2012. július 24. 0:00 és július 26. 23:00 között (12. ábra). Kiválasztását az indokolta, hogy a csapadékesemény előtt és után hosszabb időszakon belül nem volt csapadékhullás, ezáltal



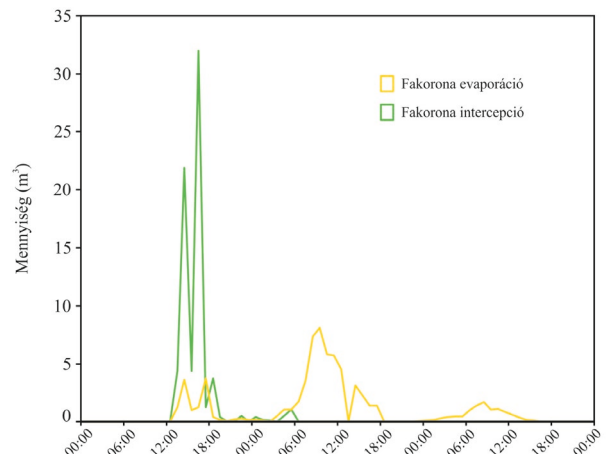
13. ábra: Az intercepció és a csapadék kapcsolata



14. ábra: A tározás és a csapadék kapcsolata



15. ábra: A tározás és az intercepció kapcsolata

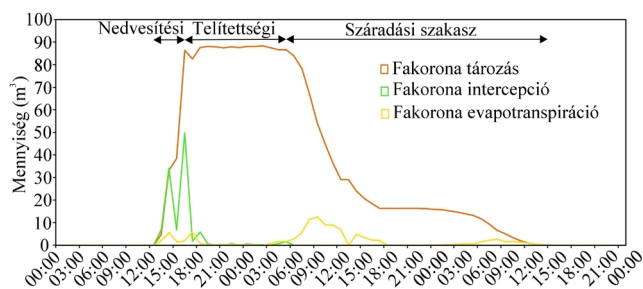


16. ábra: Az evaporáció és az intercepció kapcsolata

az nem gyakorolt „torzító” hatást a tározókapacitás feltöltődésére és kiürülésére.

Az aktív csapadékesemény 17 órán keresztül tartott (július 24. 13:00 és július 25. 06:00 órák között), ez volt az 5. legnagyobb egybefüggő csapadékhullás az év során. Ez idő alatt összesen 3825 m^3 ($20,13 \text{ mm}$) folyékony halmazállapotú csapadék hullott. A vizsgált időszak két részre osztható, több kisebb és egy 1600 m^3 -es nagyobb csapadékhullásra (amely kb. 1 óra alatt hullott a mintaterületre). A fák koronájának felszínét a teljes csapadék 22%-a érte el, így a további folyamatoknak ez a mennyiség képezte az alapját. A csapadékesemény kezdetén, közvetlenül azután, hogy a csapadék elérte a lombkorona felszínét az intercepciós folyamatok is működésbe lépnek.

A fakoronára jutó csapadék és az intercepció mennyisége addig a pontig azonos, amíg a fák levélfelületi tározása el nem éri az aktuális maximumát, ami jelen esetben 56 m^3 . A tározási kapacitás maximumának elérése után az intercepciós folyamatok lecsökkennek és a többlet vízmennyiség koronán áthulló (throughfall) csapadék része lesz. Ez két időpontban, 15:00-kor és 17:00-kor figyelhető meg legmarkánsabban (13. ábra). Az 1600 m^3 -es csapa-



17. ábra: Az alternatív scenárió 1. folyamatainak kapcsolata

dékesemény során a levélfelület telített és nem tud többlet csapadékot megkötni. Ez az állapot a csapadékesemény végéig fennáll, ami után a tárolt vízmennyiség kiürülése is megkezdődik, ami 14 órát vesz igénybe. Az intercepció kezdete és a kiürülés vége között kb. 48 óra telik el egy hasonló mennyiségű csapadék során, ami azonban nagyban függ a fakorona állapotától és teljességétől, illetve a meteorológiai paramétereiktől is.

