

# **A VÁROSI ZÖLDINFRASTRUKTÚRA SZEREPE A FENNTARTHATÓ CSAPADÉKVÍZ-GAZDÁLKODÁSBAN**

Doktori (PhD) értekezés

**Csete Ákos Kristóf**

Témavezető:  
Dr. Gulyás Ágnes  
egyetemi adjunktus

Földtudományok Doktori Iskola  
Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Szegedi Tudományegyetem

Szeged  
2023

## Tartalom

1. Témafelvetés, a doktori kutatás célkitűzései .....	3
2. A téma irodalmi előzményeinek áttekintése.....	5
2.1. A városok vízháztartásának meghatározó tényezői .....	5
2.1.1. A város és víz kapcsolat rendszere .....	5
2.1.2. Megváltozott városi környezeti feltételek .....	6
2.1.3. Várostervezés és vízgazdálkodási rendszerek .....	10
2.1.4. Vízgazdálkodási rendszerek .....	11
2.2. A városi növényzet, zöld-kékinfrastruktúra.....	13
2.2.1. A zöld- és kékinfrastruktúra és a természetalapú megoldások kapcsolatrendszere 14	
2.2.2. A növényzet városi vízgazdálkodásban betöltött szerepe .....	16
2.2.3. Csapadékvízgyűjtés .....	18
2.2.4. Zöldinfrastruktúra és NBS megoldások .....	19
2.2.5. A vegetáció hidrológiai ciklusban betöltött szerepének vizsgálatának tudományos előzményei .....	22
3. Mintaterületek .....	23
3.1. Szeged klimatikus és földrajzi jellemzői .....	23
3.2. A vizsgálatok helyszínei .....	26
3.2.1. i-Tree Hydro mintaterületek .....	26
3.2.2. EPA SWMM mintaterületek .....	30
4. Módszerek .....	33
4.1. i-Tree Hydro alapú vizsgálatok.....	34
4.2. EPA SWMM alapú vizsgálatok .....	38
5. Eredmények.....	44
5.1. A növényzet hatását bemutató eredmények.....	44
5.1.1. Mikroléptékű modellezés eredményei.....	44
5.1.2. Lokális léptékű modellezés eredményei.....	50
5.2. Csapadékvízgyűjtés hatékonyságát feltáró eredmények.....	55
5.2.1. Mikroléptékű modellezés eredményei.....	55
5.2.2. Lokális léptékű modellezés eredményei.....	66
6. Diskusszió, kitekintés .....	75
7. Összefoglalás .....	80
8. Köszönetnyilvánítás .....	81
9. Irodalomjegyzék .....	81
10. Magyar és angol nyelvű összefoglaló .....	92
10.1. Összefoglaló.....	92
10.2. Summary in English.....	97

## 1. Témafelvetés, a doktori kutatás célkitűzései

A klímaváltozás napjaink egyik legfontosabb környezeti kihívása, amely az élet minden területét érinti. Hatása sokrétű, szinte az összes ökológiai és gazdasági alrendszerre kiterjed. Következményeit nem lehet egyik pillanatról a másikra megváltoztatni, ezért kiemelten fontos a nem kívánt hatásokra felkészülni és a tompító eszközök minél szélesebb skáláját feltárni (European Environment Agency, 2012b, 2017).

Az urbánus területek jelentős mértékű növekedése összekapcsolódik a klímaváltozással, hiszen a városok nagy népsűrűsége azt kívánja meg, hogy az ott élő lakosság – minél komfortosabb – életkörülményei biztosítva legyenek és a városok felkészüljenek a klímaváltozás következtében fellépő negatív hatásokra (European Environment Agency, 2012b, 2017). A zöldinfrastruktúra természetes megoldásokat kínálhat a klímaváltozás hatásaira való felkészülésben, hiszen részeként a növényzet számos tompító, puffer hatással rendelkezik. A növényzet a mikroklima módosításától és légköri szennyeződések megkötésétől kezdve a városi vízgazdálkodásban betöltött szerepéig bezárólag rendkívül sok kedvező hatással bírhat, melyeket összefoglaló néven ökoszisztéma szolgáltatásoknak hív a városökológiai terminológia (Berland et al., 2017; Coutts & Hahn, 2015; Gill et al., 2007; Kollányi et al., 2017a,b; Prudencio & Null, 2018). Az utóbbi években számos szolgáltatás (pl. légszennyezettség megkötés, szénmegkötés és raktározás stb.) hatékonyságértékeléséhez születtek tudományos megalapozottságú fejlesztések (Coutts & Hahn, 2015; Livesley et al., 2016). A zöldinfrastruktúra és a növényzet fenntartható városi vízgazdálkodásban betöltött szerepe egy kiemelt témakör, hiszen az időjárási szélsőségekre való felkészülésben, illetve a hosszútávú tompító hatások kialakításában is fontos szerepet tölthet be (Berland et al., 2017; Kuehler et al., 2017). A témakör kutatottsága nemzetközi szinten jóval nagyobb, hazai környezetben azonban a növényzet fenntartható vízgazdálkodásban betöltött szerepe messze nincs kellő részletességgel feltárva. A nemzetközi és hazai szinten zajló kutatások elsősorban a városi lefolyásviszonyok alakulását vizsgálják és kevesebb az olyan munka, amely a városi vízgazdálkodást a növényzet oldaláról vizsgálta (Elliott & Trowsdale, 2007; Jayasooriya & Ng, 2014). A modellezési vizsgálatok során a hidrológiai folyamatok sok esetben elkülönülve jelennek meg a növényzeti tényezőktől (Thorndahl et al., 2006; Zoppou, 2001), vagy ha meg is jelenik a lefolyásmodellezésben a növényzet, az leginkább egy egynemű zöld egységként alkot egy konstans értéket. Ugyanakkor a növényzet fajtájától (lágyszárú, fásszárú, cserje vagy fa) függően igen eltérő potenciállal rendelkezik, ezért szükséges finomítani az elemzési módszereket is. A hidrológiai folyamatok modellezése során kiemelt szempontnak kell lennie, hogy a növényzet térbeli tulajdonságait és időbeli változásait (például lombfakadás, lombhullás) is figyelembe vevő vizsgálatokat végezzünk, mivel annak ellenére, hogy a növényzet minden településen jelen van, a vízgazdálkodásban betöltött szerepéről és hatásairól alig rendelkezünk valós adatokkal (szemben a mesterséges, épített infrastruktúra elemeivel, amelyről több információ áll rendelkezésre). A fenntartható megoldások – mint a csapadékvízgyűjtés – szerepét kevés esetben vizsgálták más mintaterületekre kiterjeszthető módszertannal. A kutatások során sok esetben a csapadékvízgyűjtés, illetve a gyűjtőfelszínnek környezete közötti összefüggés nem kerül elég részletesen feltárássra. Kevés vizsgálat fókuszál arra, hogy milyen potenciált jelent a gyűjtött csapadékvíz a környező növényzet öntözésében, illetve városi és városrészi szinten mely területek legalkalmasabbak ezek alapján csapadékvízgyűjtésből származó öntözési rendszerek kiépítésére. A kutatások legtöbb esetben egy kisebb épülettömbre vagy parcellára vonatkoznak, amelyek ugyan az adott területre pontos adatokat tartalmazhatnak, azonban nagyobb léptékű kiterjeszhetőségük nehézségekbe ütközhet.

Ebből adódóan a doktori kutatásomban a növényzet városi vízgazdálkodásban betöltött szerepének minél részletesebb feltárássra törekedtem, továbbá a városi csapadékvízgyűjtési megoldások fenntartható vízgazdálkodásban betöltött szerepének térinformatikai módszerekkel történő vizsgálatára. A kutatásom során részletes irodalmi és módszertani áttekintést végeztem a fenntartható vízgazdálkodással, a növényzet hidrológiai ciklusban betöltött szerepével

kapcsolatban, részletesen feltárva a növényzet-csapadék interakciókat. Ezzel célom volt, hogy alapot teremtsék a részletes modellezési vizsgálatoknak. A hidrológiai modellezés során célom volt, hogy lehetőség szerint olyan módszertant dolgozzak ki, amely alkalmazható Szegeden, további magyarországi településeken, illetve a közép-európai régió hasonló karakterisztikájú városaiban. Mind a növényzet városi hidrológiai szerepének, mind a csapadékvízgyűjtési lehetőségek modellezésére mikro és lokális léptékű vizsgálatokat is végeztem. A növényzet vízgazdálkodásban betöltött szerepének feltárásása során egy Egyesült Államokban fejlesztett modell használatára esett a választás. Ennek a modellnek magyarországi alkalmazására a jelenlegi időpontig a doktori munkámban bemutatott vizsgálatokon kívül nincs elérhető információ, illetve tudományos publikáció. Ebből adódóan a cél az eredmények elemzése és a növényzet szerepének vizsgálata mellett a modell magyarországi környezetben történő alkalmazhatóságának feltárása volt. Megvizsgáltam milyen nehézségekbe ütközik a modell adaptálása, az inputadatok elérhetősége, illetve, hogy az általa adott eredmények alkalmazhatóak-e hazai döntéshozási folyamatok előkészítésére.

A csapadékvízgyűjtéssel kapcsolatos mintaterületi vizsgálatok elvégzése során cél volt, hogy a csapadékvízgyűjtés vízgazdálkodással kapcsolatos hatásait és folyamatok jellemzőit elemezzem mikroléptékben és ezzel a lokális léptékű vizsgálatok módszertani alapját is megteremtsem. Célom volt, hogy a mikroléptékű vizsgálatok során elemezzem azokat a lehetőségeket és folyamatokat, amelyek egy-egy épület szintjén megvalósíthatóak, így a fenntartható vízgazdálkodásban a lakossági, illetve önkormányzati szemléletformálást is elősegíthetik, adatokkal alátámaszthatják. A lokális léptékű csapadékvízgyűjtési vizsgálat során kitűzött cél volt, hogy olyan módszertant dolgozzak ki, amellyel elősegíthető a csapadékvízgyűjtés és az ebből történő növényzeti öntözési igények város szintű tervezése, amely nem csak egy adott városra vonatkozik, hanem bizonyos korlátok között adaptálható a régió más hasonló felépítésű településein is. Ennek érdekében, olyan növényzeti és az öntözővízigények (növényzeti kategóriák alkalmazásával) jellemzésére szolgáló indikátorok kidolgozását tűztem ki célul, amelyek viszonylag könnyen előállíthatók, illetve közel bármely településen megoldható az előállításuk és az inputadatok beszerezhetősége sem ütközik nehézségekbe. Az eredmények elemzése során cél volt a városrészsintű adatok összehasonlítása és pufferzóna módszer tesztelése, illetve az ideális öntözési terület meghatározása.

A doktori kutatás által kitűzött célok és megválaszolendő kérdések:

#### **A növényzeti felszínborítás és a városi vízháztartás mélyreható elemzése:**

- A növényzet csapadékkal kapcsolatos interakcióinak melyek a jellegzetességei a vizsgált területeken? A városi növényzet fenntartható vízgazdálkodásban betöltött szerepét alátámasztják-e a vizsgálatok?
- A növényzet felszínborítási arányának megváltoztatása milyen irányba (kedvező, kedvezőtlen) mozdítja el a városi területek hidrológiai folyamatait a vizsgált mintaterületek alapján?
- Mennyire határozza meg a hidrológiai folyamatokat és városi vízgazdálkodás továbbfejlesztését az adott mintaterület felszínborítása és meglévő épület, úthálózati struktúrája?
- Az i-Tree Hydro modell alkalmas-e hazai mintaterületeken történő vizsgálatokra?

#### **A csapadékvízgyűjtési potenciál-elemzés fejlesztése:**

- Melyek azok a csapadékesemény jellegzetességek, amelyek befolyásolhatják a csapadékvízgyűjtést?
- A növényzet öntözővízigényének meghatározására létrehozhatóak-e olyan egyszerű indikátorok, amelyek könnyen előállíthatók és alkalmasak csapadékvízgyűjtésre kijelölhető területek városon belüli lehatárolására?

- Mely az a pufferzóna-távolság, amelyen belül hatékony a növényzet öntözése összegyűjthető csapadékvizből? Használható-e a pufferzóna alapú módszertan városi környezetben öntözési igény megállapítására.
- Különböző városrészek esetében melyek az eltérések és melyek azok a jellegzetességek, amelyek a városrészek eltérő csapadékvízgyűjtési potenciáját okozzák?
- Milyen mértékben képes fedezni az összegyűjtött csapadékvíz a növényzet öntözővíz igényét és Szegeden melyek azok a területek, ahol gyűjtőrendszerek kiépítésében érdemes gondolkodni?

## 2. A téma irodalmi előzményeinek áttekintése

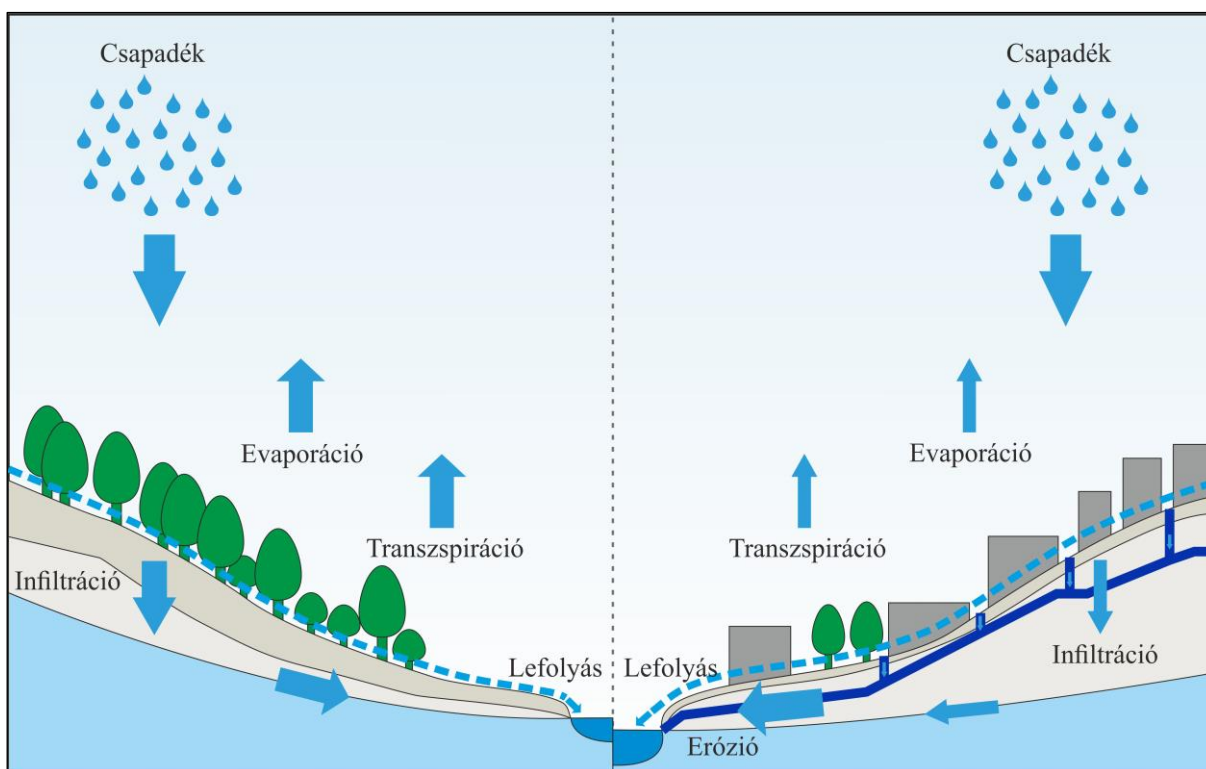
### 2.1. A városok vízháztartásának meghatározó tényezői

#### 2.1.1. A város és víz kapcsolat rendszere

A világ számos pontján – így hazánkban is – napjaink és a közeljövő fontos problémaköre a klímaváltozás következtében kialakuló szélsőségek és az általuk okozott negatív hatások, amelyek komoly kihívások elé állíthatják a városokat. A városok és a vizek kapcsolata még kiemeltebb téma lesz, mind a felhasználás, mind a kockázatkezelés szempontjából. A városok definíciója kontinensenként, de akár országonként is eltérhet, azonban közös tulajdonságuk, hogy a természetes környezetet jelentős mértékben megváltoztatják, ezáltal sokszor nem kívánt hatásokat kiváltva. Már a 19. század során jelentős volt a városi népesség növekedése, amely a 20. és 21. század során rendkívüli mértéket öltött egyes régiókban. Ez a trend a közeljövőben is folytatódni fog, a növekedés módjában, intenzitásában és területi koncentrációjában történhetnek változások (Jaramillo & Nazemi, 2018; Seto et al., 2010; Wilby, 2019). 2018-as adatok alapján világszinten a városi lakosság aránya meghaladja az 55%-ot, azonban ez az arány folyamatosan növekszik és 2050-re valószínűsíthetően eléri a 68%-ot (United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2019). A növekvő városi népesség és a fokozódó urbanizáció hatására a természetes környezet nagymértékben átalakul, így a városi vízgyűjtők jelentős antropogén nyomásnak vannak kitéve. Városi vízgyűjtő alatt olyan vízgyűjtőt értünk, amelyen a városi területhasználat van túlsúlyban, illetve a vízzáró felületek aránya meghaladja a 10%-ot (Buzás, 2015). Az urbanizáció hatásai többnyire túlmutatnak az adminisztratív határokon, ezért fontos a városban és tágabb környezetében megjelenő vízproblémákat egységes komplex rendszerben kezelni (Gayer & Ligetvári, 2007; Jha et al., 2012). A klímaváltozás okozta problémák a városi régiókban halmozottan jelenhetnek meg a nagymértékű antropogén beavatkozások és átalakítások következtében (European Environment Agency, 2012b, 2017; Kabisch et al., 2016).

A városi vízgyűjtők területén a vízkörforgásban tapasztalható problémák – a hidrológiai ciklus egyes elemeiben történt változások következtében – nagyon változatosak lehetnek és különbözhetnek a természetes vagy természetközelinek tekintett területek problémáitól (1. ábra). A városi területek komplex hatásrendszere következtében egyrészt a természetes folyamatok, mint a heves csapadékesemények, elöntések, áradások, aszályok jelentős hatással lehetnek a városi lakosság jólétére és életminőségére. Másrészt az urbanizációs folyamatok maguk is generálhatnak ilyen kedvezőtlen jelenségeket (pl. villámárvíz). A városi vízgyűjtő területén található vizek jelentős antropogén hatásoknak vannak kitéve térbeli (ivóvíz ellátás, építkezések során talaj- és rétegvíz elvezetése) és fizikai-kémiai szempontból (szennyezések, ivóvízkezelés) egyaránt (Balatonyi et al., 2021). Ezek a problémák kettős kihívás elé állítják a várostervezési szakembereket. A kihívások egyik oldalát az időszakos víztöbblet (pl. heves csapadékesemény) következtében kialakuló városi villámárvizek jelentik, amelyek komoly személyi és anyagi károkat okozhatnak rövid idő leforgása alatt (Jha et al., 2012; Kjeldsen et al., 2013). Ezzel éppen ellentétes kihívást jelent ugyanakkor a száraz periódusokra történő felkészülés, amelyek jelentős hatást gyakorolhatnak a városok vízkörforgására, különös

tekintettel az aszálynak kitett területeken, illetve ahol kevés a természetes öntöző- és ivóvízforrás (Chang & Bonnette, 2016).



1. ábra A természetközeli és városi vízgyűjtő eltérő hidrológiai folyamatai ([1] alapján)

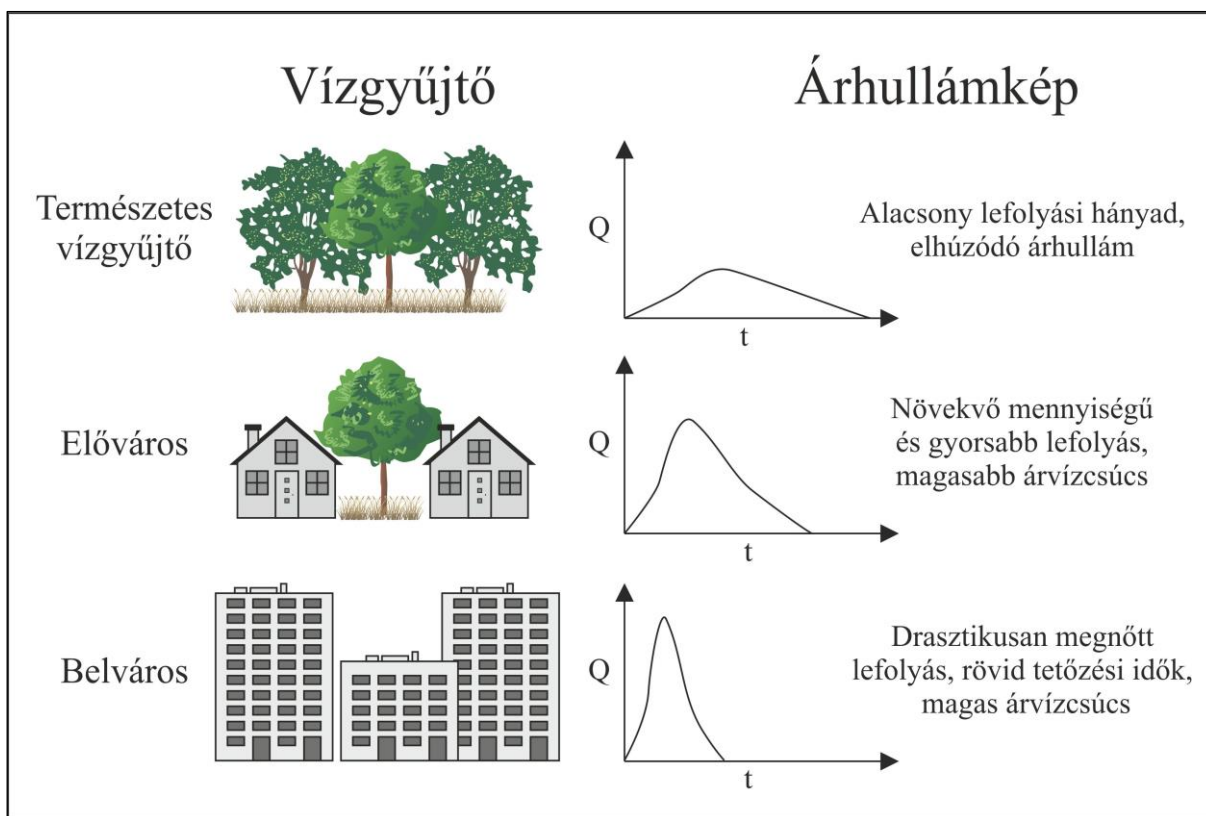
### 2.1.2. Megváltozott városi környezeti feltételek

A városi vízgyűjtők problémáit többnyire felszínborítási és területhasználati okokra vezethetjük vissza, illetve az ehhez kapcsolódó nagymértékű csapadék- és szennyvízelvezetésre (Fletcher et al., 2013). A települések (főleg a nagyobb városok) területén a víz, mint környezeti elem többnyire a mesterséges infrastruktúra rejtekében áramlik és csak akkor kerül a figyelem középpontjába, amikor jelentősebb fennakadást vagy károkat okoz a település mindennapjaiban (Gayer & Ligetvári, 2007).

Az épületek és egyéb mesterséges felszínelemek által létrehozott összetett felszíngeometria nagymértékben módosítja a mikroklimatikus viszonyokat. A természetestől eltérő hőkapacitásuk és hőtároló képességük miatt a különböző mesterséges felszínburkoló elemek befolyásolják a felszíni- és a felszínközeli hőmérsékletet, illetve az eltérő vízáteresztési képességeik következtében az evapotranszspirációs folyamatokra is jelentős hatással vannak. Az épületek, kimondottan a magas és szűk utcakanyonokkal jellemezhető városrészekben a szélsőségekben és a besugárzás mértékben okozhatnak jelentős változásokat. Az említett pár példa jól szemlélteti, hogy a mikroklimatikus viszonyok milyen változásokon mehetnek keresztül, amelyek a városi hidrológiai paraméterek változásában is szerepet játszanak (Arnfield, 2003; Bourbia & Boucheriba, 2010; Shishegar, 2013; Shuster et al., 2005). Mindezek mellett a legfontosabb módosító paraméter a felszín fedőanyagok eltérése a természetes területekéhez képest.

A városok területén nagymértékben használt vízzáró burkolatok miatt a felszíni lefolyás mennyisége jelentősen nő, vagyis a hidrológiai ciklus elemeinek arányaiban nagymértékű eltolódások figyelhetők meg a természetes területekéhez és kisebb településekéhez képest (Kjeldsen et al., 2013; Mejía & Moglen, 2010; Rodriguez et al., 2008; Samouei & Özger, 2020). A legszembetűnőbb változás a felszíni lefolyás arányának növekedése, amely kimondottan a vízzáró burkolatokkal fedett, leginkább belvárosi városrészekben és ipari területeken jellemző. A

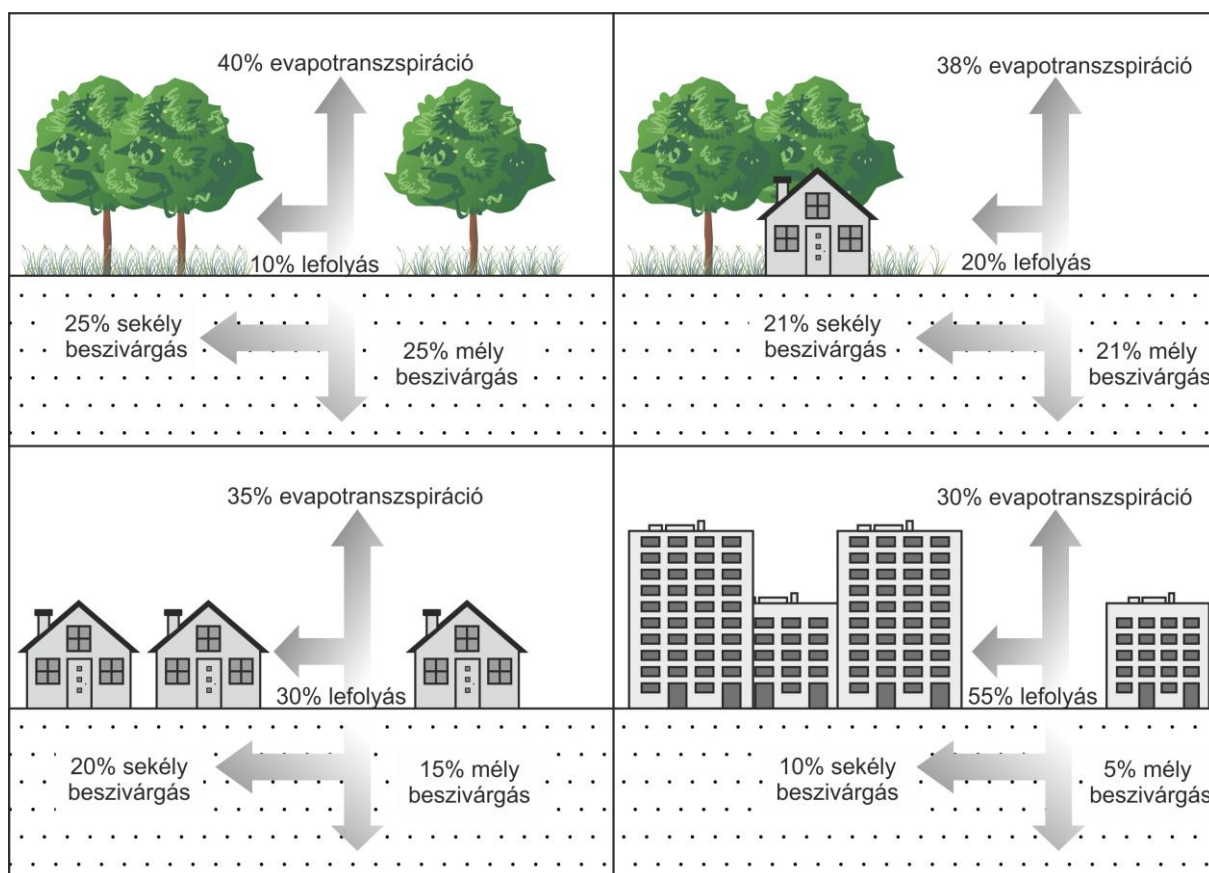
vízzáró burkolatok városon belüli kiterjedését általánosságban jól mutatja a népsűrűség és a vízzáró felület arány ( $R_f$ ) között felállított összefüggés (az ipari területeket kivéve, mivel ott a magas vízzáró burkolat arányhoz, alacsony népsűrűség társul, az ipari használatból adódóan), amely különböző városrésztípusonként jelentősen eltér. Míg egy kertvárosi terület esetében alacsony a vízzáró felületi arány (30-40%, 50-100 fő/ha népsűrűség mellett), addig egy belvárosi területnél elérheti a 60-70%-ot is (150-200 fő/ha népsűrűség mellett) (Gayer & Ligetvári, 2007).



2. ábra Az urbanizáció hatása a vízgyűjtőre és a lefolyás árhullámképére (Gayer & Ligetvári, 2007 alapján)

A felszíni lefolyás arányában bekövetkező változás magával vonja a hidrológiai ciklus többi elemének módosulását. Jelentősen csökken például a beszivárgás (infiltráció) a talaj felszíni és mélyebb rétegei felé egyaránt, ami komoly probléma, mert többek között a növényzet élettani folyamataihoz szükséges vízellátást, vagy a párolgás általi termikus komfortjavulást is ez segíti elő. A vízzáró felszínnek – a fokozott lefolyás miatt – emelhetik a csúcsvízhozamot, vagyis a víz gyorsabban távozik a területről (Jacobson, 2011; Shuster et al., 2005; Van de Ven, 1990). A nagyobb csúcsvízhozam és a rövidebb tartózkodási idő ugyanakkor meredekebb árhullámgörbét eredményez, amely megnövekedett kockázatot jelent a városok vízgyűjtőjén kialakuló villámárvizek szempontjából (2. ábra) (Gayer & Ligetvári, 2007; Lu & Qin, 2019; Shuster et al., 2005). A villámárvizek, általában intenzív csapadékhullás következtében alakulnak ki. Veszélyességük abban rejlik, hogy rövid idő alatt túlterhelhetik a csatornahálózatot és előntést okozhatnak a vízgyűjtő alsóbb szakaszán, illetve mélyebb részein. A vízügyi szakirodalom villámárvíznek nevezi azokat az eseményeket, amelyeknél az összegyülekezési idő kevesebb mint 6 óra. A villámárvizek (flash flood) és a városi villámárvizek (urban flash flood/ urban flood) mechanizmusa nagyrészt megegyezik, hiszen a hirtelen lehulló csapadék természetes területen is fokozza a nagymértékű felszíni lefolyást. Villámárvíz hegyvidéki/domsági (nagy lejtőszögű) vízgyűjtőn is keletkezhet és jelentős szerepet játszhat kialakulásában a hirtelen megáradó kisvízfolyás, amelynek többletvízhozamát nem tudja elvezetni a meder. A városi területek a fentebb említett antropogén tényezők (vízzáró

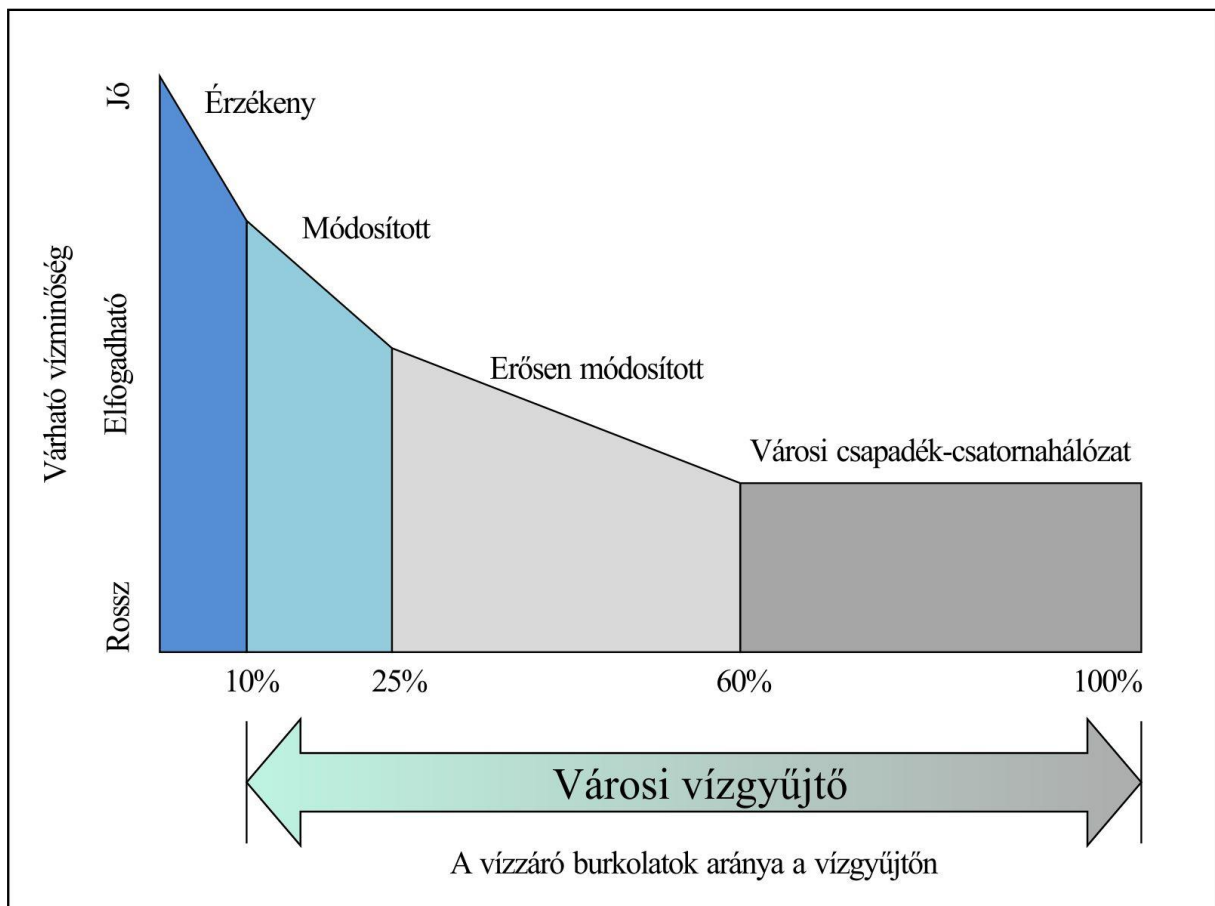
felszínek, kompaktált talajok, alulméretezett/eltömődött elvezető hálózat) jelentenek speciális helyzetet és okozhatnak hirtelen nagy mennyiségű csapadékok következtében kialakuló elöntéseket (pluvial (rain-related) flood). A fogalmi megnevezések tisztázása nem e disszertáció tárgya, mivel nemzetközi publikációkban is több esetben felváltva használják a kifejezéseket (urban flood, flash flood, pluvial flood) így a dolgozatomban e jelenségre a városi villámárvíz kifejezést alkalmazom. A villámárvizek minél hatékonyabb kivédése azért kiemelkedően fontos, hiszen a nagy népesség- és vagyonkoncentráció következtében magas lehet a károkozásuk, főleg a mélyebben fekvő városrészekben (pincék, mélygarázsok elöntése) (Hosseinzadehtalaei et al., 2020; Kaspersen et al., 2017; Kundzewicz et al., 2014; Papagiannaki et al., 2015; Tabari et al., 2021). A fentiekből következően a városi hidrológiai folyamatokra általában a gyorsaság, hirtelenség és a magas amplitúdó a jellemző (Buzás, 2012; Haidu & Ivan, 2016). A városi területeken a természetes párolgató felszínek (mint például a növényzet vagy a nyílt talajfelszín) aránya alacsonyabb természetes területekhez képest, ami az evapotranszpiráció jelentős csökkenését okozza (3. ábra).



3. ábra A különböző felszínborítással rendelkező területek hidrológiai folyamatai (Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998 alapján)

A felszínen lejátszódó hidrológiai folyamatokban nagyon nagy szerepe van a talajoknak, mivel beszivárgást elősegítő felszínek, illetve a növényzet számára is életteret nyújtanak. A városi területeken azonban mindkét funkciójuk sérül, mivel nagymértékben jellemző rájuk a kompaktáltság (tömörödés) és a fizikai-kémiai degradáció. A mindennapos taposás, a közlekedés, ipari tevékenység stb. okozta tömörödés olyan jelentős hatást gyakorolhatnak a talajminőségre, amely nem csak a hidrológiai folyamatokat befolyásolja, hanem a városi növényzet egészségi állapotára is hatással lehet (Salvadore et al., 2015).





4. ábra A városi vízgyűjtő vízzáró burkolati aránya és vízminőség közötti összefüggés (Buzás, 2015 alapján)

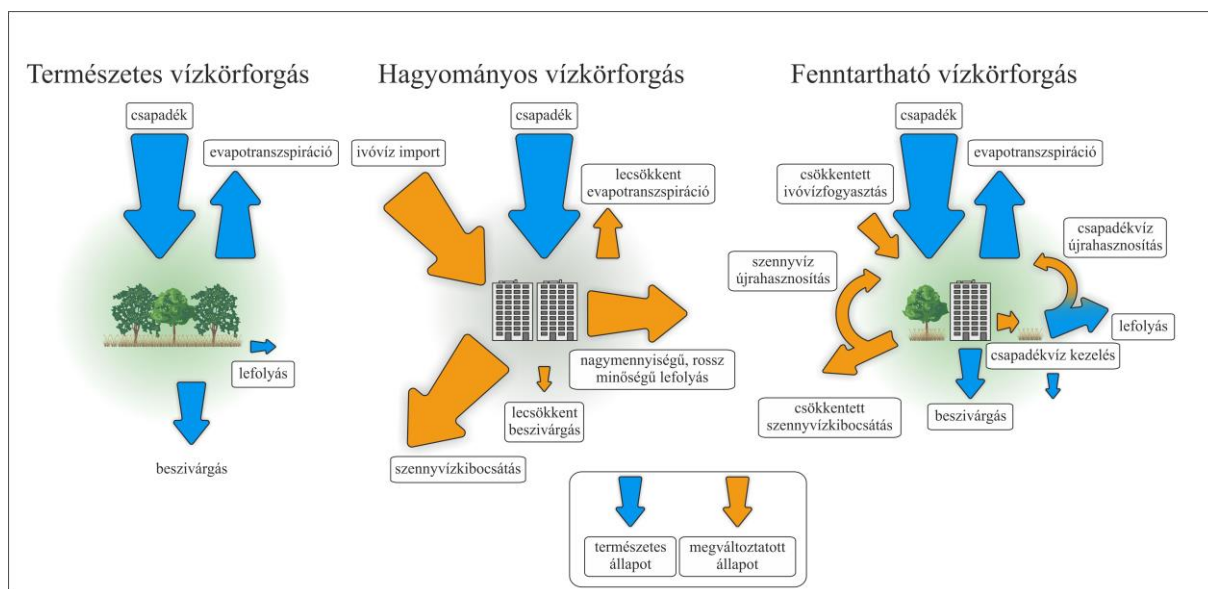
A nagyarányú városi lefolyás ugyanakkor jelentős mértékben terhelt különböző szennyezőkkel. Ezek változatos forrásokból származhatnak, mint például fűtés, városi közlekedés, ipari tevékenység, magánkertek növénygondozásával kapcsolatos kibocsátásai, amelyek mind hatással vannak a városi vízgyűjtő és a befogadó vízfolyás vízminőségére. Minél magasabb a burkolt felületek aránya, annál nagyobb mértékben várható, hogy a vízminőség romlik (Brattebo & Booth 2003; Buzás, 2015; Gilbert & Clausen, 2006) (4. ábra). A megváltozott árullámkép egyik következménye az úgynevezett first flush (első szennyezőanyag hullám), amely a lefolyás elején jelentkező, löketszerű nagy szennyezőanyag koncentrációjú lefolyás. A koncentráció függ attól, hogy előzetesen mekkora szennyezőanyag mennyiség ülepedett le a felszínre és ebből mekkora mennyiséget tud feloldani vagy elmozgatni a lefolyás. Alapvetően azonban a szennyezés körülbelül 60%-át a lefolyás első 40%-a foglalja magában (Buzás, 2012; Gayer & Ligetvári, 2007).

A városi környezet nagymértékben felerősítheti az aszályos, hóhullámokkal terhelt időszakok kedvezőtlen hatásait, mind a lakosságra, mind a környezeti elemekre, vízkörforgásra nézve. A mesterséges felszínburkolatok és épületek a természetestől eltérő hőkapacitásból és albedóból adódóan a felfogott hőmennyiséget sokáig képesek tárolni és kibocsátani magukból, ezáltal a magasabb hőmérsékletet hosszabb ideig fenntartani a környezetben (Unger & Gál, 2017). A vízzáró felszínek esetében a hóhullámos időszakokban a felületükre kerülő vízmennyiség gyorsan elpárolog és emellett a víz beszivárgására sincs lehetőség a mélyebb rétegek felé. A szűk, kanyonszerű utcaelrendezés a belvárosi területeken a hőtöbblet minél hosszabb ideig történő fennmaradását segíti elő. A városok feletti léghőmérséklet akár 4-7 C°-kal is magasabb lehet, amely a párolgás mennyiségében is változást von maga után, akár 5-20%-os növekedéssel is lehet számolni (Gayer & Ligetvári, 2007). Az aszályos időszakokban a felszínalatti vizek kitermelése is fokozódik (lakossági kertek öntözése kutakból), amelyek a

vízciklusra nézve hosszabbtávú kedvezőtlen hatásokkal bírhatnak. A városok területén található tavak, illetve vízfolyások is jelentős mértékű vízszintcsökkenést mutathatnak a hosszantartó aszályos időszakokban. Emellett a felszínalatti vizek szintje is nagymértékben csökkenhet, amely a felszíni növényzetre lehet kedvezőtlen hatással.

### 2.1.3. Várostervezés és vízgazdálkodási rendszerek

A várostervezés feladata, hogy olyan tervezési folyamatokat hozzon létre, amelyek tompítják és módosítják a városban környezeti elemekkel kapcsolatos problémákat. A modern várostervezésnek fel kell készülnie a szélsőséges időjárási helyzetek kezelésére, amelyek kialakulására nagyobb eséllyel számíthatunk a klímaváltozás eredményeképpen (Balatonyi et al., 2021). Mivel fokozódhat a villámárvizek, vagy a súlyosan vízhiányos időszakok száma és hossza a fentebb bemutatott vízciklusbeli eltolódások tovább rontják a városok ezzel szembeni ellenállóképességét (Jha et al., 2012; Schmitt et al., 2004; Van de Ven, 1990). Komoly kihívás, hogy noha a városi elöntések során jelentkező víztöbblet aktuálisan jelentős károkat és fennakadásokat okozhat, ez a számottevő vízmennyiség a legtöbb esetben hasznosulás nélkül kikerül a város vízkörforgásából és egy későbbi aszályos periódusban vízhiány jelentkezik (Buzás, 2012; Gayer & Ligetvári, 2007). A vízzáró felszínek aránynövekedése alacsony csapadékkal párosulva extrém mértékben lecsökkenti a beszivárgást, ami vízellátási problémákat, kedvezőtlen mikroklímát okozhat és drasztikusan csökkenti a városi növényzet aszály toleranciáját (Buzás, 2012; Gayer & Ligetvári, 2007). A klímaváltozás tükrében fontos **rendszer szemléletben gondolkodni** és előnyben részesíteni a **komplex csapadékvíz-kezelést** a hagyományos szemléletű egyszerű csapadékvíz elvezetéssel szemben (5. ábra). Noha a városokban a csapadék esetén jelentkező víztöbblet „kordában tartásának” szükségességéhez nem fér kétség, ugyanakkor a csapadékeloszlás nagy tér- és időbeli bizonytalansága miatt elengedhetetlen a komplex csapadék-visszatartó rendszerek alkalmazása is (Kabisch et al., 2016; Romnée et al., 2015; United Nations Environment Programme, 2009). Ennek az egyik legsokoldalúbb eszköze a zöld- (és kék-) infrastruktúra elemeinek széleskörű alkalmazása.



5. ábra A hagyományos és fenntartható vízkörforgási rendszerek közötti különbségek (Hoban & Wong, 2006 alapján)

A városi növényzeti rendszer (legyen az magán vagy közterületi) alapvetően többnyire ember alkotta, ezért a természetes ökológiai folyamatok nem mindig érvényesülnek megfelelően pl. súlyosan sérül a természetes vízellátása, vagyis mesterséges öntözést igényel a száraz, aszályos időszakokban. A fenntarthatóság szempontjából kiemelt szempont, hogy a csapadékos időszakokban minél hatékonyabb beszivárgást (infiltrációt) érjünk el, illetve a városi

zöldfelületek öntözését minél nagyobb részben a csapadékos időszakból származó eltározott vízmennyiségből fedezzük.

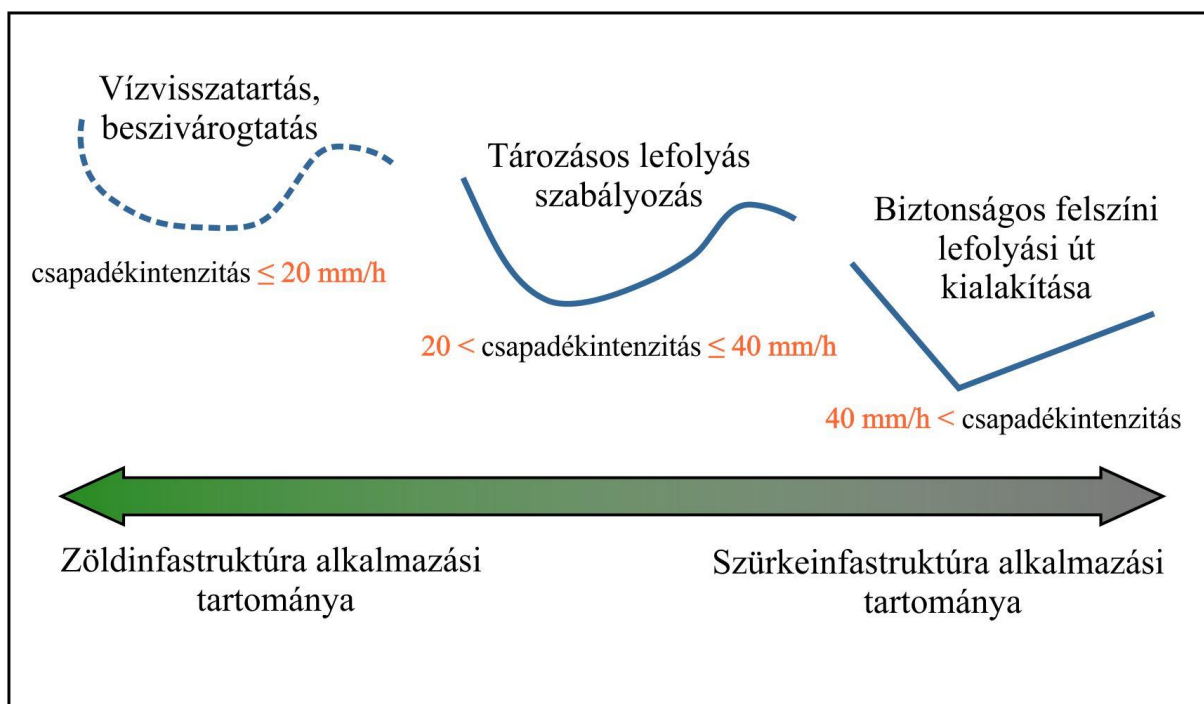
Egy város különböző területein a talaj, növényzet és a vízzáró felületek arányaiban jelentős eltérések mutatkozhatnak. A vízelvezető rendszerek elégséges kapacitásának tervezésében ennek figyelembevétele különösen fontos, hiszen az eltérő arányok eltérő lefolyást, evapotranszpirációt és infiltráció eredményeznek (Li et al., 2018; Thorndahl et al., 2006). Ugyanakkor nem csupán a növényzet megléte, hanem a minősége is meghatározó lehet, ezért ennek mélyebb analizését is szükséges bevonnai a felszínborításon alapuló városi hidrológiai vizsgálatokba (Romnée et al., 2015; Salvadore et al., 2015).

#### 2.1.4. Vízgazdálkodási rendszerek

Az antropogén hatások és igények, valamint a hidrológiai folyamatok rendszerbe foglalásában a települési vízgazdálkodásnak főszerep jut. Ez több olyan műszaki és gazdasági tevékenység összesége, amelyek tervszerűen, keretrendszerben és rendszeresen valósulnak meg. Céljai között szerepel a víz okozta károk megelőzése és elhárítása, illetve a gazdasági oldalról nézve a vizek nyújtotta előnyök hasznosítása. A vízgazdálkodás összetettségét az adja, hogy az adott térségben fellépő igények – mennyiségi és minőségi – kielégítésre való törekvés a cél, azonban szem előtt tartva a vízhasználatokból eredeztethető gazdasági hasznosulást is (Stelczer, 2000). A települési vízgazdálkodás olyan szolgáltatások és tevékenységi körök összesége, amelyek biztosítják az ivóvízhasználatot (lakossági, intézményi és ipari felhasználók számára), de ide tartozik a keletkezett szennyvizek tisztítása és elhelyezése környezeti és közegészségügyi szempontok alapján. Ezek alapján tehát a városi vízrendszer több alrendszert foglal magába, egyrészt az ivóvízellátó, illetve a szennyvíz és csapadékvíz elvezető-tisztító rendszereket. A klímaváltozáshoz való alkalmazkodás tekintetében kiemelten fontos szempont a település területét jelentkező csapadékvizek kezelése: elvezetése, tározása és a szennyező anyagok megkötése (Buzás & Somlyódy, 2011; Buzás, 2015). A csapadékvíz-gazdálkodás jóval több mint egyszerű elvezetés, hiszen magában foglalja a belterületi vízviasszatartás elősegítését, illetve hasznosítását, ezáltal az elvezető hálózatok tehermentesítését és a vizek mennyiségi és minőségi védelmét. A csapadékvíz-gazdálkodás egyik fő eleme a csapadékvíz-gyűjtés, amely a mellett, hogy jelentős mennyiségű (később hasznosítható) vizet tart vissza a rendszerben kedvező hatással lehet a mikroklímára, a biodiverzitás növekedésére és így közvetett és közvetlen módon a lakosság jólétére is (Balatonyi et al., 2020). A klímaváltozás okozta szélsőséges időjárási események sok esetben a csapadékin tenzítés nagymértékű növekedésével járnak. Az intenzitás alapján három csoportba sorolhatóak a csapadékok és ez a beosztás segíthet abban, hogy milyen jellegű infrastrukturális beavatkozásokra van szükség. A nagy intenzitású csapadékok esetében (20 mm/h felett), illetve a kimondottan a magas intenzitású események esetében (40 mm/h felett) szürke infrastruktúra alkalmazása szükséges, mivel a biztonságos elvezetés és szabályozás ennek segítségével oldható meg. A zöldinfrastruktúra szerepe leginkább a 20 mm/h-nál kisebb intenzitású csapadékok esetében nő meg, vagyis a lokális vízviasszatartásban és a beszivárogtatásban emelendő ki, illetve a reziliencia növelésében szintén nagy hangsúlyt kap az alkalmazása (6. ábra) (Buzás, 2015).

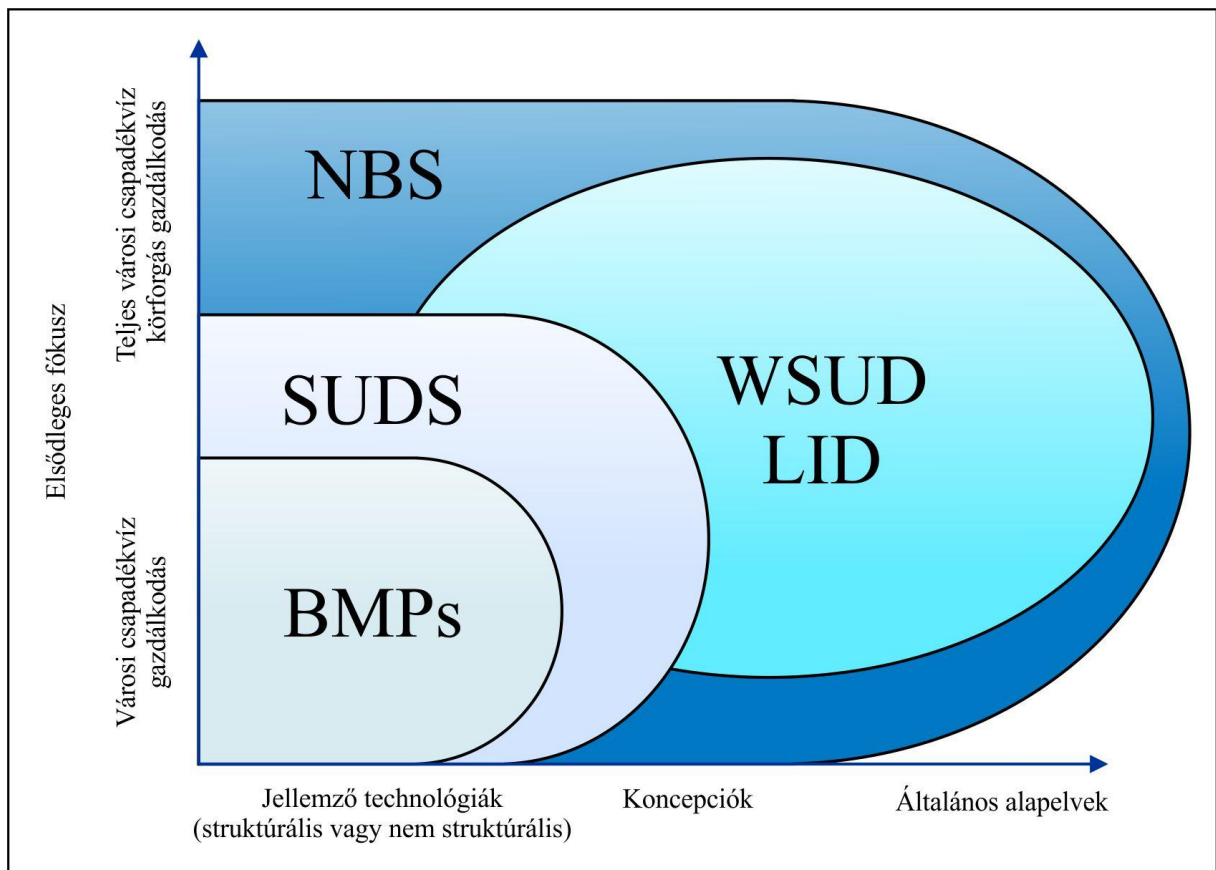
A klímaváltozással kapcsolatos jövőbeni előrejelzések következtében a modern várostervezési folyamatokkal szemben elvárás, hogy a tervezési folyamatok fenntartható módon valósuljanak meg (Kabisch et al., 2016; Romnée et al., 2015; Tóth, 2019; UNEP, 2009). A fenntarthatóságot fő szempontként kezelő városi vízgazdálkodástervezési rendszerekre manapság már több példát is találunk. A legismertebbek ezek közül az ún. LID (Low Impact Development), amelyet az Egyesült Államokban fejlesztettek ki az 1970-es, 1980-as évek fordulóján; a SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems), amelyet az 1990-es években vezettek be és a WSUD (Water Sensitive Urban Design), amelynek használata szintén 1990-es években kezdődött Ausztráliában (Dietz, 2007; Fletcher et al., 2013, 2015; Mak et al., 2017; Palla & Gnecco, 2015, Woods-Ballard et al., 2007). Ezek a rendszerek szerteágazó referenciával, módszertannal és megvalósított projektekkel rendelkeznek. Többnyire

angolszász területeken fejlesztették ki őket, de keretrendszerüket több más ország is átvette (7. ábra).



6. ábra a zöld- és szürkeinfrastruktúra alkalmazási tartománya a csapadékvíz-gazdálkodásban, a különböző csapadékintenzitások figyelembevételével (Buzás, 2015 alapján)

Ezek a rendszerek a különböző területi és tervezési hagyományokból adódóan néhány tekintetben különbözhetnek ugyan, azonban céljaik többnyire megegyeznek. Ilyen például a természetes hidrológiai ciklus elemeinek helyreállítására való törekvés a város területén, illetve, hogy elősegítsék vízvisszatartást (csapadékvízgyűjtés és tározás). Fontos szempont a vizek minőségének megőrzése és helyreállítása (a szennyezés minimalizálása), illetve a diszturbancia mértékének csökkentése a vízi környezetekben (United States Environmental Protection Agency, 2007). Kiemelendő a minél kisebb mesterséges beavatkozásra való törekvés és a városi vizek környezeti szempontú kezelése (Credit Valley Conservation, 2010b; Department of Water and Environmental Regulation, 2007; Dietz, 2007; Elliott & Trowsdale, 2007; Fletcher et al., 2015; United States Environmental Protection Agency, 2007; Woods-Ballard et al., 2007). Mindhárom rendszer alapelveiben kulcsszerep jut a zöldinfrastruktúra megfelelő integrálásának (Romnée, 2015). Ezekben a rendszerekben a zöldinfrastruktúra központi szerepet játszhat a mesterséges mérnöki elemek és megoldások kiegészítésében (Johnstone et al., 2012). Ezek mellett a már bevált és nemzetközileg ismert rendszerek és koncepciók mellett léteznek újabb kezdeményezések is mint a „Sponge City” projektek Kína (pl. Vuhan) és Európa (pl. Berlin) egyes nagy városaiban (Chan et al., 2018). A Sponge City koncepció Kínában született és a már létező rendszereket is felhasználja, implementálja úgymint a LID, WSUD, Best Management Practices (BMPs) (Jiang et al., 2018; Lancia et al., 2020). A Sponge City projektek célja új megközelítéseket alkalmazni a városi csapadékvíz-gazdálkodás és árvízvédelem tekintetében, amelyeknek járulékosan pozitív hatása lehet a városklíma szélsőségeinek mérséklésében is, így kedvezően befolyásolva kedvezően a városi életminőséget. Fontos cél a városi lefolyáscsúcs csökkentése, a csapadékvíz ideiglenes tározása és újra felhasználása. Emellett kiemelendő a természetes víztestek beintegrálása a komplex vízmegtartó és elvezető rendszerbe és egyéb zöld megoldások kiépítése (zöldtetők, infiltrációs terek) (Köster, 2021). Ezen újítások fontos szerepet játszhatnak a fenntartható megoldások terjesztésében.



7. ábra A különböző vízgazdálkodási rendszerek és természet alapú megoldások közötti kapcsolat (Qi et al., 2020 alapján)

Ahogy a világ legtöbb táján, úgy Magyarországon is jelentős problémát okozhatnak az aszályos időszakok, ennek ellenére a csapadékvizek helybentartásának kérdése sem térségi sem városi szinten nem megoldott (Balatonyi et al., 2020). A mezőgazdasági területeink mellett talán a településeket érinthetik leginkább az éghajlatváltozás negatív hatásai. Ennek oka, hogy a településeinken koncentrálnak a népesség és a gazdasági folyamatok döntőrésze, ezért tekinthetjük őket magas kockázatúaknak (kített, sérülékeny) az éghajlatváltozás szempontjából. A településeink sérülékenységet tetézheti, hogy sok városunk aszálynak kített vagy árvízvel, belvízzel veszélyeztetett területen helyezkedik el (Buzás, 2015). Az aszályos időszakok okozta problémák többnyire a mezőgazdasági területekre jelentenek magas kockázatot, de a klímaváltozás tükrében, meghatározó tényezővé válhatnak és hatásaik akár a települések életére is hatással lehetnek (Balatonyi et al., 2020). A fentebb részletezett problémák megoldására rendszer-, vízgyűjtőszintű megoldásokat kell felmutatni, interdiszciplináris összefogással. A megoldásoknak figyelembe kell venni a hazai közigazgatási szinteket is, hiszen a tudományos alapú megoldásokat, a rendszer minden szintjével együttműködve lehet csak érvényesíteni. Ebben kell helyet találni a városi szintnek is, mivel a város az azt körülölelő környezet hatásaitól nagymértékben függ.

## 2.2. A városi növényzet, zöld-kékinfrastruktúra

A városi zöldfelületek (urban green spaces, UGS) olyan területek a településen belül, amelyeket teljesen vagy részben vegetáció borít (gyep, cserje vagy fa borítás), függetlenül attól, hogy köz- vagy magánterületen helyezkednek-e el. A városi zöldterület ezen belül egy szűkebb területhasználati kategóriát jelent: amely zöldfelülettel részben vagy egészben borított közterület, sajátos jogszabályi kötelezettségekkel és különböző funkciókkal (pl. közkertek, közparkok, fasorok stb.) A növényzet rendkívül sokrétű városökológiai szereppel bír a mikroklíma szabályozástól, a biodiverzitás emelésén a levegőminőség javításán és a

vízgyógyítás fenntarthatóbbá tételén át a lakosság mentális jólétének fokozásáig (Ayala-Azcárraga et al., 2019; Báthoryné et al., 2021; Cheng et al., 2021; Kolcsár et al., 2021; Niță & Ioja, 2020; Razak et al., 2016). Ebből adódóan védelme, fejlesztése és a hozzáférés biztosítása a városlakók számára kiemelten fontos (Kolcsár & Szilassi, 2018).

A növényzet aránya városrészenként jelentősen eltérhet, jellemzően a beépített városközpontokban és ipari területeken a legalacsonyabb, a városközponttól kifelé haladva a családi házas, illetve lakóparkos városrészekben nő, ezért fontos a városrészenkénti ismeret a növényzet városi környezetre gyakorolt hatásairól.

### 2.2.1. A zöld- és kékinfrastruktúra és a természetalapú megoldások kapcsolatrendszere

A zöldinfrastruktúra egy rendkívül komplex rendszere és megközelítési módja a természeti elemek hálózatba rendezésének, ebből adódóan a fogalma is számos nézőpontot tükröz. Mivel viszonylag új és interdiszciplináris fogalomról van szó, így meghatározása sem egységes, szakirodalmanként és országoként is eltérhet, ám bennük számos közös tartalmi elem van.

A zöldinfrastruktúra alatt alapvetően természetes és félig természetes területeket értünk, amelynek elemei stratégiaileg megtervezettek és hálózatba rendezettek. A pontos tervezés és irányítás célja, hogy a zöldinfrastruktúra elemek minél szélesebb körű ökoszisztéma szolgáltatásokat nyújthassanak (European Environment Agency, 2012a; Hoyk, 2021b; Kollányi et al., 2017a,b). A zöldinfrastruktúra sok esetben a hagyományos megoldásokkal szemben kíván olcsóbb és fenntarthatóbb, természetes alternatívákat nyújtani. A szürke infrastruktúrával szemben a természetes megoldásokat helyezi előtérbe, jó kiegészítője lehet a mesterséges elemeknek és sok esetben ki is válthatja azokat (Hoyk, 2021b; Kollányi et al., 2017a,b). Szürke infrastruktúra alatt a mesterséges, legtöbb esetben valamilyen vízzáró anyagból álló (beton, aszfalt) elemeket értünk, amelyek a városi vízgazdálkodáshoz kötődően lehetnek például csatornák, utak, elvezető árkok, illetve az ehhez kapcsolódó vízmozgató berendezések. Nem kérdés, hogy a hagyományos szürke infrastruktúrára is szükség van a városi területeken, hiszen sok esetben csak ezek tudják biztosítani a megfelelő csapadékvízvezetést egy-egy nagy intenzitású csapadék esetén, ezért a két infrastruktúrát együtt szükséges alkalmazni. A zöldinfrastruktúrát kombinálva a hagyományos elemekkel, komplex megoldások teremthetők, amelyeknek megvan a potenciáljuk, hogy csökkentsék az extrém és nem várt hatásokat is (Berland et al., 2017; Liu et al., 2015; Prudencio & Null, 2018). A zöldinfrastruktúra rendszer központi részét a városokban a zöldfelületek és zöldterületek alkotják, ezért a városi növényzetet kiemelt jelentőséggel szükséges kezelni. A zöldinfrastruktúra előnyei és hozadékai több szinten csoportosíthatók, a városi vízgazdálkodáshoz és mikroklíma javításhoz több módon járulhat hozzá (Táblázat 1.).

*Táblázat 1. A zöldinfrastruktúra által biztosított előnyök (Kollányi et al., 2017b alapján)*

Környezeti előnyök	A klímaváltozás hatásainak mérséklése
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiszta víz biztosítása</li> <li>• Levegő és víztisztítás</li> <li>• Erózió védelem</li> <li>• Esővíz visszatartás</li> <li>• Környezetminőség javítása</li> <li>• A talajpusztulás és degradáció mérséklése</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Árvízi csúcsok csillapítása</li> <li>• Az ökoszisztémák megerősítése</li> <li>• A szénmegkötés, raktározás elősegítése</li> <li>• A városi hősziget hatásainak csökkentése</li> <li>• Haváriák megelőzése, hatásainak mérséklése (vihar, árvíz)</li> </ul>

Napjainkban egyre több és több ország ismeri fel a zöldinfrastruktúra szerepét az urbanizáció okozta vízkörforgásban bekövetkező negatív hatások mérséklésében. Ezekkel az eszközökkel a városi vízgazdálkodás fenntarthatóbbá és költséghatékonyabbá tehető, illetve a

városok is élhetőbbé válhatnak a lakosaik számára. A zöldinfrastruktúra szerepe elsősorban a puffereképességében rejlik, hiszen természetes tompító folyamatokat építhet be mesterséges környezetbe (Berland et al., 2017; Kuehler et al., 2017). Alkalmazása elősegítheti a vízvisszatartást és ezáltal a csapadékvíz elvezetőrendszerekre gyakorolt terheit is csökkentheti. A zöldinfrastruktúra a növényzet segítségével hozzájárulhat a felszíni lefolyás csúcsvízhozamának csökkentéséhez, illetve csökkentheti a vizek szennyezőanyag koncentrációját (European Environment Agency, 2012a; United States Environmental Protection Agency, 2008). Más meghatározások a zöldinfrastruktúra azon előnyét emelik ki, hogy egy hibrid hidrológiai-elvezető hálózatot kíván létrehozni a városban fennmaradó növényzeti felszínnek és az épített infrastruktúra összekapcsolása segítségével, fokozva az ökológiai előnyöket (Ahern, 2007). A zöldinfrastruktúra rendszerek a városokban magukban foglalhatják a fenntartható csapadékvíz-gazdálkodási rendszerek megoldásait és elemeit (LID, SUDS, WSUD). A fenntartható városi vízgazdálkodási rendszerek részeként a zöldinfrastruktúra mellett fontos kiemelni a kékinfrastruktúra szerepét. A kékinfrastruktúra elemek alapvetően a vízhálózat természetes vagy féltermészetes elemeiként határozhatók meg, amelyek városi környezetben is megtalálhatók (Brears, 2018; Haase, 2015). A zöld- és kékinfrastruktúra hálózat számos elemre bontható. Léteznek beosztások, amelyek a kisebb léptékű elemektől kezdve a nagyobb méretűekig kategorizálnak (Táblázat 2.), míg a klasszikus kategória rendszer a városi, regionális, országos elkülönítést alkalmazza (Kollányi et al., 2017b).

*Táblázat 2. A zöldinfrastruktúra különböző léptékű besorolása (Kollányi et al., 2017b alapján)*

<b>Épületek szintjéhez kapcsolódó ZI</b>	<b>Utca szintű zöldfelületi elemek</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zöldtető</li> <li>• Zöldfal</li> <li>• Áteresztő burkolatok (járdák)</li> <li>• Csapadékvízgyűjtő rendszerek</li> <li>• Kertek, esőkertek (raingarden)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Áteresztő burkolatok (parkolók, utak)</li> <li>• Fasorok, zöldsávok</li> <li>• Vízvisszatartó eszközök</li> <li>• Beszívárogtató elemek</li> <li>• SUDS, LID elemek</li> </ul>
<b>Városrészsztintű zöldinfrastruktúra elemek</b>	<b>Térségi szintű zöldinfrastruktúra hálózatok</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temető</li> <li>• Városi parkok</li> <li>• Rekreációs területek</li> <li>• Sportpályák és játszótérek</li> <li>• Swale-ok</li> <li>• Városi tavak</li> <li>• Kisebb vízfolyások, csatornák</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erdőterületek</li> <li>• Gyep</li> <li>• Ökológiai hálózat elemei</li> <li>• Természetes és féltermészetes zöldfelületek</li> <li>• Nagyobb vízfolyások, tavak</li> </ul>

A zöldinfrastruktúra mellett említésre méltó a természet alapú megoldások (nature-based solution (NBS)), amely kimondottan népszerű napjaink várostervezésében (Frantzeskaki, 2019). Az utóbbi években a nemzetközi terminológia is kiemelten kezeli azokat a rendszereket, amelyek kihasználva a természetes folyamatok előnyeit a városok „visszatermesztésére”, törekszenek, javítva ezzel a környezet és az élet minőségét. Az NBS megoldásokat a természetes folyamatok inspirálják és támogatják, amely a klímaváltozás következtében fellépő szélsőségek és ökológiai problémák tükrében kiemelt jelentőségű (Maes & Jacobs, 2017). Az NBS-ek kissé tágabban értelmezendők, mint a zöldinfrastrukturális megoldások, mivel az ismert ökoszisztéma alapú megközelítések mellett (pl. ökoszisztéma-szolgáltatások, zöld-kékinfrastruktúra) olyan módszereket is tartalmaznak, mint például komposztálás, legeltetés stb. (Anastova et al., 2021; Kabisch et al., 2016, 2017; Nesshöver et al., 2016; Raymond et al., 2017, 2019). A természet alapú megoldásokat felvonultató fenntartható városi vízgazdálkodásban a

legfontosabb cél a lefolyási útvonalak visszaállítása a természetes közeli állapotukba, így várhatóan a jövőben a kék-zöld urbanizáció (Blue-Green Urbanization) fontos szerepet kap a várostervezésben (Brears, 2018). Természetalapú megoldásokkal a lakosság jólétét szem előtt tartva javíthatjuk a városok ellenálló képességét (Ioja et al., 2014). Az ökoszisztéma szolgáltatások (pl.: a víz/zöld felületek kulturális/társadalmi szolgáltatásai, a zöldinfrastruktúra pufferhatása) és az NBS-ek támogathatják e célok elérését (Kabisch et al., 2016; Frantzeskaki, 2019).

### 2.2.2. A növényzet városi vízgazdálkodásban betöltött szerepe

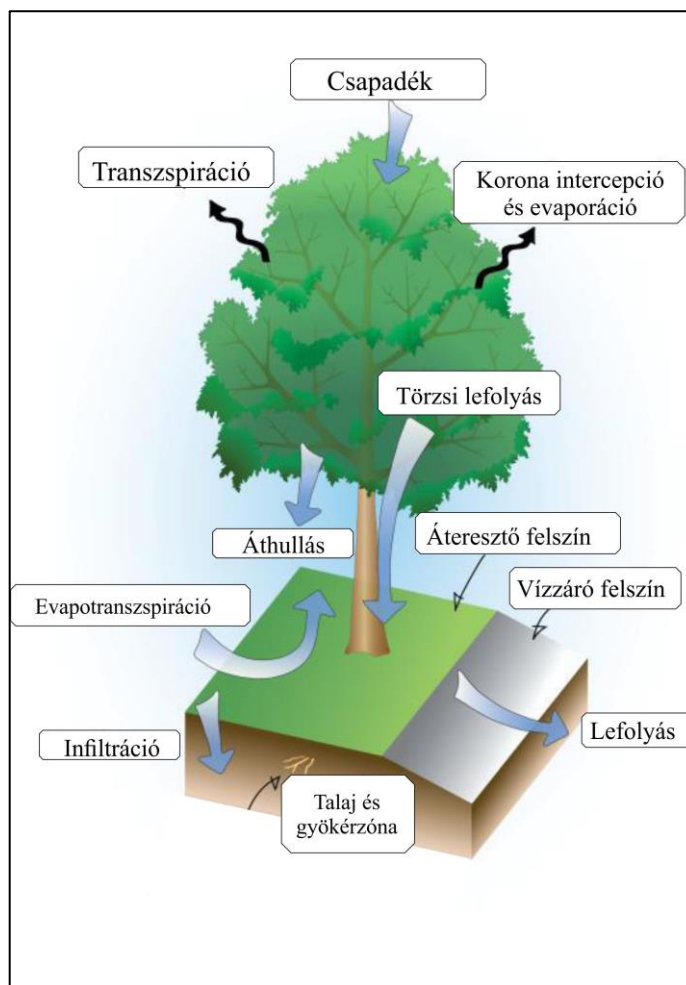
Városi környezetben a sűrű beépítettség miatt általában nem találhatóak meg nagy, egybefüggő növényzeti felszínek, ezért minden kisebb méretű növényzettel borított terület fontos része lehet a városi ökoszisztémának. Ezek a területek részt vesznek a csapadékok hatékonyabb hasznosulásában (infiltráció elősegítése), a csapadékvíz elvezetőrendszerek tehermentesítésében (pl.: lefolyás csökkentés), a város mikroklímáját jellemző negatív hatások tompításában, illetve a különböző forrásokból származó (mezőgazdasági ipari, közlekedési) szennyezőanyagok megkötésében (Berland et al., 2017; Xiao & McPherson, 2002).

A zöldinfrastruktúra elemei közül – a méretükből, fiziológiai tulajdonságaikból és komplexitásükből adódóan – a fák jelentősége kiemelkedő. Jelentős szerepük lehet a városi hidrológiai körforgás elemeire, mivel nagy felületen képesek interakcióba lépni a csapadékkal (Berland et al., 2017; Fazio, 2010; Herrera Environmental Consultants, 2008; Holder & Gibbes, 2016; Huang et al., 2017, Kuehler et al., 2016; Xiao & McPherson, 2002). A városi fák és egyéb növényzeti típusok (lágyszárú vegetáció, cserjék) tompító hatását egyre inkább felismerik a várostervezésben és alkalmazzák őket az urbanizáció vízkörforgásra gyakorolt hatásának mérséklése érdekében (Brears, 2018; Chazimontor et al., 2020). A fák a szállópor és egyéb légszennyező anyagok tekintetében jelentős megkötő tulajdonsággal bírhatnak, amely kiemelt probléma a száraz, aszályérzékeny területeken (McDonald et al., 2007; Nowak et al., 2006).

A városi növényzet legfontosabb alkalmazási lehetőségei az ideiglenes vízvisszatartásban és a felszíni lefolyás csökkentésében mutatkoznak meg. A csapadékvíz helybentartása a fenntartható vízgazdálkodási rendszerek egyik legfontosabb eleme, amelyben fontos szerep jut a növényzetnek. A fák kapcsolata a vízzel igen sokrétű, amely számos részfolyamatból tevődik össze: ilyenek az intercepció, az evaporáció, a transzspiráció (a kettőt gyakran összevonva evapotranszspirációként elemezzük) illetve közvetett módon az infiltráció. Ezek segítségével a fák hozzájárulnak a felszíni lefolyás csökkentéséhez és a mikroklímatis körülmények (pl. páratartalom) megváltoztatásához (Berland et al., 2017) (8. ábra).

Az intercepció (interception) a növényzet szempontjából a csapadékvíz felfogását, ideiglenes visszatartását jelenti a levél, a törzs és egyéb lombkorona szerkezeti elemek felszínén, (Xiao et al., 1998). Hatékonysága faj és életkor függő, a nagy tömeggel rendelkező, tagolt és nagy felületi érdességű lombkorona hatékonyabb intercepciót eredményez. Különbséget tehetünk intercepciós hatékonyság tekintetében a lombhullató és tűlevelű fajok között is. A tűlevelűek egyrészt a lombkoronájuk felépítéséből adódóan nagyobb összlevélfelülettel rendelkezhetnek, másrészt ezen fajok jelentős része örökzöld, így a csapadék felfogásában hosszabb időszakban képesek részt venni (Xiao & McPherson, 2011). Mindkét tényező elősegítheti a magasabb intercepciós hatékonyságukat. Az intercepció révén a csapadékesemények alatt csökken a felszínre elérő vízmennyiség, így a lefolyás is, ezzel csökkentve a városi villámárvizek kialakulásának esélyét (Bahmani et al., 2012).





8. ábra A fásszárú vegetáció és a csapadék interakciói ([2] alapján)

A lombkorona/csapadékvíz interakció három nagyobb szakaszra osztható: Az első az ún. *nedvesedési* szakasz, melynek kezdete a csapadékhullás elejére tehető, a végét pedig a lombkorona teljes telítődése jelenti. A második, ún. *telítettségi* szakaszban a telítődött lombzat nem képes több csapadékvizet ideiglenesen tározni, így a többlet vízmennyiség lecsepeg (canopy drip) a felületéről vagy a törzsön lefolyva (stemflow) a felszínre kerül. Az a csapadékvízmennyiség, amely direktben áthullik a lombkorona résein ún. áthullás (throughfall) komponensként eléri a felszínt és a lefolyó vagy beszivárgó vízmennyiség részévé válik (Móricz et al., 2009; Xiao & McPherson, 2011 Zagyvainé, 2014). A csapadékesemény befejeződését követően kezdődik el az utolsó ún. *száradási* szakasz, amely során a lombkorona felületéről evaporáció révén távozik az ott tározott vízmennyiség. E folyamat hossza a hőmérséklet-, szél- és páratartalom viszonyoktól függő. A kisebb intenzitású csapadékok során, sűrű lombkorona esetén a víz sok esetben el sem éri a felszínt, azt teljes mértékben felfogja a fás vegetáció (Móricz et al., 2009). Nagy intenzitású csapadékhullás esetében azonban az intercepció kevésbé hatékony.

A mesterséges felszínborítási elemek magas aránya és talajok nagymértékű degradációja a városokban jelentősen akadályozza a beszivárgást (infiltráció). A fák fejlett gyökérrendszerük közreműködésével közvetett módon ezt a tényezőt is javítják. A faállomány jelentősége azonban csapadékszegényebb időszakokban sem kevésbé jelentős. A mikroklímátikus viszonyokat az evaporáció (evaporation) és a transzspiráció (transpiration) segítségével ilyen időszakban is javítják (Berland et al., 2017). Ezek alapján a fák – más zöldinfrastrukturális elemekhez hasonlóan, bár azoknál nagyobb mértékben – pozitívan képesek befolyásolni a városi hidrológiai ciklust (Berland et al., 2007; Staelens et al., 2008; Xiao & McPherson, 2011).

### 2.2.3. Csapadékvízgyűjtés

A városi felszínborítási és mikroklimatikus viszonyok jelentősen megváltozott életfeltételeket biztosíthatnak a növényzet számára, ahol a lágy- és fásszárúakat felépítésükből adódóan eltérő hatások érik. A lágyszárúak esetében az emberek okozta taposás, a burkolatok alkalmazása és a talajok degradációjából adódó állapotromlás jelenthet kiemelt stresszforrást. A kompaktáltság, a mesterséges burkolatok alkalmazása, illetve a következtükben fellépő túlzott vízelvezetés csökkenti a beszivárgást, ezáltal a növényzet számára potenciálisan rendelkezésre álló vízmennyiségét (Salvadore et al., 2015). A fásszárú vegetációt a taposás okozta degradáció kevésbé érinti, azonban a talajok kompaktáltsága, vagy a felszín alatti infrastruktúra a fák gyökérrendszerének hatékonyságát csökkentheti. A felszín felett a lombkoronametszés okozhat problémát, amely jelentős fotoszintetizálófelület-veszteséget jelenthet. A problémákat tetézi, hogy a városi növényzet általában mesterségesen ültetett, ebből adódóan a száraz, városi környezetben fenntartása is sok esetben emberi beavatkozást igényel. Egyik leggyakoribb ilyen beavatkozási igény, a degradált vízciklusból adódó vízhiány kezelése (Nouri et al., 2013). E problémára az öntözés az egyik hagyományosan alkalmazott megoldás, ami azonban jelentős terhet ró a városüzemeltetésre és városi vízrendszerre (Lowry et al., 2011). Amennyiben a lokális csapadék mennyisége nem elégséges erre a célra (vagy azért, mert összegében túl alacsony, vagy, mert a beszivárgás annyira akadályozott), akkor más forrásokat szükséges bevonni. Általában az ivóvíz és a talajvíz a két legelérhetőbb vízforrás erre a célra azonban egyik sem fenntartható megoldás. A legfenntarthatóbb megközelítés a hagyományos öntözővízforrások kiváltására vagy/és kiegészítésére az összegyűjtött esővíz felhasználása (tetők, parkolók stb. felületéről) (Campisano et al., 2017; Leong et al., 2018; Velasco-Muñoz et al., 2019). A fenntartható városi vízgazdálkodási rendszer részeként a megfelelő kapacitásban alkalmazott, integrált szemlélettel kialakított csapadékvízgyűjtő rendszerek (rainwater harvesting systems (RWHS)) megfelelő eszközök lehetnek a városok fenntarthatóbbá tételére (Torres et al., 2020). A csapadékvízgyűjtéssel kapcsolatos kutatásokban alapvetően két különböző megközelítést alkalmaznak, a kutatás céljától függően. A PHS-t (pond harvesting systems) általában nagyobb léptékű kontextusban használják, míg az RHS-t (roof harvesting systems) általában kisebb léptékű környezetben (egy épület és környezete) használják (Karim et al., 2021; Liaw & Chiang, 2014; Zabidi et al., 2020). Mindkét megközelítésnél kiemelt szempont a megfelelő gyűjtési helyszín definiálása, amelyre számos térinformatikai eszköz nyújt lehetőséget és segítséget (Sayl et al., 2020). A csapadékvíz-gazdálkodási modellek a csapadékvízgyűjtés becslésében fontos szerephez jutnak, megalapozhatják a tervezését (Steffen et al., 2013). A csapadékvízgyűjtés szerepe a lefolyás és elöntés csökkentésben is kulcsfontosságú a többlet vízmennyiség visszatartásával, amely számos kutatásban elemzésre került (Huang et al., 2015; Jamali et al., 2020; Petrucci et al., 2012).

A csapadékvíz megújuló erőforrásnak tekinthető, amelynek helybentartása hozzájárulhat az ivóvízkészletek védelméhez, illetve a települések ivóvíz importjának csökkentéséhez. Hosszabb távon a csapadékvízgyűjtő rendszerek a fenntarthatósági és környezettudatosági szempontok mellett gazdasági szempontból is előnyt jelenthetnek, hiszen a városi elvezetőrendszerek egyes elemeit kisebbre lehet méretezni és a rendszerek energia felhasználását is csökkenteni lehet. Több vizsgálat alapján a háztartások vízfogyasztásának akár több mint felét is ki lehet váltani a csapadékvízgyűjtéssel (Ward et al., 2012). A gyűjtött csapadékból később kijuttatott öntözővíz a szárazabb, csapadékmentes időszakokban részben elpárolog, így javíthatja a városi mikroklimát és a humán komfortérzetet (Campisano et al., 2017). Az ivóvíz készletek védelme mellett a gyűjtőrendszerek felépítéséből adódóan a városokban a felszíni lefolyás mennyiségét is csökkentheti a csapadékvízgyűjtés, amivel nagy intenzitású csapadékok esetén a városi villámárvizek kockázatát is csökkenteni lehet (Campisano et al., 2017). A csapadékvízgyűjtő-rendszereket, amennyiben nem épülettetőről történik a gyűjtés, olaj- és iszapszűrővel szerelik fel, így a csapadékok által lemosott felszíni

szennyeződések koncentrációjának csökkentéséhez is hozzájárulhatnak. A csapadékvíz gyűjtése során fontos a gyűjtőrendszerek megfelelő méretezése, amely függ attól, hogy lakossági vagy intézményi szintű gyűjtésről beszélünk. A felületek, amelyekről a csapadékvizet a rendszerek összegyűjtik többnyire épülettetők, azonban parkolók és egyéb nagyobb burkolt felszínekről is történhet a gyűjtés. Utóbbiak esetében azonban valamilyen előkezelés (általában szűrők telepítése) szükséges és leginkább kültéri használatra alkalmas az összegyűjtött víz (Georgia Department of Community Affairs, 2009). A gyűjtőtartályok kiépítésénél több lehetőség áll a várostervezés előtt. A csapadékvízgyűjtőket ki lehet úgy alakítani, hogy télen is használhatóak legyenek, ehhez vagy a felszín alá vagy pedig az épületek belsejében kell elhelyezni ezeket. A kültéri tartályok esetében a téli a fagykarok elkerülése érdekében csak szezonális használat lehetséges (Credit Valley Conservation, 2010b; Georgia Department of Community Affairs, 2009; Master Plumbers and Mechanical Services Association of Australia, 2008; Texas Water Development Board, 2005).

#### 2.2.4. Zöldinfrastruktúra és NBS megoldások

Egyre több kutatás és gyakorlati tapasztalat mutat rá, hogy a hagyományos szürke infrastrukturális megoldásokat érdemes ötvözni (esetenként helyettesíteni) zöld megoldásokkal. A kombinációk révén elláthatják a csapadékvíz elvezetési és kezelési feladatokat, javíthatják a városi mikroklímát, de emellett a városkép fejlesztéséhez és a rekreációs lehetőségekhez is hozzájárulhatnak és a fenntarthatósági szempont is jobban érvényesül.

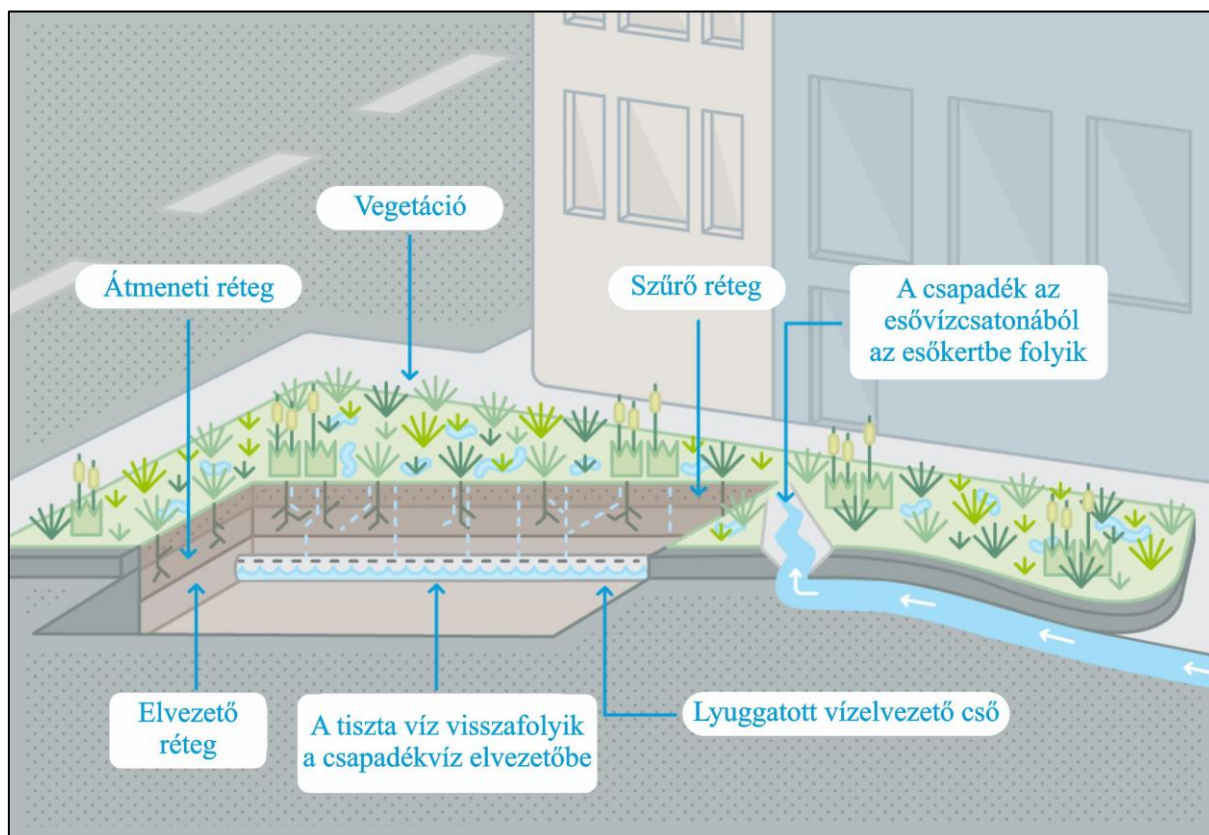
A városi területeken a helyhiány általános probléma és mivel a városszerkezet megváltoztatására kevés lehetőség nyílik, így az új (földfelszíni) zöldfelületek létesítése is nehézségekbe ütközhet. Ezek a problémák leginkább szűk belvárosi területeken jelentkezhetnek, amelyek tervezésénél még nem volt elsődleges szempont a zöldítési irányelvek figyelembevétele. Ezekben a szituációkban jelenthet megoldást a kihasználatlan vertikális és horizontális épületfelületek bevonása a zöldítésbe és ezzel közvetve vagy közvetlenül a csapadékvíz-gazdálkodásba.

A *zöldtetők* általános ismertsége és népszerűsége kiemeli őket a többi alternatív csapadékvíz-kezelési megoldás közül. Zöldtetőnek azokat a megoldásokat nevezzük, amelyek alacsony dőlésszögű lapostetőn vannak kivitelezve, talajkeverékkel borítottak és vegetációval fedettek. Előnyük abban rejlik, hogy a nagyvárosokban jelentős területet képviselnek az épülettetők, amelyek potenciálisan zöldtető kialakításra is alkalmasak lehetnek, így komoly zöldfelület növelési potenciáljuk van (Herrera-Gomez et al., 2017). Alkalmazásuknak számos pozitív környezeti hatása van: például hozzájárulnak a városi mikroklíma módosításához (és a humán komfort javításához) és a csapadékvíz helybentartásához. A tetőre telepítve szigetelőréteggel viselkedhetnek, így növelhetik az épületek energiahatékonyságát (Berardi et al., 2014; Getter & Rowe, 2006; Vijayaraghavan, 2016). A városi hidrológiai körforgásban vízvisszatartás és késeltetés révén hozzájárulnak a felszíni lefolyás csökkentéséhez, így csökkentve a heves csapadékesemények csúcsvízhozamát (Berardi et al., 2014; Carpenter et al., 2016). Emellett párologtatásukkal pozitív irányba befolyásolhatják a mikroklímát. A zöldtetők két főbb típusát különböztethetjük meg. A vékonyabb talajréteggel és kisebb növényzeti borítottsággal rendelkező extenzív zöldtetőket, illetve az intenzív zöldtetőket, amelyek lehetővé teszik a többszintű növényállomány telepítését (Credit Valley Conservation, 2010a,b). A két típus közötti átmenetet képviseli a félintenzív zöldtető, illetve a zöldtetőkhöz kapcsolódik a kéktetők fogalma, amelyek nem tartalmaznak zöld elemeket, viszont a csapadékvizek ideiglenes visszatartásához hozzájárulhatnak a nagyvárosi területeken (Pataky, 2016). A zöldtetők felépítése, a rajtuk elhelyezett felszínborító anyagok (talaj, zúzottkő) és az erre telepített növényzet nagyban befolyásolja a csapadékfelfogó és tározó képességüket. Egyes vizsgálatok alapján a csapadék-visszatartó hatékonyság elérheti a 60-70%-ot (bizonyos esetekben akár magasabb is lehet), így a túlterhelt csapadékvíz-hálózat tehermentesítéséhez is hozzájárulhatnak (Berardi et al., 2014; Carpenter et al., 2016; DeNardo et al., 2005; Hoyk, 2021b; Vijayaraghavan, 2016). A zöldtetők további pozitív tulajdonsága, hogy bizonyos

szennyeződések (pl.: nehézfémek, nitrit, foszfát) is megköthetnek, illetve közvetve a vízgyűjtőn tapasztalható erózió mérséklésében is szerepet játszanak (Vijayaraghavan, 2016).

Vertikális kialakítású zöldfelületek a *zöldhomlokzatok*, amelyek a városokban jelenlévő nagy mennyiségű függőleges falfelület zöldítésre adnak lehetőséget, különösen a szűk belvárosi területeken, ahol nem nyílik lehetőség a talajszinti zöldítésre. Csapadékelfogó képességük alacsonyabb a zöldtetőkénél, illetve a mesterségesen kialakított zöldhomlokzatok esetében több energiát kell a fenntartásukra fordítani, azonban jelentős mikroklima módosító hatással bírhatnak, illetve az épületek energiahatékonyságát is növelhetik (Medl et al., 2017; Pataky, 2016).

Számos más olyan zöld megoldás létezik, amelyeket a különböző fenntartható csapadékvíz-gazdálkodási rendszerek vagy NBS tervezésekor alkalmaznak.



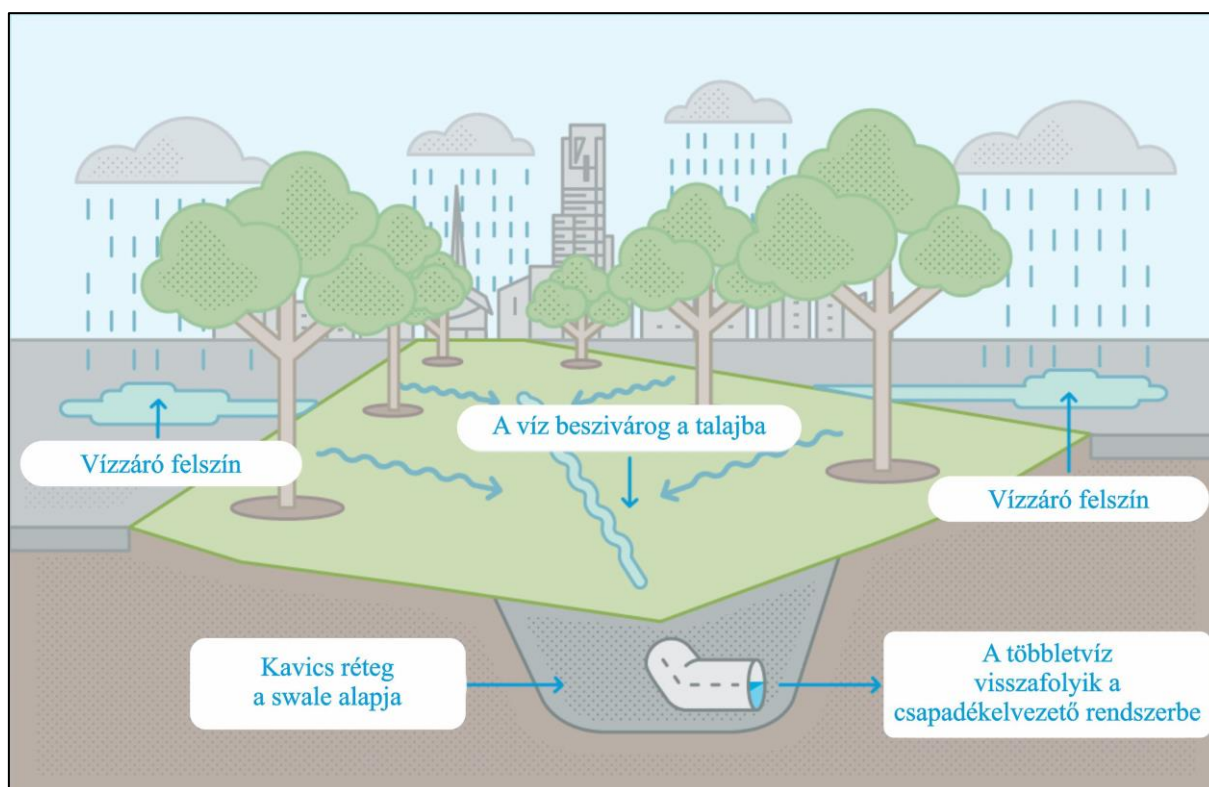
9. ábra Az esőkertek sematikus felépítése ([3] alapján)

Az *esőkerteket* (rain garden) előszeretettel alkalmazzák olyan területeken, ahol növényzetet kívánnak elhelyezni, de emellett lefolyáscsökkentés és a csapadékvíz visszatartás is szempont. Formájuk és méretük változatos lehet, az elnyújtottabb formáktól kezdve a kompaktakig. Ilyenre lehet példa az úttest és gyalogos járdák közötti elválasztó sávban vagy épületek előterében történő alkalmazás (9. ábra). Növényborításuk változatos, melynek képesnek kell lennie a hosszabb, csapadékmentes időszakok, illetve a hosszantartó elöntések elviselésére is. A vízbevezetés helyén erózió megelőző megoldást célszerű alkalmazni, illetve túlfolyóval vezetik le a túlzottan nagy mennyiségű vizet (Credit Valley Conservation, 2010b; Dietz & Clausen, 2005; Hoyk, 2021a; Ishimatsu et al., 2016; Prince George's County, 2002).

A *szikkasztóárkok* hosszúság, árokszerű mélyedések, amelyek felső rétegében zúzott kő vagy kavics található, amely elősegítheti a beszivárgást. A gyepfelülettel borított szikkasztóárok kisebb ökológiai értékkel bír, mint egy esőkert, azonban, így is természetesebbnek tekinthető, mint a hagyományos elvezető rendszer. A gyepfelület és az alatta található kavics és talajréteg természetes szűrőfelületként viselkedik, amely megszűri az

enyhébb szennyeződések. Kombinált megoldásként az ilyen mélyebb fekvésű területek alá akár műanyag szikkasztó ládák is kerülhetnek (Csizmadia, 2018).

A szikkasztóárkoknál nagyobb léptékű megoldások a *záportározó tavak*, amelyek fontos szerepet tölthetnek be a városi csapadékvíz-gazdálkodásban és a zöldfelületi tervezésben egyaránt. Kialakításuktól függően ideiglenes, illetve állandó vízborítással rendelkezhetnek. Elsődleges feladatuk a nagy mennyiségű esőzések következtében kialakult többletvíz tározása. Csökkenthetik az árhullámok csúcsvízhozamát, így a felszíni lefolyás mértékét és a mélyen fekvő városrészek elöntésének kockázatát is. Mivel a záportározók vízforrása elsődlegesen a felszínen lefolyó és a tározóba vezetett csapadékvíz, így különböző szennyezőszűrőket szükséges beépíteni a rendszerbe. A záportározók köré sok esetben változatos felépítésű vegetációt is telepítenek, amely szintén rendelkezhet szennyeződésszűrő funkcióval. A tározó köré telepített növényzet emellett jelentős ökológiai funkcióval is bírhat, mint mesterséges vizesélőhely (Csizmadia, 2018).



10. ábra A swale sematikus felépítése ([3] alapján)

Szintén nagyobb felszíni formák, változatos kiterjedéssel a *swale*-ok, amelyek hosszúság alakúak, vegetációval borított mélyedések, árkok. Többféle változatuk létezik a (gyeppel borított és különböző szárazság tűrő fajokkal borított változatok), de alapvető tulajdonságuk, hogy nyitott csatornaszerű mélyedések, vegetációval fedve, amelyeknek csapadékvíz elvezetésére, a lefolyás késleltetésére, az árhullámcsúcsok csillapítására és a szennyeződések szűrésére alkalmasak (Melbourne Water, 2005; Revitt et al., 2017). Jellemzőjük, hogy a víz bevezetés kavicságyon keresztül történik a nagyobb elöntések esetén túlfolyó csatornanyílásokat is beépítenek a rendszerbe (10. ábra) (Credit Valley Conservation, 2010 a,b).

A városi területeken a vízjáró burkolatok a hidrológia körforgásra jelentős hatást gyakorolhatnak, leginkább a felszíni lefolyás növelése, az összegyülekezési idő csökkenése és ebből adódóan a csúsvízhozamok növekedése a legfontosabb problémák, amelyeknek kialakulásához ezek a felszínek hozzájárulhatnak. A vízjáró felszínekről származó lefolyás jelentős szennyezőket is tartalmazhat (Brattebo & Booth 2003; Xie et al., 2019). Emellett a városi mikroklímára is kedvezőtlen hatást gyakorolhatnak, hiszen a természetestől eltérő

hőkapacitással, illetve albedóval rendelkezhetnek. Megfelelő alternatívái lehetnek a nagyon elterjedt vízzáró felszíneknek a különböző áteresztő burkolatok. Ezek előnye és célja, hogy a felszínen lefolyó csapadékvíz keresztül szivárognon a burkolaton, vagy alkotó elemeinek résein. Ez a lefolyáscsökkentés mellett a talajrétegek vízellátottságát is javíthatja az infiltráció révén (Bean et al., 2007; Brattebo & Booth 2003; Collins et al., 2010; Xie et al., 2019). Az áteresztő felszínek, felépítésükből adódóan legfőképpen olyan területeken használhatóak, ahol a forgalmi terhelés alacsony, ilyenek lehetnek parkolók, terek, sétálóutcák és járdák. A városi vízgyűjtőn a felszíni lefolyás jelentős mértékű szennyeződések tartalmazhat, amelyek a hagyományos vízzáró felszínek esetében kevéssé jutnak a talajfelszínre, mivel az utakról, járdákról közvetlenül a csatornahálózatba kerül a csapadék jelentős része. Áteresztő burkolatok telepítése, olyan területeken javasolt, amelyekről várhatóan kevésbé szennyezett lefolyás érkezik (tetők, parkolók, járdák) vagy pedig megfelelő előkezelő rendszereket szükséges alkalmazni. Téli időszakban a különböző jégtelenítő sók (például KCl), amelyeket utakon és parkolókon használnak, beszivároghatnak a talajvízbe az áteresztő burkolatokon keresztül. Ezen szennyező anyagok, növelhetik a talajokban található nehézfémek mobilizálódását, ezáltal megnövelve a kockázatát a talajvizek szennyeződésének is. Több kutatás azonban azt támasztotta alá, hogy az áteresztő felszínek a csökkenthetik a lefolyó vizek szennyezőanyag terhelését (Bean et al., 2007; Brattebo & Booth, 2003; Gilbert & Clausen, 2006).

Az áteresztő burkolatoknak több típusa létezik, amelyek elnevezésére három angol kifejezés illik leginkább (**permeable, pervious, porous**), azonban a nevezéktan pontos lehatárolása kimondottan nehéz, mivel az eltérő fejlesztési irányokból adódóan sok esetben szinonimaként használják a három kifejezést (Ferguson, 2005). Felépítésük alapján szintén három nagyobb csoportot lehet elkülöníteni: öntött burkolatok, szórt burkolatok és elemes burkolatok (Almási & Csizmadia, 2016). Az áteresztő (porous asphalt) aszfalt (drénaszfalt) és áteresztő (pervious concrete) beton (drénbeton) felszínek esetében, a hagyományos aszfalt és beton burkolatoktól eltérően a felszínre került víz a burkolat anyagán keresztül be tud szivárogni az alsóbb rétegekbe. Ebben az esetben maga a burkolat felülete is részt vesz a víz áteresztésében. Ezen megoldások esetében a felület lehetővé teszi a talajrétegek szellőzését is, szemben a hagyományos vízzáró burkolatokkal. Ez a típus jól alkalmazható olyan felületeken, ahol szükséges a burkolat homogenitása, viszont kiemelt szempont a beszivárogtatás is. Az áteresztő burkolatokról összegyűjtött csapadékvíz (amennyiben a burkolat alatt csapadékvízgyűjtő rendszer is beépítésre került) a gyűjtés felszínétől függően (olajjal szennyezett parkolók vagy gyalogos járdák stb.) minimális előkezeléssel használható lehet kültéri öntözésre, magasnyomású mosásra, de akár mellékhelyiségek vízigényének fedezésére is (Almási & Csizmadia, 2016).