Az eltárolt vízmennyiség az intercepció során a levélfelületre kerülő vízmennyiség függvénye, ezért kimondottan szoros kapcsolat áll fenn a két folyamat között (15. ábra). A Hydro a tározást kumulatív módon számolja, ez az oka, hogy a mennyisége és időtartama meghaladja az intercepcióét. Az eltárolt vízmennyiség kiürülése többórás folyamat, amely a csapadékhullás befejezése után kezdődhet meg. A tárolt vízmennyiség a tározási kapacitás elérése után állandósul a fentebb említett 56 m^3 -es értéken és ez az állapot mindaddig fennmarad, amíg van beérkező csapadék (14. ábra). Amennyiben nagyobb időintervallum van két csapadékesemény között, akkor a tárolt vízmennyiség elérheti azt a szintet, hogy a vegetáció ismét képes lesz vizet felvenni. A tározás mennyiségét az

intercepció és az evaporáció kettős folyamata szabályozza, ezért a tározás e két folyamat függvénye.

A Hydro-ban az evaporáció és az intercepció mennyisége megegyezik a vizsgált időszak során, a két folyamat időbeli eloszlása viszont különbözik (16. ábra). Az intercepcióban a csapadékesemény elején hirtelen, ugrásszerű növekedés tapasztalható. Az egész vizsgált időszak alatt történt evaporáció, legnagyobb mértékben a csapadékhullás befejeztével, mivel ekkor a csapadékhullás már nem gátolta a párolgotatást.

Az alapeset mellett az alternatív scenáriók felállítása jól szemléltethetővé teszi a különbséget a megváltozott felszínborítási viszonyok hatásáról az adott csapadékeseményre. Az *asz.1*-ben megváltoztatásra került a lombkorona borítottság mértéke. Az alapesethez képest 25%-al növeltük meg a lombkorona kiterjedését a mintaterületen. Ennek a változásnak köszönhetően a teljes csapadéknak 35%-a érkezett a lombkorona felszínére.

Az *asz.1*-ben a folyamatok alakulása az alapesethez hasonló lefutással rendelkezik. A scenárióban a csapadék időbeli és térbeli eloszlása nem változott, azonban a fászfű vegetáció arányát növeltük, ebből adódik a folyamatok mennyiségi növekedése. A tározás maximuma 90 m^3 -re, az intercepció mennyisége pedig 50 m^3 -re növekedett. E másfélszeres növekedés jól érzékelteti a fakorona borítottság növelésének hatását a felszíni lefolyás csökkentése kapcsán. Az intercepciós tározás három fázisának jellegzetességei is tükröződnek a csapadékesemény lefutásán (17. ábra). A nedvesítési szakasz során jól felfedezhető jellegzetesség, hogy az intercepcióval arányban a tározás mennyisége növekszik, de az evaporációs folyamatok is működnek. A telítettségi szakaszban a korona tározási kapacitása elérte a maximumát, ennek következtében a fakorona nem tudott többlet csapadékot felvenni az intercepció, sem leadni az evaporáció során. A száradási szakaszban a csapadékhullás befejeztével, az evaporáció, illetve a gravitáció hatására bekövetkező lecsepégés révén a koronában tárolt vízmennyiség is megkezdte kiürülését.