#### 2.2.5. A vegetáció hidrológiai ciklusban betöltött szerepének vizsgálatának tudományos előzményei

A városi hidrológiai modellek fejlesztésének három főbb célja van Salvadore et al. (2015) szerint. Elsőként, hogy elemezze és értékelje az urbanizáció hatását a természetes vízkörforgásra nézve, illetve, hogy bővítse az ismereteket erről a komplex rendszerről. Továbbá mivel a városi környezet rendkívül komplex, a hidrológiai mérések nagyobb kihívást és több mérőpontot jelentenek a városokban, így a modellezés ezek és a megbízható adatok hiányát kompenzálná. Emellett pedig a városi hidrológiai modellek célja különböző előrejelzések kialakítása, scenáriók elemzése, úgymint az árvízi előrejelzés, a felszínborítás és használat változásai, a klímaváltozás lehetséges hatásai a környezetre, így a városokra is.

A városi vízkörforgást számos kutatás során vizsgálták már hidrológiai és hidrodinamikai szempontból. Erdőterületek esetén a növényzet hidrológiai ciklusban betöltött szerepét is részletesen feltárták. Emellett egyedi fák vízháztartási folyamatainak vizsgálatára is találunk (bár sokkal kevesebb) kutatási eredményt városi környezetben, amelyek legfőképpen az fás vegetáció intercepciójának összefüggéseit tárják fel, ami a hidrológiai modellfejlesztés

egy nagyon fontos szegmense (Bahmani et al., 2012; Holder & Gibbes, 2017; Nytch et al., 2019; Staelens et al., 2008; Xiao & McPherson, 2011). A csapadék intercepciójának vizsgálatára a terepi vizsgálatok mellett számos modellezés alapú kutatás látott napvilágot, amelyek a fák csapadékfelfogó képességét tárták fel (Huang et al., 2017; Xiao et al., 1998; Xiao & McPherson, 2002). Az intercepcióval kapcsolatos terepi és modellezési eredmények fontos részét képezik a vegetáció városi vízkörfogását feltáró kutatásoknak, de nem foglalkoznak a növényzet komplex hatásával. Többnyire adott fafajokra terjednek ki a vizsgálatok, illetve a további folyamatok, mint az infiltráció vagy a felszíni lefolyás már nem képezik a kutatások tárgyát. Olyan vizsgálatokból, amelyek során a növényzet komplex városi hidrológiai folyamatokban játszott szerepét vizsgálták, már sokkal kevesebb áll rendelkezésre.

A városi hidrológia felszíni lefolyással kapcsolatos részével nagyszámú kutatás foglalkozik. Ezek rendszerint a felszínborítást veszik a modellezések alapjául, amelyben a növényzet leginkább egy felszínborítási típusként jelenik meg és az eltérő szerkezetű vegetáció tompító folyamatait már nem tárják fel a vizsgálatok. Néhány kutatás során, amelyek például az előntést vizsgálták (Kjeldsen et al., 2013), a felszínborítás városi és vidéki felszínborítási kategóriára került szét bontásra, amelyet nem bontottak részletesebb alkategóriákra. Egyes vizsgálatokban kevésbé koncentráltak a növényzet hatásaira, leginkább a főbb hidrológiai folyamatokat vizsgálták a kutatás során (Schmitt et al., 2004). Az 1960-as évektől használtak szoftvereket a vízkészlet-gazdálkodással kapcsolatban, azonban az 1970-es évektől kezdve kezdtek fejleszteni olyan modelleket, amelyek a csapadékvíz lefolyásának mennyiségi és minőségi modellezésére is lehetőséget biztosítottak (Jayasooriya & Ng, 2014; Zoppou, 2001).

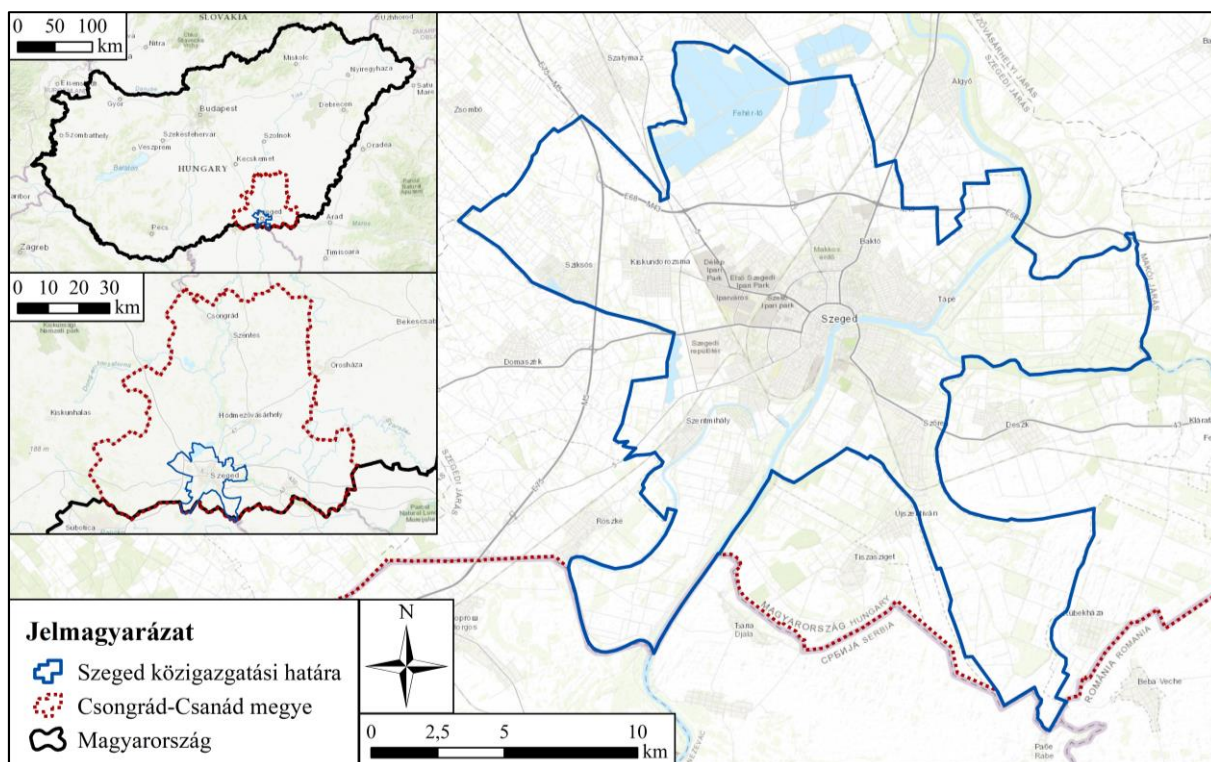
A városi csapadékvíz modellek alapvetően az alábbi részelemeket tartalmazzák: csapadék-lefolyás modell (amelyek a felszíni és felszínalatti lefolyás komponenseket, illetve a szennyezőanyagok vízzáró felszínekről történő kimosását modellezik) és a transzport modell, amely a lefolyó csapadékvíz és a szennyezőanyagok csapadékvíz elvezető infrastruktúrán (nyílt csatornák, csőhálózatok és tározók) keresztül történő áramlását írja le (Zoppou, 2001). Az újabb modellek és megközelítések már jóval több olyan elemet tartalmaznak a modellezés során, amely vagy a növényzet vagy valamilyen fenntartható vízgazdálkodási elem modellezését segítik elő (pl. LID) (Elliott & Trowsdale, 2007). Jayasooriya & Ng (2014) azokat a modelleket gyűjtötte össze, amelyek a csapadékvíz-gazdálkodás gazdasági oldalát, illetve a zöldinfrastrukturális megoldásokat is képesek modellezni. Az általam választott EPA SWMM modell segítségével szintén lehet LID megoldásokat vizsgálni, amelyekkel például zöldtetőket vagy csapadékvízgyűjtők hidrológiai folyamatait lehet modellezni. Az i-Tree Hydro modell különlegessége abban rejlik, hogy a növényzetet részletes specifikációkkal lehet megadni és azontúl, hogy a felszínborítási kategóriákon belül több alkategóriára lehet bontani, amellet számos növényzetre vonatkozó jellemzőt lehet beállítani (pl. LAI (Leaf-area index) vegetációs periódus hossza stb.) (Coville et al., 2020; Wang et al., 2008). Az i-Tree Hydro további előnye több modellel szemben, hogy felhasználói felülete felhasználóbarátabb, így szélesebb felhasználói bázishoz juthat el a jövőben.

### **3. Mintaterületek**

#### **3.1. Szeged klimatikus és földrajzi jellemzői**

A doktori kutatásaim helyszínéül Szeged városa szolgált, amely Magyarország harmadik legnépesebb városa Budapest és Debrecen után. Közel 160 000 fős lakosságával (KSH, 2021) a Dél-Alföldi régió központja, jelentős gazdasági és oktatási centrum. Szeged nagymértékben városiasodott település, jelentős a burkolt felszínnek aránya belterületén. Jellegzetes radiocentrikus városszerkezetét az 1879-es nagy árvíz után nyerte el, mivel a várost kettéosztó Tisza jelentős pusztítást okozott ekkor és az újjáépítés során a régi városi struktúrát a mai körutas-sugárutas szerkezet váltotta fel. A Tisza folyásirányának megfelelő baloldalán található Újszeged, amely egy viszonylag modern városrész, amelyben jellemzően társas- és

családirházak találhatóak. A vizsgálataim a Tisza jobboldalán elhelyezkedő „Ószegedi” területen találhatóak.

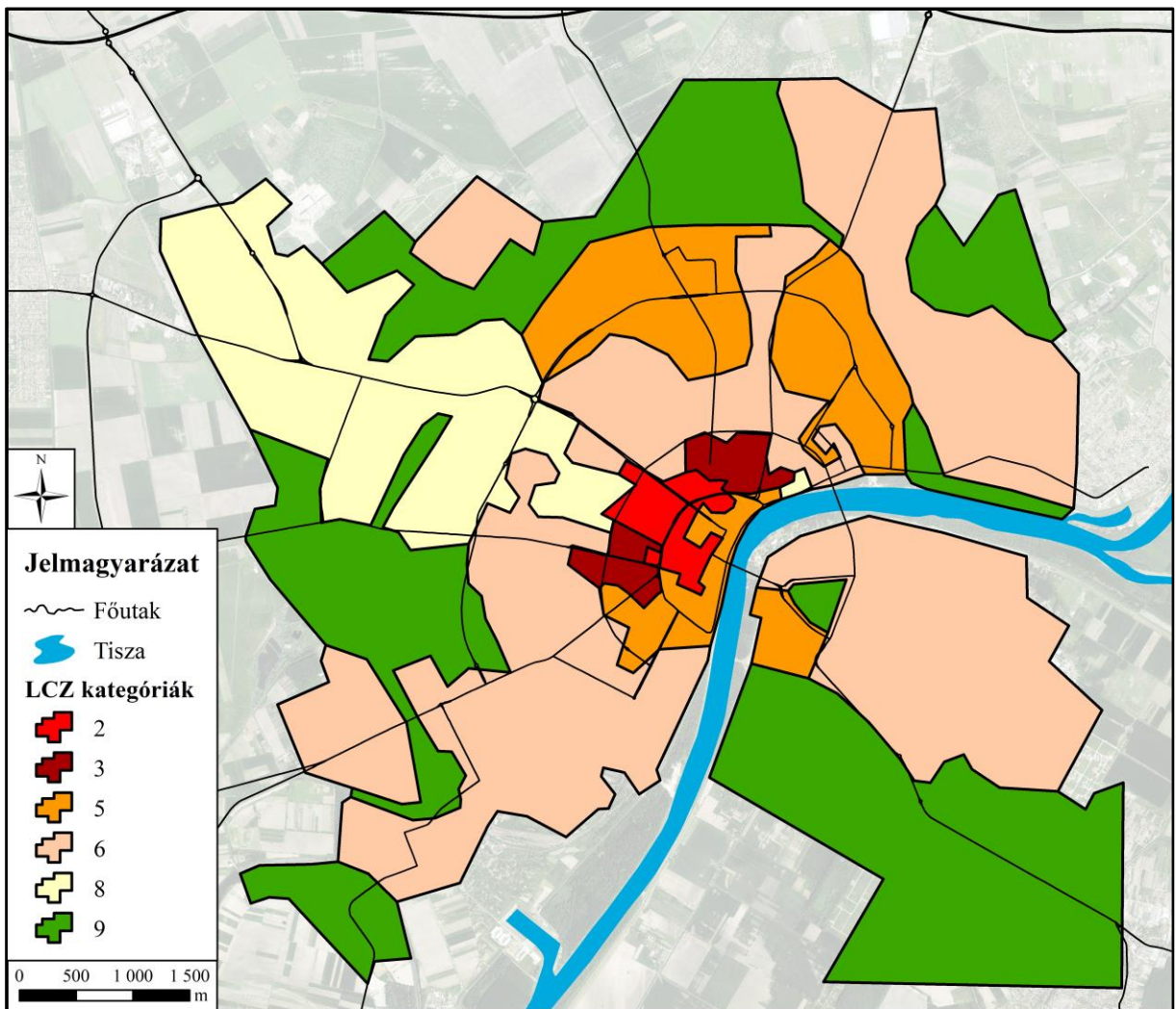


11. ábra Szeged földrajzi elhelyezkedése

Természetföldrajzi szempontból Szeged az Alföld, Alsó-tiszai-síkvidék középtáján helyezkedik el a Tisza és a Maros összefolyásánál (11. ábra). A térség éghajlatát jelentős mértékben meghatározza a földrajzi elhelyezkedése és az Alföld medencejellege. Alapvető jellemző az alacsony felhőborítás, az országon belüli alacsony csapadékösszeg és a magas napfénytartam. A középtáj térségében ez 2100 óra felett is lehet (Péczely, 2009). A szélirány jellemzően ÉNY-i, amely Szeged szempontjából azért fontos, mivel a Kiskunsági homokhátság területéről nagymennyiségű szállóport szállíthat be a város területére. Az éves csapadékösszeg az országos értéknél alacsonyabb (a szegedi régióban 508 mm az átlagos éves csapadékösszeg az 1986–2015 közötti időszakot alapul véve (Harris et al., 2014; Unger et al., 2020)), gyakoriak az aszályos időszakok a nyári évszakban. A csapadék maximuma júniusra tehető, a klímaváltozás következtében a csapadékok szélsőséges eloszlása is egyre jellemzőbb, mind térbeli eloszlásában mind pedig a csapadékintenzitás tekintetében a szélsőségek felé tolnak el a csapadékesemények (Bartholy et al.; 2014; Sábitz et al.; 2014; Mezősi, 2011; Mezősi et al., 2016). Ez Szeged térségében is előrevetíti, hogy városi vízgazdálkodás szempontjából a szélsőségesen heves csapadékesemények és a hosszan elhúzódó aszályos időszakok egyaránt problémát jelenthetnek. Előbbiek komoly megterhelést jelenthetnek a városi elvezetőrendszerre, utóbbi esetén pedig – mivel természetes forrásból nem tudja fedezni a vízigényét – a városi vegetáció jelentős öntözésre szorulhat.

Szegeden a település méretéből és a mesterséges felszínborításból adódóan komoly városi hősziget jelenség (a vidék és város belterülete között mért hőmérséklet különbség) alakulhat ki (Balázs et al., 2009; Unger et al., 2014a,b; Unger & Gál, 2017). A nagy hőszigetintenzitásnak jelentős negatív hatása lehet minden városban előre, a humánkomfortra éppúgy, mint a növények városi túlélésére. Hatására a belvárosi területeken nagyobb hőstressznek vannak kitéve a növények, amelyek vízigénye is változhat ennek függvényében.





12. ábra Az LCZ kategóriák elhelyezkedése Szegeden (Unger et al., 2014b alapján)

Egy város felszínborítási viszonyai és az épületek geometriája nagyban meghatározzák a városi mikroklimát és a vízkörforgási viszonyokat. A Lokális Klímazonák (LCZ) rendszere a városi mikroklima viszonyok jellemzésére használatos nemzetközileg elfogadott kategória rendszer, amely közvetve a városrészek hidrológiai viszonyairól is információt szolgáltat. Az egyes LCZ-k lehatárolásához számos objektíven mérhető paraméter szükséges. A rendszer figyelembe veszi az épület- és felszíngeometriát, az égbolt láthatóságot (SVF), az albedót, de a vízzáró/áteresztő felszínrányt is. Összesen 10 beépítettségjellemző LCZ (LCZ 1-10) típust különít el a rendszer és 7 felszínborítással jellemezhető típust (LCZ A-G), illetve lehetőség van a felszínborítás rövid időtávú változását is jellemezni. Az LCZ típusok többnyire egységes felszínborítással, anyagtypusokkal és épületgeometriával jellemezhetőek, amelyek kiterjedése alapvetően pár száz métertől pár kilométerig terjed. Szegeden az Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék kutatói korábbi vizsgálatokban részletesen vizsgálták az LCZ rendszer szegedi alkalmazhatóságát és ennek eredményeképpen rendelkezésre áll a város LCZ beosztása, amelyet a doktori kutatásom vizsgálati során felhasználtam (Unger et al., 2014a,b). A doktori vizsgálataim mintaterületein a fentebb említett LCZ típusokból hat található meg. Az LCZ 2 típus kompakt beépítéssel és közepes épület magassággal jellemezhető, mely Szegeden a legszűkebben értelmezett belvárost fedi le. Ezt a területet veszi két oldalról körbe az LCZ 3 típus, amely szintén kompakt beépítéssel, viszont alacsonyabb épület magassággal írható le. Az LCZ 5 típus, amely nyitott beépítésű és az épületek közepes magassággal rendelkeznek, több helyen található meg a városban és vegyesebb képet mutat az előző két típusnál. Ez a típus megtalálható a belváros déli részén, illetve a város északi, észak-keleti panel lakótelepi részén

is. Az LCZ 6 típusban jellemzőek az alacsonyabb épületek és a közöttük elterülő, gyepvel vagy egyéb vegetációval borított területek. Ez a típus nagy területet fed le Szegeden belül, családi házas és néhányszintes társas házas területeket foglal magába. Szeged belterületén megtalálható még az LCZ 8 (kiterjedt területek, alacsony épületekkel) és az LCZ 9 (alig beépített), amelyek alapvetően a külsőbb területek fedik le (12. ábra). Szegeden az egyes városrészek felépítése, az épületek típusai sok más közép-európai poszt-socialista várossal párhuzamba állíthatóak. Kimondottan a panelépületekből álló lakótelepi városrészek, amelyek jellegzetesek voltak a keleti blokk országaiban. Ebből adódóan a Szegeden elvégzett vizsgálatok közép-európai tekintetben is releváns információval szolgálhatnak.

### 3.2. A vizsgálatok helyszínei

A két felhasznált modell eltérő felépítése, adat követelményei és a modellezési folyamataiból adódóan a mintaterületek bemutatását is két csoportra osztom. Az egyik alfejezetben az i-Tree Hydro modellhez köthető mintaterületek bemutatása történik meg, míg az azt követő fejezet az EPA SWMM modell mintaterületeit részletezi.

#### 3.2.1. i-Tree Hydro mintaterületek

##### Pilot vizsgálat – Széchenyi téri mintaterület

A Széchenyi téri a legkisebb méretű a három i-Tree Hydro mintaterület közül, egyfajta pilot területként funkcionált a modell hazai környezetben történő teszteléséhez (továbbiakban M0). A mintaterület az LCZ 2 és LCZ 5 típusokkal jellemezhető belvárosban található, területe 19,7 ha. A vizsgálat helyszíne magában foglalja a Széchenyi teret – amely Szeged egyik legnagyobb, és legfrekvenciáltabb zöldfelülete – illetve a környező épülettömböket, utakat, járdákat. A mintaterület jelentős része vízzáró felszínnel burkolt, épületek közötti szűk utca kanyonok kedvező feltételeket biztosítanak a jellegzetes város mikroklíma kialakulásának. A vízzáró burkolatok nagy aránya és a magas járdaszegélyek miatt ezen a területen a lehulló csapadék beszivárgása erősen akadályozott, nagy a felszíni lefolyás. A felszínborítási típusok lehatárolásának eredményeképpen megállapítható, hogy a terület közel háromnegyedét a vízzáró felszínnek teszik ki, míg a fásszárú vegetáció közel a fennmaradó egynegyedét (13. ábra). A tér tipikus városi fafajokban gazdag, mint például a közönséges platán (*Platanus x hybrida*), nagylevelű hárs (*Tilia plathyphyllos*), nyugati ostorfa (*Celtis occidentalis*) stb. Lágyszárú borítás jobbára csak a Széchenyi téren található meg. A fakorona alatti felszínborítás nagyobb része vízzáró felszín (62%). E mintaterület esetében alternatív felszínborítási scénáriókkal is végeztem vizsgálatokat, amelyekben a felszínborítási arányokat megváltoztattam a jelenleg valós viszonyokhoz képest. Az Alternatív scénárió 1-ben (ASZ1) a vegetáció arányának növelésével egy a mainál „zöldebb” állapotot modelleztem, míg az Alternatív scénárió 2-ben (ASZ2) a vízzáró felszín arányának növelésével kedvezőtlenebb felszínborítás következtében kialakuló helyzet modellezését végeztem el (Táblázat 3.).



13. ábra Az M0-ás mintaterület a felszínborítási kategóriákkal

Táblázat 3. A Széchenyi téri mintaterület felszínborítási arányai

	Fa	Lágyszárú	Cserje	Vízáró felszín	Talaj felszín	Vízfelület
Valós helyzet	22,5%	3,1%	0,1%	73,7%	0,5%	0,1%
ASZ1	35%	14,7%	1%	48,7%	0,5%	0,1%
ASZ2	17,5%	2,1%	0,1%	79,7%	0,5%	0,1%

Mivel az i-Tree Hydro modell egyelőre elsősorban az Egyesült Államok területére optimalizálták, így az első vizsgálatok futtatásához szükséges volt kijelölni egy Szeged klimatikus és geográfiai viszonyaihoz közel álló USA-beli várost referencia területként, amely egy a tanszéken korábban folyó kutatáshoz hasonlóan a Kansas állambeli Goodland lett (Gulyás & Kiss, 2012). Az M0 mintaterület esetében a modellezés meteorológiai alapja 2012 volt, amely során 417,7 mm volt az éves csapadékösszeg Szegeden.

A kutatás második fázisában két hasonló méretű (a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében) ugyanakkor szignifikánsan eltérő felszínborítású, épület geometriájú mintaterületet kerestünk, hogy az eltérő hidrológiai folyamatok bemutatására megfelelő alapot szolgáltatassanak.

#### Belváros – Szent István téri mintaterület

A Szent István téri a mintaterület (továbbiakban M1) szintén a belvárosban található, annak észak-keleti részén. A területét döntően az LCZ 3-as típus fedi le – kis területen az LCZ 2 és LCZ 6 típusba is átnyúlik – ebből adódóan a kompakt beépítés, alacsony épületmagasság,

a vízzáró felszínek magas aránya jellemző rá, azonban az M0-ás területhez képest az épület magasság többnyire alacsonyabb. A mintaterületen található zöldfelületek többsége utcai fasor, azonban három nagyobb tér is megtalálható, ahol nagyobb méretű, egybefüggő zöldfelületek vannak, területe 60,7 ha (14. ábra). Ennek jelentős része vízzáró felület (61%), a fásszárú borítás 31%, míg a lágyszárúak felszínborítási aránya 7%. A fák koronája alatti területeken a vízzáró felszínek 65%-ot, míg az átteresztő felszínek 35%-ot (16. ábra).



14. ábra Az M1-es mintaterület a felszínborítási kategóriákkal

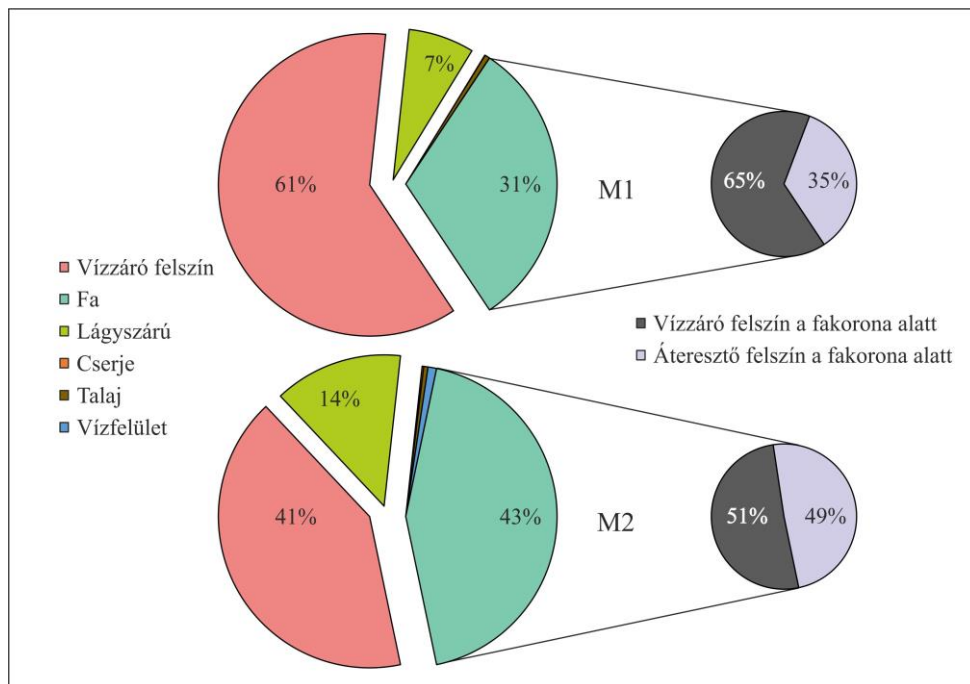
### Lakótelepi mintaterület

A harmadik mintaterület Szeged külsőbb, észak-keleti városrészében található, amelyet az LCZ 5 típus fed le (továbbiakban M2), területe 65,3 ha (15. ábra). Ezt a típus közepes épületmagasság és nagyobb, nyílt terek, zöld felületek jellemzik. A terület jellegzetes panel lakótelep, pár ettől eltérő háztípussal. Az épületek közötti terek egyrészt a sugárutak körutak és egyéb közlekedési felületek teszik ki, de jelentős a zöldfelületek aránya is, ahol sok fásszárú

is található. A három mintaterület közül itt a legmagasabb a vegetáció aránya, a fásszárúaké 43%, míg a lágyszárúaké 14%. A fakoronák alatt közel fele-fele arányban találhatóak meg vízzáró és átteresztő felszínek (16. ábra).



15. ábra Az M2-es mintaterület a felszínborítási kategóriákkal



16. ábra Az M1 és M2 mintaterületek felszínborításának százalékos eloszlása

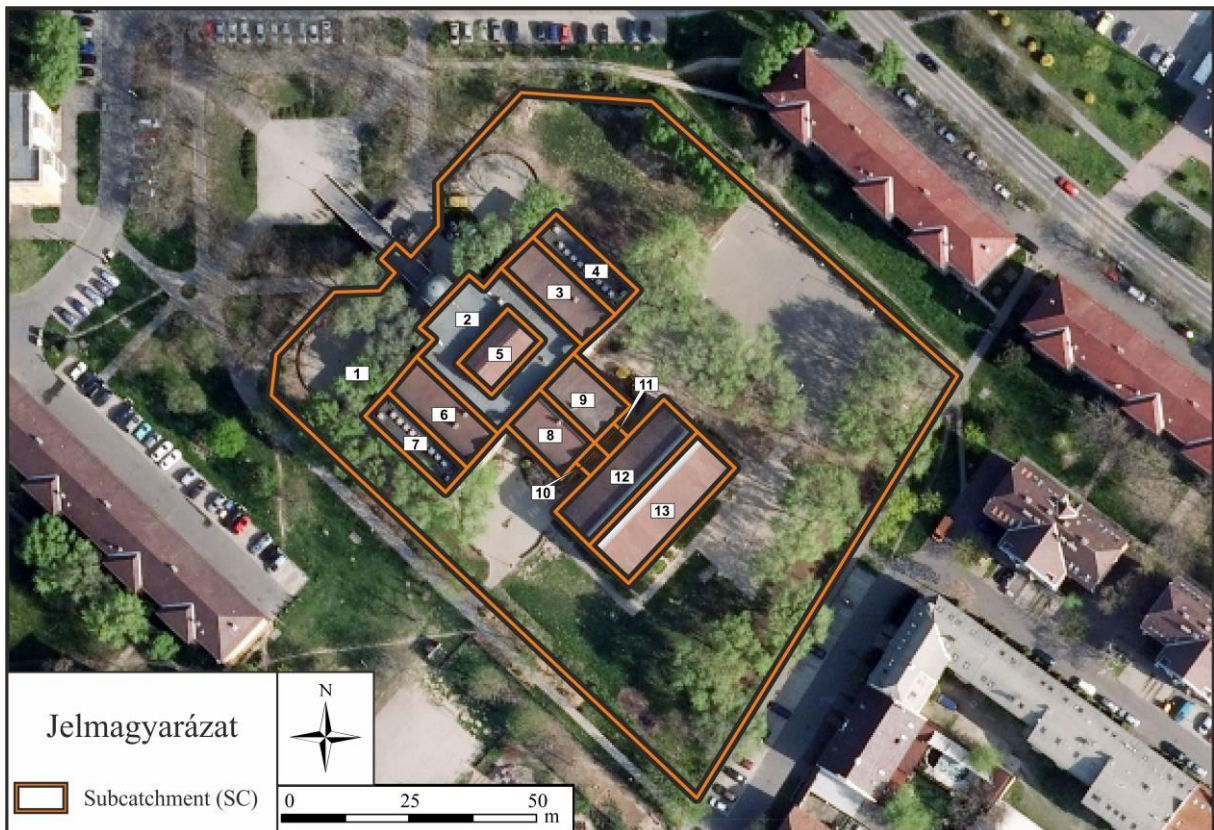
Az M1-es és M2-es mintaterületek kijelölésénél szempont volt a pontos összehasonlíthatóság érdekében a közel azonos méret, de amint a területek jellemzésénél is

látható az úthálózathoz az LCZ típusokhoz való alkalmazkodás következtében, illetve, hogy viszonylag egységes városrészleteket fedjenek le a mintaterületek ez nem valósult meg teljes mértékben. Ezt kiküszöbölendő a nagyobb területű mintaterületet (M2) arányosítottam a kisebbhez (M1), úgyhogy területük azonos legyen, viszont az M2 terület megőrizze a felszínborítási arányait, amelyek a modellezés szempontjából elsődlegesek. Így a két terület összehasonlítható és a városrészek között különbségek is objektíven vizsgálhatóak. Mind az M1 és M2 mintaterület esetében a modellezés meteorológiai alapja a 2015-ös év volt, amely során 450,1 mm volt az éves csapadékösszeg Szegeden.

### 3.2.2. EPA SWMM mintaterületek

#### Arany János Általános Iskola

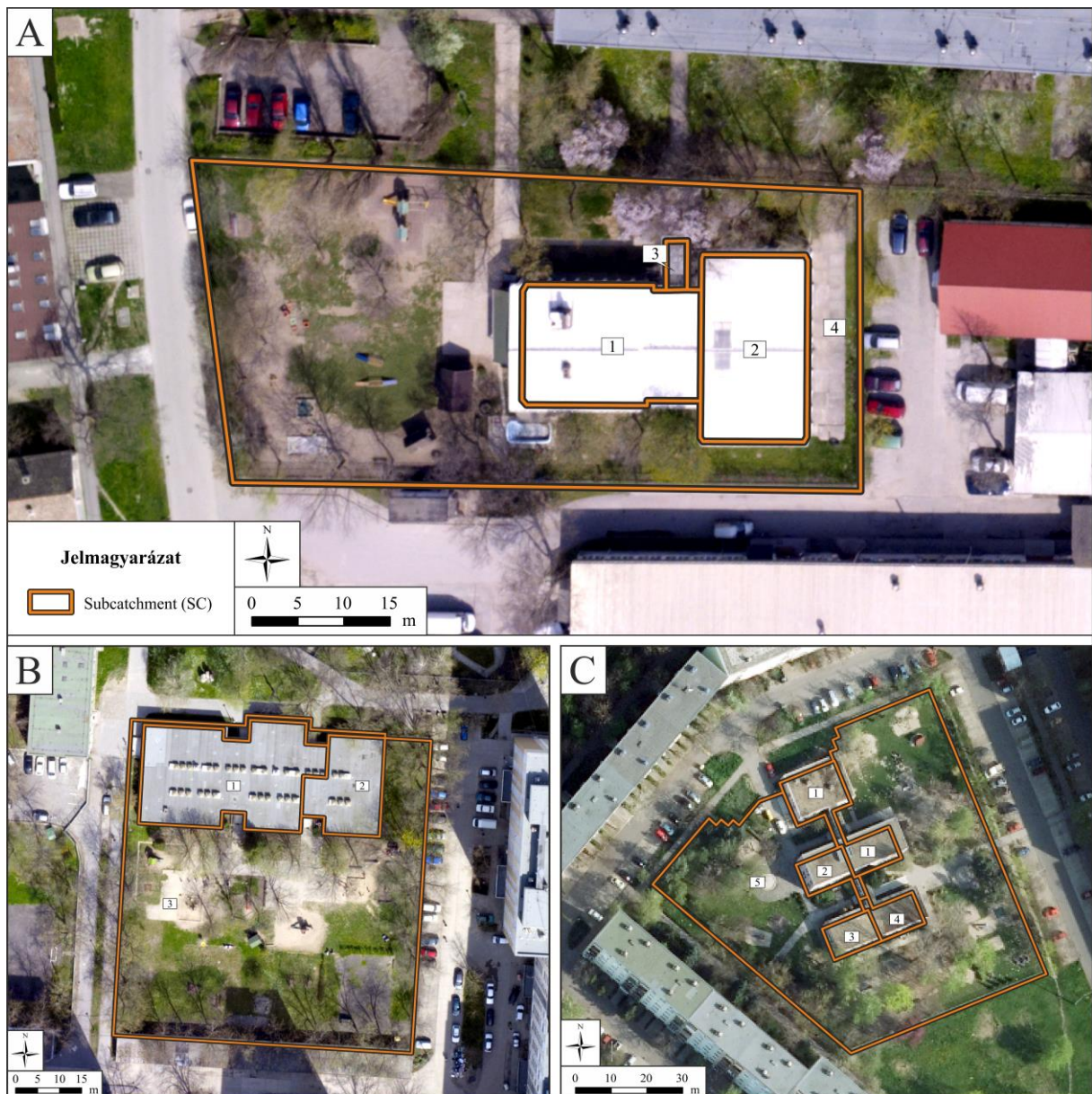
Ez a mintaterület Szeged északi részén, az LCZ 5 és LCZ 6 típusok határán található, amelyekre jellemző az alapvetően alacsony vagy közepes épületmagasság és a közöttük lévő szélesebb tér. Olyan városrészben helyezkedik el, ahol kertes házak, panellakótelepi területek, bevásárlóközpontok is találhatóak, így alapvetően a városrész kevert felszínborítási jellemzőkkel bír. A modellezés meteorológiai alapja szintén 2015 volt (450,1 mm éves csapadékösszeg). A vizsgálatok területe egy általános iskola (Arany János Általános Iskola), annak tető elemei és udvara volt. A mintaterület mérete a tetőkkel és az udvarral együtt 1 ha. A kisléptékű modellezés során a különböző lehatárolt vízgyűjtőfelszínek képeznek egy-egy vizsgálati elemet, így az épület tetejét tizenkét tetőelemre osztottam, illetve különálló elemként szerepel az iskola udvara. Ezeket a modellezési részegységeket a modellben subcatchment-nek nevezik, így az elemek elnevezésében a továbbiakban ennek rövidítését követem: iskolaudvar SC1, tetőelemek SC2-13 (17. ábra). Az összegyűjthető víz pontos számításához fontos a különböző tetők közötti lefolyási útvonalak definiálása. Az egyes tetőelemekről egy másikra vezetett csapadék megnövelheti az összegyűjthető víz mennyiségét, így pontos helyszíni felmérést végeztem a tetőelemek kapcsolódásával kapcsolatban. Az iskolában kiépített csapadékvízgyűjtő-rendszer négy kis méretű, egyenként 520 literes kapacitással rendelkező gyűjtő tartályból áll. Ezek az SC4 és SC7 elemekhez kapcsolódnak tetőnként két-két tartályos konfigurációban. Az SC2, 4 és 7 lapostetők, míg a többi elem döntött, cserépborítással ellátott elem. Az SC7 esetében csak a tető saját felületéről származó csapadék áll rendelkezésre gyűjtéshez, az SC4 esetében viszont az SC3 jelölésű tetőről többlet vízmennyiséget kap a rendszer, hozzáfolyás formájában.



17. ábra Az Arany János Általános Iskola mintaterületi felosztása

### Óvodai mintaterületek

A kutatás második fázisában a fentebb bemutatott iskolai pilot projekt tapasztalatait felhasználva három önkormányzati kezelésben lévő óvoda területén végeztem modellezést. Az óvodák területén egy projekt keretében csapadékvízgyűjtő rendszereket építettek ki, amely következtében a kiépített rendszerek térbeli paramétereiről pontos információk álltak rendelkezésre. Az óvodák területén elhelyezett csapadékgyűjtők modellezése során a meteorológiai adatok alapja szintén a 2015-ös év volt. A három óvoda: Kemes utcai óvoda, Tünde téri óvoda, Garam utcai óvoda. Mind három terület esetében az óvodák kerítéssel határolt területe jelentette a modellezési területet, ezen belül helyezkedtek el az épületek és a kiépített víztározó rendszerek (18. ábra). Valamennyi óvoda területe az LCZ 5 típusban található, amely közepes épületmagasságot és viszonylag nyitott beépítést jelent. Az óvodák az eltérő méret ellenére hasonló felépítéssel rendelkeznek. Mindegyik területen található eltérő arányban gyepvel fedett udvar, az épületek pedig hagyományos lapostetővel fedettek. A Kemesi terület négy subcatchment-ből áll, amelyből három tető, illetve az óvoda udvara. A mintaterület közel  $2400 \text{ m}^2$ , amelyből 78%-ot az udvar tesz ki. Itt az SC1 jelölésű tetőről történik a vízgyűjtés egy  $170 \text{ cm}$  mélységű gyűjtőtartályba, amelynek térfogata  $12 \text{ m}^3$ . A Tünde téri terület három subcatchment-re lett osztva a rendelkezésre álló információk alapján, ebben az esetben az SC2-es jelölésűről történik a vízgyűjtés. A gyűjtőtartály paramétere megegyeznek az előzővel. A három részegység összesen  $4900 \text{ m}^2$  területű, amelyből az udvar tesz ki 75%-ot. A Garam utcai mintaterület a legnagyobb méretű és legtöbb alegységgel rendelkező, illetve itt két tető elemről történik a vízgyűjtés. A vízgyűjtőrendszer méretezése megegyezik az előzőkkel, azonban az SC2 elemről és az SC3 elemről ugyanabba a tartályba történik gyűjtés, így ez különbséget jelent a többi rendszerhez képest. A Garam utcai terület mérete  $6000 \text{ m}^2$ , amelyből az udvar közel 86%-ot tesz ki.



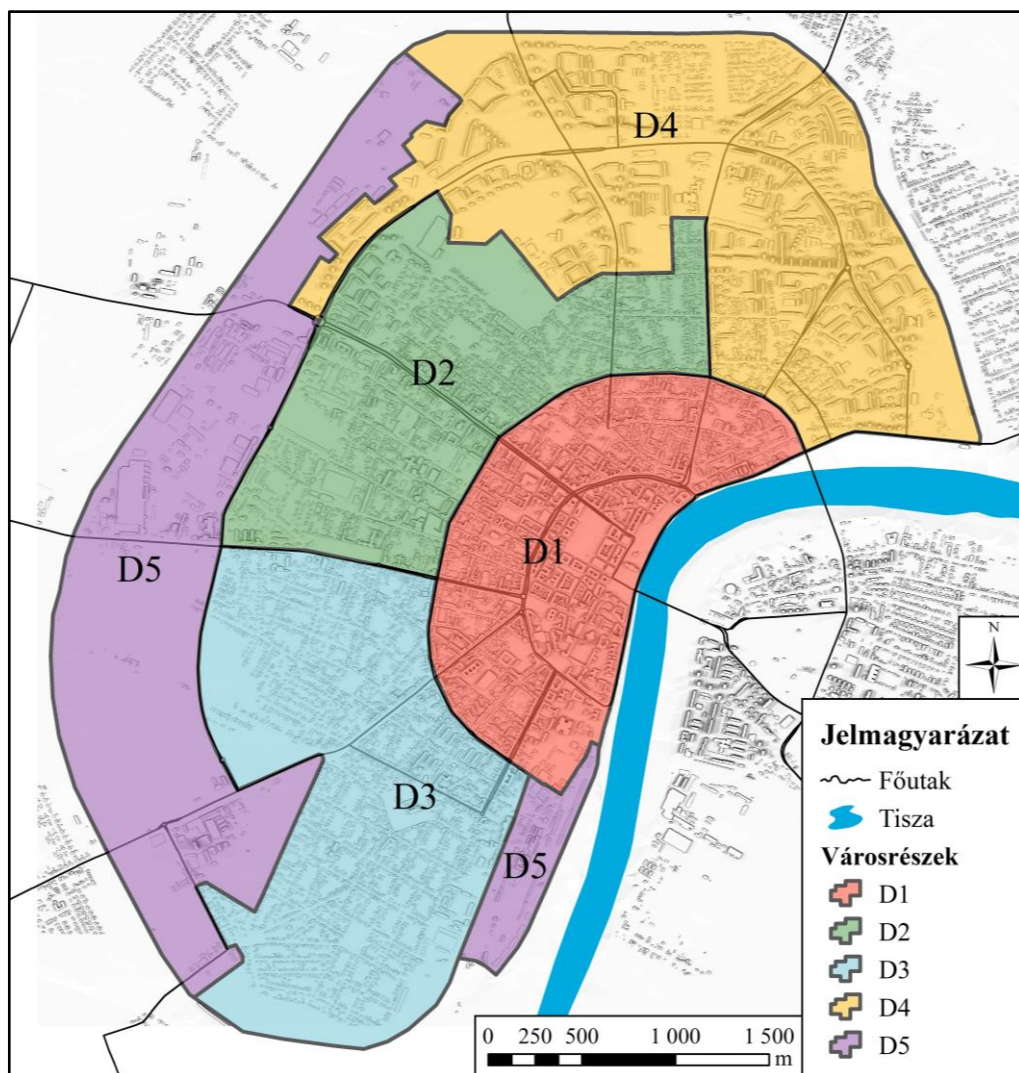
18. ábra Az óvodák mintaterületi felosztása (A. Kemes utcai óvoda, B. Tünde téri óvoda, C. Garam utcai óvoda)

### Teljes városi mintaterület

A kutatás harmadik fázisában Szeged közel teljes (Tisza jobb partján elterülő) belterületét lefedő vizsgálatot végeztem az EPA SWMM modellel. Ez a város mesterséges burkolatokkal leginkább fedett része, illetve a városi vízkörforgás is ezen a területen a leginkább módosított és a csapadékvízgyűjtéssel kapcsolatos megoldások itt segíthetnek csökkenteni leginkább a vízhálózatra nehezedő nyomást. A vizsgálatok alapjául szolgáló területet öt városrészre osztottam (továbbiakban D1-D5), amely beosztás a Lokális Klímazónak határainak figyelembevételével készült (19. ábra). Minden egyes kijelölt terület egy-egy városi felszínborítási csoportot jelent viszonylag egységes utcaképpel, épülettípusokkal és felszínborítási aránnyal. A D1-es területen legmagasabb a vízzáró felületek aránya Szegeden belül. Ez a terület magában foglalja a belvárosi részeket, amelyek közepes vagy alacsony épületmagassággal, kompakt beépítettséggel és ebből adódóan alacsonyabb zöldfelület borítással jellemezhetőek. A D1-es területen a viszonylag régi épületek nagy tetőfelülettel rendelkeznek. A D2-es és D3-as terület sok szempontból hasonló, azonban a D2-esben az épülettípusok sokkal változatosabbak és több bevásárlóközpont található a területén, amelyek



jelentős méretű tetőfelülettel rendelkeznek. A D3-as terület tipikus családi házas városrész, ahol sok, kisméretű épület található, kisméretű tetőfelületekkel. A D4-es városrész egy lakótelepet magába foglaló terület, magas épületekkel, közepesen nyitott beépítettséggel, amelyek egy jelentős része zöldfelület. Ezek az épületek az 1960-as és 1980-as évek között épültek, és többségük nagyméretű lapostetővel rendelkezik. Az ehhez hasonló városrészek elterjedtek a közép-európai poszt-szocialista városokban. Végül a D5-ös terület egy ipari és egyéb szolgáltató része a városnak, amely számos gyárat, vasúti kiszolgáló épületet, és egyéb ipari struktúrákat foglal magába, így a tetőfelületek mérete és típusa nagymértékben változik. Az elérhető épületadatbázison alapulva lehatároltam a mintaterületen belüli tetőfelületeket. Minden egyes tető egy-egy önálló rendszert képvisel és egy-egy subcatchment-et a modellezési környezetben. Összesen 13 980 ilyen elemet különítettem így el, a tetők összegzett mérete 264 ha. A tetők által lefedett terület jelenti a továbbiakban a vizsgálatok területét. A teljes városra kiterjedő vizsgálat esetében a modellezés meteorológiai alapja 2016 volt, amely során 689,8 mm volt az éves csapadékösszeg Szegeden.



19. ábra Szeged városrészsintű beosztása a csapadékvízgyűjtési vizsgálatokhoz

#### 4. Módszerek

A hidrológiai paraméterek (mint például a csapadékmennyiség, a folyók vízhozama vagy az egyes csapadékelvezető csatornák ki- és belépő pontjain keresztüláramló vízmennyiség) mérése többnyire pontszerűen történik, melyek sok esetben hosszútávú monitoringok, így trendeket, hosszútávú változásokat is lehet vizsgálni a segítségükkel. Az

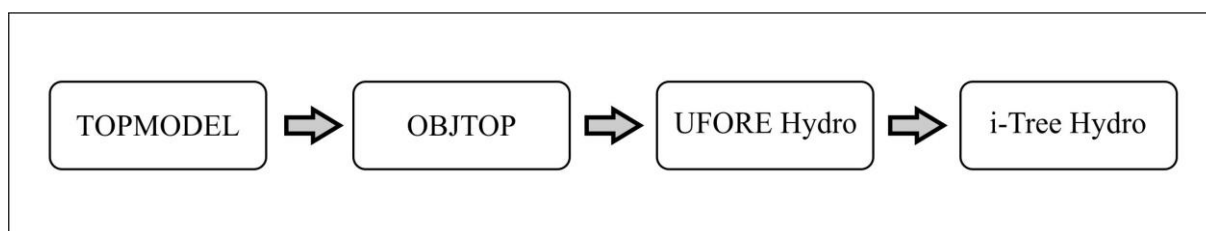
egyéb hidrológiai folyamatok (pl. evaporáció) monitorozása kevésbé megszokott vagy elterjedt. Noha az ilyen adatok legtöbb esetben egy-egy kutatás pontszerű méréseiből állnak rendelkezésre, a kutatásoknak gyakori célja a térbeli kiterjesztés. Példa erre a fák intercepciójának terepi mérése, amely során különböző korú és fajba tartozó egyedek csapadék felfogóképességét mérik, így ezt bizonyos keretek között ki lehet terjeszteni más területek állományaira is (Xiao & McPherson, 2011). Nagyobb kiterjedésű vízgyűjtők esetében a pontos vízgyűjtőterület határának ismerete és a végponti kifolyókon létesített mérőpontok nagyban elősegítik a lefolyás és egyéb hidrológiai folyamatok modellezését. Ehhez szükséges a kifolyópontok számának ismerete is. A különböző hidrológiai modellek akkor lehetnek igazán hasznosak, amikor olyan terület vízkörforgásának folyamataira vagyunk kíváncsiak, amelyek esetében kevesebb mérési idősor áll rendelkezésre vagy bizonyos adatokról egyáltalán nem rendelkezünk információval, például fák, lágyszárúak intercepciójáról.

A doktori kutatásom során két eltérő modellt használtam és a modellek kiválasztását hosszas szakirodalmi áttekintés előzte meg (Bautista & Peña-Guzmán 2019; Elliott & Trowsdale, 2007; Jayasooriya & Ng, 2014; Kirnbauer, et al., 2013; Rossman, 2015; Song, et al. 2020). Bár a két modell alkalmazásának eltérő célja volt, azonban az alapvető városi hidrológiai és vegetáció modellezési metódusok alkalmazásából adódóan több hasonlóságot mutatnak.

#### 4.1.i-Tree Hydro alapú vizsgálatok

A doktori kutatásom egyik szegmense a növényzet városi hidrológiai folyamatokban betöltött szerepének vizsgálata a zöldinfrastruktúra részeként, ezért itt olyan modell alkalmazására volt szükség, amellyel a növényzetet az eddigi modellezési gyakorlatban alkalmazott módszereknél jóval komplexebb módon lehet kezelni. Kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy a növényzetet altípusokra lehessen bontani (fák, lágyszárúak, cserjék), illetve egyéb jellemzőik megadására is legyen lehetőség (pl. levélfelület index). A szakirodalom áttekintése és a modellek tulajdonságainak felmérése után az Egyesült Államokban fejlesztett i-Tree modell család i-Tree Hydro modelljére (modell verzió v5.1) esett a választás (Coville et al., 2020; Taggart et al., 2014). Maga a modell UFORE Hydro néven is ismeretes volt, azonban a könnyebb követhetőség kedvéért a dolgozatban az i-Tree Hydro (vagy röviden Hydro) elnevezést fogom alkalmazni (Hirabayashi & Endreny, 2016; i-Tree, 2017; Nowak et al., 2018; Wang et al., 2008).

Az i-Tree Hydro modellt az Egyesült Államokban fejlesztették és eddigi alkalmazási területei is itt találhatók, más országokban történő vizsgálatokra való felkészítése a vizsgálataim elvégzésének időpontjáig nem történtek meg (kivéve néhány angolszász országot, ahol erre történtek törekvések). Emiatt a szükséges térbeli és meteorológiai adatbázisok az USA területén található mintaterületekre gyorsan leihívhatóak és így ott egyszerűen futtatható a modell. Azonban az Egyesült Államokon kívül eső mintaterületeken – így Magyarországon is – a szükséges adatok összegyűjtése és az adatbázisok összeállítása komoly feladatot jelent. A modell magyarországi alkalmazására a jelenlegi időpontig a doktori munkámban bemutatott vizsgálatokon kívül nincs elérhető információ.



20. ábra A Hydro fejlesztési fázisai (Bautista, & Peña-Guzmán, 2019 alapján).

Az i-Tree Hydro több modell és modellezési környezet felhasználásával, illetve fejlesztésével érte el mai verzióját. A modell alapját a TOPMODEL (TOPography based

hydrological MODEL) adta, amely a topográfia hidrológiai folyamatokra gyakorolt térbeli hatását vette figyelembe. Ennek továbbfejlesztett változata az OBJTOP (OBJECT-oriented programming TOPMODEL) csapadék-lefolyás modell, amely már objektum orientált lefolyás modell volt. Az UFORE-Hydro (Urban Forest Effects Model) modell volt a következő lépcsőfoka a fejlesztésnek, amelynek célja már a városi növényzet hatásainak számszerűsítése volt. Fejlesztése során arra törekedtek, hogy minimális inputadat igényeljen, így kutatók és tervezők számára is viszonylag könnyen alkalmazható legyen városi területek vizsgálatakor (Bautista, & Peña-Guzmán, 2019; Wang, 2008). Ennek a felhasználói felülettel ellátott, továbbfejlesztett verziója az általam is használt i-Tree Hydro (20. ábra).

A modell három fő input paraméter csoporttal rendelkezik, illetve ezek mellett egyéb kiegészítő másodlagos paraméterekkel. A három fő input csoport: meteorológiai, felszínborítási és talajtulajdonságokkal kapcsolatos paraméterek (Hirabayashi & Endreny, 2016; i-Tree, 2017; Wang et al., 2008). A modell objektum-orientált, fizikai modell, amely számításainak alapjául a Penman-Monteith egyenlet szolgál, így a vegetáció és egyéb felszín (nyílt vízfelszín, talajok) potenciális evapotranspirációjának számítása ez alapján történik (Shuttleworth, 1993; Wang et al, 2008).

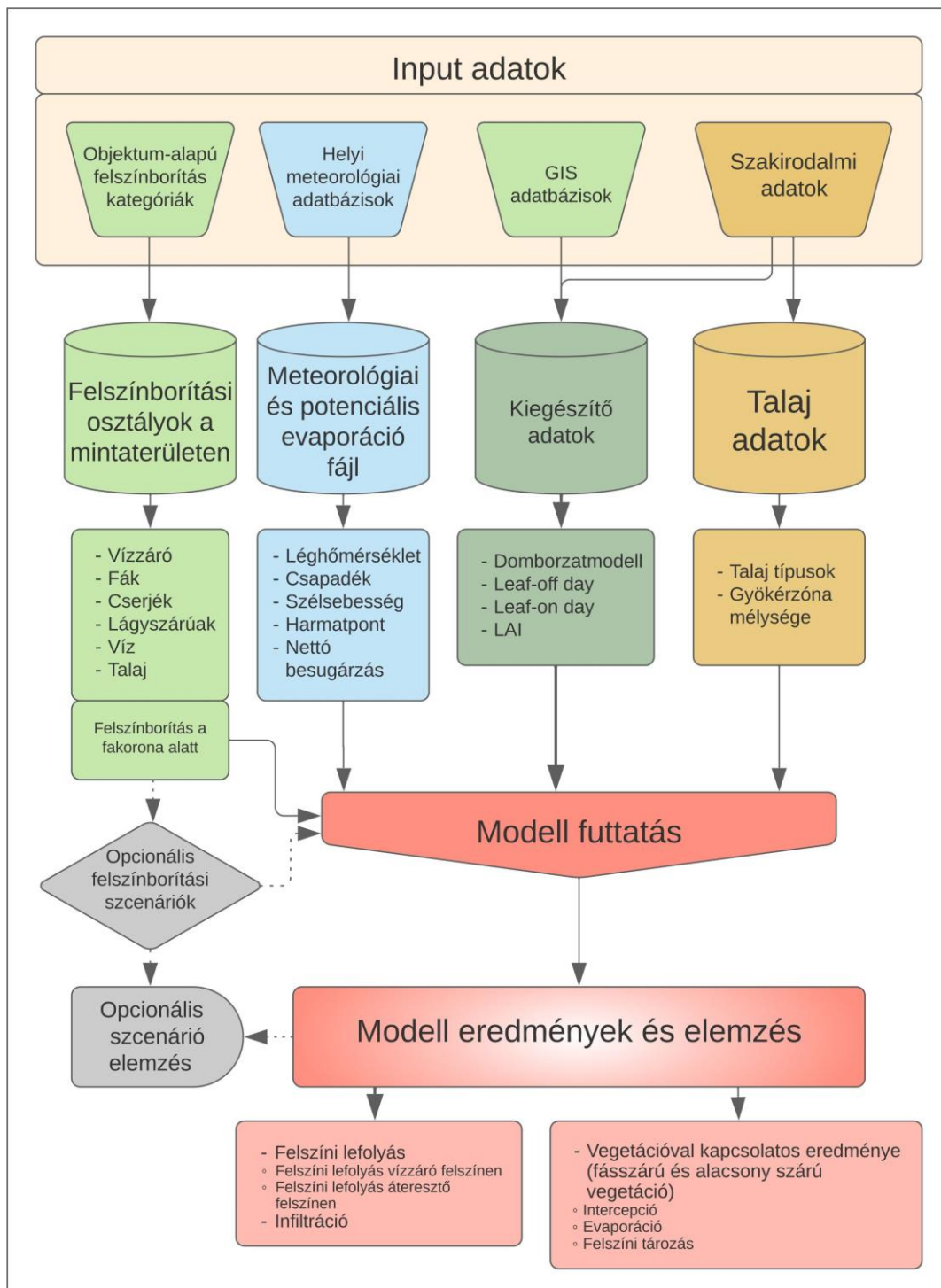
A meteorológiai adatok órás felbontásban szükségesek a modell futtatásához, így részletes adatbázis előállítására volt szükség. A szükséges adatok forrását a Szegedi Tudományegyetem, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszékének adatai, illetve az Országos Meteorológiai Szolgálat, szegedi szinoptikus állomásának adatai biztosították. A meteorológiai adatokat két külön, specifikus formátumú fájlba szükséges rendezni: egy általános meteorológia adatokat tartalmazó, illetve egy potenciális evapotranszspirációs adatokat tartalmazó fájlba. Az általános meteorológiai adatok közül a legfontosabb az órás csapadékösszeg, léghőmérséklet, harmatpont, szélesség, hóvastagság és a nettó besugárzás. A potenciális evapotranszspirációs adatokat tartalmazó fájl a különböző felületekről (például a talajfelszín, hóval borított felszín és a fák) történő potenciálisan elpárologtatható vízmennyiség számításához szükséges adatokat tartalmazza, a meteorológiai fájl aktuális időjárási paramétereit alapul véve. Mivel a két fájl egymásra épül, ezért fontos minél pontosabb és helyspecifikusabb adatbázist használni az előállításukhoz. E tekintetben a pilot vizsgálat, illetve a két későbbi eltérő városrészben történő modellezés között voltak eltérések a meteorológiai paraméterek előállításában. A Hydro USA központúsága miatt a pilot vizsgálat során választottunk egy amerikai mintavárost, amely hasonló klimatikus és felszínborítási paraméterekkel rendelkezik, mint a magyarországi mintaterület. Erre azért volt szükség mivel ekkor még a meteorológiai adatok formázása a modell fejlesztői és üzemeltetői segítségével történt meg és csak csekély számú paraméter beállítására nyújtott lehetőséget. A két későbbi, nagyobb mintaterületen történő vizsgálat során azonban már teljes mértékben saját előállítású meteorológiai adatokkal dolgoztam, így csökkentve a feldolgozás során elforduló hibák lehetőségét és növelve az adatok pontosságát.

A második input csoport felszínborítási adatokat tartalmaz, illetve egyéb térinformatikai feldolgozáshoz kapcsolódó adatköröket. A Hydro futtatásához hat különböző felszínborítási osztály mintaterületen belüli százalékos megoszlásának előállítására van szükség. Ezek a következők: vízzáró felszín (épületek, utak, járdák), fásszárú növényzeti borítás, lágyszárú növényzeti borítás, cserje borítás, nyílt talajfelszín és vízfelszín. A nagyobb pontosság érdekében nem csupán a fásszárú növényzet arányát szükséges megadni, hanem a fák koronája alatt található felszínborítást is definiálni kell (vízzáró, illetve átteresztő felszínként). Ez az információ elősegíti a pontosabb infiltráció becslést, illetve azt, hogy a koronán áthulló vízmennyiség miképpen hasznosul (i-Tree, 2017).

A felszínborítási adatok előállítása nagy pontosságot igényelt, ezért ezt a feladatot két térinformatikai program segítségével valósítottam meg. Az pre- és postprocessing műveletekhez az ESRI ArcMap 10.2 térinformatikai programot használtam, míg a kategóriák lehatárolásához a Trimble eCognition 9.1 szoftvert. Felszínborítási kategóriák előállításának alapját ortofotók adták, amelyek a pilot és későbbi vizsgálatok között eltelt időből adódóan

más-más időpontból származnak. Mivel a későbbi vizsgálatok (M1, M2) során kiforrottabb lett a térinformatikai módszertan, így az kerül a fejezetben részletesebb bemutatásra. Az eCognition program segítségével szegmens alapú osztályozást (multi-resolution) alkalmaztam a területről rendelkezésre álló ortofotón. Ez egy négysávós Ultra Cam X ortofotó, amely 2015-ben készült a vegetációs periódusban, geometriai felbontása pedig 0,4 méter (Lechner Tudásközpont, 2015). Ebből NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) indexet állítottam elő, amely az előállított szegmensek pontosabb kategória besorolását segítette elő. Emellett további kiegészítő adatokat is felhasználtam az osztályozás során, mivel több rendelkezésre álló alapadat pontosabb osztályozási folyamatot és kategóriákat eredményez. Ilyen további adatkörök a DEM (Digital Elevation Model), DSM (Digital Surface Model) és nDSM (Normalized Digital Surface Model), illetve egy vektoros épületadatbázis (Gál et al., 2009; Lechner Tudásközpont, 2015). A feldolgozás első lépéseként az ortofotó és a kiegészítő adatok segítségével előállt a szegmensekre osztott mintaterület. Következő lépésként az NDVI adatok segítségével különválasztottam a növényzeti és nem növényzeti felszíneket, majd különböző határértékek és manuális besorolás segítségével leválasztásra kerültek a vízfelszínek, talajok és a vízzáró felszínek. A vektoros épületadatbázis a vízzáró felszínek pontosításához volt szükséges ebben a fázisban (Gál et al., 2009). A vegetáción belüli kategóriák kialakításához szükséges volt magassági adatok felhasználása is, ezért a növényzet differenciálásához a DSM és nDSM adatokat használtam fel, így különböző határértékek segítségével előállt a három növényzeti kategória (fák, cserjék, lágyszárúak). A művelétsor utolsó lépéseként a fásszárú növényzet alatti felszínborítási kategóriák előállítására került sor. Ehhez egy háromsávós 2011-ből származó ortofotót használtam fel 0,1 méteres geometriai felbontással, amelyet a Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi tanszék (korábban Természeti Földrajzi és Geoinformatikai tanszék) bocsájtott rendelkezésemre. E művelet során jelentős mennyiségű manuális osztályba sorolást alkalmaztam a pontosság növelése érdekében. A szegmentálás és az osztályozás eredményeképpen előállt egy normál felszínborítási, illetve egy fakoronák alatti felszínborítási térkép, amelyeket a kategóriák százalékos arányának kiszámításához használtam fel.

A különböző hidrológiai folyamatoknak (például infiltráció, lefolyás, evapotranszpiráció) fontos befolyásoló tényezői az adott terület talajtani jellemzői. Ezen paraméterek megadását terepi felmérések, illetve szakirodalmi adatok felhasználásával valósítottam meg Fejes (2014) vizsgálatait felhasználva. A talajjellemzők közül kiemelendő a fizikai talajtípus, a növényzet növekedése és ezáltal közvetve az infiltráció szempontjából fontos paraméter a gyökérszóna mélysége. E két fontos adattípus mellett további inputokat is szükséges megadni, amelyekre, ha nincs elérhető terepi mérési adat, akkor alapértelmezett szakirodalmi adatokkal számol a modell. Ilyenek például a felületi hidraulikus vezetőképesség, és a kezdeti talajtelítettségi állapot. Emellett opcionális beállításként további a speciális attribútumot is be lehet állítani a talajokkal kapcsolatban (például transzmisszivitás telített talaj esetén, áteresztő/ nem áteresztő depressziós tárolás kapacitások stb.) (i-Tree, 2017).



21. ábra A modellezés folyamata az i-Tree Hydro-ban az M1 és M2 mintaterületek esetében

A 21. ábra foglalja össze a Hydro modellezési folyamatát kezdve az inputadatok rendszerezésétől egészen a főbb várható outputok bemutatásáig. Az inputadatoknál a három fentebb említett kategória látható, illetve pár példa a kiegészítő adatokra, mint amilyen a levélfelület index (Leaf-Area Index, LAI) vagy a Leaf-on/Leaf-off day (a mintaterületet jellemző vegetáció periódus kezdetét és végét jelző dátumok). Ez utóbbiból számítja a modell a vegetációs periódus hosszát, amely az intercepció éven belüli változására jelentős hatással van. Ez Magyarországon 200 és 215 nap közé tehető szakirodalmi adatok alapján és mivel ez csupán hosszútávon változik, ezért a modellezésnél erre támaszkodtam (Rötzer & Chmielewski, 2001; Schwartz, 2003; Szabó et al., 2016). A Hydro-ban a növényzet különböző méretparaméterei kiemelt szereppel bírnak, így erőteljesen épít a levélfelület indexre. Emellett

a modell egyenletei a törzsfelület indexszel (Bark-Area Index, BAI) is számolnak, illetve e kettő kombinációjából származtatott teljes fafelület index (Total Tree Area Index, TAI) is fontos paramétere az egyenletrendszernek. Ezeknek a mutatóknak az egyenletrendszerbe való beépítése azért is fontos, mivel a fásszárú vegetáció intercepció hatékonysága a faj-, kor- és típus jellemzők mellett a felfogó felületek kiterjedésétől függ a leginkább (Hirabayashi, 2013; Móricz et al, 2009; Wang et al., 2008). Mint ahogy az (1) egyenletben is látható egy korrekciós paramétert (Fleaf) is beépítettek a modellbe, amely a LAI értékét módosítja a vegetáció éven belüli kiterjedését figyelembe véve.

$$TAI=LAI*Fleaf+BAI \quad (1)$$

A Hydro lehetőséget biztosít különböző alternatív scenáriók felállítására is, amelyek során a valóstól eltérő jövő- vagy múltbéli felszínborítási adatokat használva nyerhetünk információt a felszínborításváltozás lefolyásra gyakorolt hatásáról. Alternatív scenárió vizsgálatokat az M0-ás pilot mintaterület esetében végeztem.

A modellezés végeredményeként kétféle kimeneti adatsomagot kapunk: lefolyással kapcsolatos eredményeket, illetve növényzeti felszínhez kötődő hidrológiai folyamatok eredményeit (Wang et al., 2008). Amennyiben alternatív felszínborítási scenárióval is dolgoztunk abban az esetben a különböző esetek összehasonlítására is lehetőség nyílik.

A felszíni lefolyást különböző időtartamokra összegezhetjük, így egy teljes év lefolyási mennyiségét vagy a havi változásokat is nyomon követhetjük. Emellett a Hydro információt szolgáltat arról, hogy ez a lefolyt csapadékmennyiség vízzáró vagy áteresztő felszínen folyt-e le. A lefolyás harmadik komponense pedig az alapvízhozam mennyisége, amely a csapadékmentes időszakban a felszín alatti vizekből táplálkozó alapvízhozamot takarja. A lefolyáshoz közvetve kapcsolódó folyamatként az infiltráció mennyiségét is megadja a modell, hiszen ez az a vízmennyiség, amely nem folyik le, hanem a talaj mélyebb rétegei felé migrál.

A növényzeti felszínhez kötődő hidrológiai folyamatok fákkal, illetve alacsony szárú növényzettel (lágyszárúak és cserjék) kapcsolatos eredményekre oszthatók (Wang et al., 2008). A modell eredményeket szolgáltat mindkét növényzeti csoport kapcsán az intercepcióról, a növényzeti felületeken ideiglenesen eltározott csapadékvíz mennyiségéről, az evaporációról és az áthullásról is. Az eredmények feldolgozásánál bizonyos esetekben egyben kezeltem növényzeti típusokra vonatkozó eredményeket, azonban vannak olyan esetek, ahol a két típus külön ábrázoltam (ezt az adott résznél feltüntetésre került).

#### 4.2.EPA SWMM alapú vizsgálatok

A doktori kutatásomban a városi zöldinfrastruktúra hidrológiai folyamatokban betöltött szerepe mellett a csapadékvízgyűjtési lehetőségek feltárását és a városi növényzet fenntartható öntözésének lehetőségét vizsgáltam. Erre az egyre aszályosabbá váló dél-magyarországi régió esetében még nagyobb szükség van, mivel a csapadékvíznek a jövőben nagyobb szerepet kell kapnia a fenntartható zöldfelület menedzsmentben. A csapadékvízgyűjtési lehetőségek mérésekkel történő vizsgálata mellett a hidrológiai és hidraulikai modellezés biztosít alternatív információ gyűjtési lehetőséget.

E kérdéskör vizsgálatában az opciók széles skálája és a modell térbeli rugalmassága miatt a választás a szintén az Egyesült Államokban kifejlesztett EPA SWMM (Environmental Protection Agency, Storm Water Management Model) modellre esett (modell verzió 5.1), amely egy dinamikus – egyeseményes vagy hosszútávú szimulációra is alkalmas – csapadék-lefolyás modell. Alapvetően azzal a céllal hozták létre, hogy segítse a városi lefolyás modellezését, a szennyvíz- és ivóvízhálózat, illetve csapadékelvezető rendszer területi tervezését és több szempontú vizsgálatát. A fejlesztés során azonban sok olyan elemmel bővült, amelyek lehetővé teszik a zöldinfrastrukturális és LID elemek beépítését (mint például csapadékvízgyűjtő tartályok, beszivárogtató árkok, növényzettel borított swale-ok vagy a

bioretenciós-cellák (ide tartoznak az esőkertek, zöldtetők), így kitűzött céljaimnak is megfelelt a modell (Rossman, 2015).

A modell kiválasztásánál az is feltétel volt, hogy jól felosztható legyen kisebb téregységekre (például tetőkre, udvarokra) és a csapadékvízgyűjtő tartályok/rendszerek integrálhatósága is megoldható legyen (Elliott & Trowsdale, 2007; Jayasooriya & Ng, 2014; Rossman, 2015). A modell által számított lefolyás egy adott területegységre (subcatchment) érkező csapadékmennyiségből generálódik, amely a területegység különböző tulajdonságaiból adódóan válik lefolyó vízmennyiséggé. A modell a subcatchment-ek közötti lefolyási útvonalak közötti hidraulikai tényezők, illetve víziközművek beépítésére (átemelő, csatornák, szivattyúk) is lehetőséget biztosít.

Kutatásaim során öt mintaterületen végeztem modellezést Szegeden, amelyből négy kisléptékű, míg az ötödik városi léptékű (A kisléptékűek helyszínei: Arany János Általános Iskola, Kemes utcai, Tünde téri, Garam utcai óvodák).

Az SWMM modell inputadatait alapvetően két nagy csoportba lehet sorolni: térbeli és meteorológiai adatok. A meteorológiai adatok közül a hőmérséklet (a léghőmérséklet napi minimum és maximum értéke), illetve az óras csapadékösszeg a kiemelendő, amelyeket a Szegedi Tudományegyetem, Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszékének adatbázisa, illetve az Országos Meteorológiai Szolgálat, szegedi szinoptikus állomásának adatai biztosították.

A térbeli adatok alapját a subcatchment-ek adják, amelyek változó méretűek és alakúak lehetnek és számos a lefolyás-párolgás arányát befolyásoló paraméterrel jellemezhetőek. Ilyen például a területük, lejtésük, a vízzáró területek aránya a terület egységeken belül, az érdességi együttható, a depressziós tározás mértéke vízzáró és áteresztő felületeken stb. A modell leírás több paraméterhez biztosít szakirodalmon alapuló együtthatókat, így például a különböző tetőfedő anyagok felületi érdessége is megadható (Rossman, 2015; Rossman & Huber, (2016a,b). A kutatásom során többféle subcatchment típust határoltam le. A kisléptékű vizsgálatok során épülettetőket, illetve áteresztő felszínnel rendelkező udvarokat is lehatároltam. Ezek esetében épületadatbázis alapján történt az adatfelvételezés, amit terepi szemrevételezés során pontosítottam. A teljes városra vonatkozó vizsgálat esetében ilyen részletességű terepi bejárásra nem volt lehetőség, így az épületadatbázis feldolgozásából származó adatok kerültek subcatchment-ként a modellbe (Gál et al., 2009).

Az EPA SWMM modell alkalmazása során számos olyan vizsgálat született, amelyben hasonlóan az általam elvégzett kutatáshoz az egyes épülettetők egy-egy subcatchmentet reprezentáltak a modellben (Burszta-Adamiak & Mrowiec, 2013; Cipolla et al., 2018; Hamouz & Muthanna, 2019; Iffland et al., 2021). A tetőkről származó csapadékvízgyűjtési potenciál felmérésére számos megközelítés létezik, amelyek az általam alkalmazott módszerhez hasonlóan épületadatbázisból származó téradatokat használtak (Adugna et al., 2018; Aladenola & Adeboye, 2010; Gwenzi & Nyamadzawo, 2014; Roman et al., 2017). Emellett számos kutatásban egyéb inputokkal is kiegészítették a térbeli adatbázist (mint például lakossági adatokkal), hogy a vízhasználatokról/igényekről információt szerezzenek (Ghisi et al., 2006, Villar-Navascués et al., 2020).

A csapadékvízgyűjtési rendszereket és az ezekkel kapcsolatos kutatásokat két csoportba lehet sorolni a vizsgálatok kiterjedésétől és céljától függően. A PHS (pond harvesting systems) megnevezést alapvetően nagyobb kiterjedésű rendszerekre alkalmazzák, amelyek összetett infrastruktúrát tartalmaznak kezdve a tetőkről származó vizek összegyűjtésétől, az elvezetésen át a városrészszintű tárolásig, felhasználásig. Az ilyen rendszerek sok esetben komplex elemeket is magukba foglalnak, akár kisebb tározó tavakat, vizesélőhelyeket is városrészszinten. A kisebb léptékű rendszerek megnevezése (RHS, roof harvesting systems), alapvetően egy adott épületet és annak szűkebb környezetét foglalja magában (Karim et al., 2021; Liaw & Chiang, 2014; Zabidi et al., 2020). Belmeziti et al. (2013) vizsgálatai során is fontos szerepet kapott az önálló épületek szintje és a városi szintek közötti kapcsolat. Kutatásaim során mindkét léptéken az RHS megközelítést alkalmaztam. Az egész városra kiterjedő vizsgálat esetében ez azzal indokolható, hogy ugyan a nagy mintaterületen lehatárolt összes épülettető modellezésre

került (a subcatchmentek száma 13 980), azonban a modellezés célja nem a köztük lévő hidrológiai kapcsolat, hanem az egyes tetők és szűk környezetük közötti kapcsolat feltárása volt. Ez pedig a nagy terület ellenére is a kisléptékű értelmezést teszi szükségessé. A vizsgálatok további szakaszában azonban több eltérés is van a mintaterületeken alkalmazott módszertanok között. Míg az iskola és a három óvoda területén kiépített gyűjtőrendszerek találhatóak, így a tartályok esetében konkrét méretekkel lehet kalkulálni, addig a teljes városra vonatkozó vizsgálat esetében erre nem nyílt lehetőség, hiszen az messze meghaladta a kutatás kereteit. Ebből adódóan ez esetben az egyes tetőkről maximálisan összegyűjthető vízmennyiség képezte a további vizsgálatok alapját.

A teljes városra kiterjedő vizsgálat esetében a megfelelő öntözési igény kiszámításához elengedhetetlen a vízgyűjtőfelületek (tetők) körülötti növényzet mennyiségének, minőségének, valamint a gyűjtőfelületektől való távolságának meghatározása. Ez a három paraméter kombinációja alapvetően befolyásolja, hogy mely növényzeti felszínek teljesítik a gazdaságos öntözhetőség feltételeit. Annak érdekében, hogy ezek a területek pontosabban lehatárolhatóak legyenek az egyes subcatchmentek (tetők) köré puffer zónákat generáltam 10, 20 és 50 méteres távolságokkal. A különböző pufferzóna-távolságokat különböző rétegeken tároltam és a számításokat is külön-külön végeztem el rajtuk. Az egyes számításokat minden egyes pufferzónára elvégeztem, így a különböző indexek és indikátorok mind a 13 980 tetőhöz tartozó 10, 20 és 50 méteres pufferzónára kiszámolásra kerültek (a pufferzónák nem tartalmazzák az épületek területét). Egy-egy zöldfelület több pufferzónába is tartozhat, mivel a cél az egyes subcatchmentek és a körülöttük lévő puffer területek csapadékvízgyűjtési és öntözhetőségi lehetőségeinek feltárása volt. Így az, hogy egy zöldfelület hány tetőről származó csapadékvízzel öntözhető, nem képezte részét a módszertannak. Ha egy zöldfelület több tetőről származó csapadékvízből is kaphat öntözővizet – abból adódóan, hogy több pufferzóna közös metszetében helyezkedik el – abban az esetben a tetőkről származó öntözővíz nem adódott össze. Minden esetben az került kiszámításra, hogy egy tetőről származó vízmennyiség képes-e fedezni a pufferzónájában található zöldfelület öntözővízigényét.

Az öntözendő növényzet és zöldfelület kategóriába minden NDVI index alapján beazonosítható vegetáció beletartozott, így a magán és közösségi területek is, ebből adódóan a telek- és tulajdonjogi viszonyok nem befolyásolták a vizsgálatot. A növényzet mennyiségének és minőségének pufferzónán belüli definiálásához egy NDVI grid adatbázis használtam. Ezt a grid adatbázist egy 5 méteres felbontású NDVI térképből állítottam elő, amelyet egy 2015-ös UltraCam X (RGB-NIR) négycsatornás ortofotóból származtattam (Lechner Tudásközpont, 2015). A gridháló minden egyes pontja egy NDVI értéket kapott, így a növényzetet el lehetett különíteni az egyéb felszínborítási típusoktól. Az első módszer, amelyet alkalmaztam a felszínborítás definiálására az adott pufferzónán belül, a zóna átlagos NDVI értéke volt. Ez a megoldás általános információkat szolgáltatott a felszínborításról, azonban nem határozta meg a növényzet zónán belüli minőségét és arányát. A második módszer során már a növényzet mennyiségét és minőségét is figyelembe vevő számításokat alkalmaztam. A gridháló egyes pontjai 25 m<sup>2</sup>-es területet reprezentálnak (egy 5x5 méteres pixel területét), amelyeket NDVI határértékek alapján kategóriákba soroltam. A határértékeket Aquino et al. (2018) alapján, illetve az ortofotó tulajdonságait is figyelembe véve határoztam meg, mivel a fotó készítésének időpontjában jellemző szárazság némileg befolyásolta a határértékek megállapítását (Táblázat 4.).

*Táblázat 4. Az NDVI kategória határok (Aquino et al., 2018 alapján)*

NDVI kategória határok	Leírás
(-1) – 0	Nem növényzettel fedett felszínek
0 – 0,2	Alacsonyabb minőségű növényzet



0,2 – 1	Magasabb minőségű növényzet
---------	-----------------------------

Ez alapján a különböző NDVI kategóriába besorolt grid pontokat összegeztem minden egyes pufferrónára. A különböző kategóriák területét kiszámítottam pufferrónánként, amely alapján két indikátort állítottam elő.

$$G1 = \frac{A_{0,2-1}}{A} * 100 \quad (2)$$

ahol:

**G1** a magasabb minőségű vegetáció aránya a pufferrónán belül (%),

**A** a pufferróna teljes területe (m<sup>2</sup>),

**A<sub>0,2-1</sub>** 0,2-1 NDVI értékek közé eső gridpontok területe (m<sup>2</sup>).

$$G2 = \frac{A_{0-1}}{A} * 100 \quad (3)$$

ahol:

**G2** a teljes vegetáció (magas és alacsony minőségű együttesen) aránya a pufferrónán belül (%),

**A** a pufferróna teljes területe (m<sup>2</sup>),

**A<sub>0-1</sub>** 0-1 NDVI értékek közé eső gridpontok területe (m<sup>2</sup>),

Ezek az indikátorok az növényzeti NDVI kategóriák területének százalékos arányát mutatják meg pufferrónákon belül. A G1 indikátor a magasabb minőségű növényzetet reprezentálja, szemben a G2-vel, amely az adott pufferrónán belüli teljes növényzetet foglalja magában. E százalékos értékeket három osztályba soroltam, amelyek megmutatják a G1 és G2 indikátorok pufferrónán belüli arányát (Táblázat 5.). Ezzel minden pufferrónáról összetett információt kaptam a növényzet szempontjából. Egy példán keresztül szemléltetve: egy adott pufferróna G2-es indikátort tekintve (tehát minden növényzetet figyelembe véve) G<sub>high</sub> osztályba került, ha a gridpontok, amelyek 0 és 1 között NDVI értéket vettek fel 51% feletti arányt tesznek ki a pufferróna pontjaiban. Azonban ugyanez a pufferróna a G1 indikátort tekintve kaphat G<sub>low</sub> besorolást, ha a gridpontok, amelyek 0,2 és 1 között NDVI értéket vettek fel, csupán 15-34% közötti arányt tesznek ki a pufferróna pontjaiban. Vagyis az a helyzet áll elő, hogy bár magas a pufferrónán belül a növényzeti arány, abból kisebb arányt képvisel a magas minőségű (azaz biológiai aktivitás szempontból fontosabb) vegetáció.

Táblázat 5. A G1 és G2 indikátorok osztályozása (G<sub>low</sub> = alacsony arányú növényzet, G<sub>med</sub> = közepes arányú növényzet, G<sub>high</sub> = magas arányú növényzet)

	Osztályok		
	G <sub>low</sub>	G <sub>med</sub>	G <sub>high</sub>
G1 és G2 indikátorokra számított arányok	15-34%	35-50%	51%-

Az indikátorok és az osztályozásuk együtt jellemzik a pufferrónákon belüli növényzetet és alapot adnak az öntözővízigény kalkulálására. A potenciálisan elérhető és felhasználható öntözővíz a növényzet vízigényének függvényében számítható ki. A doktori kutatásom esetében Szegedre vonatkozó szakirodalmi adatokra támaszkodva 450 mm (0,45 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) öntözővíz igénnyel számoltam a vegetációs periódusra (Jószainé Párkányi, 2007). Ez az érték nem állandó, befolyásolhatják a vizsgált év meteorológiai paraméterei is. Továbbá, amennyiben pontosabb számszerű adatok (például kataszteri felmérések) érhetőek el a növényzet minőségéről és mennyiségéről, akkor ez az érték tovább pontosítható. Mivel ilyen

pontosságú adat Szeged esetében nem áll rendelkezésre, ezért a szakirodalmi  $0,45 \text{ m}^3/\text{m}^2$  értéket, mint egységnyi maximum értéket vettem, amelyet úgy tekintettem, hogy 100%-ban fedezi az adott terület öntözővízigényét. A következő egyenletek a pufferzónák öntözővízigény számítási módszertanának alapjául szolgáltak (22. ábra).

$$V_{\text{total}} = \bar{V} * A \quad (4)$$

ahol:

$V_{\text{total}}$  a teljes öntözővízigény (az az öntözővíz mennyiség, amelyet akkor szükséges a pufferzónára kijuttatni, ha azon belül a növényzet aránya 100%-ot tesz ki) ( $\text{m}^3$ ),

$\bar{V}$  az öntözővízigény ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ) (ebben a vizsgálatban  $0,45 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ),

$A$  a pufferzóna területe ( $\text{m}^2$ ).

$$P_{\text{total}} = \frac{V_{\text{roof}}}{V_{\text{total}}} * 100 \quad (5)$$

ahol:

$P_{\text{total}}$  a teljes megvalósítható öntözővízigény (a  $V_{\text{total}}$  mekkora mértékben fedezhető a tető lefolyásából) (%),

$V_{\text{roof}}$  a tetőről származó lefolyás mennyisége ( $\text{m}^3$ ).

$$V_{G1} = 0,01V_{\text{total}} * G1 \quad (6)$$

ahol:

$V_{G1}$  a magasabb minőségű növényzet öntözővízigénye (az öntözővíz mennyisége, amelyet a pufferzónára szükséges kijuttatni, ha csak a G1 indikátorban foglalt növényzet van figyelembevétel) ( $\text{m}^3$ ).

$$V_{G2} = 0,01V_{\text{total}} * G2 \quad (7)$$

ahol:

$V_{G2}$  a teljes növényzet öntözővízigénye (az öntözővíz mennyisége, amelyet a pufferzónára szükséges kijuttatni, ha csak a G2 indikátorban foglalt növényzet van figyelembevétel) ( $\text{m}^3$ ).

$$P_{G1} = \frac{V_{\text{roof}}}{V_{G1}} * 100 \quad (8)$$

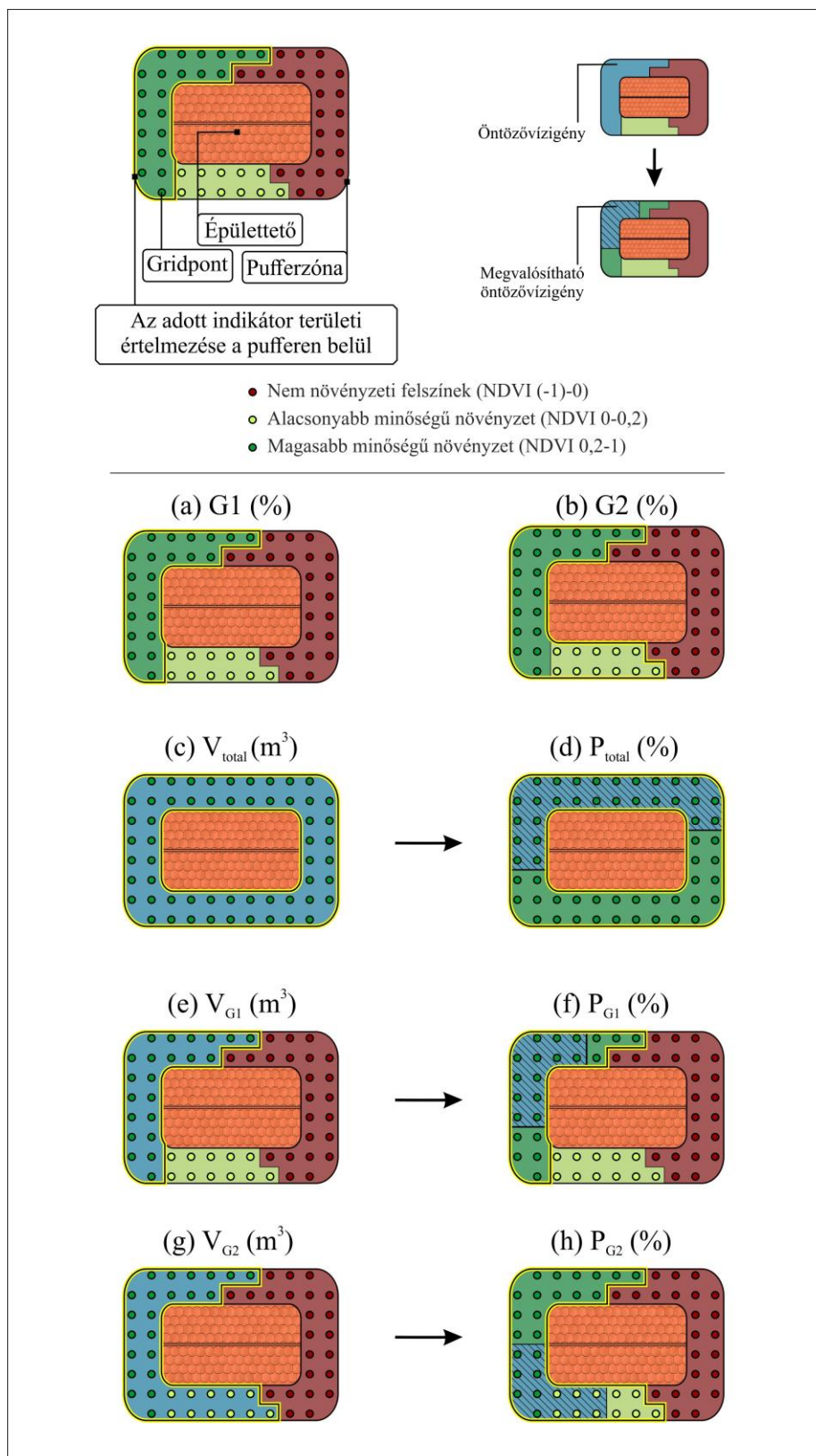
ahol:

$P_{G1}$  a magasabb minőségű növényzet megvalósítható öntözővízigénye (a  $V_{G1}$  mekkora mértékben fedezhető a tető lefolyásából) (%),

$$P_{G2} = \frac{V_{\text{roof}}}{V_{G2}} * 100 \quad (9)$$

ahol:

$P_{G2}$  a teljes növényzet megvalósítható öntözővízigénye (a  $V_{G2}$  mekkora mértékben fedezhető a tető lefolyásából) (%).



22. ábra A pufferzónákra vonatkozó öntözővíz számítás módszertanának térbeli bemutatása – (a) a magasabb minőségű vegetáció aránya a pufferzónán belül, (b) az összes vegetáció aránya a pufferzónán belül, (c) a teljes pufferzóna öntözővízigénye, (d) teljes megvalósítható öntözővízigény, (e) a magasabb minőségű növényzet öntözővízigénye, (f) magasabb minőségű növényzet megvalósítható öntözővízigénye, (g) az összes növényzet öntözővízigénye, (h) az összes növényzet megvalósítható öntözővízigénye

Ezek az indikátorok minden subcatchment pufferzónájára kiszámításra kerültek, mind a három puffer távolságra vonatkozóan (10, 20, 50 méter) (22. ábra). Ezek alapján lehatárolásra kerültek azok a területek, amelyek az összegyűjthető csapadékvízzel öntözhetőek. A három indikátor árnyaltan tárja fel az öntözési lehetőségeket, amennyiben a pufferzóna teljes mértékben növényzettel borított ( $P_{total}$ ) vagy a növényzet aránya definiálva van az NDVI kategóriák alapján ( $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ).

## 5. Eredmények

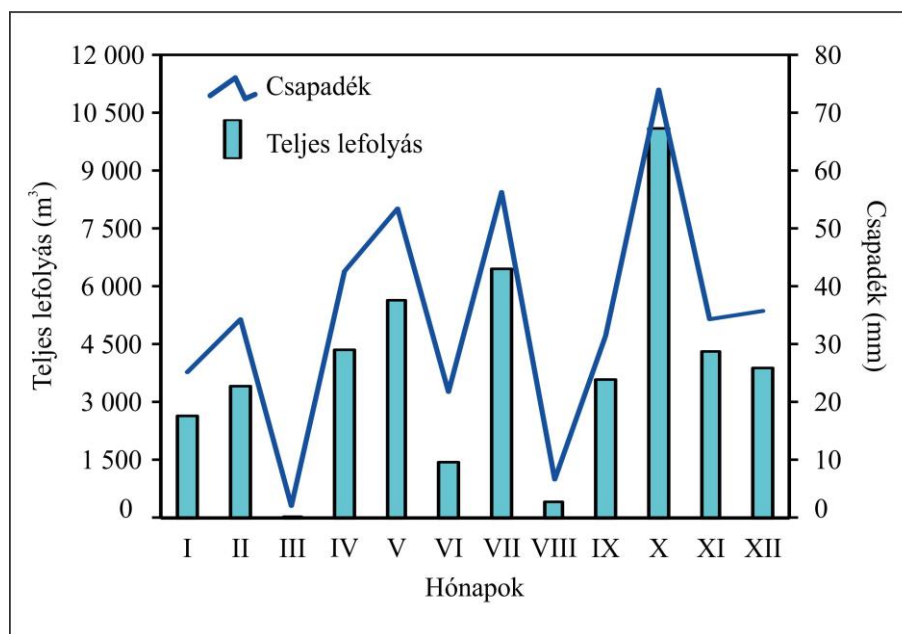
### 5.1. A növényzet hatását bemutató eredmények

#### 5.1.1. Mikroléptékű modellezés eredményei

A szegedi belvárosban található Széchenyi teret is magába foglaló mintaterület volt a helyszíne az i-Tree Hydro-val végezett első vizsgálatoknak. Ebből adódóan pilot, előkészítő lépésnek tekinthető a doktori disszertációban bemutatott további vizsgálatoknak (Csete & Gulyás, 2019a). Ennek a viszonylag kisméretű mintaterületi vizsgálatnak a célja volt az, hogy a modell használhatóságát, limitációit teszteljem, a magyarországi inputadatok előállításának kivitelezhetőségét felmérjem és előkészítsem a modellt a nagyobb mintaterületeken végzett vizsgálatokhoz.

#### Alapeset eredményei

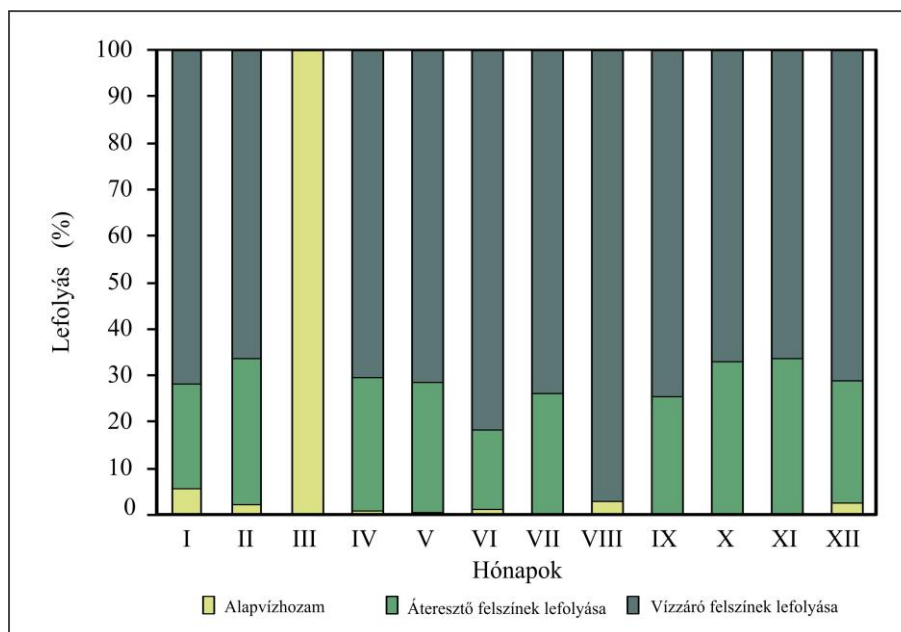
2012-ben – amely a modellben használt meteorológiai adatok alapját jelentette – a szegedi mérőállomáson az éves csapadékösszeg 417,7 mm volt, amely a konkrét mintaterület esetében 82 350 m<sup>3</sup> csapadékot jelentett. Ez a csapadékösszeg jelentősen elmarad az utóbbi 30 év átlagától, amely 508 mm (Harris et al., 2014; Unger et al., 2020). Ez a vízmennyiség képezte az alapját a vizsgálatok során a többi hidrológiai folyamatnak. Az éves teljes lefolyás 46 336 m<sup>3</sup> volt, amely a csapadék mennyiség 56%-a (23. ábra).



23. ábra A csapadék és a lefolyás a mintaterületen

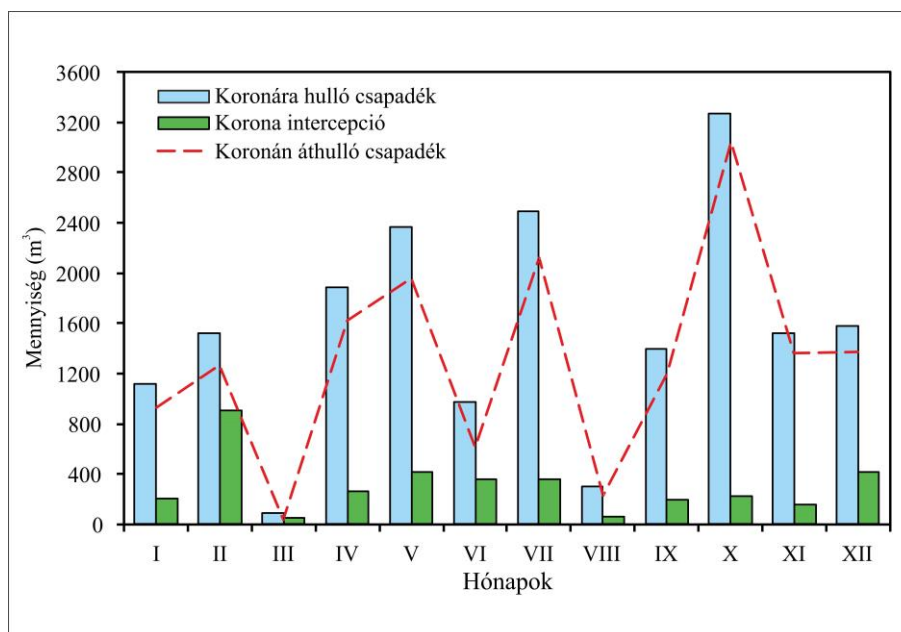
Mivel a lefolyás mennyiségét leginkább csapadék határozza meg – az egyéb meteorológiai paramétereket is figyelembe véve – így a havi mennyisége is a csapadék alakulásához igazodik. A lefolyás különböző elemeire viszont már nagyobb befolyással vannak a különböző egyéb paraméterek és folyamatok, mint például a felszínborítási arányok, növényzet típusa stb. Havi bontásban tekintve a csapadék legnagyobb része (69%) vízzáró

felszíneken folyik le és csak kisebb arányban (28%) áteresztő felszíneken. A fennmaradó mennyiség – az alapvízhozam – márciusban tette ki a legnagyobb arányt a teljes lefolyáson belül, amelynek oka, hogy ekkor kevés csapadék hullott, így a felszínen csak minimális volt a lefolyt vízmennyiség (24. ábra).



24. ábra A lefolyás komponensek havi bontásban

A vegetációval kapcsolatos információkat két csoportra lehet osztani: fásszárú vegetációval (fák) és alacsony szárú vegetációval (lágyszárúak és cserjék) kapcsolatos eredmények. A csapadék 25,6%-a hullott a teljes növényzetre. A 2.2.2 fejezetben bemutatottak alapján a modellezés során elkülöníthetők a lombkorona/csapadék interakció különböző komponensei, az eddigiéknél sokkal részletesebb elemzést lehetővé téve. A vizsgált időszakban a fásszárú vegetációra a csapadék 22,5%-a hullott, ebből is látható, hogy a mintaterületen a fás vegetáció területi kiterjedése jelentősen meghaladta a többi kategóriáét. A fák intercepciója az év során meghaladta a területre hulló teljes csapadékmennyiség 4%-át.



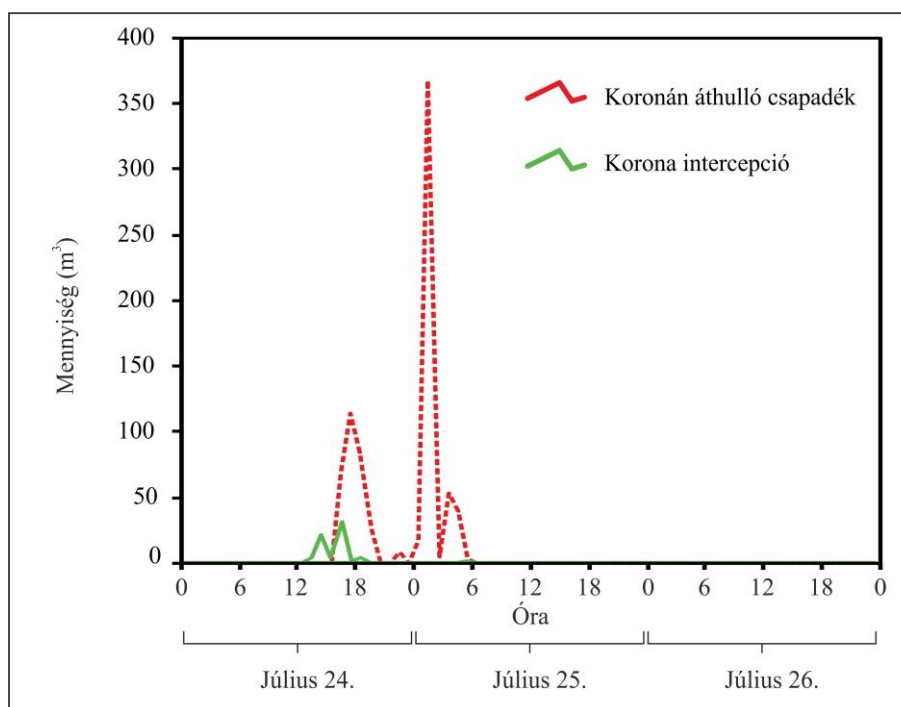
25. ábra A fakorona interakciói

A fakoronára hulló csapadékmennyiség több mint 19%-át fogta fel a fás vegetáció, a fennmaradó hányad a koronán áthulló csapadék részévé vált, és így elérhette a fakoronaborítás alatti felszín (25. ábra). Az intercepció-áthullás arányát számos paraméter befolyásolja, mint például a csapadék halmazállapota, a vegetációs periódus időtartama, a légköri állapot és egyéb paraméterek. Az intercepció hatékonysága alapvetően a vegetációs időszak fő idényében (tavasz végétől ősz elejéig) a legmagasabb, azonban ezt befolyásolhatja a csapadékesemények intenzitása és hossza is. Az intenzív csapadékok esetében a lombkorona nem képes annyira fékezni csapadékhullást, illetve a hosszan elhúzódó események alatt könnyebben telítetté válik a lombkorona, amely szintén a nagyobb arányú áthullást segíti elő.

### Csapadékesemény alatti folyamatok vizsgálata

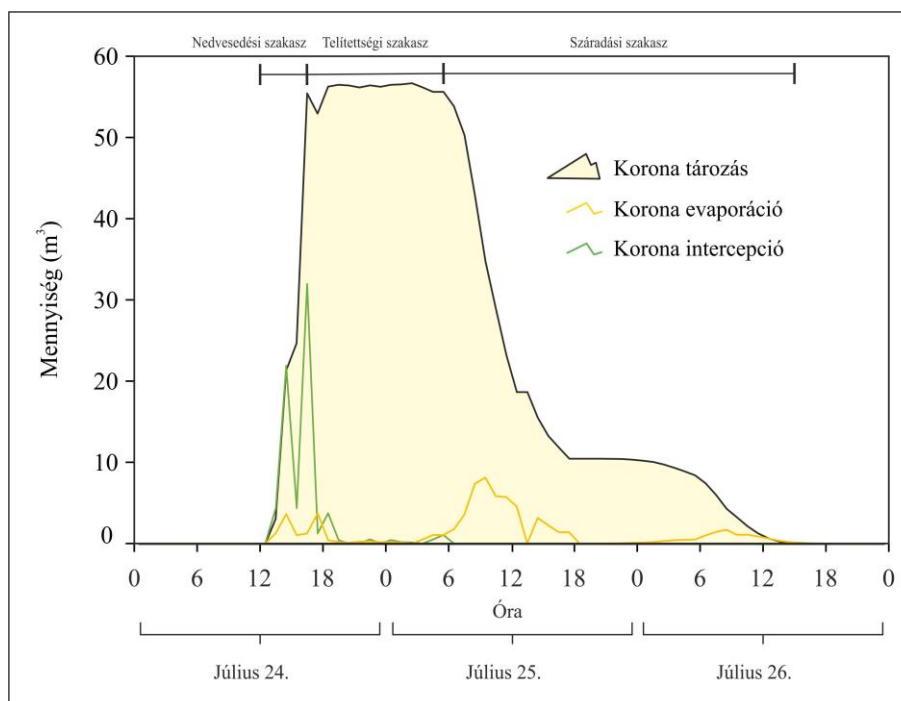
A Hydro segítségével a csapadékesemények során lejátszódó hidrológiai folyamatokról is képet kaphatunk, amennyiben az óras felbontású eredményeket elemezzük. Ennek során egy 72 órás periódust vizsgáltam 2012. július 24., 0:00 és július 26. 23:00 között. A csapadékesemény kiválasztása során szempont volt, hogy az eseményt megelőzően hosszabb ideig nem történt csapadékhullás és így a lombkorona tározási kapacitását és az intercepció hatékonyságát nem befolyásolták más csapadékeseményekből eredeztethető zavaró tényezők. A csapadékhullás a 72 órás perióduson belül 17 órán keresztül tartott, ez volt az ötödik leghosszabb egybefüggő csapadékesemény az év során. Ez idő alatt 3 825 m<sup>3</sup> csapadék hullott a mintaterületre. A vizsgált időszak két főbb részre osztható: az első részben több kisebb csapadék, míg a második részben egy nagyobb csapadék hullott.