Összegzés. A zöld infrastruktúra sokrétű hatásának számszerűsítése és tervezési rendszerekbe történő integrálása a várostervezés egyik legaktuálisabb feladata. Ezen belül a városi vízháztartásban betöltött szerepe talán a leginkább figyelmen kívül hagyott terület volt a közelmúltig, noha megfelelő alkalmazásával jelentősen csökkenthetjük a csatornahálózat terheltségét. Egy sokkal költségesebb hálózatbővítés helyett egy sokoldalú, természetalapú megoldással javíthatjuk a terület vízháztartását és a környezet állapotát. Az extrém csapadékesemények mellett fellépő aszályok a városi vízgazdálkodás fenntarthatóvá tételét teszik szükségessé. A növényzet – kimondottan a fászfű vegetáció – a városi árvizek és a hirtelen lehulló csapadékok következtében megnövekedett felszíni lefolyás mérséklésében kiemelt szerephez juthat. Ennek a mérséklő hatásnak a terepi mérése erőforrás- és időigényes feladat, amelyben segítséget nyújthat modellek felállítása és futtatása. A Hydro a növényzet szerepét kiemelt szempontként kezeli, illetve a különböző scenáriók

felállításának lehetősége alkalmassá teszi városrendezési tervek és beruházások jövőbeli hatásának becslésére.

Bár egyre több ország ismeri fel a természet alapú megoldások pozitív hatásait, hazánkban még ritka az integrált szemléletű fejlesztés, melynek az is oka lehet, hogy kevés az erre vonatkozó objektív adat. Munkánkban igyekeztünk rávilágítani a növényzet (elsősorban a fás vegetáció) városi vízháztartásban betöltött szerepére és e potenciál városstervezési kiaknázhatóságára. Szeged és térsége aszálynak és heves esőzéseknek egyaránt kitett térségben terül el, így olykor a víztöbblet, másszor a vízhiány okoz gondot. A jelentős beépítettségű Széchenyi téren és környékén végzett modellezés arra mutattak rá, hogy a növényzet jelentős mértékben csökkentheti a felszíni lefolyást. Ez az intercepciós tározásnak és az evaporációnak köszönhető, amelyek során a vegetáció a felszínre kerülő csapadék mennyiségét és eloszlását is módosíthatja. A zöldfelület (lombkorona borítás) és a beszivárogtató felületek megnövelése kedvező irányban változtatja meg a beszivárgás arányát a felszíni lefolyáshoz képest, így lényegesen több víz raktározódhat a városi talajokban, vagyis az extrém száraz időszakokban kevesebb öntözésre lehet szükség. A tanulmányban bemutatott zöldfelület csökkentés arra is rávilágít, hogy ha egy köztér rekonstrukció (vagy bármilyen egyéb, a felszínborítást jelentősen megváltoztató beruházás) során nagyobb mértékű fakivágással (illetve vízzáró burkolatnöveléssel) számolunk, az erőteljesen csökkentheti a fenti folyamatok hatékonyságát. A növényzet hatása már egy ilyen kis mintaterületen is mérhető, azonban a vizsgálatot Szeged teljes területére kiterjesztve, nagyobb léptéken is értelmezhető a zöld infrastruktúra hatása, aminek városstervezési hozadéka és akár komoly gazdasági vonzata is lehet. A modell hazai területekre és hazai adatokra épülő adaptálása további feldolgozásokat tesz szükségessé. Az input paraméterek pontosítása és hazai adatbázisokra való felkészítése után további terveink között szerepel újabb output paraméterek (felszíni tározódás, levélzetben tárolt vízmennyiség) elemzése és új mintaterületek bevonása a vizsgálatba. Mindemellett fontos cél az eredmények minél hatékonyabb integrálása a tervezési folyamatba.

Köszönetnyilvánítás. A kutatás az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-16-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