A csapadékesemény kezdetével az intercepció tározás is kezdetét vette. A csapadékhullás elején – amíg a lombkorona nem érte el a tározási kapacitása maximumát – az intercepció mennyisége közel megegyezik a csapadék mennyiségével és a két görbe átfedésben van. Azonban mikor a lombkorona tározási kapacitása eléri maximumát az intercepció csökkenni kezd és többlet vízmennyiség az áthullás részévé válik. Ezt két időpontban jelentkezik jól láthatóan (július 24. 15:00 és 17:00). A vizsgált időszak második felében a levélfelületek telítettek, így már nem képesek több vízmennyiséget megtartani. Ez az állapot a csapadékesemény végéig fennáll, majd ezután a tározott vízmennyiség kezd kiürülni, ami körülbelül 14 órát vesz igénybe (26. ábra, 27. ábra).



26. ábra Az intercepció és áthullás a vizsgált csapadékesemény során

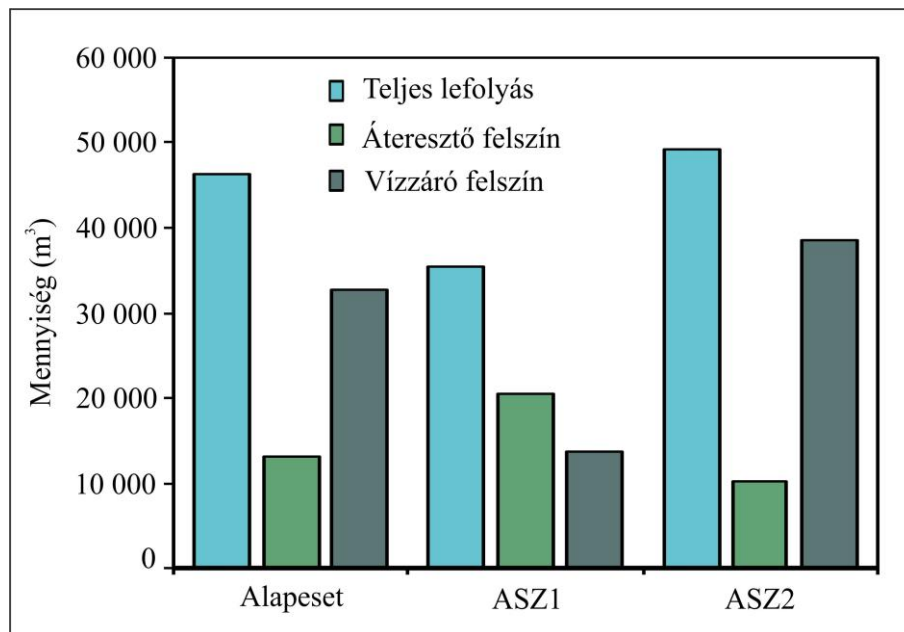
Az intercepció kezdete és a tározott vízmennyiség kiürülése között hozzávetőlegesen 48 óra telt el. Ez a folyamat nagymértékben függ a lombkorona állapotától és komplexitásától, illetve a főbb meteorológiai paraméterektől is. Az ideiglenesen eltározott víz mennyisége nagyban függ az intercepciótól, így két folyamat között szoros kapcsolat áll fent. A Hydro modell a tározást kumulatív módon számolja, így az intercepció során a felfogott csapadék mennyisége mindig hozzáadódik az előző óra adataihoz, és értelemszerűen a csapadékhullás elején kiugró növekedés tapasztalható az értékében. A tározott vízmennyiség kiürülése több órás folyamat, amely alapvetően a csapadékhullás befejeződése után kezdődik el. Az eltározott víz mennyisége állandósul, miután a tározási kapacitás eléri maximumát (jelen esetben  $56 \text{ m}^3$ -en), és ez az állapot a csapadékhullás végéig fennmarad. Az evaporáció az egész vizsgált időszakban jelen van, de igazán kiugró értéket a második szakasz végén – a csapadékhullás befejeztével – produkál. Az áthullás ellenben akkor válik a fő folyamattá, amikor a lombkorona telítetté válik (27. ábra). A csapadékhullás elején az intercepció nagy hatékonysággal működött, azonban 16:00-kor (július 24.) csapadék már áthullott a lombkoronán. 0:00-kor (július 25.) a lombkorona már a telítettségi fázisban volt és elérte tározási kapacitásának maximumát, így a koronára érkező csapadék az áthullás részévé vált (26. ábra).



27. ábra Korona tározás és intercepció a vizsgált csapadékesemény alatt

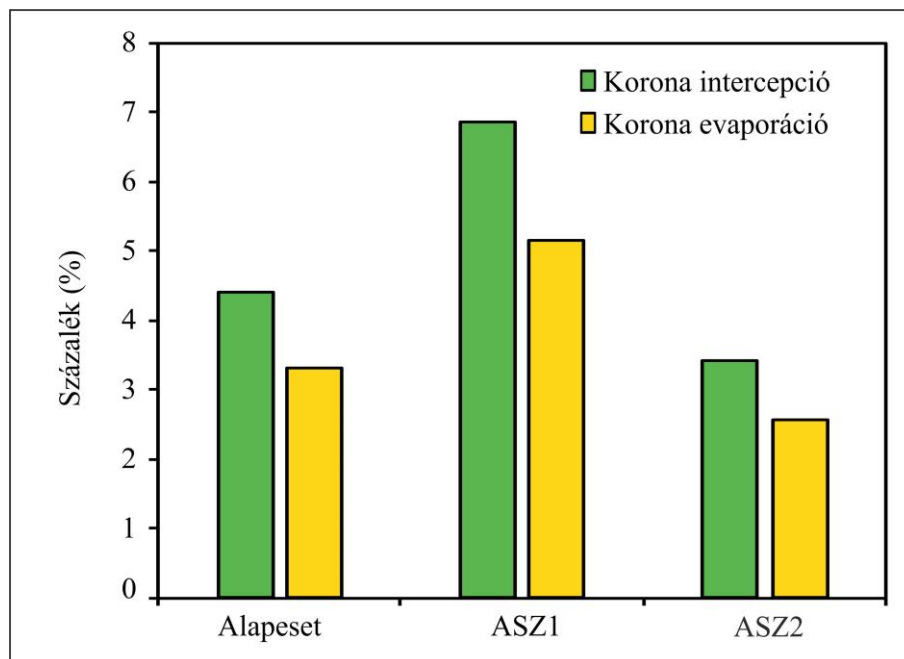
### Szenárió elemzés eredményei

A szenáriókban alkalmazott felszínborítási arányváltoztatások a csapadék-lefolyás arányban jelentős eltéréseket eredményezhetnek (pl. a vegetáció arányának növelése a teljes lefolyás mennyiségének csökkenéséhez járulhat hozzá). A teljes lefolyás mennyisége az ASZ1-ben  $35\,000 \text{ m}^3$ -re csökkent, míg az ASZ2-ben  $49\,000 \text{ m}^3$ -re nőtt az Alapesethez képest. A felszínborítás megváltoztatásával az ezen belüli arányokban is változások következnek be: az Alapesethez képest az ASZ1-ben az áteresztő felszínnek lefolyása  $13\,000 \text{ m}^3$ -ról  $20\,000 \text{ m}^3$ -re növekedett, ezzel szemben a vízzáró felszínnek lefolyása jelentős mértékben csökkent, míg az ASZ2 során fordított folyamatok játszódtak le (28. ábra).



28. ábra A lefolyás mennyiségi változása a scenáriók során

A fás vegetáció intercepciója ASZ1 scenárió során mérhetően növekedett, a teljes csapadék 6,8%-át fogta fel az Alapeset 4,4%-ával szemben. A magasabb intercepció magasabb evaporációt is eredményez, ami így 4 200 m<sup>3</sup>-re növekedett. A vegetáció csökkenésével számoló ASZ2 során az intercepció hatékonysága 3,4%-ra csökkent, illetve az evaporáció mennyisége (2 100 m<sup>3</sup>) is elmaradt az alapeset eredményeitől (29. ábra).

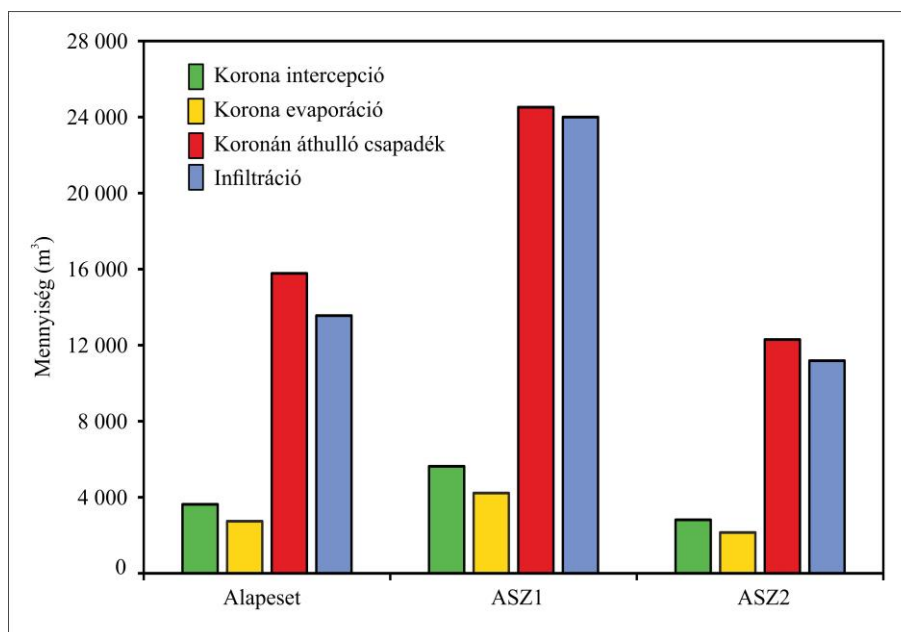


29. ábra A scenáriók intercepciójának és evaporációjának változása

Az előbbiekből következően az áthullás mennyisége is változott: az Alapesetben 15 700 m<sup>3</sup> volt, amely az ASZ1-ben 24 500 m<sup>3</sup>-re növekedett, az ASZ2-ben pedig 12 300 m<sup>3</sup>-re csökkent. A fenntartható csapadékgazdálkodást tekintve az ASZ1 egyértelműen kedvezőbb scenárió, hiszen az intercepció, illetve az evaporáció is magasabb az Alapesethez képest. Habár az ASZ1 során magasabb a koronán áthulló csapadék aránya, a scenárió során az infiltráció is jelentős mértékben megnőtt, amely a lefolyás csökkentést segíti elő. Az infiltráció



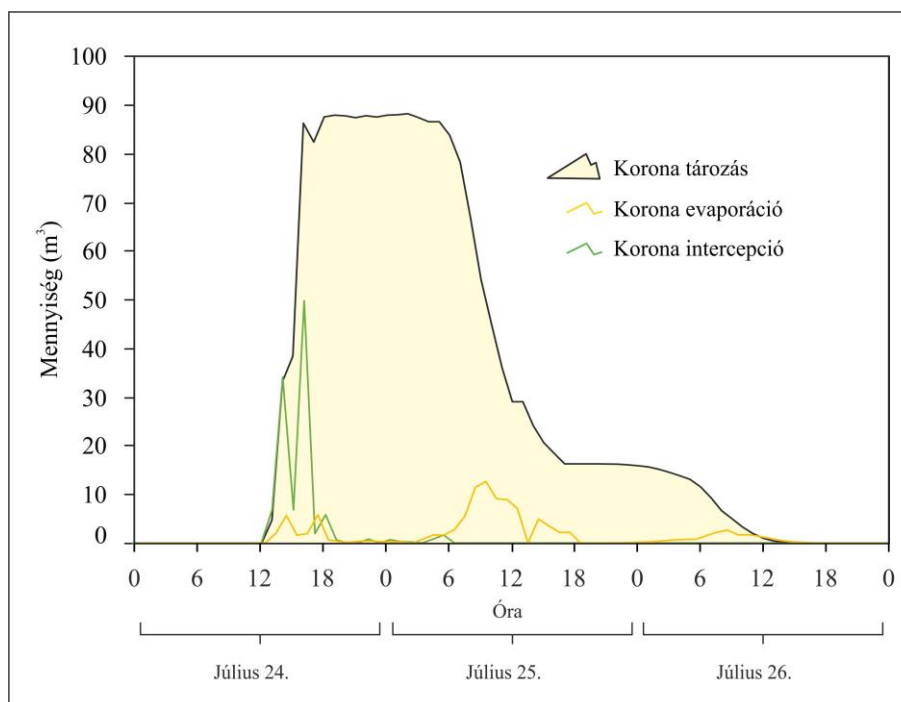
mennyisége 13 600 m<sup>3</sup> volt az Alapeset során, míg az ASZ1 során 24 000 m<sup>3</sup>-re növekedett ez az érték, az ASZ2 során pedig jóval elmaradt ettől (30. ábra).



30. ábra A koronán áthulló csapadék és az infiltráció mértéke szcenáriónként

Ha a folyamatokat összegezve tekintjük át akkor az az rajzolódik ki, hogy az ASZ1 folyamatai alapvetően kedvező irányba változtak az Alapesethez képest. A fakorona borítás eredményeképpen az intercepció, az evaporáció mértéke és az infiltráció is növekedett, míg a lefolyás mértéke csökkent.

Az Alapeset során vizsgált csapadékesemény alapfolyamataiban az ASZ1 szcenárióban is hasonló képet mutat, azonban az egyes folyamatokhoz kötődő vízmennyiségekben történtek változások. Az intercepció mennyisége növekedett, így a tározási kapacitás maximuma is emelkedett 56 m<sup>3</sup>-ról 90 m<sup>3</sup> közelébe (31. ábra).



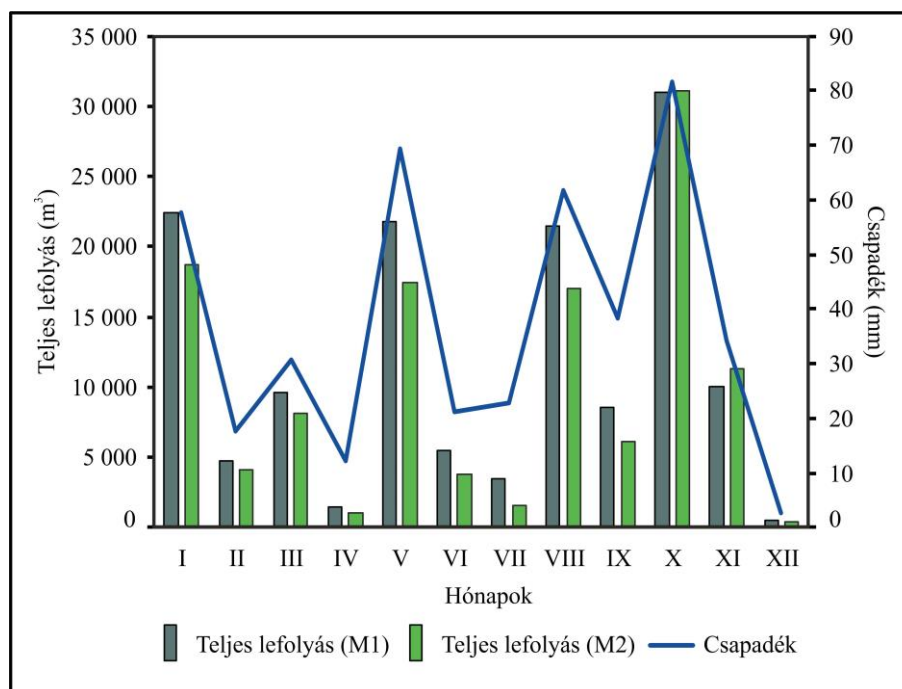
31. ábra Korona tározás és intercepció a vizsgált csapadékesemény alatt (ASZ1)

### 5.1.2. Lokális léptékű modellezés eredményei

A pilot projekt tapasztalatait felhasználva a két eltérő szerkezetű városrész hidrológiai folyamatainak összehasonlítása volt a cél a következő vizsgálatok során. A vizsgálatok során már teljesen saját feldolgozású inputadatokkal dolgoztam, így az eredmények elemzése mellett feltárható a modell hazai adaptálhatóságának kérdésköre is (Csete & Gulyás, 2020; Csete et al., 2021).

#### Lefolyással kapcsolatos eredmények

A vizsgálatokhoz felhasznált meteorológiai adatok 2015-ből származnak. Ebben az évben 450,1 mm éves csapadékösszeget mértek a szegedi meteorológiai mérőállomáson. Ez a csapadékösszeg alacsonyabb, mint utóbbi 30 év átlaga, amely 508 mm (Harris et al., 2014; Unger et al., 2020). Ez az M1 mintaterületen 273 268 m<sup>3</sup> csapadékot jelentet, míg az M2 mintaterületen 294 013 m<sup>3</sup>-t, amely a lefolyás és a többi hidrológia folyamat alapját jelentette. A dolgozat további részében a területarányos értékek/eredmények kerülnek bemutatásra (a területarányosítás a 3.2.1 fejezetben került részletezésre) (Táblázat 6.). Az M1 területen az éves teljes lefolyás a csapadék 51% (140 595 m<sup>3</sup>), míg az M2 területen a csapadék 44%-a (120 643 m<sup>3</sup>) volt. A teljes lefolyás havi eloszlása hasonló volt a két mintaterületen, többnyire az M2 esetében voltak alacsonyabbak az értékek (32. ábra).

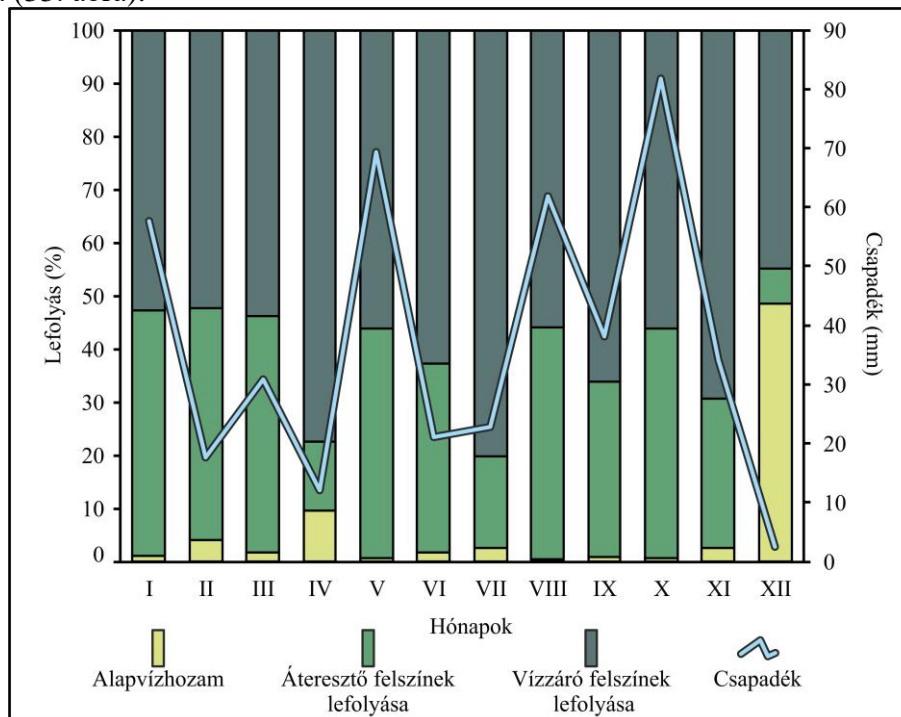


32. ábra A csapadék és teljes lefolyás havi eloszlása

A két mintaterület közötti különbségek a teljes lefolyás éves mennyiségében jól tükröződnek. Az M1 terület magasabb lefolyási aránnyal rendelkezik, mint az M2 terület, alapvetően az alacsonyabb növényzeti borítottság, az alacsonyabb áteresztő felszínarány és a kevésbé hatékony infiltráció következtében. Az M2 területen éves szinten 14,2%-kal kevesebb területarányos lefolyás mennyisége az M1 területhez viszonyítva, amely közel 20 000 m<sup>3</sup>-nyi különbséget jelent.

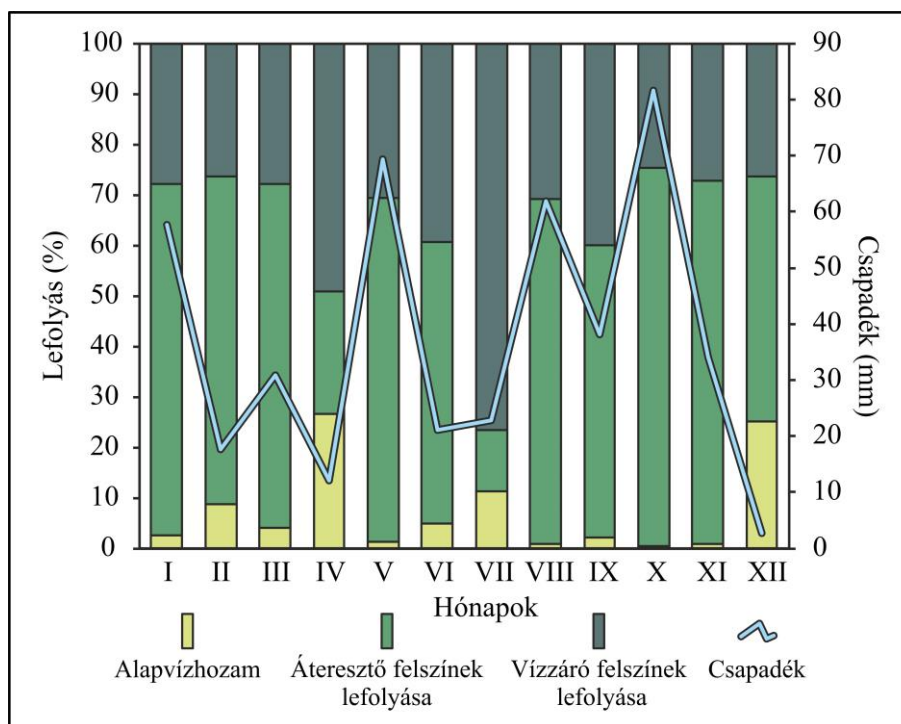
Amennyiben a teljes lefolyáson belüli alkategóriákat vizsgáljuk, jelentős eltéréseket tapasztalhatunk a két mintaterület eredményei között. Az M1 területen minden hónap esetében a vízzáró felületek lefolyása volt a domináns. A vízzáró felszínnek lefolyása az év során alapvetően egységes képet mutatott az alacsony csapadékkal rendelkező hónapok kivételével.

Az alapvízhozam aránya áprilisban és decemberben emelkedett meg a többi komponenshez viszonyítva (33. ábra).



33. ábra Lefolyás komponensek az M1 területen

Az M2 terület esetében – köszönhetően az eltérő felszínborítási struktúrának – eltérő arányok figyelhetők meg a teljes lefolyáson belül. Hasonlóan az M1 területhez az csapadékszegényebb hónapok jelentették itt is a kivételeket, ebben az esetben azonban a többi hónapban az áteresztő felszínek lefolyása volt a magasabb arányú. Az alacsony csapadékú hónapok – április, július és december – során az alapvízhozam arány jelentősen magasabb volt a többi hónapban tapasztalt mennyiségekhez képest (34. ábra).

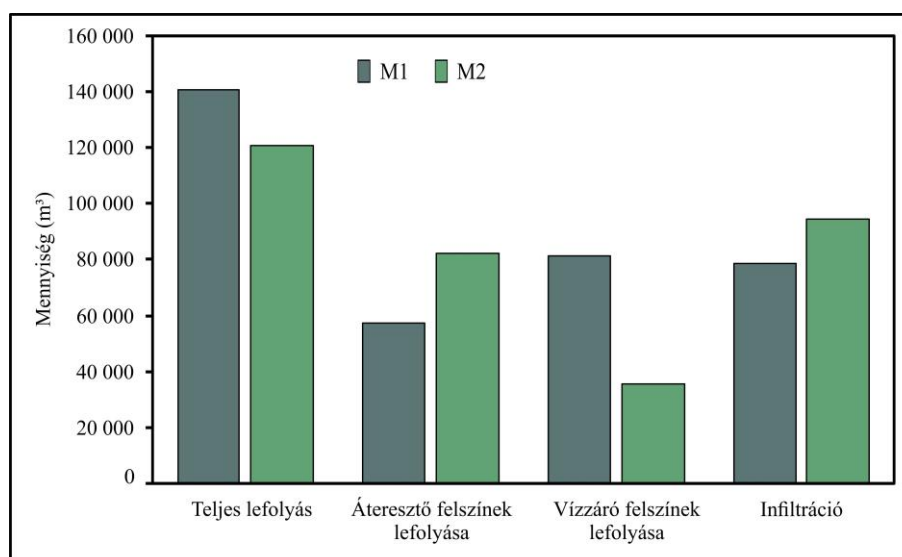


34. ábra Lefolyás komponensek az M2 területen

Az áteresztő és vízzáró felszínek lefolyása esetében ellentétes arányok figyelhetők meg a két mintaterület esetében. Az épületek magasabb száma és a vízzáró felületek magasabb aránya, illetve a növényzet alacsonyabb aránya az M1-es belvárosi mintaterületen magasabb teljes lefolyást eredményez, amelynek döntő többsége a vízzáró felszíneken folyik le. Az infiltráció arány csupán 29%. Az M2-es terület esetében a teljes lefolyás mértéke alacsonyabb, illetve ennek nagyobb része áteresztő felszíneken folyik le. Az infiltráció aránya itt 35%-os, így nagyobb mennyiségű csapadék szivárog be a talaj rétegeibe (Táblázat 6., 35. ábra). Az előzetes feltételezéseknek megfelelően az M2 terület esetében a hidrológiai paraméterek kedvezőbbek csapadékvíz-gazdálkodás szempontjából.

Táblázat 6. A lefolyással kapcsolatos eredmények

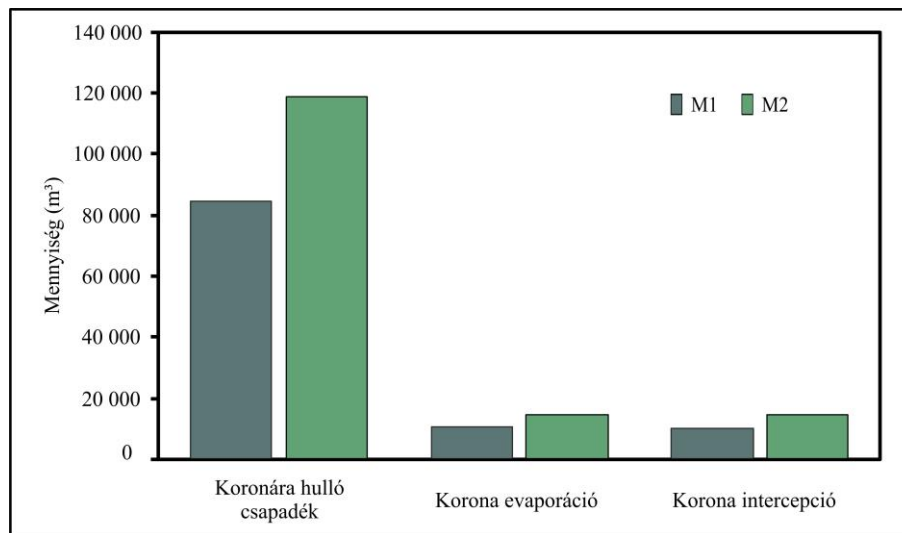
Folyamat	M1	M2 (területarányos értékek)
▪ Teljes lefolyás (m <sup>3</sup> )	140 595	120 643
▲ Alapvízhozam (m <sup>3</sup> )	1 936	2 622
▲ Áteresztő felszínek lefolyása (m <sup>3</sup> )	57 304	82 435
▲ Vízzáró felszínek lefolyása (m <sup>3</sup> )	81 355	35 586
▪ Infiltráció (m <sup>3</sup> )	78 416	94 703
▪ Csapadék (m <sup>3</sup> )	273 268	273 268



35. ábra Lefolyással kapcsolatos eredmények összegzett összehasonlítása

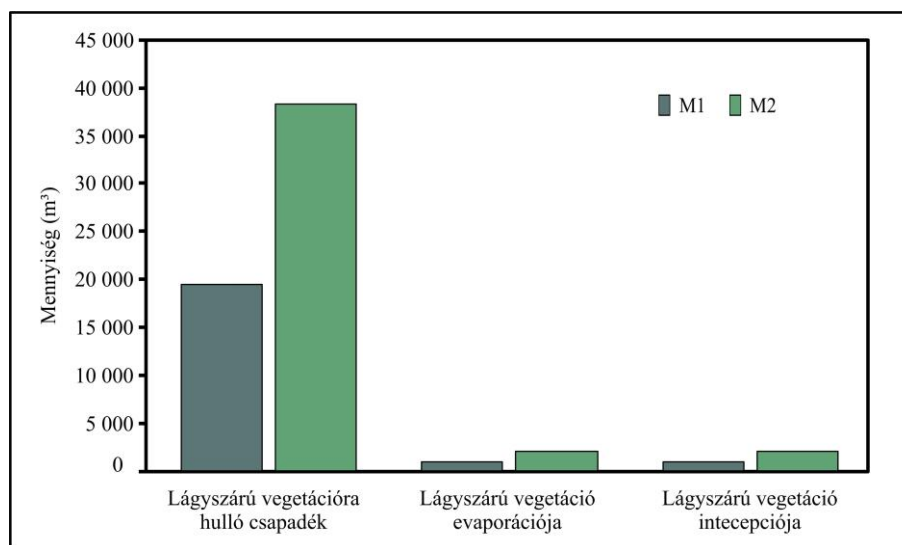
### Vegetációval kapcsolatos eredmények

A két mintaterület összehasonlítása során szintén két kategóriába soroltam a növényzetet: alacsony szárú növényzet (lágyszárúak és cserjék), illetve fás vegetáció. Köszönhetően a méretüknek, strukturális felépítésüknek, illetve a mintaterületeken belüli felszínborítási arányuknak a fák játsszák a fő szerepet a hidrológiai folyamatok módosításában. Az M2 mintaterület esetében a fák területi aránya jelentősen magasabb, amely előre vetíti a magasabb intercepciót, illetve evaporációt. A nagyobb fakorona borításból adódóan az M2 területen a fák koronájára közel 35 000 m<sup>3</sup>-rel több csapadék hullott, mint az M1 terület esetében. Az intercepció az M1 terület 10 502 m<sup>3</sup> (a teljes csapadék 3,8%-a), az M2 terület esetében 14 759 m<sup>3</sup> (a teljes csapadék 5,4%-a) volt az év során. Ebből adódóan a lakótelepek, amelyek környezetében több, nyitottabb zöldfelület található magasabb zöldinfrastrukturális értékkel bírhatnak, mint a belvárosi mintaterület. Az intercepció mennyiségéből következően az növényzeti felszínről történő evaporáció értékei is hasonló arányokkal bírnak (36. ábra).



36. ábra A mintaterületek fákkal kapcsolatos folyamatai

Az alacsony szárú növényzet állományi adottságaiból (arányaiban kevesebb felfogó felülettel rendelkezik), illetve, abból adódóan, hogy területi aránya is elmarad a fás szárú vegetációtól, kevesebb csapadékot fogott fel, illetve párologtatott el, mint a fás vegetáció. Az M2 terület esetében az alacsony szárú vegetáció intercepciója 2 020 m<sup>3</sup> (0,7%-a teljes csapadéknak), amely az M1 terület esetében csupán 1 030 m<sup>3</sup> volt (a teljes csapadék 0,4%-a) (37. ábra).

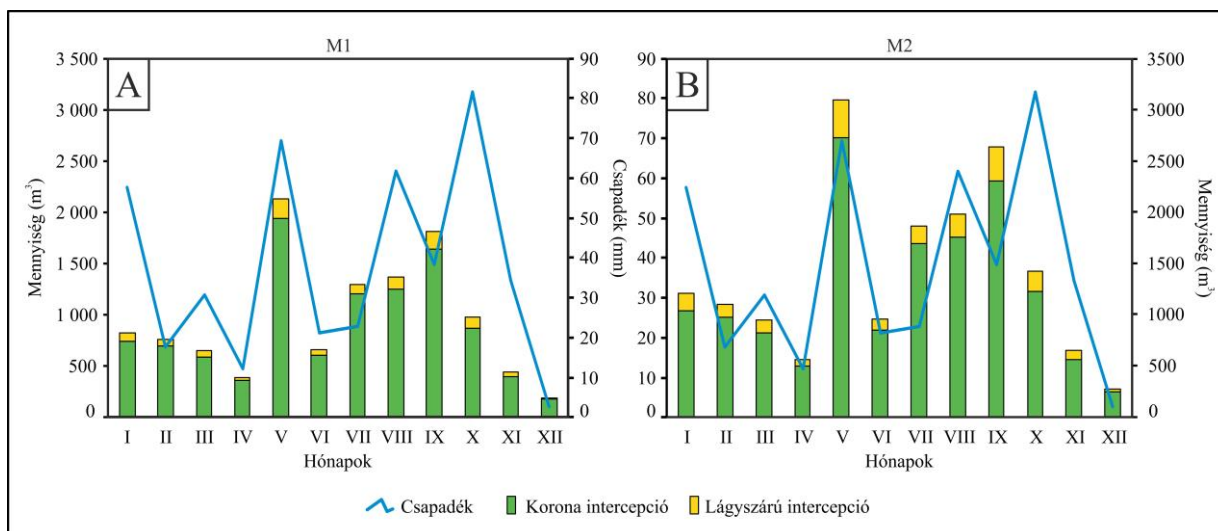


37. ábra A mintaterületek alacsony szárú növényzettel kapcsolatos folyamatai

Ezek alapján körvonalazódik, hogy a mintaterületek intercepcióját a fás vegetáció befolyásolja nagyrészt, míg az alacsony szárú vegetáció – az alacsonyabb területi arány és felület következtében – kevésbé jelentős szerepet tölt be ebben a folyamatban. A mintaterületek között tapasztalható különbségek miatt a lakótelepi mintaterületen a vegetáció hozzájárulása a víz visszatartásban sokkal magasabb lehet, mint a sűrűn beépített belvárosi mintaterület esetében.

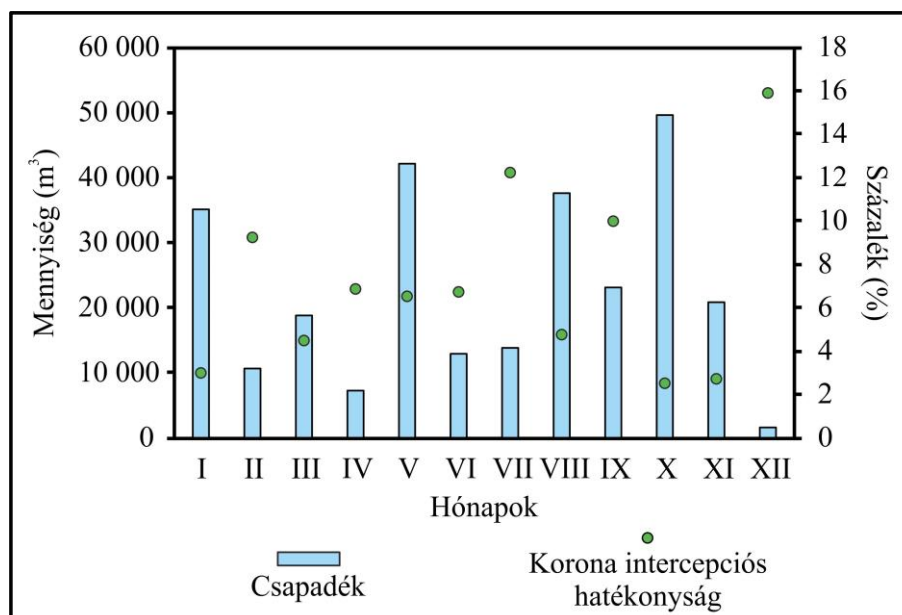
Az intercepció havi eloszlása elsődlegesen a csapadék mennyiségén alapul, bár a vegetációs periódus alakulása szintén befolyásolja az éven belüli változásokat. A magas csapadékú hónapok (január, május, augusztus, október) jól látható különbségeket mutatnak. Noha januárban és augusztusban a csapadék mennyisége közel azonos volt (58 mm és 62 mm), a nyári intercepció közel másfélszerese volt a téli mennyiségnek. Ez annak köszönhető, hogy az aktív vegetációs periódusban a vegetáció csapadék-visszatartó hatékonysága sokkal nagyobb.

Hasonló különbségek figyelhetők meg május és október között is. Októberben magasabb volt a csapadékmennyiség, viszont ennek ellenére májusban közel kétszer akkora volt az intercepció mennyisége köszönhetően az aktív vegetációs periódusban jellemző nagyobb levélfelületnek (38. ábra).



38. ábra A fák és az alacsony szárú növényzet intercepciója mintaterületenként, havi bontásban, A – M1 terület, B – M2 terület

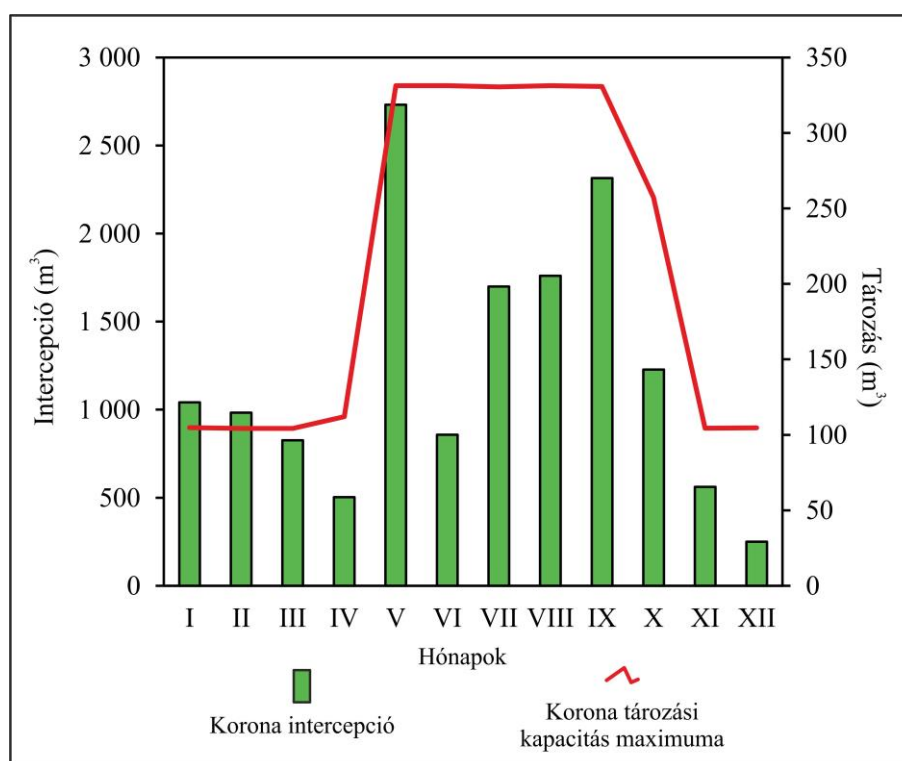
Az intercepció hatékonysága (a visszatartott csapadékvíz aránya az összes lehullott csapadékhoz viszonyítva) alapvetően annál magasabb minél szárazabb az adott hónap (39. ábra). Ez a jelenség abból a tényből következik, hogy azokban az esetekben mikor alacsonyabb a csapadékmennyiség a fakorona tározási kapacitása nem éri el a maximumát, nem lép fel telítődés.



39. ábra a fakorona intercepció hatékonysága az M2 területen

A korona tározási kapacitásának maximuma a legmagasabb értékeit a vegetációs periódus alatt veszi fel (40. ábra). Ugrásszerűen megnő a tavaszi lombfakadás után és hasonló intenzitással csökken le az őszi lombvesztés során. Amikor a lombkorona eléri a maximális tározási kapacitást, a többlet csapadék nem kerül tárolásra, ami rontja az intercepció arányát. A hatékonyság kismértékű növekedése előfordulhat a téli hónapokban is, ám ez értelemszerűen nem a levélfelület nagyságával, hanem a csapadék jellegével függhet össze. Hó formájában

érkező csapadék esetén nagyobb intercepciós hatékonyságot tapasztalhatunk, mint azonos mennyiségű ám folyékony halmazállapotú csapadék esetén (39. ábra, 40. ábra).



40. ábra Az intercepció és a levélfelületi tározás havi maximumai az M2 terület esetében

## 5.2. Csapadékvízgyűjtés hatékonyságát feltáró eredmények

### 5.2.1. Mikroléptékű modellezés eredményei

A különböző mikroléptékű vizsgálatok eredményei azokat a folyamatokat hivatottak bemutatni, amelyek nagyobb méretű épületek (közintézmények) és szűk környezetük területén, a csapadékvízgyűjtés kapcsán játszódhatnak le. Az itt bemutatott eredmények a mindennapi életben is értelmezhető léptékhez kapcsolódnak és mutatják be a csapadékvízgyűjtés folyamatait. A mikroléptékben végzett vizsgálatok egyben a teljes városra kiterjedő lokális léptékű modellezéshez is módszertani alapul szolgáltak, illetve az ott előálló eredmények értékelését is elősegítették.

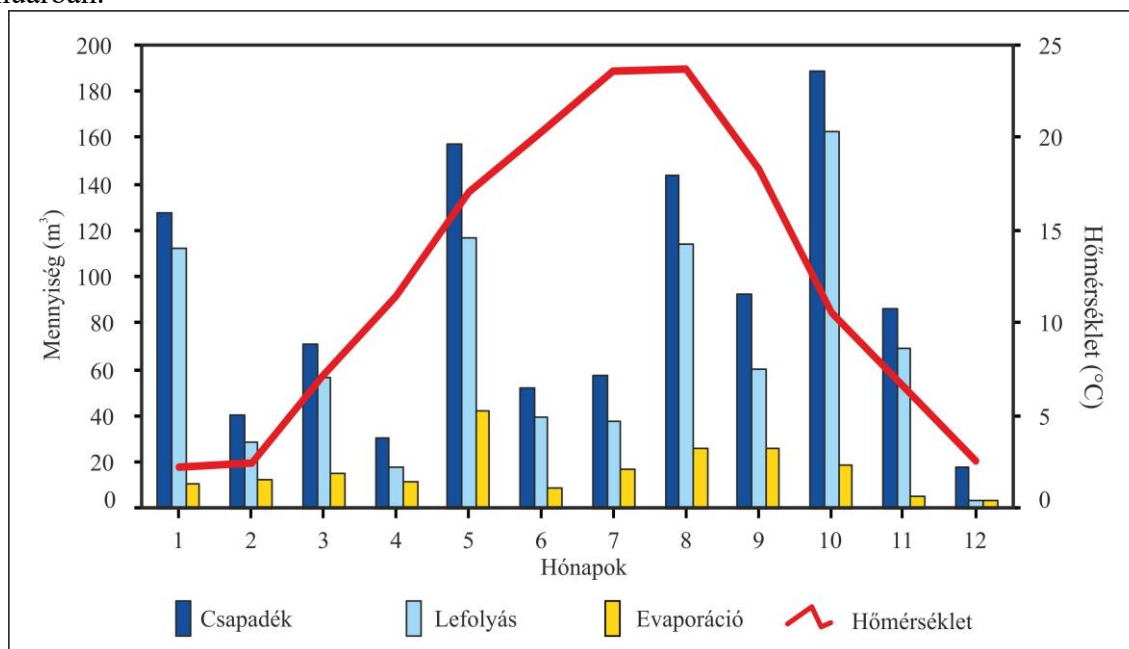
#### a) Arany János iskola területén végzett vizsgálatok

Az iskola területén végzett pilot vizsgálatok szolgálták alapjául a további EPA SWMM modellel végzett elemzéseknek. A viszonylag kis területen végzett vizsgálat célja hasonló volt, mint az i-Tree Hydro Széchenyi téri mintaterületének esetében, mégpedig, hogy felmérjem a modell használhatóságát és előkészítsem a további összetettebb vizsgálatok során alkalmazandó módszertant. E modellezés során felmértem az inputadatok körét, azok előállításnak megvalósíthatóságát, illetve teszteltem a modell részfolyamatait. Ebből adódóan ez a vizsgálat sokrétű, a modell több funkcióját is felhasználó elemzés, amely a további csapadékvízgyűjtéssel kapcsolatos vizsgálatok előkészítéséül szolgált (Csete & Gulyás, 2019b).

#### Összegzett eredmények

A modell a subcatchment-ekhez kötődően olyan alapvető információkat biztosít, amelyek havi vagy éves formában is feldolgozásra kerülhetnek (a 3.2.2 fejezet 17. ábráján bemutatott felosztás szerinti egységek alapján). Ezek az alapinformációk tartalmazzák a subcatchment-ekre hulló csapadék mennyiségét, a lefolyó és elpárolgó víz mennyiségét. Az

inputadatok alapján a legnagyobb havi csapadékmennyiségek januárban, májusban, augusztusban és októberben voltak. A párolgás és lefolyás aránya váltakozó volt a hónapok során, a legmagasabb evaporáció 37% volt áprilisban, míg a legmagasabb lefolyás 88%-os volt januárban.

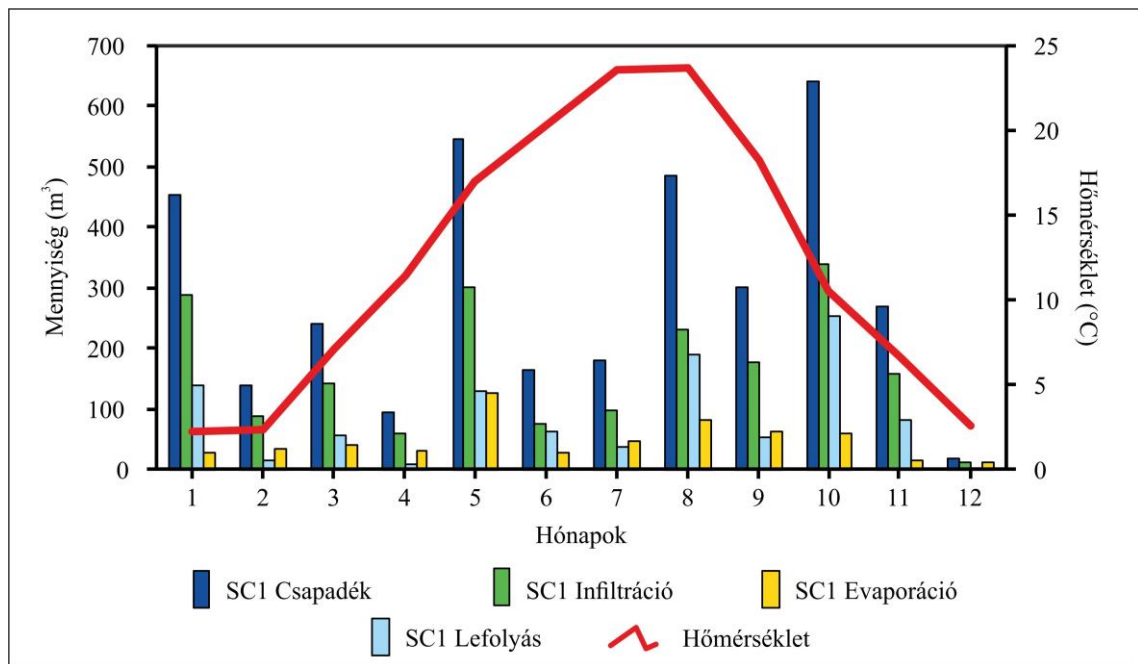


41. ábra Az épülettetők (SC2-13) összesített hidrológiai folyamatai havi bontásban

A 41. ábra diagrammján csak az épület tetőelem subcatchment-jeinek összege szerepel (SC2-13), az udvar (SC1) nem, mivel a nagy terület sokkal magasabb mennyiségeket jelentett, ezért külön ábrán került megjelenítésre. Látható, hogy a lefolyás aránya minden hónapban magas arányt tett ki, ez többnyire a téli és őszi hónapok esetében jelentkezik, amelyek során az havi átlag hőmérsékletből adódóan az evaporáció mértéke alacsony. Az SC1 subcatchment-tel ellentétben a tető elemek nem rendelkeznek olyan felülettel, amely beszivárgásra lenne képes, ezért a lefolyás mennyiségét csupán az evaporáció képes ellensúlyozni (41. ábra).

Az SC1 esetében az evaporációban már a növényfelület hatása is érvényesül, mivel itt a felszínborítás hozzávetőlegesen 66%-ban áteresztő felszíneket is tartalmaz, amelyen részben valamilyen típusú növényzet is található. Emellett az áteresztő felszíneknek köszönhetően az SC1 területen az infiltráció is megjelenik, amely a lefolyás csökkenéséhez járul hozzá nagy mértékben. A csapadék havi eloszlása hasonló, mint a többi SC esetében – természetesen az abszolút mennyiségek eltérőek – azonban a csapadék további sorsában, azaz a többi hidrológiai folyamatban már eltérő arányokat lehet felfedezni. Az SC1 esetében egyik hónapban sem éri el a lefolyás a 40%-ot és az éves átlag is 24% körül alakul, amely így jelentősen alacsonyabb a többi subcatchment-hez képest. Az infiltráció aránya legtöbb esetben 40 és 60% közötti havi szinten, az éves átlag pedig 58%, így a beszivárgás jelentős részt tesz ki az SC1 terület folyamataiból (42. ábra).



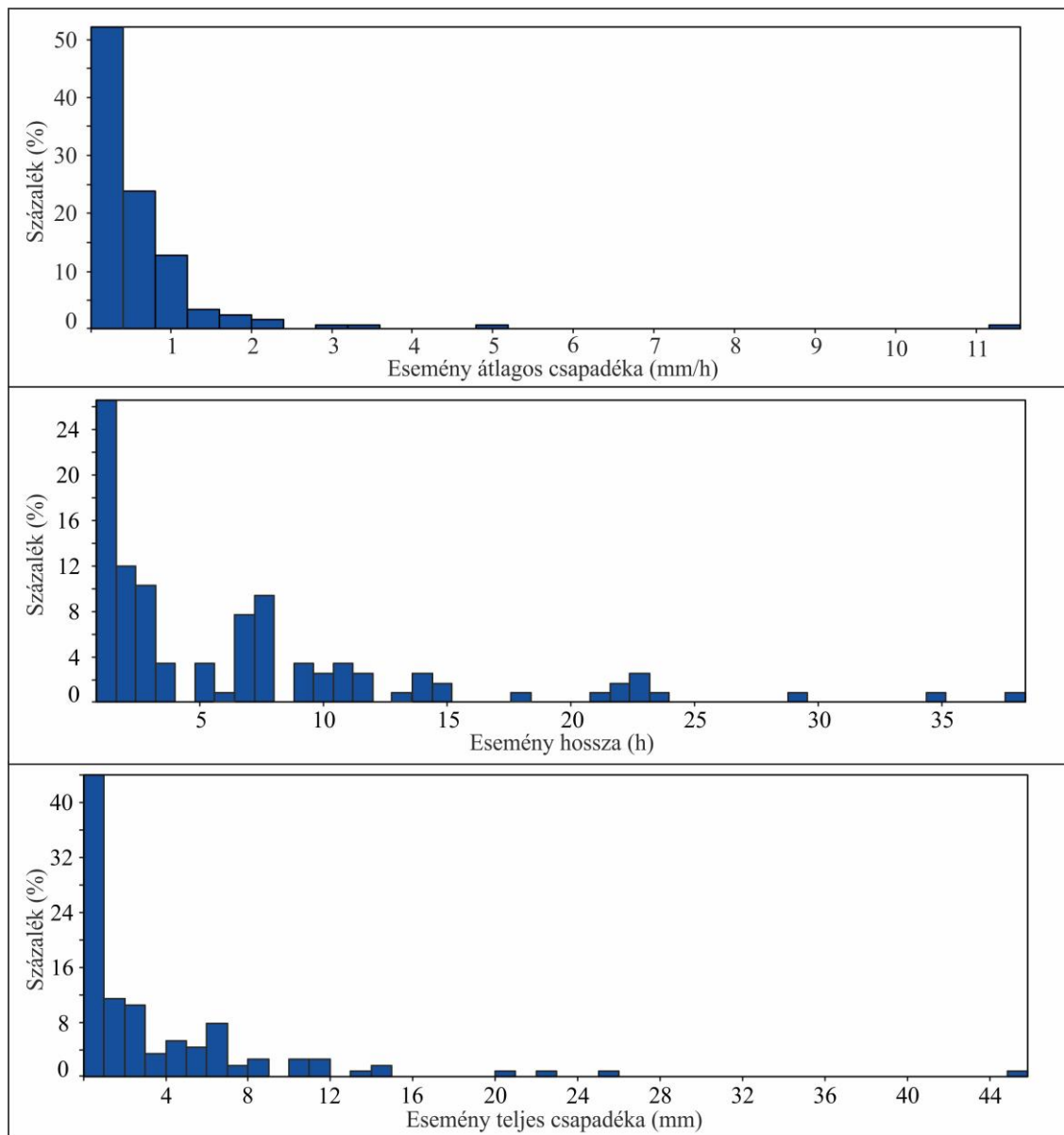


42. ábra Az iskolaudvar (SC1) hidrológiai folyamatai havi bontásban

#### Csapadékeseményekkel kapcsolatos eredmények

Az EPA SWMM nem csupán a csapadék és a kapcsolódó folyamatok éves, illetve havi eloszlásáról ad áttekintést, hanem csapadékesemények mennyiségi és időbeli eloszlásáról is képet nyújthat. A csapadékeseményekkel kapcsolatos eredmények információkat szolgáltatnak az események hosszáról, az események során felhalmozódó összes csapadékról és egy időegység alatt lehulló átlagos mennyiségről is. Összeségében áttekintő képet kaphatunk a csapadékesemények mennyiségi és időbeli eloszlásáról az év során.

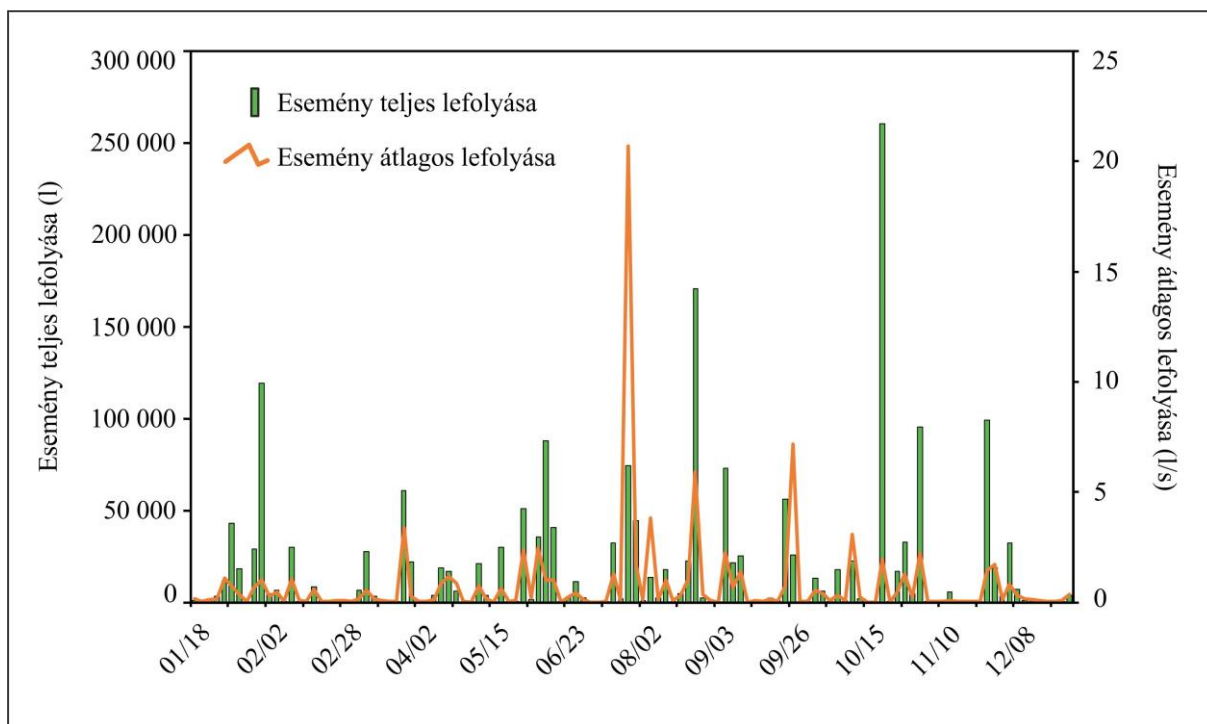
E vizsgálat során azokat a csapadékhullásokat tekintetem csapadékeseménynek, amelyek időtartama elérte legalább az egy órát. Így az év során 117 csapadékeseményt sikerült lehatárolni 5 órás elkülönítési hosszal (azaz két megfigyelt csapadékesemény között legalább 5 órának kellett eltelnie). A leghosszabb egybefüggő csapadékesemény 38 óráig tartott 13 hónapos visszatérési idővel, amely azt jelenti, hogy hasonló meteorológiai körülmények között egy évben egyszer vagy kevesebbszer fordul elő ilyen jellegű esemény. Emellett az év során 27 olyan csapadékesemény volt, amely legalább 10 órán keresztül tartott. Az események visszatérési ideje rövidül, ahogy a lehullott csapadék mennyisége csökken, ezzel párhuzamosan az események előfordulási valószínűsége növekszik. Ahogy 43. ábraán látható a legmagasabb előfordulási eséllyel rendelkező események hossza 5 óra alatti (a csapadék események kb. 55%-a). Továbbá a 15 és 5 óra hosszúság közötti események relatíve magas arányt tesznek ki (35%), míg az ennél hosszabbak elhanyagolható számban vannak jelen (43. ábra). A csapadékesemények hossza mellett lehullott teljes csapadékmennyiségről is szolgáltat információt a modell. Alapvetően a 7 mm alatti összegzett csapadékkal rendelkező csapadékhullások teszik ki az események döntő többségét. A 1-7 mm közötti sávon belül az 1 mm-es csapadékhullással rendelkező csapadékesemények vannak túlsúlyban, az összes csapadékesemény 50%-át ezek teszik ki. A legnagyobb csapadékmennyiséggel rendelkező esemény során 45 milliméter csapadék hullott, amelynek időtartama 38 órára tehető. Az év során 13 esemény során haladta meg a csapadékmennyiség a 10 mm-t, míg 52 esemény volt, amely során csupán 1 mm csapadék hullott (43. ábra).



43. ábra Az éves csapadékesemények karakterisztikája

További információkat lehet kinyerni a csapadékesemények átlagos óras intenzitásával kapcsolatban is. A 21. ábrán látható, hogy az átlagos intenzitás az esetek 92%-ban 1,5 mm/h alatt marad. Csupán kevés esemény van, amely ezt meghaladja és csak egy kiugró érték található 11,5 mm/h-ás intenzitással. Az ilyen nagy intenzitású csapadékok jelenthetik a legnagyobb problémát a lefolyás szabályozás során.

A felszíni lefolyás esetében hasonló kép bontakozik ki, mint a csapadékesemények vizsgálatánál, amely abból adódik, hogy a lefolyás a csapadék mennyiségén és eloszlásán alapul. A lefolyás események hossza a csapadékesemények hosszához igazodik azonban a mennyisége jelentősen alacsonyabb, mert az evaporációs és az infiltrációs tényező már nem számít bele. Amennyiben az események teljes lefolyását és az átlagos lefolyást összevetjük, akkor az adott lefolyási események alapvető jellemzőiről kaphatunk információt.

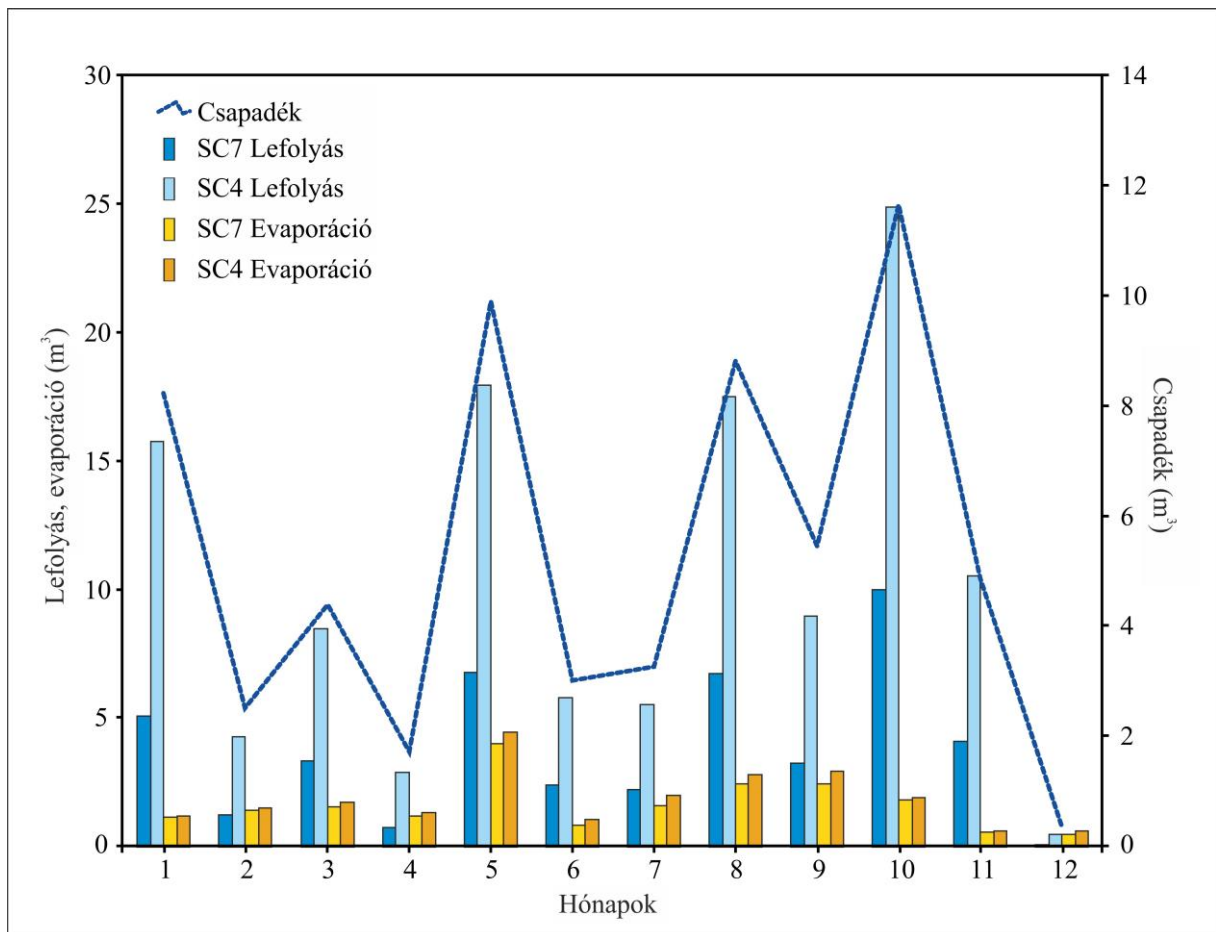


44. ábra A lefolyás események átlagos lefolyása és teljes lefolyása

A lefolyási események ősszel és télen hosszabbak, a teljes lefolyt vízmennyiség is magasabb (44. ábra). A nyári lefolyás események többnyire rövidek, viszont a lefolyási intenzitásuk magasabb más periódusoknál. Két eseményt lehet kiemelni az év során, amelyek kiugró értékekkel rendelkeznek. Az egyik egy júliusi esemény közepes összlefolyás mennyiséggel, de a legnagyobb óránkénti átlagos lefolyással rendelkezik, ami egy heves csapadékkal járó zivatar tipikus képe. A másik esemény októberben zajlott, amikor is a nagy mennyiségű összlefolyáshoz alacsony óránkénti átlagos lefolyás társult, egy hosszabban elhúzódó, de kis intenzitású csapadéknak köszönhetően (44. ábra).

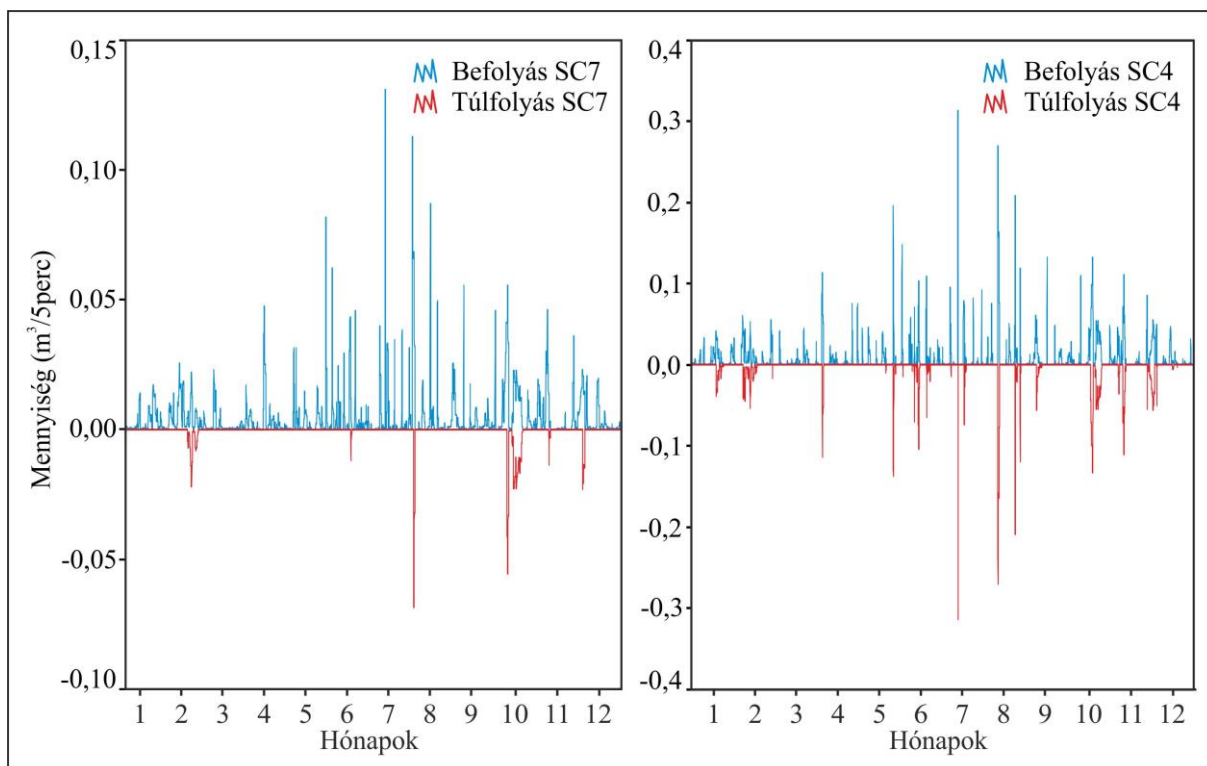
#### Csapadékvízgyűjtés hatékonyságával kapcsolatos eredmények

A csapadékvízgyűjtés megtervezésekor fontos, hogy pontosan ismerjük a vízgyűjtőfelületekre hulló és lefolyó csapadékvíz térfogatát. Esetünkben a két tetőre (SC4, SC7) – amelyekhez a vízgyűjtő tartályok vannak kapcsolva – közel azonos mennyiségű csapadék hullott, azonban a lefolyásban mégis jelentős különbség tapasztalható, mivel az egyik egyéb tetőről (SC3) a lefolyó víz teljes mértékben átvezetésre került az SC4-re. Ez a különbség jól látható a lefolyás mennyiségében (az SC4-en a lefolyás mennyisége közel kétszerese az SC7 lefolyásához képest). Ezzel szemben az evaporáció mennyiségében nincs ekkora különbség, amely abból adódhat, hogy az SC4 tető evaporációs adottságai nem tudták ellensúlyozni a nagy mértékű többlet hozzáfolyást (45. ábra).



45. ábra A csapadékvíz gyűjtőrendszerrel ellátott tetők lefolyása és evaporációja

A modellben az összegyűjthető víz mennyisége a tetőkre hulló csapadékon alapul, azonban a számításokhoz már az evaporáció nélküli, lefolyás részévé váló vízmennyiség kerül felhasználásra. A konkrét tározási szintek meghatározásához a gyűjtőtartályok magasságát használja a modell, amely jelen esetben 930 mm. A tartályok magassága azért fontos a modellezés és a számítások során, mivel a beérkező csapadékvízmennyiség magassági szintje meghatározhatja, hogy a csapadék mikor tölti fel a gyűjtőtartályt és mikor folya túl a többlet vízmennyiség. A gyűjtőtartályok viszonylag kis mérete miatt elvezetési idővel is szükséges számolni, mivel a tartályok első feltöltődése után a modell csupán a túlfolyó víz mennyiségével számolna. Ebből adódóan a vizsgálat során két elvezetési idővel is kalkuláltam (2 mm/h és 5 mm/h), azonban a két elvezetési idővel kalkuláló scenáriók eredményeiben nem voltak jelentős eltérések. A tetők túlfolyásának mennyiségében azonban jelentős különbség fedezhető fel, mégpedig a SC4 tetőre történő többlet hozzáfolyás következtében (46. ábra). Az ábra alapján jól kivehető az előző fejezetrészben említett két csapadékesemény (július, október), ahol szintén jelentős különbség van a két tető között, az SC4 esetében a túlfolyás közel kétszerese a SC7-nek.



46. ábra A csapadékgyűjtővel rendelkező tetők túlfolyása

Az SC4 tető esetében a potenciálisan rendelkezésre álló lefolyás kb. 52% (63-66 m<sup>3</sup>) összegyűjthető. Ez a mennyiség a két tartályból álló rendszer kb. 60-szoros feltöltésére lenne elegendő. Ezzel szemben az SC7-es tető esetében a potenciálisan rendelkezésre álló lefolyásnak a 76%-a (35-36 m<sup>3</sup>) összegyűjthető lenne. Az SC7 tető esetében ez a mennyiség a két tartályból álló rendszer kb. 33-szoros feltöltésére lenne elegendő. Ez alapján az SC4 százalékos hatékonysága alacsonyabb, mint az SC7-nek, amely annak köszönhető, hogy az SC3 tetőről többlet hozzáfolyás érkezik a felületére. Azonban abszolút mennyiségben több víz gyűjthető össze, közel kétszeres mértékben. A tartályok első feltöltődésének ideje jelzi a feltöltődés mértékét és gyorsaságát. Az SC4 esetében az első feltöltődéshez 432 órának kellett eltelnie a vizsgálat kezdete óta, míg az SC7 esetében 548 óra kellett ugyan ehhez. Minden azt is jelzi, hogy az SC4-hez kapcsolt tartályok esetében a nagyon mennyiségű beérkező vízmennyiség miatt a tartályok hamarabb túltöltődtek.

#### b) Óvodai mintaterületek

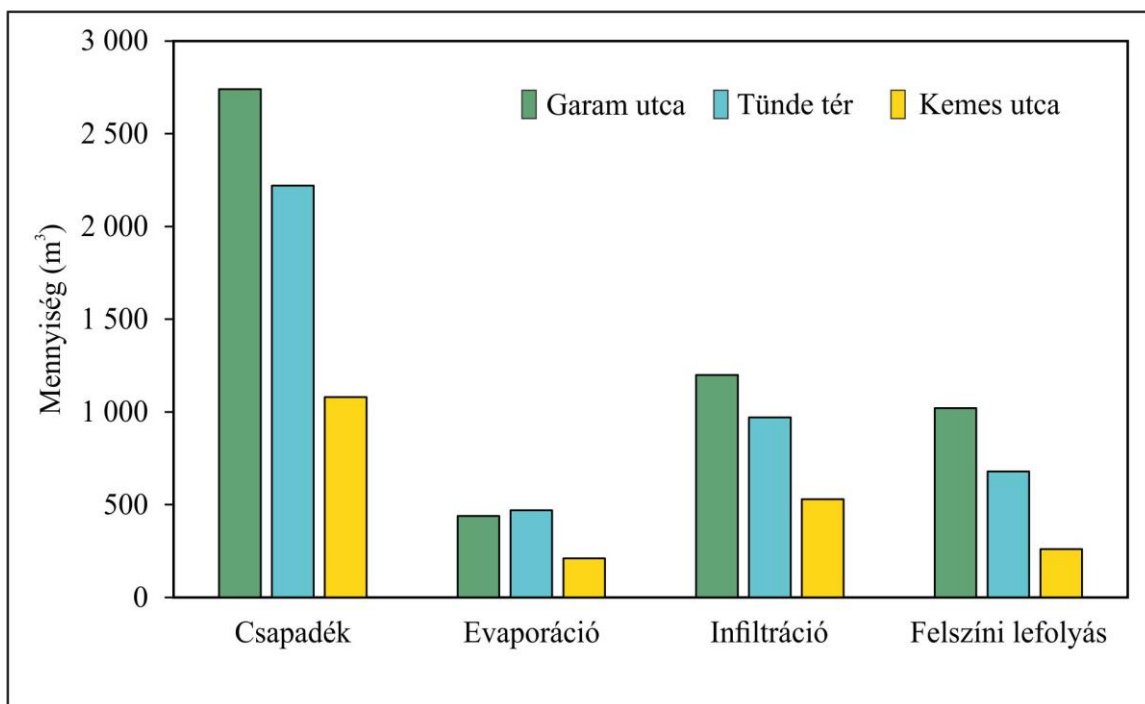
A három óvoda épületeire és udvaraira kiterjedő vizsgálat célja a különböző kiterjedésű közintézmények területén megvalósult, illetve megvalósulandó csapadékvízgyűjtő rendszerek hatásainak feltárása volt. A mintaterületekről konkrét, számszerűsíthető információ állt rendelkezésre a kiépülő rendszerekről, így az EPA SWMM modellbe is ezek kerültek beépítésre. A három óvoda eltérő méretű, de hasonló felépítésű, lapostetős épület, így az alapvető különbségek a vízgyűjtő felületek területéből következnek (Táblázat 7.).

Táblázat 7. Az óvodai mintaterületek jellemzői

Mintaterület	Összterület (m <sup>2</sup> )	SC száma (db)	Gyűjtőtartály mérete (m <sup>3</sup> )
Kemes utca	2 400	1-4	12
Tünde tér	4 900	1-3	12
Garam utca	6 000	1-5	12

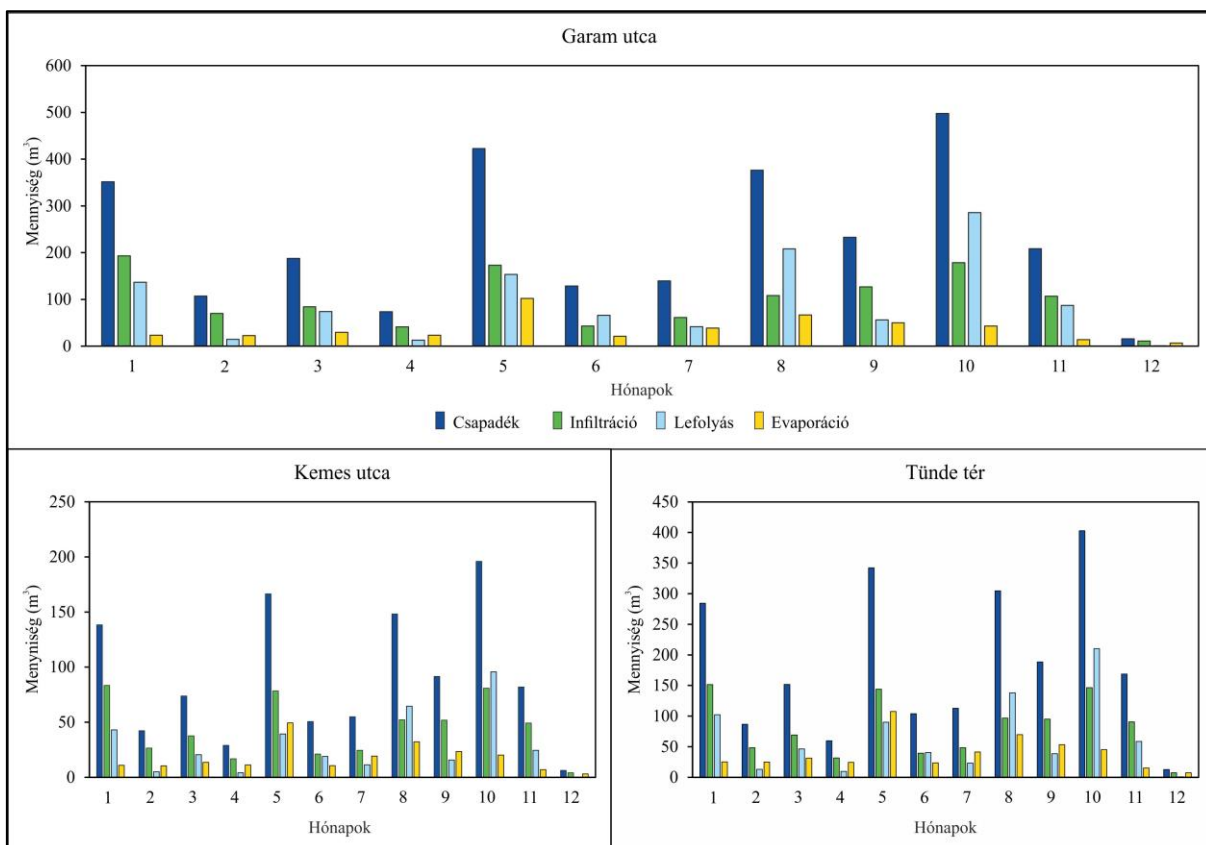
### Összegzett eredmények

Az EPA SWMM alapvető információkat biztosít az olyan különböző vízgyűjtő felületekhez (tetőkhöz, udvarokhoz) köthető folyamatokról, mint az evaporáció, a lefolyás, az infiltráció vagy a tározás, mindezeket több időfelbontásban összegezhető módon. Az eredmények elemzése során jól látható, hogy abszolút mennyiségeket tekintve a Garam utcai terület a kiemelkedő, hiszen az itt található subcatchmentek összesített kiterjedése a legnagyobb. Az evaporáció esetében a Tünde téri óvoda értékei a legmagasabbak. A csapadékmennyiségéhez viszonyítva arányában az infiltráció mértéke a Tünde téri területen a legmagasabb, a csapadék 49%-a. A felszíni lefolyás mértéke pedig a Garam utcai területen a legkiemelkedőbb arányú, 37%-os értékkel (47. ábra).



47. ábra A különböző hidrológia folyamatok éves szintű összegzett összehasonlítása az egyes mintaterületeken

Amennyiben ezeket az adatokat havi bontásban vetjük össze, jól láthatóan kirajzolódik az, hogy a vizsgált intézmények területének eltérése jelentős mértékű különbségeket okozhat az abszolút mennyiségek tekintetében. Ugyanakkor a felszínborítási különbségek alapvetően befolyásolják a vízháztartás egyéb folyamatainak havi megoszlását. A Kemes és a Tünde téri mintaterületen például több esetben volt magasabb az evaporáció havi szinten a felszíni lefolyásnál, mint a Garam utcai terület esetében. A Kemes utcai és Tünde téri területeken hat ilyen hónap volt, míg a Garam utcai területen csupán három (48. ábra). A Garam utcai területen az átlagos havi lefolyás 34%, aminek a magas havi csapadékú októberben volt a legmagasabb aránya (57%), míg decemberben a legalacsonyabb (4%). A Tünde téri területen 29%-os átlagos lefolyás mellett a legmagasabb értéket (52%) októberben, a legalacsonyabbat (7%) decemberben detektáltuk. A legalacsonyabb átlagos lefolyás arányt (26%) a Kemes utcai óvoda területén modelleztük.

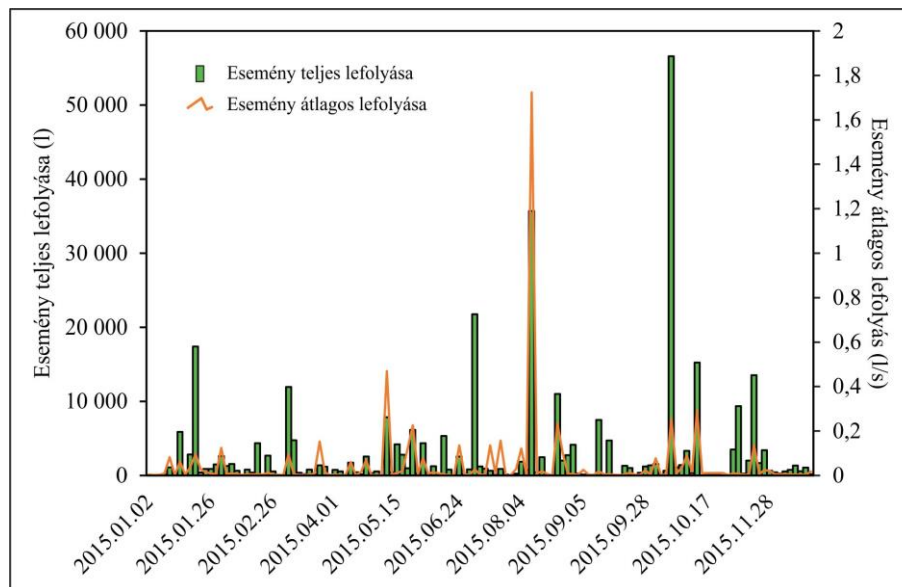


48. ábra Az óvodai mintaterületek hidrológiai folyamatainak összevetése, havi bontásban

Hidrológiai folyamatok csapadékesemények során

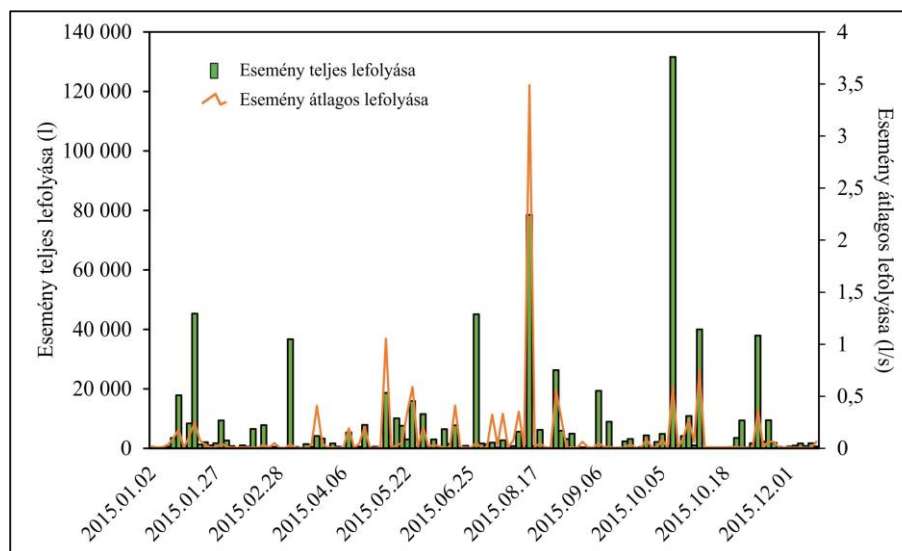
A csapadékesemények alatt lejátszódó folyamatok elemzése nagy jelentőséggel bírhat a felszíni lefolyás szabályozása kapcsán. Azonban a csapadékvízgyűjtés hatékonyságára is hatással lehetnek az esetlegesen kiugró mennyiséggel vagy hosszú időtartammal rendelkező csapadékesemények. Az egyes események a lehulló csapadék mennyiségén alapulnak, azonban az elemzés során külön tudjuk kezelni az evaporáció és infiltráció mentes lefolyást, ami így ténylegesen csak azt a vízmennyiséget tartalmazza, amely a vízgyűjtőtartályok feltöltésére fordítható. Az ilyen részletes elemzés lehetővé teszi a hosszan elhúzódó, de kisebb intenzitású, illetve a rövid idejű intenzív csapadékesemények jellegzetességeinek megismerését. Ennek a kiegészítésére használhatjuk az esemény átlagos lefolyását, amely egy időegység alatt lefolyt vízmennyiségéről ad információt, így jellemezve az esemény intenzitását.

A három mintaterület csapadékeseményei hasonló karakterisztikával rendelkeznek, mind a teljes lefolyás, mind az egyes események átlagos lefolyása tekintetében, azonban a mennyiségekben jelentősebb eltérés is lehet az óvodák eltérő területe miatt. A Kemes utcai óvoda területén lejátszódó folyamatok jellemezhetőek a legalacsonyabb mennyiségekkel mind a teljes lefolyás, mind az átlagos lefolyás szempontjából (49. ábra).



49. ábra A Kemes utcai terület csapadékesemény alatti lefolyási viszonyai

A Kemes utcai terület esetében alapvetően kiegyensúlyozott csapadékesemények a jellemzőek, tehát a teljes lefolyáshoz viszonylag alacsony átlagos lefolyás társul, azonban ebben az esetben is vannak kiugró események mindkét jellemző esetében. A kiemelendő események között két eltérő típust lehet elkülöníteni: amikor a teljes lefolyáshoz mérten magas az átlagos lefolyás mennyisége, illetve az olyan esetek, amikor a kiemelkedő teljes lefolyáshoz alacsony átlagos lefolyás értékek társulnak. Az előbbi típusra példa a kiugró augusztusi csapadékesemény, amely az év során a második legnagyobb teljes lefolyással jellemezhető esemény volt, viszont az átlagos lefolyása a többihez képes jelentősen kiugró volt. Ehhez hasonló karakterisztikával jellemezhető esemény volt még májusban, azonban ott jelentősen alacsonyabb abszolút mennyiségekkel. A másik eseménnytípusra kiváló példa az októberben lejátszódó csapadékesemény, amely az év legnagyobb teljes lefolyású eseménye volt, viszont ehhez arányaiban kismértékű átlagos lefolyás társult. Ezt a típusú csapadékeseményt alapvetően hosszan elhúzódó, csendes esőként lehet jellemezni. Több ehhez a típushoz hasonló esemény játszódott le júniusban, januárban és márciusban is.

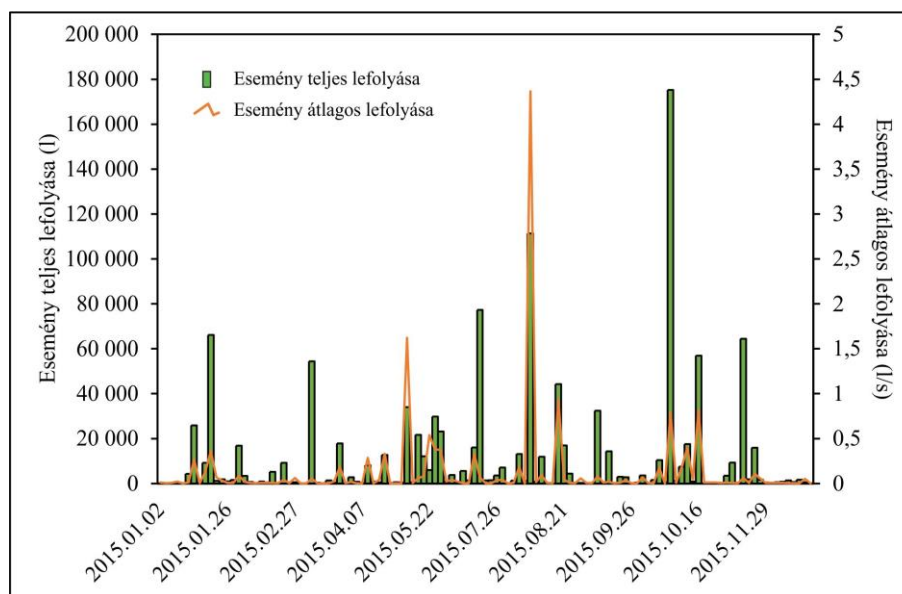


50. ábra A Tünde téri terület csapadékesemény alatti lefolyási viszonyai

A Tünde téri mintaterületen lejátszódó csapadékesemények esetében nagyon hasonló kép rajzolódik ki. A kiugró csapadékesemények döntő többsége azonos időszakban történt,



hasonló jellemzőkkel (augusztusi, októberi esemény), de alapvetően nagyobb mennyiségi értékekkel, mind a teljes, mind az átlagos lefolyás esetében. Bizonyos időszakokban találhatóak eltérések az események között a két területen, ilyen az október végétől december végéig tartó időszak vagy a február március között tartó időszak, amely során a Tünde téri területen kissé eltértek a csapadékesemények arányai a Kemesi területtől. Ez alapvetően a magasabb teljes lefolyási mennyiségnek köszönhető, amelyhez képest arányában az átlagos lefolyás nem nőtt olyan mértékben (50. ábra).



51. ábra A Garam utcai terület csapadékesemény alatti lefolyási viszonyai

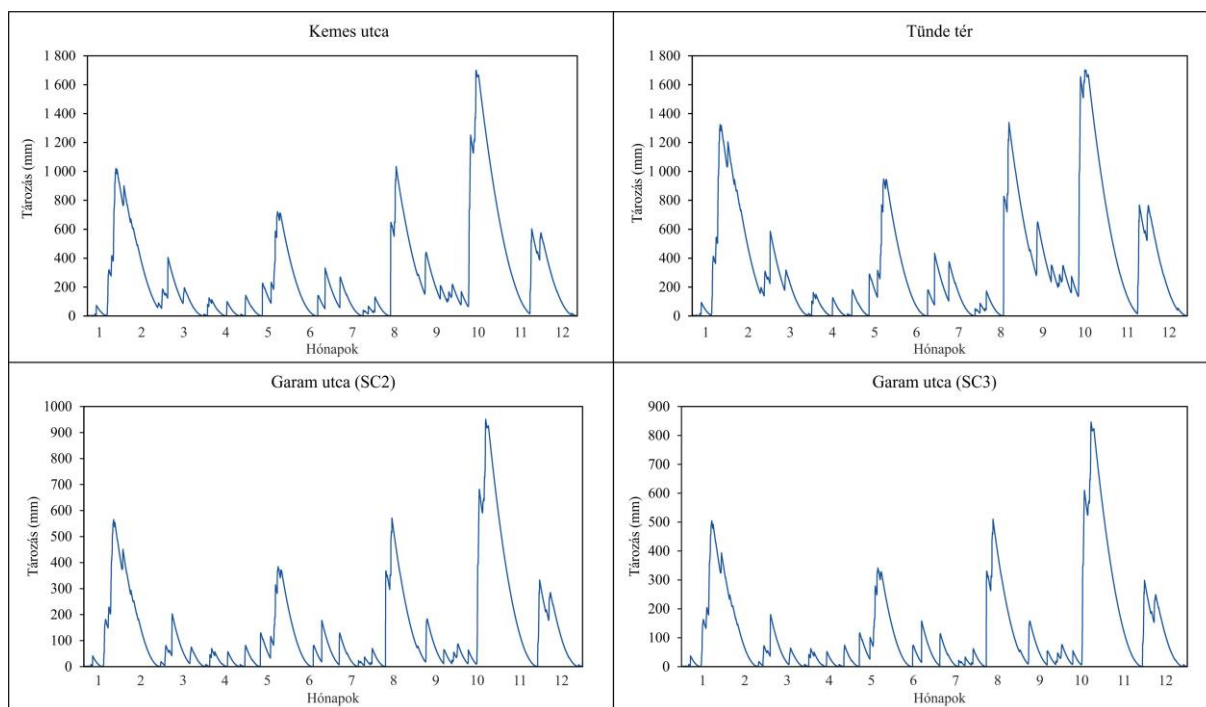
A Garam utcai terület leginkább az abszolút mennyiségek viszonylatában különbözik, mivel e mintaterület esetében a Tünde tért is meghaladó teljes lefolyás értékek a jellemzők. Itt is az októberi és az augusztusi események emelhetők ki, mint legszélsőségesebb példák, azonban a többi eseményben kisebb átrendeződések figyelhetők meg. Ilyen esetek figyelhetők meg például május és július között, leginkább az átlagos lefolyás esetében, de júniusban a teljes lefolyás esetében is (51. ábra).

### Tározás

A három óvoda területén elhelyezett csapadékvízgyűjtő tartályok mélysége mindegyik esetben 1700 mm, így a maximálisan elérhető vízszint közel azonos. Amennyiben a modellezés során úgy számolunk, hogy gyűjtőtartályok folyamatosan töltődnek, de semmilyen kiürülés nem történik, abban az esetben ez könnyen ahhoz vezethet, hogy a tartályok töltöttsége az első nagyobb csapadékok után eléri a maximális szintet és több csapadékkal már nem tud feltöltődni. Ezért különféle kiürülési időkkal lehet számolni, amelyek egy esetleges vízkivételt is szimulálhatnak (például egy öntözéshez történő vízkivételt).

Az alábbi példán 0,1 mm/órás kiürülési értékkel végzett számítások eredménye látható (52. ábra). Alapvetően az a kép bontakozik ki, hogy a kiugró tározási szintek követik a nagyobb csapadékesemények levonulását, általánosságban időben kicsivel lemaradva azok után. Mint az ábra is mutatja a Kemes utcai terület többségében alacsonyabb tározási szintekkel jellemezhető, mint a Tünde téri terület. Ez kimondottan az év eleji, téli időszakban érhető tetten. Az őszi októberi-novemberi időszakban történt kiugrás során közel azonos szintet ért el a két terület, hiszen itt hosszan elhúzódó, nagy mennyiségű csapadékhullás történt, amely a Kemes területen is maximális szintig töltötte a tározót. Ez a nem túl drasztikus különbség alapvetően abból adódik, hogy a Tünde téri területen a vízgyűjtő tető felülete kissé nagyobb méretű, így több csapadék áll rendelkezésre a gyűjtés során. A Garam utcai terület kissé eltér a másik két terület tározási szintjeitől. Ennek alapvető oka, hogy ennek az óvodának a területén két tetőről történt

a vízgyűjtés, amelyek viszonylag kisméretűek voltak, viszont a róluk levezetett csapadék egy közös tartályba került. Az éven belüli eloszlásuk jelentős részben megegyezik a másik két területen tapasztaltakkal, azonban a tározási szintek jelentősen alacsonyabbak mindkét esetben (összeadva közelítik a másik két terület tározási szintjeit). Egy másik fontosabb eltérés a többi területen tapasztaltakhoz képest, hogy szeptember és a kiugró októberi esemény közötti időszakban a Garam területen szinte teljesen kiürültek a tartályok, míg a másik két területen megmaradtak egy minimális szinten (52. ábra).



52. ábra A mintaterületek csapadékvízgyűjtő tartályainak tározási szintjei az év során

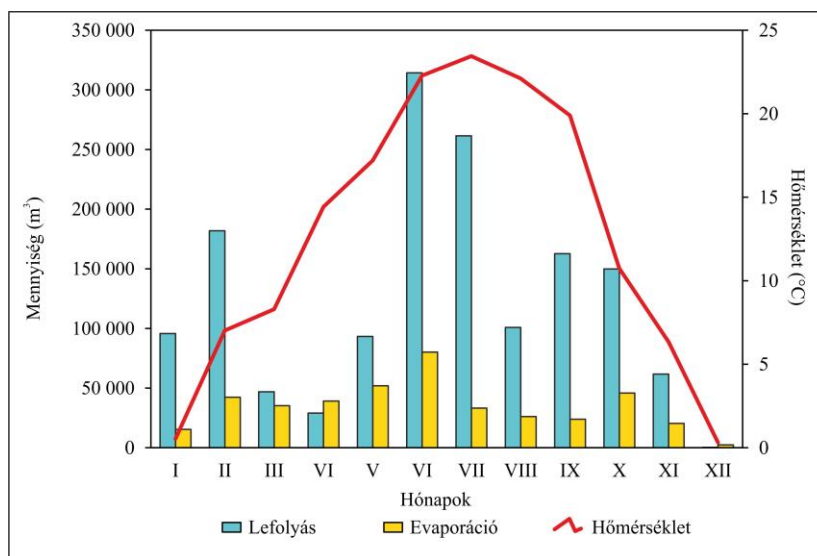
### 5.2.2. Lokális léptékű modellezés eredményei

A 4.2. fejezetben bemutatott módszertan szerint Szeged teljes területére kiterjedő vizsgálat célja az egész várost átfogó, a modell tervezési szempontú használhatóságának felmérése volt (Csete et al., 2021). Ebben az esetben nem az egyes épületekhez kiépített rendszerek használhatóságának elemzése volt a vizsgálat célja, hanem a Szeged területén az épülettetőről potenciálisan összegyűjthető csapadékvíz mennyiség és ehhez kapcsolódóan a zöldfelületek öntözhetőségének becslése. A vizsgálathoz a 19. ábrán bemutatott felosztást használtam. A vizsgálat során az összes folyamat (csapadék, lefolyás, evaporáció) értékei az adott városrészben megtalálható tetőkre és azok területére vonatkozik, tehát, ha egy városrész maximális, illetve átlagos lefolyás értékeinek bemutatása történik meg, akkor az az ott található tetők területe alapján került kiszámításra.

#### Alapvető meteorológiai és hidrológia folyamatok

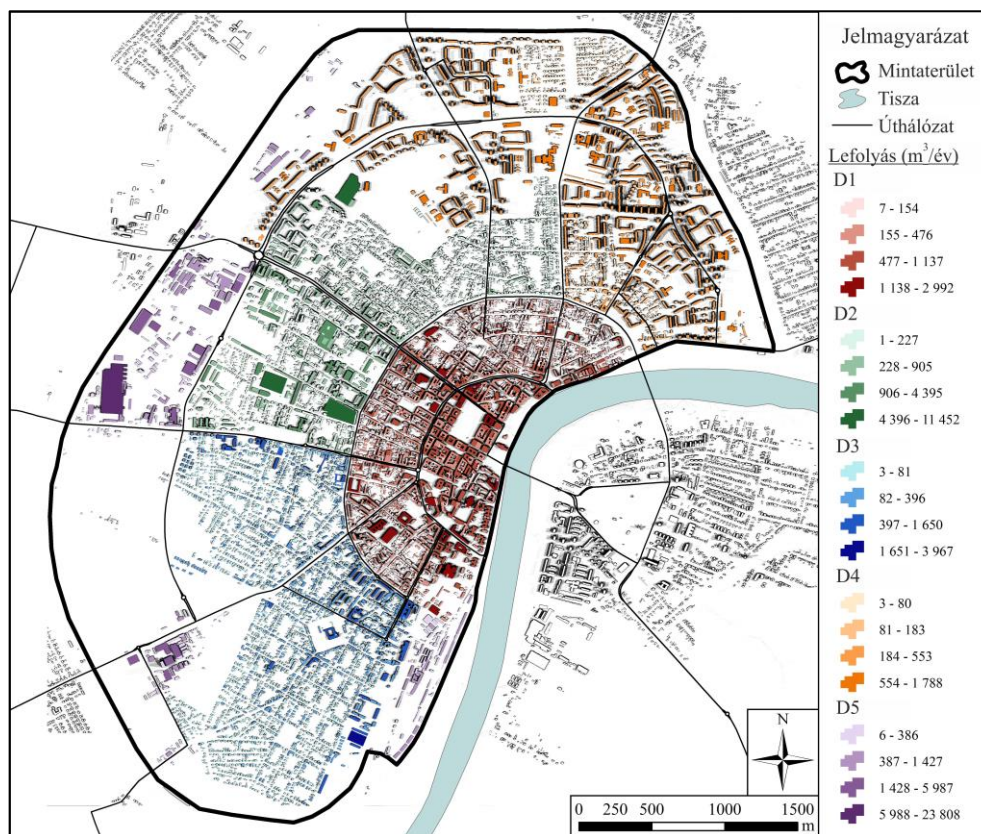
Az alapvető hidrológia folyamatok eredményei (lefolyás, evaporáció) kiemelt fontosságúak a vizsgálatok további szakaszaiban, hiszen a vegetációval kapcsolatos összevetések is ezekre épülnek. Ebben a fejezetrészben az eredmények az egész vizsgált területre vagy városrészekre összegezve kerülnek bemutatásra, hogy áttekinthető képet kapjunk az alapvető folyamatokról. Az összes mintaterületen található tetőre összesítve alapvetően a felszíni lefolyás és az evaporáció értékei tavasszal és az év végi hónapokban (november, december) alacsonyak. A tavasz kivételével minden évszakban vannak olyan hónapok, amelyek kiemelkedő lefolyási és evaporációs értékkel rendelkeznek. A hőmérséklet az év során az éves

átlaghoz közeli, vagyis a téli hónapok rendelkeznek a legalacsonyabb értékekkel, míg a nyáriak a legmagasabbakkal köztük pedig a tavasz és az ősz átmeneti időszakot képvisel (53. ábra).



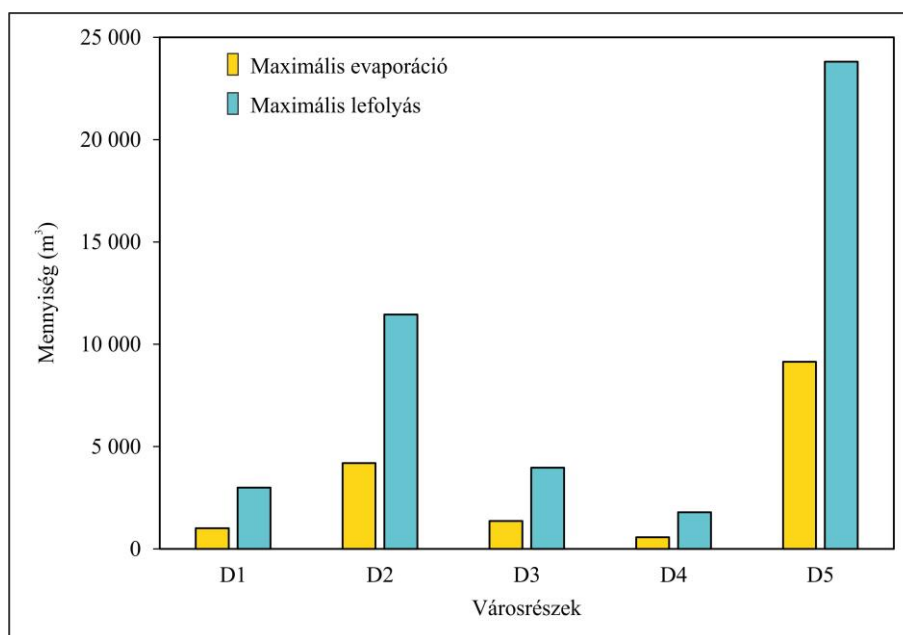
53. ábra A vizsgált terület lefolyása, evaporációja és hőmérsékleti viszonyai havi bontásban

A különböző folyamatok (csapadék, lefolyás, evaporáció) térbeli eloszlása városrészenként jelentős eltéréseket mutat. Ezek az eltérések alapvetően az egyes városrészek területén található tetők számának és méretének eltéréseiből eredeztethetőek (54. ábra). A tetők méretének befolyásoló hatását jól mutatja, hogy egy-egy városrészben a maximum értékekért pár nagyobb méretű tető okolható. Így lehetséges, hogy az alapvetően kis tetőmérettel jellemezhető D3-as városrész maximum értéke magasabb a D4-es terület maximum értékénél, holott alapvetően az a terület nagyobb méretű tetőkkel rendelkezik.