Irodalom

- Ács, F. and Hantel, M., 1999: The Penman-Monteith concept based land-surface model PMSURF. *Időjárás* 103, 19–36.
- Balázs, B., 2008: Az átlagos városi hősziget területi szerkezetének modellezése és a modell kiterjesztése. *Doktori értekezés*, Szeged
- Berland, A., Shiflett, S.A., Shuster, W.D., Garmestani, A.S., Goddard, H.C., Herrmann, D.L., and Hopton, M.E., 2017: The role of trees in urban stormwater management. *Land-scape and Urban Planning* 162, 167–177.
- Buzás, K., (szerk.) 2012: Települési csapadékvíz-gazdálkodás. Budapest, *TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.*, pp. 148
- Congalton, R.G., 1991: A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of the Environment* 37, 35–46.
- CVC, 2010: Low impact development stormwater management planning and design guide (Version 1.0) *Credit Valley Conservation*, Toronto and Region Conservation Authority
- Department of Water, 2007: Stormwater Management Manual for Western Australia. *Manuscript*.
- Gayer, J., és Ligetvári, F., 2007: Települési vízgazdálkodás csapadékvíz elhelyezés. Környezetvédelmi és Vízügyi minisztérium, Budapest, *Kézirat*.
- Hancz, G., 2013: A zöld infrastruktúra szerepe a települési vízgazdálkodásban. *Debreceni Műszaki Közlemények*
- Hirabayashi, S., 2013: i-Tree Streets/Design/Eco rainfall interception model comparisons. <http://www.itreetools.org/eco/resources/iTreeStreetsDesignEcoRainfallInterceptionModelComparisons.pdf> (letöltés 30.01.2014).
- Liu, C. M., Chen, J. W., Hsieh, Y. S., Liou, M. L and, Chen, T. H., 2015: Build Sponge Eco-cities to Adapt Hydroclimatic Hazards. In: *Leal Filho W.* (eds) *Handbook of Climate Change Adaptation*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Móricz, N., Gálos, B., és Gribovszki, Z., 2009: Az erdők intercepciójának mérési és modellezési lehetőségei. *Hidrológiai Közlemények* 89(4), 35–45.
- Raymond, C.M., Berry P., Breil, M., Nita, M.R., Kabisch N., de Bel, M., Enzi, V., Frantzeskaki, N., Geneletti, D., Cardinaletti, M., Lovinger, L., Basnou, C., Monteiro, A., Robrecht, H., Sgrigna, G., Munari, L., and Calfapietra, C., 2017: An Impact Evaluation Framework to Support Planning and Evaluation of Nature-based Solutions Projects. Report prepared by the EKLIPSE Expert Working Group on Nature-based Solutions to Promote Climate Resilience in Urban Areas. *Centre for Ecology & Hydrology*
- Romnée, A., Evrard, A., and Trachte, S., 2015: Methodology for a stormwater sensitive urban watershed design, *Journal of Hydrology* 530, 87–102.
- Szelepcsényi, Z., Breuer, H., Ács, F., és Kozma, I., 2009: Biofizikai klímaklasszifikációk 2. rész: Magyarországi alkalmazások, *Léggör* 54(3), 23–30
- Unger, J., és Gál, T., 2017 Városklíma: Szeged városklímológiai vonatkozásai. Szeged, *GeoLitera*, pp. 256
- U.S. EPA, 2007: Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID) Strategies and Practices. United States Environmental Protection Agency Report No. EPA 841-F-07-006. *Washington, D.C.*
- U.S. EPA, 2010: EPA's Methodology to Calculate Baseline Estimates of Impervious Area (IA) and Directly Connected Impervious Area (DCIA) for Massachusetts Communities. *United States Environmental Protection Agency Report*
- Wang, J., Endreny, T. A., and Nowak, D. J., 2008: Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model. *Journal of the American Water Resources Association* 44(1)
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Simpson, J.R., and Ustin, S. L., 1998: Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture* 24(4), 235–244.
- Xiao, Q., and McPherson, E.G., 2002: Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban Ecosystems* 6, 291–302.
- Xiao, Q., and McPherson, E.G., 2011: Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosystem* 14, 755–769
- Zagyvainé Kiss, K. A., 2014: Az avar intercepció vizsgálata a Soproni-hegységben. Doktori értekezés, *Nyugat-Magyarországi Egyetem*
- i-Tree, 2017: i-Tree Hydro User's Manual v5.1. 2017: https://www.itreetools.org/resources/manuals/Hydro_Manual_v5.1.pdf