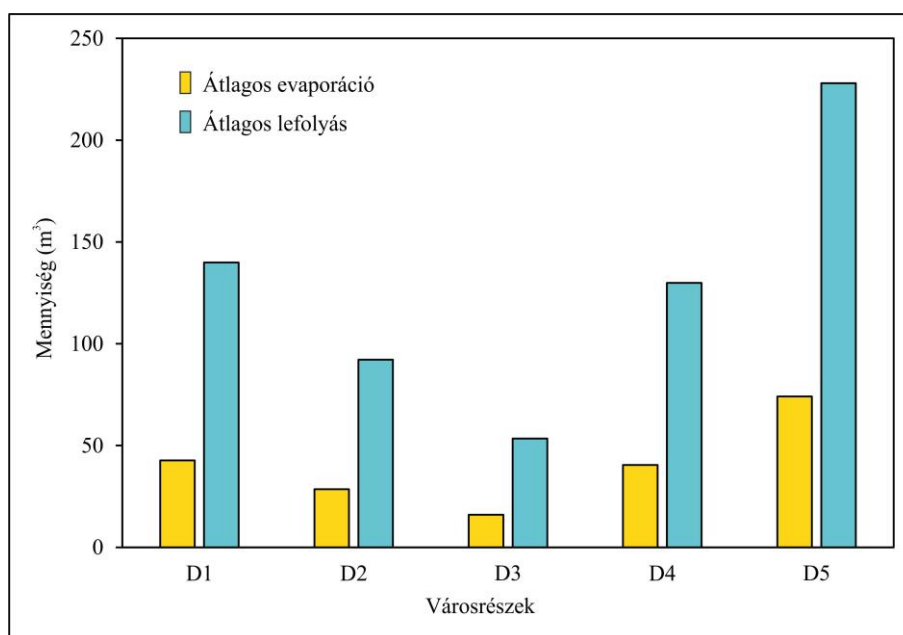
54. ábra A subcatchmentek lefolyásának eloszlása városrészenként

A maximális felszíni lefolyás és evaporációs értékek az adott városrészben elhelyezkedő, kiugró értékekkel rendelkező subcathmenteket (tetők) reprezentálják. Ezek a maximumok azt jelzik, hogy az adott területen mekkora maximális értékekre lehet számítani a tervezés során. Az öt városrész közül a D2 és D5 területén több ipari és raktár típusú épület található, amelyek a legnagyobb területű tetőket jelentik a vizsgálatok alapját jelentő épület adatbázisban (55. ábra).



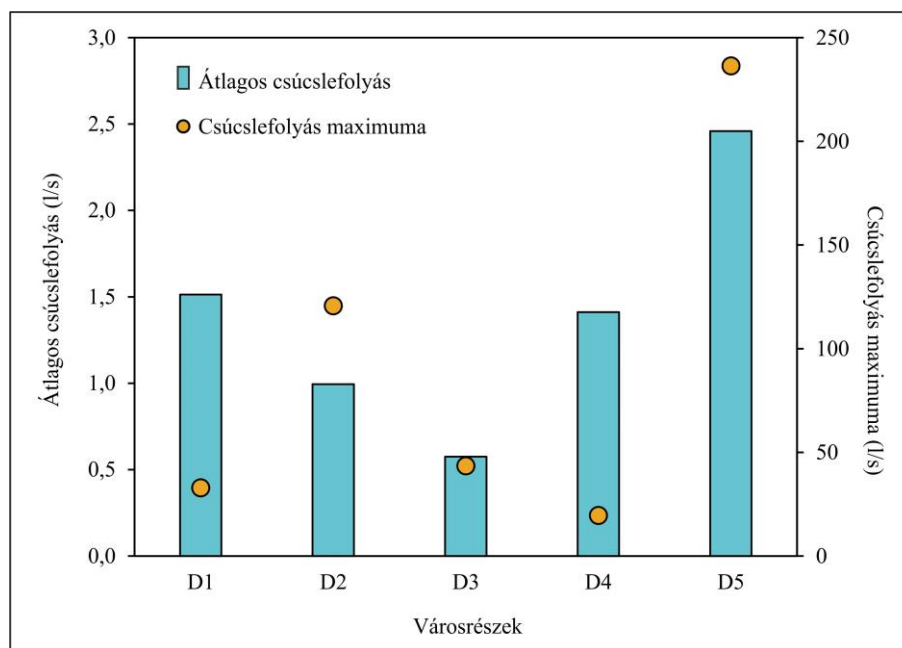
55. ábra A maximális evaporáció és lefolyás városrészenként összesítve

Az egyes városrészekre vonatkozó átlagos lefolyás és evaporáció kissé eltérő képet mutat a maximális értékektől és leginkább az adott városrész beépítettségi jellegét jobban tükrözi. A D1, D4 és D5 területek átlaga viszonylag magas, amelyek közül is kiemelkedő az utóbbi értéke. Ennek valószínűsíthető oka a területén található nagyméretű raktár épületekben keresendő. A D2 és D3 alacsonyabb értékekkel rendelkezik, mint a másik három, amely alapvetően az átlagosan kisebb épület méretekre vezethető vissza (56. ábra).



56. ábra Az átlagos evaporáció és lefolyás városrészenként összesítve

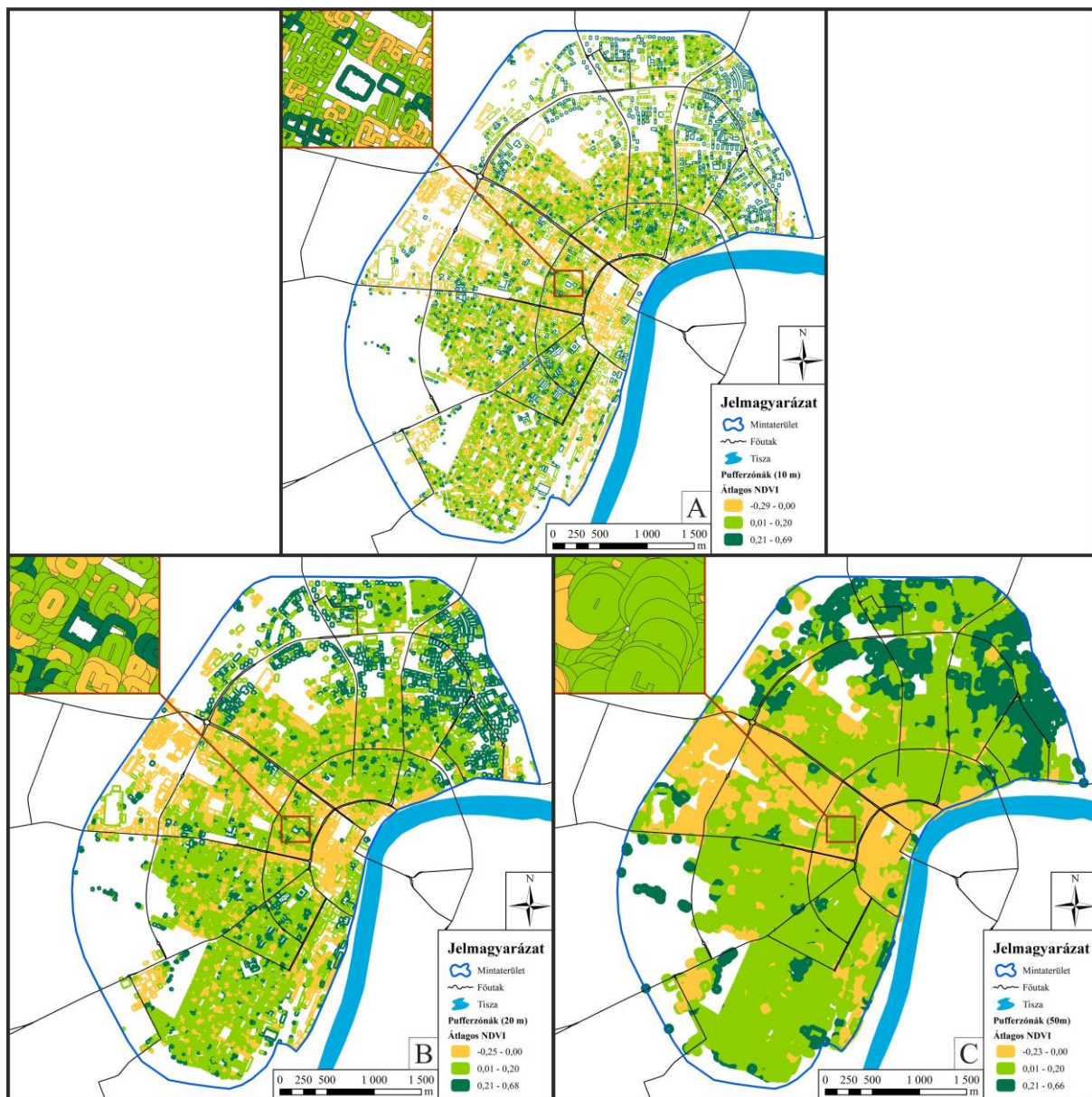
A csapadékeseményekhez kötődő felszíni lefolyás csúcsvízhozama szintén rámutathat a városrészek közötti különbségekre. A csúcsvízhozam maximuma megmutatja városrészenként, hogy mely tető rendelkezett a legnagyobb csúcsvízhozam értékekkel. Az átlagos csúcsvízhozam pedig az összes tető csúcsvízhozamának átlagát mutatja városrészenként. Mindkét érték kapcsán az D5 terület az, amely kiemelkedik, míg a D3 terület esetében a relatíve kis méretű épületek miatt mindkét csúcsvízhozam érték alacsony. A D2 városrészben található pár nagyobb méretű épület (pl. bevásárló központok), amelyek hozzájárulnak a csúcsvízhozam maximumának magas értékeihez. Azonban ebben a városrészben az átlagos tetőméretek kisebbek, így az csúcsvízhozam átlagos értéke alacsonyabb lesz a vártnál. A D1 terület esetében a 4.2. fejezetben bemutatottak alapján ugyan az átlagos tetőméret viszonylag magas, de nincsenek kiugró méretűek, így a csúcslefolyás átlagos értéke is viszonylag magas lesz (57. ábra).



57. ábra A csapadékesemények csúcslefolyásának jellemzői városrészenként összesítve

#### Vegetációval kapcsolatos eredmények

A vegetációról rendelkezésre álló adatok az egyik legfontosabb adatkört jelentik a kutatás során, mivel a növényzet mennyisége és minősége alapvető információ az öntözővíz igény meghatározásakor. A kutatás ezen részében három pufferzóna-távolságot használtam (10 m, 20 m, 50 m). Az egyes subcatchmentek lefolyása képezi az alapját az elérhető vízmennyiségnek, amely rendelkezésre állhat a pufferzónákon belüli növényzet számára. A nagyobb méretű pufferzónák nem feltétlenül jelentik a magas minőségű növényzet nagyobb arányát és magasabb NDVI értékeket, mivel a városokban sok mesterséges infrastrukturális elem található (pl. utak, járdák, közmű elemek), amelyek jelentősen csökkenthetik a pufferzónán belüli növényzeti arányt. A pufferzóna-távolság növelése következtében a zónák magukban foglalhatják az épületek közvetlen környezetében jelenlévő növényzet mellett a távolabb eső utakat, járdákat is, így csökkentve a növényzet arányát.



58. ábra A pufferzónák átlagos NDVI értékei a különböző pufferzóna-távolságok függvényében (10 m (A), 20 m (B), 50 m (C))

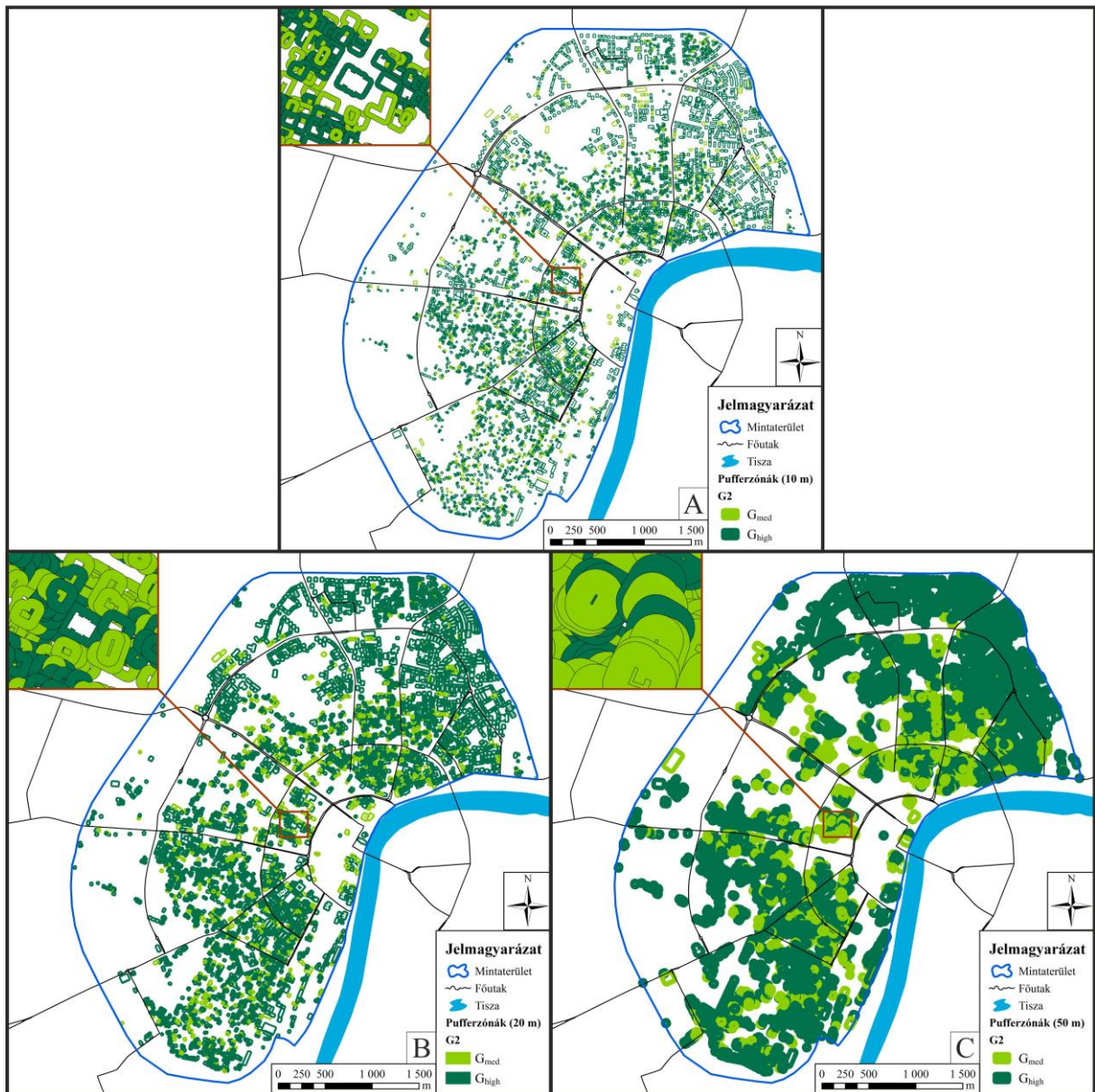
A pufferzónákat jellemző átlagos NDVI érték egy általános képet mutat a vegetáció milyenségéről a pufferzónán belül, viszont az átlagok nem emelik ki a vegetáció minőségében és mennyiségében rejlő különbségeket, így az öntözővíz igény kalkulálás során sem jelenthetik a számítások alapját. Az átlagos NDVI értékeket nézve pufferzónánként a vizsgált terület északkeleti és délnyugati része rajzolódik ki „zöld” foltként, míg a belváros és az iparterületekkel jellemezhető északnyugati részek rendelkeznek az alacsonyabb NDVI értékekkel. Ahogy a 58. ábra alapján látható az 50 méteres pufferzóna-távolság esetében kevesebb pufferzóna található magasabb NDVI értékekkel, mint a másik két zónatávolság esetében. Az északkeleti városrész pufferzónái jellemezhetők mindhárom zónatávolság esetében a legmagasabb NDVI értékekkel (58. ábra).

A pufferzónákat jellemző átlagos értékkel szemben a kategóriákba sorolt NDVI adatok sokkal pontosabb információval szolgálhatnak a növényzet minőségéről és mennyiségéről az adott pufferen belül. Ehhez első körben a növényzetet két kategóriába soroltam: teljes vegetáció (G2) és magasabb minőségű vegetáció (G1), amelyeken belül három osztályt különítettem el ( $G_{low}$ ,  $G_{med}$ ,  $G_{high}$ ). Ezek az osztályok a növényzet két kategória szerinti arányát mutatják meg a pufferzónákon belül. A magasabb minőségű vegetáció magasabb arányt tesz ki a vizsgált

terület északkeleti és délnyugati részén elhelyezkedő pufferzónákban, hasonlóan az átlagos NDVI értékekhez. A magasabb minőségű növényzet esetében több  $G_{high}$  osztályba sorolt pufferzóna található a 10 és 20 méteres puffer távolságú zónákban, mint az 50 méteres távolságúak esetében. Ennek az eltérésnek a fő oka abban keresendő, hogy az 50 méteres zónák nagyobb méretűek, ebből adódóan több alacsonyabb minőségű növényzeti foltot tartalmaznak, illetve több mesterséges felszíni elemet az épületek környezetében (59. ábra). Az eredmények hasonlóak a teljes vegetáció kategória esetében is. Azonban a teljes vegetáció kategória ( $G_2$ ) az alacsonyabb és a magasabb minőségű növényzeti foltokat is tartalmazza, ebből adódóan magasabb növényzeti arány adódik egy-egy pufferen belül, így  $G_{high}$  osztályba sorolt pufferzónák száma magasabb lesz, mint, a  $G_1$  kategória esetében. A  $G_{high}$  osztályba sorolt zónák száma kimondottan a vizsgált terület délnyugati részénél magasabb, ahol a subcathmentek alapvetően kisméretűek. A „legzöldebb” pufferzónák szintén a város északkeleti részében találhatóak, ahol a lakótelepek területen el, ahol viszonylag nagyméretű subcathmentek találhatóak nagyméretű zöldfelületekkel határolva (60. ábra).



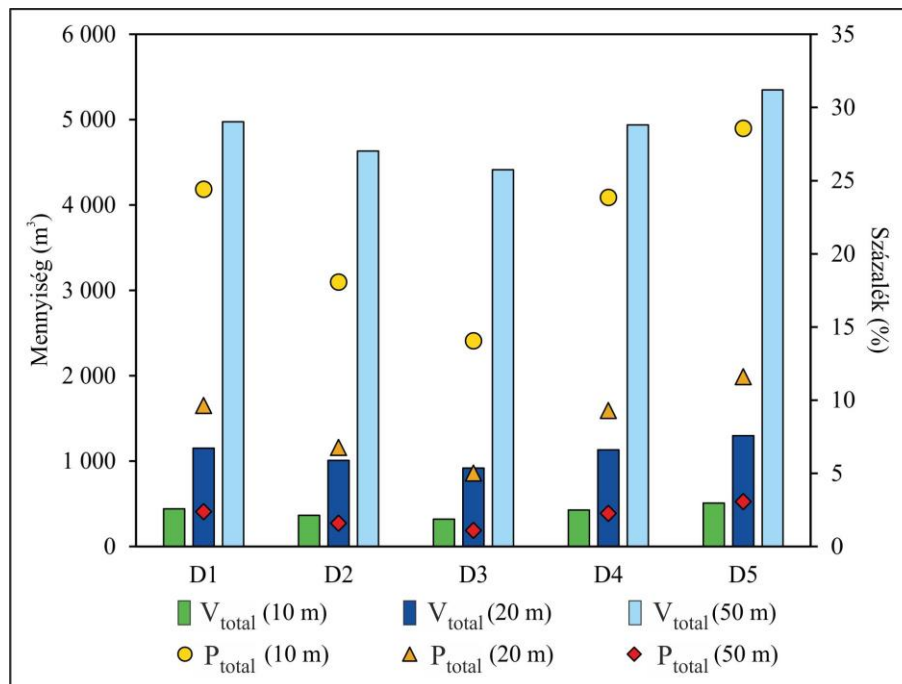
59. ábra A vegetáció pufferzónákon belüli eloszlása a  $G_1$  növényzeti indikátor alapján, a különböző pufferzóna-távolságok függvényében (10 m (A), 20 m (B), 50 m (C))



60. ábra A vegetáció pufferzónákon belüli eloszlása a G2 növényzeti indikátor alapján, a különböző pufferzóna-távolságok függvényében (10 m (A), 20 m (B), 50 m (C))

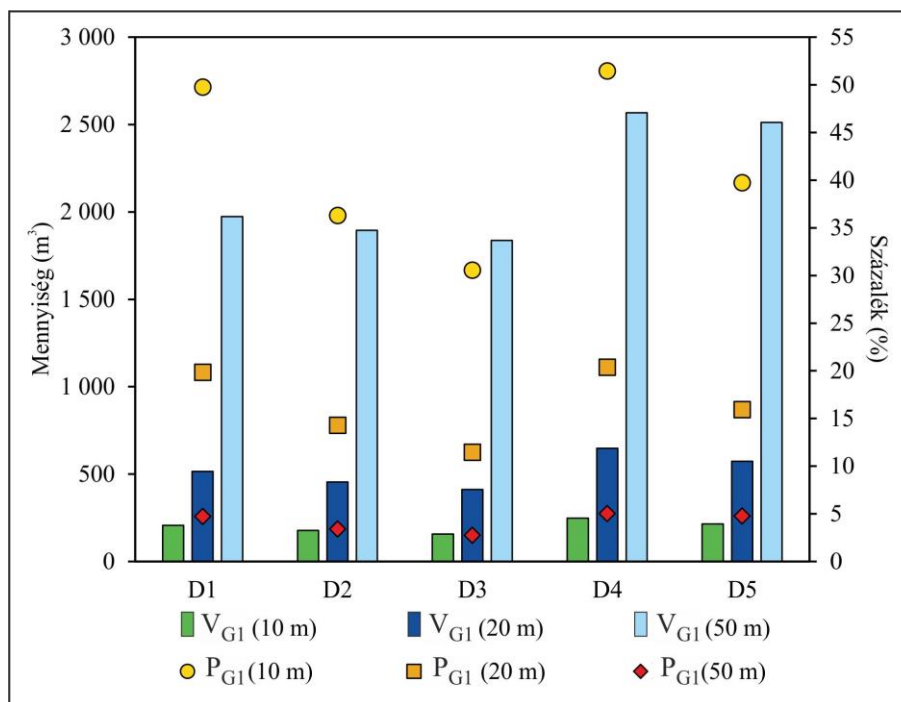
Ez a százalékalapú osztályozás azonban még nem ad a további számításokhoz megfelelő alapot, csupán az áttekintést segíti elő. Ezért, hogy azonosítani lehessen azokat a subcatchmenteket, amelyek lefedhetik a körülöttük elhelyezkedő pufferzónák öntözővíz igényét, további indikátorokra van szükség. A következő ábrák ezeknek az indikátoroknak az átlagait mutatják be városrészenként és pufferzóna-távolságonként. A 61. ábra a teljes öntözővízigényt ( $V_{total}$ ) és a teljes megvalósítható öntözővízigényt ( $P_{total}$ ) mutatja be. Amint az látható, az 50 méteres pufferzóna-távolságú zónák mérete túl nagy egy önálló subcatchmentnek, hogy a teljes zóna öntözővízigényét lefedje a lefolyás adatok alapján. A teljes öntözővízigény és a teljes megvalósítható öntözővízigény nem veszi figyelembe a pufferzónán belül növényzet minőségét és mennyiségét, hanem úgy számol, mintha az egész zónát teljes egészében növényzet fedné.





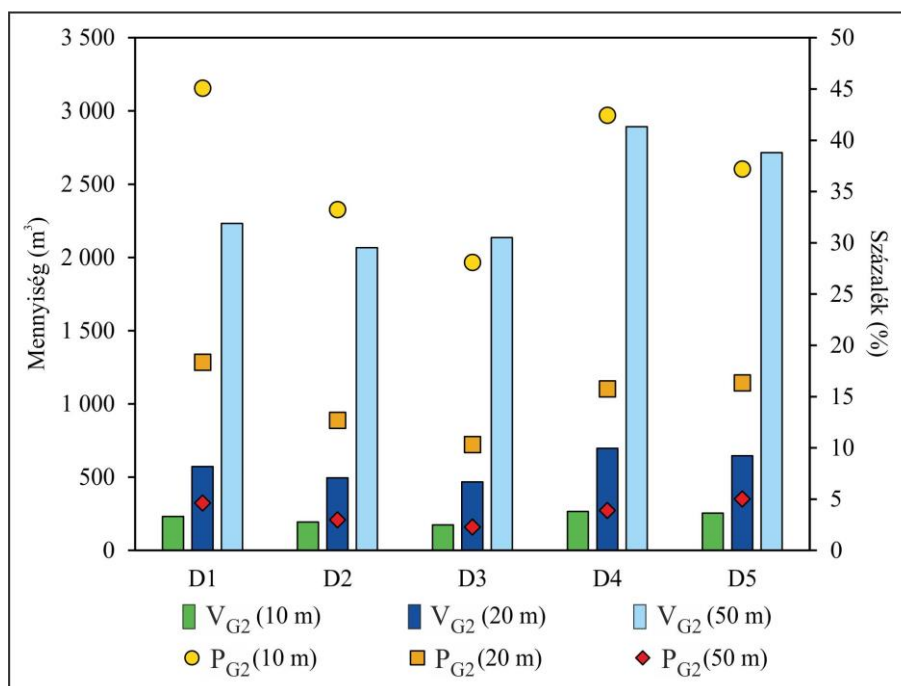
61. ábra A teljes öntözővízigény ( $V_{total}$ ) és a teljes megvalósítható öntözővízigény ( $P_{total}$ ) átlagos értékei városrészenként

Érdeemes azonban külön megvizsgálni a teljes öntözővízigény és a teljes megvalósítható öntözővízigény indikátorokat, a teljes és a magasabb minőségű növényzeti értékeit is figyelembe véve. Ezekben az esetekben az öntözővízigény alacsonyabb, mint a  $V_{total}$  és  $P_{total}$  esetében, mivel ezek már csak a növényzettel fedett területekkel számolnak a pufferzónán belül. A 62. ábra a magasabb minőségű növényzet öntözővízigénye ( $V_{G1}$ ) és a ténylegesen megvalósítható öntözővízigénye ( $P_{G1}$ ) került ábrázolásra, amelyek a magasabb NDVI értékeket használják. Ebből az látszik, hogy az öntözővízigény értékek alacsonyabbak, míg a megvalósítható értékek magasabbak, mivel az öntözést igénylő vegetáció pufferzónán belüli aránya alacsonyabb. A 62. ábra csak azok a pufferzónák szerepelnek, amelyek közepes vagy magas növényzeti aránnyal jellemezhetőek ( $G_{med}$ ,  $G_{high}$  osztályok). Azok a pufferzónák, ahol a subcatchmentek lefolyása várhatóan magas lenne, azonban a növényzet, amelyet hatékonyan lehetne öntözni nem éri el az elégséges mértékű felszínborítási arányt, kizárásra kerültek ebből az elemzésből. A D3-as területen az átlagos tetőméret kicsi, viszont a vegetáció borítás pufferzónákon belül magas, amely hozzájárulhat a viszonylag alacsony  $P_{G1}$  értékekhez. A D5 terület esetében jelentős eltérés tapasztalható. Mivel ez a városrész alapvetően ipari-kereskedelmi terület, így az alacsony növényzeti borítással rendelkező  $G_{low}$  osztályok kizárása során sok pufferzóna kikerült a vizsgálat köréből. A vizsgálat körében maradt pufferzónáknak magas öntözővízigényük van (a magasabb minőségű növényzetre vonatkozóan), de a hozzájuk tartozó tetők kisméretűek így többnyire nem fedik le a zónák öntözővízigényét (62. ábra).



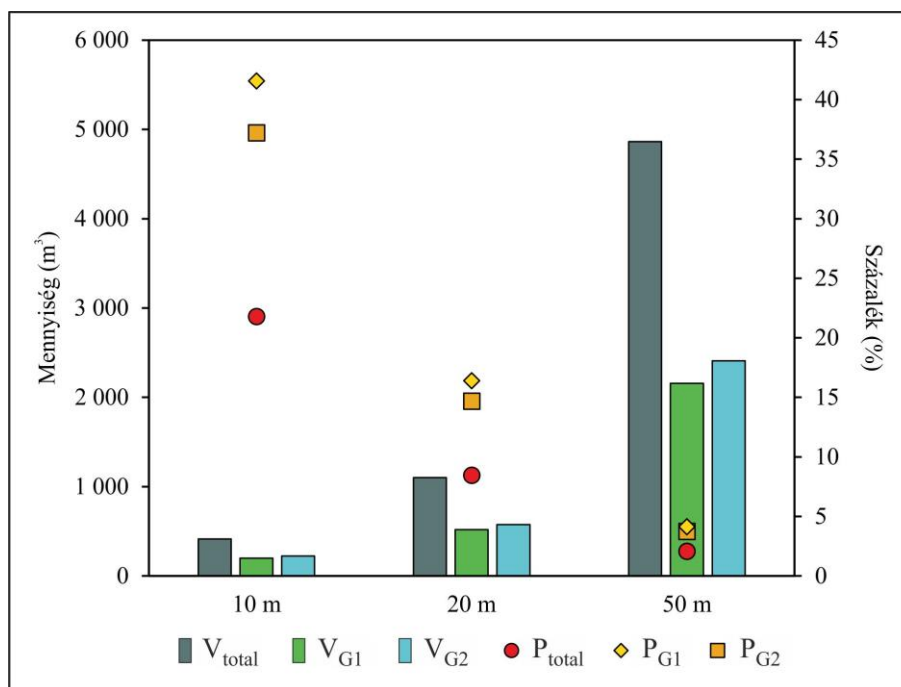
62. ábra A magasabb minőségű növényzet öntözővízigénye ( $V_{G1}$ ) és magasabb minőségű növényzet megvalósítható öntözővízigényének ( $P_{G1}$ ) átlagos értékei városrészenként

A teljes vegetációra vonatkozó öntözővízigény ( $V_{G2}$ ) és megvalósítható öntözővízigény ( $P_{G2}$ ) esetében hasonló eredmények bontakoznak ki, mint a magasabb minőségű növényzet esetében azonban várhatóan alacsonyabb megvalósítható értékekkel. Köszönhetően az összes növényzeti kategória használatának a vegetáció terület az egyes pufferezónákban magasabb, amely azonos tetőkről összegyűjthető vízmennyiség esetében azt eredményezi, hogy kevesebb növényzeti felszín öntözésére lesz elegendő az összegyűjtött víz (63. ábra).



63. ábra A teljes növényzet öntözővízigénye ( $V_{G2}$ ) és a teljes növényzet megvalósítható öntözővízigényének ( $P_{G2}$ ) átlagos értékei városrészenként

A D4 területen (mivel ez az egyik „legzöldebb” városrész) elhelyezkedő pufferzónáknak magas az öntözővízigénye. A területen belüli 10 méteres távolságú pufferzónák esetében, a  $V_{G1}$  több mint 50%-át, míg a  $V_{G2}$  40%-át lenne képes fedezni az összegyűjtött csapadékvíz mennyisége. A D1 terület esetében az öntözővízigény kissé alacsonyabb a D4-hez viszonyítva, azonban a megvalósítható vízigények mind a magasabb minőségű ( $P_{G1}$ ), mind a teljes növényzet esetében hasonlóak (62. ábra, 63. ábra). Az összefoglaló ábrán jól kivehető, hogy az 50 méteres pufferzóna-távolságkategória minden esetben túlzott méretű az öntözési felhasználáshoz. A 10 és 20 méteres pufferzónák öntözése jobban megoldható, kimondottan, ha a magasabb minőségű növényzetet vesszük figyelembe ( $P_{G1}$ ). A megvalósítható öntözővízigény százalékos értéke a 10 méteres pufferek esetében a legmagasabb és nincs számottevő különbség a teljes és a magas minőségű növényzet értékei között. Ezzel szemben a teljes megvalósítható öntöző vízigény ( $P_{total}$ ) és a  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$  között már jól látható különbség van, vagyis a teljes puffer öntözésére az összegyűjthető vízmennyiség kevés esetben elegendő, még 10 méteres zónák esetében sem. A 20 és 50 méteres puffertávolságok esetében a differencia az indikátorok között hasonló a 10 métereshez, azonban az értékek alacsonyabbak. Ennek az az oka, hogy a subcathmentek és a hozzájuk kapcsolt pufferzónák területe a zónatávolságok növelésével egyre inkább szétválik, így a subcathmentekről összegyűjthető víz a pufferzónák méretnövekedésével egyre kevésbé képes fedezni az öntözővízigényt. A pufferzóna-távolságok növelésével egyre inkább csökken a különbség a különböző megvalósítható öntözővízigények százalékos értékei között ( $P_{total}$  és a  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ ). Míg a 10 méteres távolság esetében több százalékos, akár 10 százalékos különbségek vannak, addig az 50 méteres esetében közel azonosak ezek a százalékos értékek (64. ábra).



64. ábra Az öntözővízigény indikátorok átlagos értékei pufferzóna-távolságonként

## 6. Diszkusszió, kitekintés

A Szegeden végzett mintaterületi vizsgálataim – mind a növényzet városi vízkörforgásban betöltött szerepével, mind a csapadékvízgyűjtés hatásaival kapcsolatban – fontos tanulságokkal szolgálhatnak városok hidrológiai folyamatainak alakulásáról, illetve a növényzet fenntarthatóbb városi vízgazdálkodásban betöltött szerepéről. Az alkalmazott módszerek és eredmények összehasonlítása nehézségekbe ütközik magyarországi példákkal, mivel az általam használt modelleket nem vagy kevés esetben használták hazánkban. Mindkét modell esetében pilot területeken végzett vizsgálatokkal alapoztam meg a nagyobb méretű

területeken végzett vizsgálatokat, illetve ezen vizsgálatok alapján mértem fel, hogy mely vizsgálati elemek használatát ültettem át a nagyobb méretű területekre. Alapvető tapasztalat, hogy a konkrét mintaterületeken, adott időszakban végzett vizsgálatok esetében nem egyszerű általános megállapításokat megfogalmazni, mivel ezek konkrét esetekre vonatkoznak, azonban így is leírhatóak olyan összefüggések, amelyek nagyobb általánosságban is kiterjeszthetők. Mivel Szegedet közép-európai múltja és városképe határozza meg, így a kutatásomban megfogalmazott következtetések és módszerek is leginkább ebben a térségben alkalmazhatóak.

A növényzeti folyamatokat a csapadékesemények alatt elemző kutatási rész egyik kiemelő megállítása, hogy amennyiben két egymáshoz közel eső csapadékesemény között hosszabb (megfelelő) idő telik el, akkor a növényzet lombkoronája ismét képes lehet intercepcióra. Ez igaz lehet abban az esetben is mikor egy csapadékeseményen belül a folyamat elején a csapadékhulláskor a lombkorona telítődik, majd az esemény során kisebb szünet következik a csapadékhullásban és ez idő alatt a lombkorona ismét képessé válik csapadék megtartásra. Az, hogy a lombkorona képessé válhat ismét intercepcióra nagymértékben függ a csapadékhullások között eltelt időtől, a csapadék intenzitásától és a további meteorológiai paraméterektől (szélsebesség) (Xiao et al., 1998; Xiao & McPherson, 2002). Természetesen az eredeti tározási kapacitását a lombkorona akkor nyerheti vissza, ha hosszú idő telik el a két csapadékhullás között.

A pilot vizsgálatban bemutatott scenárió elemzés során a két eset eltérő irányú változtatásokat jelentett a vízkörforgásra nézve. Amennyiben egy területen a növényzet arányát növeljük akkor az áthullás és az áteresztő felszínnek lefolyása is megnő (a területi arány növeléséből adódóan), azonban ezeket a folyamatokat kompenzáló egyéb folyamatok mennyisége is növekszik (intercepció, infiltráció). Ebből adódóan a növényzet arányának növelése a városi vízgazdálkodást szempontjából kedvezőbb irányba mozdítja el, mivel ilyen esetekben a teljes lefolyás mennyisége minden esetben csökken. Hasonló megállapításra jutott Song et al. (2020) is, miszerint a zöldfelületek arányának növelése csökkenti a felszíni lefolyást. A növényzet arányának csökkentése minden szempontból kedvezőtlenebb folyamatokat eredményez. A teljes lefolyás, a vízzáró felszínnek lefolyása is megnövekszik ilyen esetekben és a vízzáró felszínnek arányának növeléséből adódóan a beszivárgásra alkalmas felszínnek is lecsökkenek. Ilyen esetekben a korona áthullás mennyisége is csökken, azonban ez azt is jelenti, hogy a korona intercepciója is kisebb mértékű. Egy-egy tér átalakítása során arra kell törekedni, hogy a növényzet aránya ne csökkenjen, hanem inkább nőjön és fák alatti terület felszínborítása áteresztő felszín legyen (a fák alatti nem áteresztő térkő és aszfalt felszínnek kerülendő), amely kompenzálni tudja a korona áthullás mennyiségét.

Ehhez a gondolatmenethez illeszkednek az M1-es és M2-es területek összehasonlításából levonható következtetések is. Azokon a jelentős mértékben beépített, főleg belvárosban található, hagyományos, esetleg régi épülettípusokkal rendelkező városrészekben – mint amilyen az M1 – ahol a városi struktúra kötött, a felszínborítás arányának megváltoztatására kevés esély mutatkozik. Így a csapadékvíz-gazdálkodás fejlesztése a növényzet felszínborítási arányának jelentős megnövelésével nem megoldható. Ilyen területek a legtöbb hazai és közép-európai városban megtalálhatók, így az itt megállapított összefüggések kiterjeszthetők. Ezeken a területeken – a szűkös lehetőségek miatt – törekedni kell a növényzet tudatos alkalmazására a hagyományos városi fasorok kialakítása mellett. Ilyen helyzetekben leginkább a mikroléptékű megoldások működnek megfelelően, mint amilyenek az esőkertek (raingarden), amelyek komplex megoldást nyújtanak, mivel növényzetet is tartalmaznak, viszont a csapadékvíz felfogására és szikkasztására is alkalmasak lehetnek. A régi tűzfalakon alkalmazott zöldhomlokzatok a szűk utcákban növelhetik a növényzeti arányt (Hoyk, 2021b). Az ilyen területeken törekedni kell arra, hogy a burkolatok minél nagyobb arányban áteresztőek legyenek, így elősegítve a beszivárgást. Az épületenként kiépített csapadékvízgyűjtés is fontos ezeken a területeken, hiszen a tetőkről lefolyó csapadékvíz jelentős felszíni lefolyást eredményezhet és a régi épületeknél sok esetben közvetlenül az utcára történik ezek kivezetése. Ezeket a megoldásokat tudatosan és összehangoltan kell megvalósítani, mivel az egyes

fejlesztések önmagukban nem képesek a városi vízgazdálkodás problémáit megoldani, a sok kisebb megoldás együttes hatásában rejlik a potenciál, hogy csökkentse a káros hatásokat. Ezt Song et al. (2020) megállapításai is alátámasztják, miszerint a növényzet a zöldinfrastruktúra részeként kedvező hatásokat fejt ki a felszíni lefolyás csökkentésben, azonban önmagában a növényzetnek nincs elegendő kapacitása, hogy a városi elöntések teljes mértékben elkerülhetőek legyenek.

Az M1 és M2 területeken kapott eredményeim és az ott vizsgált folyamatok alapján a növényzeti intercepcióban alapvetően a fás vegetációnak jut nagyobb szerep, míg a lágyszárú növényzet kisebb szerepet tölt be. Azonban ez a mintaterületeken abból is következik, hogy a lágyszárú növényzet felszínborítási aránya alacsonyabb, viszont ezen a vegetáció klímatudatos menedzsmentjével lehet javítani (Báthoryné et al., 2021). Emellett az is kiemelendő, hogy a lakótelepi területen a nagyobb, nyitottabb épületek közötti terek miatt a lágyszárú vegetáció is nagyobb szerepet kap, mivel területi aránya is magasabb, mint a bevárosi területen, így a vízvisszatartásban is nagyobb szerepet kaphat. Ezekben a területeken a nagyon léptékű zöldinfrastrukturális megoldások is nagyobb eséllyel megvalósíthatók, mint például a swale-ok.

A fák lombkoronájának tározási kapacitása erős szezonális eltéréseket mutat. Megállapítható, hogy a tározási kapacitás maximumának legmagasabb értékei a vegetációs periódus alatt jellemzőek. Egy tavaszi kiugrás figyelhető meg az értékekben – ekkora tehető a lombfakadás is – amely egészen az őszi lombhullásig fennáll, majd jelentős csökkenés következik be az értékekben. Song et al. (2020) hasonló megállapításra jutott az intercepció hatékonyságával kapcsolatban, miszerint az intercepció (így a lombkorona tározás is), hatékonyabb a vegetációs periódus során. A növényállomány csapadékvíz visszatartással kapcsolatos hatékonyságának fontos tényezője a lombzat teljessége, illetve a levélfelület nagysága, ezért azok a tényezők, amelyek csökkentik ezt – a természetes lombhulláson kívül – kedvezőtlenül befolyásolhatják a fák ökoszisztéma szolgáltatásait, köztük a csapadékvíz visszatartást is (Xiao & McPherson, 2002). Ilyen negatív hatásokat okozó tényezők lehetnek például a szárazság, illetve kártevők okozta lombvesztés, amelyek a lombkorona jelentős mértékű elszáradását okozhatják különösképpen, ha a mesterségesen ültetett állomány egysíkú fajkészlettel rendelkezik. További lombkorona veszteséget okozhat a túlzott mértékű lombkorona nyelés is (közmvévek, épületek közelsége miatt), amely komoly problémaforrás lehet a zöldfelületek kezelése során (Hoyk, 2021b). A szezonális lombkorona hiányból adódó tározási kapacitás csökkenés alapján látható, hogy a lombkorona levélfelületében bekövetkező változás, milyen mértékű hatásokat okozhat, ezért törekedni kell arra, hogy városi faállomány a lehető legtávolabb, a lehető legnagyobb lombfelületet képes legyen megőrizni.

Az i-Tree Hydro modell hazai környezetben való alkalmazása megvalósítható, azonban ennek korlátait is fontos figyelembe venni. A doktori kutatásom során csupán néhány olyan publikációt találtam, amelyek során az i-Tree Hydro-t Egyesült Államokon kívüli mintaterületeken használták (Bautista, & Peña-Guzmán, 2019; Song, et al. 2020). A Hydro hazai környezetben való alkalmazásához rendkívül sok inputadat szükséges, emellett az adatok feldolgozása is a témakör komoly szakismeretét kívánja meg, illetve sok esetben ezek hazánkban nem állnak rendelkezésre kellő részletességgel. Ugyanakkor a modellezéssel előálló adatok kiválóan felhasználhatóak lehetnének tervezési/döntéshozzájárulási folyamatokban is, hiszen a szcenárió elemzés lehetősége megteremti a felhasználás feltételeit egy-egy városi zöldfelületet érintő változtatás tervezése során. Segítségével a korábbi standardok szerint megállapított csatorna-keresztmetszeti értékek pontosíthatók, észszerűsíthetők lehetnek. A modell alkalmazásának komoly limitáló tényezője hazánkban, hogy nagyon kevés pontos adat áll rendelkezésre a városok egyes területein a be- és kilépő vizek mennyiségéről, így a mérőpontok hálózata még nem teszi lehetővé a pontosabb elemzést. A modell használhatóságának felmérését nagyban nehezíti, hogy bár komplex és a növényzet folyamataival részletesen foglalkozó modell, ennek ellenére nagyon kevés nemzetközi, tudományos publikáció áll róla rendelkezésre (Bautista, & Peña-Guzmán, 2019; Jayasooriya & Ng, 2014; Kirnbauer, et al., 2013; Song, et al. 2020). Így a kutatásaim eredményeinek és

következtetések összehasonlítása során ez is nehezítő körülményként volt jelen. Az i-Tree Hydroval végzett vizsgálatoknak több továbbfejlesztési iránya is lehetséges. Egyrészt a Hydro modellt folyamatosan fejlesztik, így a későbbiekben várható olyan fejlesztés, amely lehetővé teszi a hazai adatbázisok könnyebb implementálását. Amennyiben ez megvalósul akkor az egyes mintaterületi vizsgálatok gyorsabban megvalósíthatóak lesznek és ezáltal több használati tapasztalat és eredmény állhat elő hazai mintaterületeken. A növényzet városi vízgazdálkodásban betöltött szerepét vizsgáló kutatási rész legfontosabb továbblépési lehetősége, hogy Szeged teljes területére kiterjedjen a modellezés. Ennek során olyan átfogó kép alakulhat ki a város zöldinfrastrukturális elemeinek vízgazdálkodásban betöltött szerepéről, amelyet különböző stratégiák megalapozó tanulmányaként is lehet használni. A jövőben kiemelt továbbfejlesztési cél, hogy Szegedhez hasonló felépítésű városok területére kiterjesszem a vizsgálataimat, hogy minél több hazai területről rendelkezésre álljanak eredmények, amelyekkel támogatni lehet a fenntartható várostervezést.

A csapadékvízgyűjtés tervezése során fontos szempont a megfelelő méretezés, vagyis, hogy a gyűjtőtartályok mérete, illetve darabszáma igazodjon a gyűjtés során lefedni kívánt terület méretéhez. A három óvoda vizsgálata során az eredmények azt mutatták, hogy a legkisebb mintaterületen volt a legalacsonyabb az átlagos lefolyás aránya. Ez a felszínborítási arányok eltérése mellett a gyűjtőtartályok méretezéséből is adódhat. A három mintaterület mérete eltér, azonban a tartályok mérete és darabszáma azonos. A csapadékvízgyűjtési rendszer is hozzájárul a lefolyási arányok alakulásához és láthatóan a kisebb mintaterületen a lefolyás aránya is alacsonyabb. A csapadékvízgyűjtés tervezése során kiemelten fontos arra figyelni, hogy megfelelő méretezésű legyen a rendszer kapacitása, hiszen a megfelelő méretezés hozzájárulhat a nagyobb lefolyás csökkentéséhez.

Az óvodák területén végzett csapadékvízgyűjtési vizsgálataim során két nagyobb csapadékesemény típust lehetett elkülöníteni. Az egyik során a teljes lefolyáshoz mérten az esemény átlagos lefolyása magas. Az ilyen eseményeket alapvetően gyors, magas lefolyású eseményekként lehetne jellemezni. A másik típus során a teljes lefolyás mennyisége kiemelkedő, azonban az átlagos lefolyás mennyisége alacsony szinten marad. Ezeket az eseményeket hosszan elhúzódó, csendes esőként lehetne leírni, amelyek során a lefolyt víz mennyisége magas azonban ez nem hirtelen, hanem hosszabb idő alatt történik meg. A két eseménnytípus eltérő hatást gyakorolhat a csapadékvízgyűjtő rendszerekre, illetve, hogy azok milyen mértékben képesek tompítani az eltérő lefolyás csúcsokat. Az intenzív csapadékok és a nagy lefolyási csúcsok kiemelt problémát jelenthetnek, hiszen egyszerre érkezhetsz a felszínre nagyobb vízmennyiség. Ilyen esetekben jelenthet megoldást a kisléptékű megoldások összehangolása (akár lakosságot is bevonva), amelyek csökkenthetik a hirtelen lefolyások következtében előtörtént városi területeket. A hosszan elhúzódó, de alacsonyabb intenzitású csapadékok is jelenthetnek problémát, hiszen ilyen esetekben a gyűjtőrendszerek hosszabb idő elteltével telítődhetnek és ekkor már kevésbé lehetnek képesek csökkenteni a lefolyási csúcsokat. A kisléptékű modellezési eljárások alkalmazásával feltárható a különböző csapadékesemények csapadékvízgyűjtésre gyakorolt közvetlen hatása, hogy a lefolyás intenzitása és a csapadékesemények elhúzódása mennyire befolyásolja a gyűjtőrendszerek feltöltődését és hatékonyságát, illetve a gyűjtőrendszerek milyen mértékben képesek csökkenteni az eltérő lefolyás csúcsokat. Ennek a témakörnek a további vizsgálata jelenti a kutatás egyik továbbfejlesztési lehetőségét is.

A csapadékvízgyűjtés lokális léptékű modellezése során feltártam, hogy a pufferzónák mérete, a pufferzónák növényzeti borításának pontos megállapítása, illetve a gyűjtőfelületek és az öntöző felületek közötti összefüggések felállítása kulcsfontosságú eleme a vizsgálatoknak. A pufferzónák esetében a városi környezet mesterséges infrastrukturális elemei (pl. utak, járdák, közmű elemek) jelentősen csökkenthetik a növényzet zónán belüli arányát. Így előfordulhat, hogy egy nagyobb méretű zóna alacsonyabb növényzeti aránnyal és NDVI értékkel rendelkezik, mint egy kisebb területű zóna. A zónatávolság is jelenthet különbséget a növényzeti arányban. Kisebb távolság esetében (10 m) a felszínborítási elemek közül csak az

épületek közvetlen környezetét foglalja magában a pufferzóna, míg nagyobb zónatávolság esetében (50 m) sokkal több mesterséges felszínborítási elem eshet a zóna területére. A pufferzónákon belüli növényzeti arány jelentősen eltérhet attól függően, hogy a zóna mely városrészben található. Alapvetően a belvárosi/központi területen található zónákban alacsonyabb a növényzet aránya, míg a lakótelepi és kertvárosiasabb területeken magasabb. Ezek a megállapítások hasonló felépítéssel rendelkező Közép-Európai városok esetében is érvényesek lehetnek, hiszen alapvetően hasonló városszerkezeti felépítéssel rendelkeznek.

A pufferzónák növényzetének jellemzésére az NDVI indexet használtam, amelyre könnyű előállíthatósága és a téradatok hozzáférhetősége miatt esett a választás. Az egyes zónák vizsgálata során az átlagos NDVI értékeket vettem alapul első körben, amely általános jellemzésre megfelelő, azonban elfedi a zónákon belül a növényzeti minőségi és mennyiségi különbségeket, így komplexebb összehasonlításra nem használható. A pufferzónák öntözővízigényének megállapítására létrehozott indikátorok ( $G_1$ ,  $G_2$ ) és ezek zónán belüli arányát jellemző értékek ( $G_{low}$ ,  $G_{med}$ ,  $G_{high}$ ) pontosabb képet adhatnak a zónák összehasonlítása során. A magasabb minőségi kategóriába sorolt növényzet esetében ( $G_1$ ) több  $G_{high}$  osztályba sorolt, pufferzóna található a 10 és 20 méteres puffer távolságú zónákban, mint az 50 méteres távolságúak esetében. Az 50 méteres zónák a méretük miatt jellemzően több mesterséges felszínelemet és tartalmaznak az épületek közelében, illetve több alacsonyabb minőségű növényzeti foltot is tartalmazhatnak.

Az vizsgálatok eredményeiből levonható következtetés az, hogy kimondottan fontos a pufferzónákon belül pontosan meghatározni azt a területet, amely öntözése szükséges, mivel a pufferzónához tartozó tetők – amelyekről a vízgyűjtés történik – mérete adott, így csak bizonyos méretű területek öntözése oldható meg a felületükről összegyűjtött vízmennyiséggel. A zónák teljes területének vízigényét ( $V_{total}$ ,  $P_{total}$ ) legtöbb esetben nem tudja fedezni az összegyűjthető csapadékvíz. Minél több növényzetet kívánunk öntözni annál több csapadékvíz szükséges hozzá, ezért szükséges a növényzet pontos definiálása, és hogy milyen típusú növényzet öntözése a cél (csak a magasabb minőségű vagy az összes növényzet). Egy-egy pufferzóna esetében a következők a legmeghatározóbbak, abból a szempontból, hogy érdemes-e csapadékvízgyűjtő rendszert kiépíteni a területén: a tetőmérete, amely meghatározza az összegyűjthető víz mennyiségét, az öntöző vízzel lefedni kívánt terület mérete (zónatávolság), a zónán belüli növényzet mennyisége és minősége, illetve ezek egymáshoz viszonyított aránya. Könnyen előfordulhat, hogy a tetőmérete és az összegyűjthető víz mennyisége is lehetővé teszi nagy terület öntözését, azonban a pufferzónában a beépítettség miatt minimális a növényzet, így az öntözés miatt nem érdemes gyűjtő rendszert kiépíteni (lefolyás csúcs csökkentés és szürkevízes öblítés miatt ebben az esetben is indokolt lehet). Ezzel ellentétesen az is előállhat, hogy a növényzet kiterjedése a pufferzónában indokolná a csapadékvízgyűjtést, azonban az épület méretéből adódóan az összegyűjthető vízmennyiség nem lenne képes fedezni az öntözővíz igényt. Ilyen terület a Szegeden vizsgált D3-as terület is, ahol az átlagos tetőméret kicsi, míg a pufferzónák növényzeti borítottsága magas, amely hozzájárul az alacsony megvalósítható öntözővíz igényekhez ( $P_{G1}$ ). Hasonló beépítettségi jelleg mellett a csapadékvízgyűjtés hatékonysága elmaradhat valamelyest például a lakótelepi jellegű területekétől, viszont a vegetáció nagy aránya miatt mégis érdemes itt is kihasználni a csapadékvízgyűjtésben rejlő potenciált, mivel az fenntartható megoldások jelentősége pont, az ilyen gyűjtési lehetőségek összehangolásában rejlik (PHS (pond harvesting systems), RHS (roof harvesting systems) (Karim et al., 2021; Liaw & Chiang, 2014; Zabidi et al., 2020)

A vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy az 50 méteres távolságok minden esetben túl nagy méretűek, hogy a tetőkről összegyűjthető csapadékvíz alapján öntözhetőek legyenek. Ezzel szemben már a 10 és 20 méteres pufferzónák esetében az öntözhetőségük jobban megoldható. Ez függ attól is, hogy a növényzet aránya mekkora a zónákban, a magasabb minőségű növényzet alacsonyabb arányt tesz ki, így annak öntözhetősége is jobban megoldható. A 10 méteres zónák esetében a legmagasabb a megvalósítható öntözővízigény százalékos értéke és ebben az esetben nincs jelentős különbség

a teljes és a magas minőségű növényzet értékei között. Azonban a teljes megvalósítható öntöző vízigény ( $P_{total}$ ), vagyis a teljes puffer öntözésére az összegyűjthető vízmennyiség még a 10 méteres zónák esetében sem elegendő.

## 7. Összefoglalás

A doktori kutatásom során a városi növényzet és a zöldinfrastruktúra fenntartható vízgazdálkodásban betöltött szerepét vizsgáltam és hatásainak részletes feltárását végeztem el térinformatikai és modellezési eszközökkel. A növényzet szerepe mellett megvizsgáltam a zöld- kékinfrastruktúra fontos részét alkotó csapadékvízgyűjtési megoldásokat, illetve, hogy azok a városi vízgazdálkodásban és a növényzet öntözésében, milyen szerepet tölthetnek be. E vizsgálatok során szintén térinformatikai és a hidrológiai modellezési eszközöket használtam fel. A disszertációban bemutatott vizsgálatok mintaterületei Szegeden belterületén találhatóak, azonban hasonló felépítésű hazai városokra is kiterjeszthető az általam összeállított módszertan, amennyiben a vizsgálatokhoz használt adatkörök rendelkezésre állnak.

A doktori kutatásom két nagyobb témakörre bontható. Az első témakörben a növényzet városi vízgazdálkodásban és vízkörforgásban betöltött szerepét elemeztem. Ennek során hidrológiai modellezést alkalmaztam és szegedi példákon keresztül, eltérő karakterisztikájú városrészek elemzése során tártam fel a növényzet szerepét a városi vízgazdálkodásban. A hidrológiai folyamatok elemzése során scenárió elemzéseket is végeztem, amelyek alátámasztották a növényzet pozitív szerepét a felszíni lefolyás módosításában. Hasonlóan a két eltérő felszínborítású városrész elemzése során levonható következtetések is azt támasztják alá, hogy a magasabb növényzeti borítottsággal rendelkező városrész kedvezőbb vízgazdálkodási tulajdonságokkal rendelkezhet. A vegetáció hidrológiai folyamatokban betöltött szerepének elemzése mellett a kutatásom egyik célja volt az is, hogy a használt modell (i-Tree Hydro) hazai alkalmazhatóságának szerepét feltárjam. Ennek során megvizsgáltam, hogy milyen nehézségekbe ütközik a modell adaptálása, az inputadatok elérhetősége, illetve, hogy az általa adott eredmények alkalmazhatóak-e hazai döntéshozási folyamatok előkészítésére. A doktori kutatásom során hazai környezetben először állt elő a modellel felhasználható eredmény, amelyhez több módszertani előkészítés volt szükséges, kimondottan a térinformatikai oldalt érintve. A modell használta során azt találtam, miszerint a Hydro alkalmas lehet hazai területeken történő hidrológiai vizsgálatokra, azonban alkalmazásának terjedését az inputadatok előállításának nehézsége akadályozhatja. Ennek ellenére az előállítható eredmények használhatóak lehetnek döntéshozási folyamatok támogatásában, hiszen mind a scenárió elemzés, mind a városrészek összehasonlíthatóságának lehetősége hasznos eszköz lehet a várostervezés kezében.

A doktori kutatásom második témakörében a csapadékvízgyűjtés fenntartható városi vízgazdálkodásban betöltött szerepét vizsgáltam, illetve a csapadékvízgyűjtés szerepét a városi növényzet öntözésében. E vizsgálatok során mikro és lokális léptékben is elemeztem a csapadékvízgyűjtés városi vízgazdálkodásban betöltött lehetséges szerepét. A mikroléptékű vizsgálatok során célom volt, hogy elemezzem azokat a lehetőségeket és folyamatokat, amelyek egy-egy épület szintjén megvalósíthatóak, így a fenntartható vízgazdálkodásban a lakossági, illetve önkormányzati szemléletformálást is elősegíthetik, adatokkal alátámaszthatják. A nagyobb léptékű (lokális) csapadékvízgyűjtési vizsgálat során kitűzött cél volt, hogy olyan módszertant dolgozzak ki, amellyel elősegíthető a csapadékvízgyűjtés és az ebből történő növényzeti öntözési igények város szintű tervezése. E módszertan során nem csupán azt volt a cél, hogy egy adott mintaterületre vagy városra vonatkozzon, hanem bizonyos korlátok között adaptálható legyen más hasonló felépítésű településen is. Ennek érdekében, olyan növényzeti és az öntözővízigények (növényzeti kategóriák alkalmazásával) jellemzésére szolgáló indikátorok kidolgozását tűztem ki célul, amelyek viszonylag könnyen előállíthatók, illetve közel bármely településen megoldható az előállításuk és az inputadatok beszerezhetősége sem ütközik nehézségekbe. Az eredmények elemzése során a feltártam, hogy az egyes városrészek milyen csapadékvízgyűjtési lehetőségekkel rendelkeznek, illetve azt is, hogy mely területeken



található öntözést igénylő vegetáció a gyűjtőterületek környezetében. A vizsgálatok során megállapítottam, hogy mely pufferzóna méretek megfelelőek az öntözési igények fedezésére. A pufferzónákon alapuló módszertan alapvetően alkalmas lehet más város területén végzett vizsgálatokra is.

A doktori kutatás során általam kidolgozott módszertanok lehetőséget biztosítanak más hazai városokban történő vizsgálatokra is, a módszertanok kiterjesztésének tesztelése a kutatás egyik lehetséges jövőbeli iránya. Bízom benne, hogy a kutatásom eredményeit és módszereit hasznosítani lehet a hazai városi vízgazdálkodás fenntarthatóvá tétele során.

## 8. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Gulyás Ágnes egyetemi adjunktusnak, hogy segítette kutatásomat és előrehaladásomat. Köszönöm neki, hogy a szakmai kérdések mellett a tudományos élet további részeiben is segítséget nyújtott.

Külön köszönet illeti Dr. Kolcsár Ronald András, aki a kutatásom során számos szakmai és tudomány technikai kérdésben nyújtott segítséget az évek során. Köszönettel tartozom Dr. Csikós Nándornak, aki szintén sok segítséget nyújtott a doktori képzés alatt, mind szakmai, mind technikai kérdésekben.

Köszönet illeti a Szegedi Tudományegyetem Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszékét, illetve a Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszékét, mivel számos olyan adatot és adatbázist biztosítottak számomra, amelyek nélkül a doktori kutatásom nem valósulhatott volna meg.

A doktori képzés alatt kutatásaimat az Új Nemzeti Kiválósági Program (ÚNKP-18-3, ÚNKP-19-3, ÚNKP-20-3) és a Kék Bolygó Klímavédelmi Alapítvány ösztöndíjprogramjai támogatták.

Végül, de nem utolsó sorban hálával és köszönettel tartozom szüleimnek, akik a doktori képzés folyamán mindenben támogattak a legnehezebb időszakokban is és akik támogatása nélkül ez a dolgozat nem születhetett volna meg.

## 9. Irodalomjegyzék

- Ahern, J. (2007). Green infrastructure for cities: the spatial dimension. In. In *Cities of the future: towards integrated sustainable water and landscape management*. IWA Publishing.
- Almási, B. & Csizmadia D. (2016). Vízáteresztő burkolatok: Vízáteresztő burkolattípusok alkalmazásának útmutatója. *Zöldinfrastruktúra füzetek 1.*, Budapest Főváros Városépítési Tervező Kft., Budapest.
- Aquino, D. do N., Neto, O. C. da R., Moreira, M. A., Teixeira, A. dos S., & de Andrade, E. M. (2018). Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, 49(3), 420–429. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180047>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Atanasova, N., Castellar, J. A. C., Pineda-Martos, R., Chrysanthy, & Nika, E., Katsou, E., Istenič, D., Pucher, B., Andreucci, M. B., & Langergraber, G. (2021). Nature-Based Solutions and Circularity in Cities. *Circular Economy and Sustainability 2021 1:1*, 1(1), 319–332. <https://doi.org/10.1007/S43615-021-00024-1>
- Ayala-Azcárraga, C., Diaz, D., & Zambrano, L. (2019). Characteristics of urban parks and their relation to user well-being. *Landscape and Urban Planning*, 189, 27–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.04.005>
- Bahmani, S., Attarod, P., Bayramzadeh, V., Ahmadi, M. T., & Radmehr, A. (2012). Throughfall, stemflow, and rainfall interception in a natural pure forest of chestnut-leaved Oak

- (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey.) in the Caspian Forest of Iran. *Annals of Forest Research*, 55, 197–206. <https://doi.org/10.15287/afr.2012.60>
- Balatonyi, L., Láng, I., & Bíró, T. (2020). Települési csapadékvíz-gazdálkodás jelenlegi helyzete. [https://www.researchgate.net/publication/344956404\\_Telepulesi\\_csapadekviz-gazdalkodas\\_jelenlegi\\_helyzete](https://www.researchgate.net/publication/344956404_Telepulesi_csapadekviz-gazdalkodas_jelenlegi_helyzete)
- Balatonyi, L., Reich, G., Jancsó, B., Nagy, Z., Buzás, K., & Tóth, L. (2021). Fenntartható települési vízgazdálkodás, jövőkép a települések részére. *Belügyi Szemle*, 69(12), 2189–2207. <https://doi.org/10.38146/BSZ.2021.12.8>
- Balázs, B., Unger, J., Gál, T., Sümeghy, Z., Geiger, J., & Szegedi, S. (2009). Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modelling, verification and extension. *Meteorological Applications*, 16(3), 275–287. <https://doi.org/10.1002/MET.116>
- Bartholy, J., Pongrácz, R., & Pieczka, I. (2014). How the climate will change in this century? *Hungarian Geographical Bulletin*, 63(1), 55–67. <https://doi.org/10.15201/HUNGEOBULL.63.1.5>
- Báthoryné, N. I. R., Gergely, A., Pernes, K., Bálint, K., & Pap, M. L. (2021). Klímaadaptív gyepgazdálkodás városban. Gödöllő: Szent István Egyetem.
- Bautista, D., & Peña-Guzmán, C. (2019). Simulating the Hydrological Impact of Green Roof Use and an Increase in Green Areas in an Urban Catchment with i-Tree: A Case Study with the Town of Fontibón in Bogotá, Colombia. *Resources 2019*, Vol. 8, Page 68, 8(2), 68. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES8020068>
- Bean, E. Z., Hunt, W. F., & Bidelspach, D. A. (2007). Evaluation of Four Permeable Pavement Sites in Eastern North Carolina for Runoff Reduction and Water Quality Impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6), 583–592. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:6\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:6(583))
- Belmeziti, A., Coutard, O., & de Gouvello, B. (2013). A New Methodology for Evaluating Potential for Potable Water Savings (PPWS) by Using Rainwater Harvesting at the Urban Level: The Case of the Municipality of Colombes (Paris Region). *Water 2013*, Vol. 5, Pages 312–326, 5(1), 312–326. <https://doi.org/10.3390/W5010312>
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.10.047>
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W. D., Garmestani, A. S., Goddard, H. C., Herrmann, D. L., & Hopton, M. E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>
- Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, 35(2), 343–347. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2009.07.017>
- Brattebo, B. O., & Booth, D. B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*, 37(18), 4369–4376. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00410-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00410-X)
- Brears, R. C. (2018). Blue and green cities: the role of blue-green infrastructure in managing urban water resources. Springer.
- Burszta-Adamiak, E., & Mrowiec, M. (2013). Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science and Technology*, 68(1), 36–42. <https://doi.org/10.2166/WST.2013.219>
- Buzás, K. (2012). Települési csapadékvíz gazdálkodás, Monográfia, Terc kiadó, 2012. 148 pp.
- Buzás, K. (2015). Víz a városban: alkalmazkodás a klímaváltozáshoz, BME, VKKT. Budapest
- Buzás, K., & Somlyódy, L. (2011). Települési vízgazdálkodás. Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok (pp. 255-288). Magyar Tudományos Akadémia.
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., & Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting

- systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195–209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- Carpenter, C. M. G., Todorov, D., Driscoll, C. T., & Montesdeoca, M. (2016). Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. *Environmental Pollution*, 218, 664–672. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.07.056>
- Chan, F. K. S., Griffiths, J. A., Higgitt, D., Xu, S., Zhu, F., Tang, Y.-T., Xu, Y., & Thorne, C. R. (2018). “Sponge City” in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land Use Policy*, 76, 772–778. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>
- Chang, H., & Bonnette, M. R. (2016). Climate change and water-related ecosystem services: impacts of drought in California, USA. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(12), e01254. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ehs2.1254>
- Chatzimentor, A., Apostolopoulou, E., & Mazaris, A. D. (2020). A review of green infrastructure research in Europe: Challenges and opportunities. *Landscape and Urban Planning*, 198(February), 103775. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103775>
- Cheng, Y., Zhang, J., Wei, W., & Zhao, B. (2021). Effects of urban parks on residents’ expressed happiness before and during the COVID-19 pandemic. *Landscape and Urban Planning*, 212, 104118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104118>
- Cipolla, S. S., Altobelli, M., & Maglionico, M. (2018). Decentralized Water Management: Rainwater Harvesting, Greywater Reuse and Green Roofs within the GST4Water Project. *Proceedings 2018*, Vol. 2, Page 673, 2(11), 673. <https://doi.org/10.3390/PROCEEDINGS2110673>
- Collins, K. A., Hunt, W. F., & Hathaway, J. M. (2008). Hydrologic Comparison of Four Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(12), 1146–1157. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:12\(1146\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:12(1146))
- Coutts, C., & Hahn, M. (2015). Green Infrastructure, Ecosystem Services, and Human Health. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 12, Issue 8, pp. 9768–9798). <https://doi.org/10.3390/ijerph120809768>
- Coville, R., Endreny, T., & Nowak, D. J. (2020). Modeling the Impact of Urban Trees on Hydrology. In D. F. Levia, D. E. Carlyle-Moses, S. Iida, B. Michalzik, K. Nanko, & A. Tischer (Eds.), *Forest-Water Interactions* (pp. 459–487). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6_19)
- Credit Valley Conservation. (2010a). Landscape design guide for low impact development, Appendix B (Version 1.0) Credit Valley Conservation, Toronto and Region Conservation Authority
- Credit Valley Conservation. (2010b). Low impact development stormwater management planning and design guide (Version 1.0) Credit Valley Conservation, Toronto and Region Conservation Authority
- Csete, Á. K., & Gulyás, Á. (2019a). Investigating the role of green infrastructure in sustainable urban water management, a case study in Szeged. *Carpathian Journal Of Earth And Environmental Sciences*, 14(2), 483–494. <http://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/097>
- Csete, Á. K., & Gulyás, Á. (2019b). Modeling options for rainwater harvesting developments in a public institution as part of sustainable urban water management solutions. *Acta Climatologica Et Chorologica*, 53(1), 5–16. <http://doi.org/10.14232/acta.clim.2019.53.1>
- Csete, Á. K., & Gulyás, Á. (2020). Adaptation of UFORE-Hydro model for Szeged and the southern region of the Great Hungarian Plain based on local meteorological database. *Acta Climatologica Et Chorologica*, 54(1), 5–17. <http://doi.org/10.14232/acta.clim.2020.54.1>
- Csete, Á. K., & Gulyás, Á. (2021). Green infrastructure-based hydrological modelling, a comparison between different urban districts, through the case of Szeged,

- Hungary. *Hungarian Geographical Bulletin* (2009-), 70(4), 353–368. <http://doi.org/10.15201/hungeobull.70.4.5>
- Csete, Á. K., Kolcsár, R. A., & Gulyás, Á. (2021). Rainwater harvesting potential and vegetation irrigation assessment derived from building data based hydrological modeling through the case study of Szeged, Hungary. *Carpathian Journal Of Earth And Environmental Sciences*, 16(2), 469–482. <http://doi.org/10.26471/cjees/2021/016/192>
- Csizmadia, D. (2018). Vízérzékeny tervezés a városi szabadtereken. *Zöldinfrastruktúra füzetek* 3., Budapesti Fővárosi Főpolgármesteri Hivatal, Budapest.
- DeNardo, J. C., Jarrett, A. R., Manbeck, H. B., Beattie, D. J. & Berghage, R. D. (2005). Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the ASAE*, 48(4), 1491–1496. <https://doi.org/10.13031/2013.19181>
- Department of Water and Environmental Regulation. (2007). Stormwater Management Manual for Western Australia, updated 2022, Government of Western Australia, Perth.
- Dietz, M. E. (2007). Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 186(1–4), 351–363. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>
- Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2005). A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. *Water, Air, and Soil Pollution* 2005 167:1, 167(1), 123–138. <https://doi.org/10.1007/S11270-005-8266-8>
- Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling and Software*, 22(3), 394–405. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2005.12.005>
- European Environment Agency. (2012a). *Green infrastructure and territorial cohesion: the concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2800/88266>
- European Environment Agency. (2012b). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: an indicator-based report*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2800/66071>
- European Environment Agency. (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: an indicator-based report*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2800/534806>
- Fazio, J. R. (n.d.). How Trees Can Retain Stormwater Runoff. *Tree City USA Bulletin*, 55, 7.
- Federal Interagency Stream Restoration Working Group. (1998). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*. GPO Item No. 0120-A; SuDocs No. A 57.6/2:EN 3/PT.653. Washington D.C., USDA.
- Fejes, I. (2015). *A talaj- és talajvízrendszer komplex környezeti szempontú értékelése városi területen, Szeged példáján*. Doktori disszertáció, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szegedi Tudományegyetem
- Ferguson, B. (2005). *Porous Pavements* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420038439>
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261–279. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2012.09.001>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Frantzeskaki, N. (2019). Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. *Environmental Science & Policy*, 93, 101–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.033>
- Gál, T., Lindberg, F., & Unger, J. (2009). Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate.

- Theoretical and Applied Climatology*, 95(1–2), 111–123. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0362-9>
- Gayer, J., & Ligetvári, F. (2007). Települési vízgazdálkodás, csapadékvíz-elhelyezés. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium.
- Georgia Department of Community Affairs. (2009). Georgia Rainwater Harvesting Guidelines Retrieved July 4, 2022, from <https://www.dca.ga.gov/node/3643>
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development. *HortScience*, 41(5), 1276–1285. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1276>
- Gilbert, J. K., & Clausen, J. C. (2006). Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut. *Water Research*, 40(4), 826–832. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2005.12.006>
- Gill, S., Handley, J., Ennos, A., & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Gulyás, Á., & Kiss, M. (2012). Economic value of trees from the point of view of urban climate - case study from Szeged (Hungary). In *8th International Conference on Urban Climates and 10th Symposium on the Urban Environment (ICUC8): Book of Abstracts*.
- Haase, D. (2015). Reflections about blue ecosystem services in cities. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 5, 77–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.02.003>
- Haidu, I., & Ivan, K. (2016). The assessment of the impact induced by the increase of impervious areas on surface runoff. Case study the city of CLUJ-NAPOCA, Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 11(2), 331–337.
- Hamouz, V., & Muthanna, T. M. (2019). Hydrological modelling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model. *Journal of Environmental Management*, 249, 109350. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.109350>
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623–642. <https://doi.org/10.1002/JOC.3711>
- Herrera Environmental Consultants. (2008). *The effects of trees on stormwater runoff*. Herrera Environmental Consultants, Inc., Seattle
- Herrera-Gomez, S. S., Quevedo-Nolasco, A., & Pérez-Urrestarazu, L. (2017). The role of green roofs in climate change mitigation. A case study in Seville (Spain). *Building and Environment*, 123, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.036>
- Hirabayashi, S. (2013). *i-Tree Streets/Design/Eco Rainfall Interception Model Comparisons*. [https://www.itreetools.org/documents/63/iTree\\_Streets\\_Design\\_Eco\\_Rainfall\\_Interception\\_Model\\_Comparisons.pdf](https://www.itreetools.org/documents/63/iTree_Streets_Design_Eco_Rainfall_Interception_Model_Comparisons.pdf)
- Hirabayashi, S., & Endreny, T. A. (2016). *Surface and Upper Weather Pre-processor for i-Tree Eco and Hydro*. [https://www.itreetools.org/documents/52/Surface\\_weather\\_and\\_upper\\_air\\_preprocessor\\_description.pdf](https://www.itreetools.org/documents/52/Surface_weather_and_upper_air_preprocessor_description.pdf)
- Hoban, A. & Wong, T. H. F. (2006). WSUD resilience to Climate Change. 1st International Hydropolis Conference, Perth WA
- Holder, C. D., & Gibbes, C. (2017). Influence of leaf and canopy characteristics on rainfall interception and urban hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 62(2), 182–190. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1217414>
- Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., & Willems, P. (2020). Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity–duration–frequency curves over Europe. *Journal of Hydrology*, 590. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125249>
- Hoyk, E. (2021a). A csapadékvíz kezelés jelentősége a városi klímaadaptációban Kecskemét példáján. *GRADUS*, 8(1), 1–5. <http://doi.org/10.47833/2021.1.AGR.001>

- Hoyk, E. (2021b). Városi zöld-kék infrastruktúra. (E. Hoyk, Ed.). Kecskemét: Neumann János Egyetem Kertészeti és Vidékfejlesztési Kar.
- Huang, C. L., Hsu, N. S., Wei, C. C., & Luo, W. J. (2015). Optimal Spatial Design of Capacity and Quantity of Rainwater Harvesting Systems for Urban Flood Mitigation. *Water* 2015, Vol. 7, Pages 5173-5202, 7(9), 5173–5202. <https://doi.org/10.3390/W7095173>
- Huang, J. Y., Black, T. A., Jassal, R. S., & Lavkulich, L. M. L. (2017). Modelling rainfall interception by urban trees. *Canadian Water Resources Journal*, 42(4), 336–348. <https://doi.org/10.1080/07011784.2017.1375865>
- Iffland, R., Förster, K., Westerholt, D., Pesci, M. H., & Lösken, G. (2021). Robust Vegetation Parameterization for Green Roofs in the EPA Stormwater Management Model (SWMM). *Hydrology* 2021, Vol. 8, Page 12, 8(1), 12. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY8010012>
- Iojă, C. I., Grădinaru, S. R., Onose, D. A., Vânău, G. O., & Tudor, A. C. (2014). The potential of school green areas to improve urban green connectivity and multifunctionality. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 704–713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.07.002>
- Ishimatsu, K., Ito, K., Mitani, Y., Tanaka, Y., Sugahara, T., & Naka, Y. (2016). Use of rain gardens for stormwater management in urban design and planning. *Landscape and Ecological Engineering* 2016 13:1, 13(1), 205–212. <https://doi.org/10.1007/S11355-016-0309-3>
- i-Tree. (2017). i-Tree Hydro User's Manual v5.1. [https://www.itreetools.org/resources/manuals/Hydro\\_Manual\\_v5.1.pdf](https://www.itreetools.org/resources/manuals/Hydro_Manual_v5.1.pdf)
- Jacobson, C. R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1438–1448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.018>
- Jamali, B., Bach, P. M., & Deletic, A. (2020). Rainwater harvesting for urban flood management – An integrated modelling framework. *Water Research*, 171, 115372. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.115372>
- Jaramillo, P., & Nazemi, A. (2018). Assessing urban water security under changing climate: Challenges and ways forward. *Sustainable Cities and Society*, 41, 907–918. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.005>
- Jayasooriya, V. M., & Ng, A. W. M. (2014). Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review. *Water, Air, & Soil Pollution* 2014 225:8, 225(8), 1–20. <https://doi.org/10.1007/S11270-014-2055-1>
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8866-2>
- Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China’s challenges and “sponge cities” strategy. *Environmental Science & Policy*, 80, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.016>
- Johnstone, P., Adamowicz, R., Haan, F. J. De, Ferguson, B. C., & Wong, T. (2012). Liveability and the water sensitive city. *Science-Policy Partnership for Water Sensitive Cities*, August, 68.
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Pauleit, S., Naumann, S., Davis, M., Artmann, M., Haase, D., Knapp, S., Korn, H., Stadler, J., Zaunberger, K., & Bonn, A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 21(2). <https://doi.org/10.5751/ES-08373-210239>
- Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (Eds.). (2017). *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas—Linkages Between Science, Policy and Practice*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_1)

- Karim, M. R., Sadman Sakib, B. M., Sakib, S. S., & Imteaz, M. A. (2021). Rainwater harvesting potentials in commercial buildings in dhaka: Reliability and economic analysis. *Hydrology*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010009>
- Kaspersen, P. S., Ravn, N. H., Arnbjerg-Nielsen, K., Madsen, H., & Drews, M. (2017). Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 21, 4131–4147. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4131-2017>
- Kirnbauer, M. C., Baetz, B. W., & Kenney, W. A. (2013). Estimating the stormwater attenuation benefits derived from planting four monoculture species of deciduous trees on vacant and underutilized urban land parcels. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12(3), 401–407. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2013.03.003>
- Kjeldsen, T. R., Miller, J. D., & Packman, J. C. (2013). Modelling design flood hydrographs in catchments with mixed urban and rural land cover. *Hydrology Research*, 44(6), 1040–1057. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.158>
- Kolcsár, R. A., & Szilassi, P. (2018). Assessing accessibility of urban green spaces based on isochrone maps and street resolution population data through the example of Zalaegerszeg, Hungary. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 13(1), 31–36. <https://doi.org/10.26471/cjees/2018/013/003>
- Kolcsár, R. A., Csikós, N., & Szilassi, P. (2021). Testing the limitations of buffer zones and Urban atlas population data in urban green space provision analyses through the case study of Szeged, Hungary. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126942. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126942>
- Kollányi, L., Máté, K., Mezősné Szilágyi, K., Báthoryné Nagy, I. R., Ádám, Sz., Árgay, Z., Csósz, M., Géczi, O., Kincses, K., Pádárné Török, É., Konkoly-Gyuró, É. Török K., Csecserits A. & Szitár, K. (2017a). Zöldinfrastruktúra-hálózat fejlesztése: A zöldinfrastruktúra szempontjából releváns intézményi és jogszabályi környezet áttekintése, 118 p., Földművelésügyi Minisztérium
- Kollányi, L., Máté, K., Mezősné Szilágyi, K., Báthoryné Nagy, I. R., Török K., Csecserits A. & Szitár, K. (2017b). Zöldinfrastruktúra-hálózat fejlesztése: A zöldinfrastruktúra-hálózat felmérésével és fejlesztésével kapcsolatos hazai és nemzetközi tapasztalatok, jó gyakorlatok feldolgozása, adatigények meghatározása, 158 p., Földművelésügyi Minisztérium
- Köster, S. (2021). How the Sponge City becomes a supplementary water supply infrastructure. *Water-Energy Nexus*, 4, 35–40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.02.002>
- Kuehler, E., Hathaway, J., & Tirpak, A. (2017). Quantifying the benefits of urban forest systems as a component of the green infrastructure stormwater treatment network. *Ecohydrology*, 10(3), 1–10. <https://doi.org/10.1002/eco.1813>
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 59(1), 2014. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Lancia, M., Zheng, C., He, X., Lerner, D. N., Andrews, C., & Tian, Y. (2020). Hydrogeological constraints and opportunities for “Sponge City” development: Shenzhen, southern China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100679. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100679>
- Lechner Tudásközpont. (2015) (korábban Földmérési és Távérzékelési Intézet). Budapest.
- Leong, J. Y. C., Chong, M. N., Poh, P. E., Vieritz, A., Talei, A., & Chow, M. F. (2018). Quantification of mains water savings from decentralised rainwater, greywater, and hybrid rainwater-greywater systems in tropical climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 176, 946–958. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.020>

- Li, Z., Xu, S., & Yao, L. (2018). A systematic literature mining of Sponge city: Trends, foci and challenges standing ahead. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su10041182>
- Liaw, C.-H., & Chiang, Y.-C. (2014). Framework for Assessing the Rainwater Harvesting Potential of Residential Buildings at a National Level as an Alternative Water Resource for Domestic Water Supply in Taiwan. *Water*, *6*(10), 3224–3246. <https://doi.org/10.3390/w6103224>
- Liu, W., Chen, W., & Peng, C. (2015). Influences of setting sizes and combination of green infrastructures on community's stormwater runoff reduction. *Ecological Modelling*, *318*, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.11.007>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, *45*(1), 119–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Lu, W., & Qin, X. (2019). Integrated framework for assessing climate change impact on extreme rainfall and the urban drainage system. *Hydrology Research*, *51*(1), 77–89. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.233>
- Maes, J., & Jacobs, S. (2017). Nature-Based Solutions for Europe's Sustainable Development. *Conservation Letters*, *10*(1), 121–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/conl.12216>
- Mak, C., Scholz, M., & James, P. (2017). Sustainable drainage system site assessment method using urban ecosystem services. *Urban Ecosystems*, *20*(2), 293–307. <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0593-6>
- Master Plumbers and Mechanical Services Association of Australia. (2008). Rainwater Tank Design and Installation Handbook. Australian Government National Water Commission
- McDonald, A. G., Bealey, W. J., Fowler, D., Dragosits, U., Skiba, U., Smith, R. I., Donovan, R. G., Brett, H. E., Hewitt, C. N., & Nemitz, E. (2007). Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations. *Atmospheric Environment*, *41*(38), 8455–8467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.025>
- Medl, A., Stangl, R., & Florineth, F. (2017). Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, *125*, 227–239. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2017.08.054>
- Mejía, A. I., & Moglen, G. E. (2010). Impact of the spatial distribution of imperviousness on the hydrologic response of an urbanizing basin. *Hydrological Processes*, *24*(23), 3359–3373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.7755>
- Melbourne Water. (2005). *WSUD engineering procedures stormwater*. Melbourne: CSIRO Publishing
- Mezősi, G. (2011). *Magyarország természetföldrajza*. Akadémiai Kiadó.
- Mezősi, G., Blanka, V., Ladányi, Z., Bata, T., Urdea, P., Frank, A., & Meyer, B. C. (2016). Expected mid-and long-term changes in drought hazard for the south-eastern Carpathian basin. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, *11*(2), 355–366.
- Móricz, N., Gálos, B., & Gribovszki, Z. (2009). Az erdők intercepciójának mérési és modellezési lehetőségei. *Hidrológiai Közlöny* *89*(4), 35–45
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E., Krauze, K., Külvik, M., Rey, F., van Dijk, J., Vistad, O. I., Wilkinson, M. E., & Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of The Total Environment*, *579*, 1215–1227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>
- Niță, M. R., & Ioja, C. I. (2020). Environmental conflicts in the context of the challenging urban nature. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, *15*(2), 471–479. <https://doi.org/10.26471/CJEES/2020/015/146>



- Nouri, H., Beecham, S., Kazemi, F., & Hassanli, A. M. (2013). A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. *Urban Water Journal*, 10(4), 247–259. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.726360>
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4(3–4), 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>
- Nowak, David J, Maco, Scott, Binkley, & Mike. (2018). i-Tree: Global tools to assess tree benefits and risks to improve forest management. *Arboricultural Consultant*. 51(4): 10-13., 51(4), 10–13. [https://www.itreetools.org/resources/intl\\_overview.php](https://www.itreetools.org/resources/intl_overview.php).
- Nytch, C. J., Meléndez-Ackerman, E. J., Pérez, M. E., & Ortiz-Zayas, J. R. (2019). Rainfall interception by six urban trees in San Juan, Puerto Rico. *Urban Ecosystems*, 22(1), 103–115. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0768-4>
- Palla, A., & Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, 361–368. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>
- Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Bezes, A. (2015). Flash flood occurrence and relation to the rainfall hazard in a highly urbanized area. *Hazards Earth Syst. Sci*, 15, 1859–1871. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1859-2015>
- Pataky, R. (szerk.) (2016). Zöldhomlokzatok: Függőleges zöldfelületek tervezésének, kivitelezésének műszaki és kertészeti útmutatója. *Zöldinfrastruktúra füzetek 2.*, Budapest Főváros Városépítési Tervező Kft., Budapest
- Péczy, Gy. (2009). *Éghajlattan*. Nemzeti Tankönyvkiadó.
- Petrucci, G., Deroubaix, J. F., de Gouvello, B., Deutsch, J. C., Bompard, P., & Tassin, B. (2012). Rainwater harvesting to control stormwater runoff in suburban areas. An experimental case-study. [Http://Dx.Doi.Org/10.1080/1573062X.2011.633610](http://Dx.Doi.Org/10.1080/1573062X.2011.633610), 9(1), 45–55. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2011.633610>
- Prince George's County. (2002). 'The Bioretention Manual', Prince George's County (MD) Government, Department of Environmental Protection. Watershed Protection Branch, Landover, MD
- Prudencio, L., & Null, S. (2018). Stormwater management and ecosystem services: a review. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa81a>
- Qi, Y., Chan, F. K. S., Thorne, C., O'donnell, E., Quagliolo, C., Comino, E., Pezzoli, A., Li, L., Griffiths, J., Sang, Y., & Feng, M. (2020). Addressing Challenges of Urban Water Management in Chinese Sponge Cities via Nature-Based Solutions. *Water* 2020, Vol. 12, Page 2788, 12(10), 2788. <https://doi.org/10.3390/W12102788>
- Raymond, C. M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., Nita, M. R., Geneletti, D., & Calfapietra, C. (2017). A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 77, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008>
- Raymond, C., Breil, M., Nita, M., Kabisch, N., de Bel, M., Enzi, V., Frantzeskaki, N., Geneletti, G., Lovinger, L., Cardinaletti, M., Basnou, C., Monteiro, A., Robrecht, H., Sgrigna, G., Muhari, L., Calfapietra, C., & Berry, P. (2019). 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 and Hydrology.
- Razak, M. A. W. A., Othman, N., & Nazir, N. N. M. (2016). Connecting People with Nature: Urban Park and Human Well-being. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 222, 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.138>
- Revitt, D. M., Ellis, J. B., & Lundy, L. (2017). Assessing the impact of swales on receiving water quality. [Http://Dx.Doi.Org/10.1080/1573062X.2017.1279187](http://Dx.Doi.Org/10.1080/1573062X.2017.1279187), 14(8), 839–845. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1279187>

- Rodriguez, F., Andrieu, H., & Morena, F. (2008). A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*, 351(3), 268–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.007>
- Romnée, A., Evrard, A., & Trachte, S. (2015). Methodology for a stormwater sensitive urban watershed design. *Journal of Hydrology*, 530, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.054>
- Rossman, L. & Huber, W. (2016a) Storm Water Management Model Reference Manual Volume I, Hydrology. US EPA Office of Research and Development, Washington DC
- Rossman, L. & Huber, W. (2016b) Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality. US EPA Office of Research and Development, Washington DC
- Rossman, L. (2015) Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1 - manual. US EPA Office of Research and Development, Washington DC
- Rötzer, T., & Chmielewski, F.-M. (2001). Phenological maps of Europe. *Climate Research*, 18(3), 249–257.
- Sábitz, J., Pongrácz, R., & Bartholy, J. (2014). Estimated changes of drought tendency in the Carpathian Basin. *Hungarian Geographical Bulletin*, 63(4), 365–378. <https://doi.org/10.15201/HUNGEOBULL.63.4.1>
- Salvadore, E., Bronders, J., & Batelaan, O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, 529, 62–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.028>
- Samouei, S., & Özger, M. (2020). Evaluating the performance of low impact development practices in urban runoff mitigation through distributed and combined implementation. *Journal of Hydroinformatics*, 22(6), 1506–1520. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.054>
- Sayl, K., Adham, A., & Ritsema, C. J. (2020). A GIS-Based Multicriteria Analysis in Modeling Optimum Sites for Rainwater Harvesting. *Hydrology 2020*, Vol. 7, Page 51, 7(3), 51. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY7030051>
- Schmitt, T. G., Thomas, M., & Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 299(3), 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.012>
- Seto, K. C., Sánchez-Rodríguez, R., & Fragkias, M. (2010). The New Geography of Contemporary Urbanization and the Environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 35(1), 167–194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125336>
- Shishegar, N. (2013). Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons. *Journal of Clean Energy Technologies*, 52–56. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2013.V1.13>
- Shuster, W. D., Bonta, J., Thurston, H., Warnemuende, E., & Smith, D. R. (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, 2(4), 263–275. <https://doi.org/10.1080/15730620500386529>
- Shuttleworth, W. J. (1993). Evaporation. In *Handbook of hydrology*. Ed.: Maidment, D.R., New York, NY, McGraw Hill, 4.1–4.53
- Song, P., Guo, J., Xu, E., Mayer, A. L., Liu, C., Huang, J., Tian, G., & Kim, G. (2020). Hydrological Effects of Urban Green Space on Stormwater Runoff Reduction in Luohe, China. *Sustainability 2020*, Vol. 12, Page 6599, 12(16), 6599. <https://doi.org/10.3390/SU12166599>
- Staelens, J., de Schrijver, A., Verheyen, K., & Verhoest, N. E. C. (2008). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22(1), 33–45. <https://doi.org/10.1002/HYP.6610>
- Steffen, J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., & Burian, S. J. (2013). Water Supply and Stormwater Management Benefits of Residential Rainwater Harvesting in U.S. Cities. *JAWRA Journal*

- of the American Water Resources Association, 49(4), 810–824. <https://doi.org/10.1111/JAWR.12038>
- Stelczer, K. (2000). A vízkészletváltozás hidrológiai alapjai. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest. ISBN: 963 463 249 1
- Szabó, B., Vincze, E., & Czúcz, B. (2016). Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary. *International Journal of Biometeorology* 2016 60:9, 60(9), 1347–1356. <https://doi.org/10.1007/S00484-015-1128-1>
- Tabari, H., Moghtaderi Asr, N., & Willems, P. (2021). Developing a framework for attribution analysis of urban pluvial flooding to human-induced climate impacts. *Journal of Hydrology*, 598. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126352>
- Taggart, T.P., Endreny, T. A., & Nowak, D. (2014). Modeling the effect of urban infrastructure on hydrologic processes within i-Tree Hydro, a statistically and spatially distributed model. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2014*, PA13B-3911.
- Texas Water Development Board. (2005). The Texas Manual on Rainwater Harvesting. 3rd Edition. Texas Water Development Board. Austin, TX.
- Thorndahl, S., Johansen, C., & Schaarup-Jensen, K. (2006). Assessment of runoff contributing catchment areas in rainfall runoff modelling. *Water Science and Technology*, 54(6–7), 49–56. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.621>
- Torres, M. N., Fontecha, J. E., Zhu, Z., Walteros, J. L., & Rodríguez, J. P. (2020). A participatory approach based on stochastic optimization for the spatial allocation of Sustainable Urban Drainage Systems for rainwater harvesting. *Environmental Modelling & Software*, 123, 104532. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104532>
- Unger, J., & Gál, T. (2017). Városklíma: Szeged városklimatológiai vonatkozásai. *GeoLitera*, 256 p.
- Unger, J.; Lelovics, E. Gál, T., & Mucsi, L. (2014a). A városi hősziget fogalom finomítása a lokális klímazónák koncepciójának felhasználásával – példák Szegedről. *Földrajzi Közlemények*, 138 (1). pp. 50-63
- Unger, J., Lelovics, E., & Gál, T. (2014b). Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geographical Bulletin*, 63(1), 29–41. <https://doi.org/10.15201/HUNGEOBULL.63.1.3>
- Unger, J., Skarbit, N., Kovács, A., & Gál, T. (2020). Comparison of regional and urban outdoor thermal stress conditions in heatwave and normal summer periods: A case study. *Urban Climate*, 32. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2020.100619>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations
- United Nations, Environment Programme (2009). *Rainwater harvesting: a lifeline for human well-being*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/7762>.
- United States Environmental Protection Agency. (2007). *Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID) Strategies and Practices*. Report No. EPA 841-F-07-006. Washington, D.C
- United States Environmental Protection Agency. (2008). *Managing Wet Weather with Green Infrastructure. Action Strategy*. United States Environmental Protection Agency
- Van de Ven, F. H. M. (1990). Water balances of urban areas. *International Association of Hydrological Sciences Publication* 198. 21–32.
- Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Batlles-delaFuente, A., & Fidelibus, M. D. (2019). Rainwater Harvesting for Agricultural Irrigation: An Analysis of Global Research. *Water*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071320>
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740–752. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.119>

- Wang, J., Endreny, T. A., & Nowak, D. J. (2008). Mechanistic Simulation of Tree Effects an Urban Water Balance Model. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(1), 75–85. <https://doi.org/10.1111/J.1752-1688.2007.00139.X>
- Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2012). Performance of a large building rainwater harvesting system. *Water Research*, 46(16), 5127–5134. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2012.06.043>
- Wilby, R. L. (2019). A global hydrology research agenda fit for the 2030s. *Hydrology Research*, 50(6), 1464–1480. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.100>
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual* (Vol. 697). London: Ciria.
- Xiao, Q., & McPherson, E. G. (2002). Rainfall interception by Santa Monica's municipal. *Urban Ecosystems*, 6, 291–302. <https://doi.org/10.1023/B:UECO.0000004828.05143.67>
- Xiao, Q., & McPherson, E. G. (2011). Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosystems*, 14(4), 755–769. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0192-5>
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Simpson, J. R., & Ustin, S. L. (1998). Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*, 24(4), 235–243. <https://doi.org/10.48044/jauf.1998.028>
- Xie, N., Akin, M., & Shi, X. (2019). Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, 210, 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.134>
- Zabidi, H. A., Goh, H. W., Chang, C. K., Chan, N. W., & Zakaria, N. A. (2020). A Review of Roof and Pond Rainwater Harvesting Systems for Water Security: The Design, Performance and Way Forward. In *Water* (Vol. 12, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/w12113163>
- Zagyvainé Kiss, K. A. (2014). Az avar intercepció vizsgálata a Soproni-hegységben. Doktori értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem
- Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 195–231. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)

Internetes források:

- [1] <https://www.melbournewater.com.au/building-and-works/stormwater-management/introduction-wsud> Hozzáférés: 2023. 06. 22.
- [2] US EPA. (2015). Stormwater to Street Trees Engineering Urban Forests for Stormwater Management <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/stormwater2streettrees.pdf> Hozzáférés: 2023. 06. 22.
- [3] City of Melbourne <https://urbanwater.melbourne.vic.gov.au/melbournes-water-story/water-sensitive-urban-design-wsud/> Hozzáférés: 2023. 06. 22.

## 10. Magyar és angol nyelvű összefoglaló

### 10.1. Összefoglaló

Mivel a klímaváltozás kapcsán bekövetkező kedvezőtlen változások mérséklése fontos feladat, ezért szükséges a városi vízgazdálkodásban is felkészülni és a jelenlegi folyamatokat fenntarthatóbbá tenni a növényzet és egyéb zöld- kékinfrastrukturális megoldások segítségével. Doktori kutatásomban a növényzet és a zöldinfrastruktúra városi vízgazdálkodásban betöltött szerepének részletes feltárását végeztem el térinformatikai és modellezési eszközökkel. Emellett a zöld- kékinfrastruktúra részét alkotó csapadékvízgyűjtés városi vízgazdálkodásban és a növényzet öntözésében betöltött szerepét vizsgáltam meg szintén a térinformatika és a hidrológiai modellezés eszköztárát felhasználva. A disszertációban bemutatott vizsgálatokat Szeged belterületén lehatárolt mintaterületeken végeztem, azonban hasonló felépítésű hazai

városokra is kiterjeszhető az általam összeállított módszertan, amennyiben a vizsgálatokhoz használt adatkörök rendelkezésre állnak.

A növényzet vízgazdálkodásra gyakorolt hatását feltáró vizsgálatok kezdeti lépése egy pilot vizsgálat volt, amelyet egy Szeged belvárosában megtalálható mintaterületen végeztem. Ennek során egyrészt megvizsgáltam a használt modell (i-Tree Hydro) alkalmazhatóságát és hazai mintaterületeken használható módszertant dolgoztam ki, illetve többek között scenárió elemzéseket is végeztem a területen. A kutatás ezen részének kiemelendő megállapítása, hogy a növényzet arányának csökkentése vízgazdálkodási szempontból kedvezőtlen folyamatokat indíthat el, mint amilyen a felszíni lefolyás arányának növekedése. Ezzel szemben a növényzet felszínborítási arányának növelése, a lefolyás aránya csökkenésével jár és összeségében vízgazdálkodási szempontból kedvezőbb irányba változnak a hidrológiai folyamatok. A vizsgálat keretében feltártam a csapadékesemények alatt lejátszódó növényzeti interakciókat is. Ennek során megvizsgáltam a lombkorona intercepció, evaporáció és tározási kapacitás változását. A fák lombkoronájának intercepciója nagymértékben függ a csapadékesemények hosszától és a csapadékesemények között eltelt időtől is. A csapadékesemények elején az intercepció felfutása figyelhető meg, egészen addig, míg a lombkorona tározási kapacitása el nem éri a tározási kapacitásának maximumát. Amennyiben két csapadékesemény között hosszabb időszak telik el, abban az esetben a lombkorona ismét képes lehet intercepcióra, amíg a tározási kapacitás maximumát ismét el nem éri. A csapadékesemények alatti folyamatok pontos ismerete fontos információkkal szolgálhat, hiszen ez hozzájárulhat a hidrológiai folyamatok pontosabb megismeréséhez és a terület vízgazdálkodási beavatkozási pontjainak azonosításához is.

A vizsgált városrészek (belvárosi, lakótelepi) eltérő beépítettséggel és épület geometriával jellemezhetőek, amelyek alapvetően befolyásolják a vízgazdálkodási viszonyokat és a lehetséges fejlesztési irányokat. Míg a lakótelepi, nyitottabb beépítettséggel jellemezhető városrészben akár nagyobb léptékű fejlesztések is megvalósíthatók, addig a belvárosi mintaterület esetében a szűkebb, korlátozottabb terek kevésbé teszik lehetővé a zöldinfrastrukturális fejlesztéseket. Az ilyen esetekben a kisebb léptékű fejlesztések (például esőkertek) kialakítása a célravezető. A vizsgált területen a fák lombkoronájának tározási kapacitása szezonális eltéréseket mutat. A lombkorona tározási kapacitásának maximumai a vegetációs periódusra tehetőek, így tavasszal egy kiugrás figyelhető meg az értékekben, míg őszi végén nagyobb csökkenés történik. Ez a két időszak a tavaszi lombfakadás és az őszi lombhullás idejére tehető. Ebből adódóan a városi növényzet fenntartása során arra kell törekedni, hogy a lombkorona minél hosszabb ideig, minél teljesebb formában maradjon meg, hiszen így sokkal hatékonyabban képes ellátni tompító funkcióját.

A doktori kutatásom egyik fontos célja volt annak feltárása, hogy az i-Tree Hydro modell jelenlegi formájában használható-e magyarországi mintaterületeken, illetve használata hozzájárulhat-e a várostervezési folyamatok tudományos támogatására. A Hydro-hoz hasonló hidrológiai modellből kevés olyan áll rendelkezésre, amely a növényzet hatását és folyamatait ilyen részletességgel vizsgálja. A Hydro modell legnagyobb hátránya, hogy széleskörű inputadatbázis szükséges a használatához, amely nem feltétlenül áll rendelkezésre minden településen. További hátrány, hogy a modell alapvetően az Egyesült Államokra lett tervezve inputadatbázisok tekintetében, ahol az adatok modellbe importálása viszonylag könnyen megoldható, azonban más országok adatbázisainak – így a hazai adatbázisok – használta hosszas feldolgozást és természettudományos háttértudást igényel. A modell használatának kezdeti szakaszában (pilot vizsgálat) a modell üzemeltetői által nyújtott segítséggel előállított adatbázist használtam. A lokális léptékű vizsgálatok során azonban már teljes mértékben hazai, saját előállítású adatbázisok alapján végeztem a vizsgálatokat, amely hosszú, kísérletezési fázist jelentett. Azonban az előállítható eredmények ennek ellenére használhatók lehetnek döntéselőkészítési folyamatok támogatásában, hiszen mind a scenárió elemzés, mind a városrészek összehasonlíthatóságának lehetősége hasznos eszköz lehet a várostervezés kezében. Egy-egy városi terület átalakítása során felmerülő zöldfelületi változások vízgazdálkodásra

gyakorolt hatásairól vagy a növényzet csapadékesemények alatti tompító hatásáról is képet kaphatunk a modell használatával.

A csapadékvízgyűjtés városon belüli lehetőségeinek vizsgálatát mikro és lokális léptékben végeztem el. A mikroléptékű vizsgálatok teljes városra kiterjedő vizsgálat megalapozásául szolgáltak, de emellett az adott területek/épületek csapadékvízgyűjtési lehetőségeiről is részletes képet adtak. A mikroléptékű vizsgálatok során a csapadékesemények jellegzetességeinek elemzésére is kitértem, amely során két olyan jellegzetes csapadékesemény típust sikerült lehatárolni, amelyek hatására a gyűjtőrendszerek tervezésénél szükséges felkészülni. Az intenzív csapadékok a hirtelen leérkező nagy vízmennyiség miatt okozhatnak problémát, míg a hosszan elhúzódó esők estében a hosszú időtartam okozhat nehézségeket, amely során a gyűjtőrendszerek telítődhetnek és már nem képesek a lefolyás csúcsok csökkentésében megfelelő szerepet játszani. Ennek a problémakörnek a további vizsgálata szükséges, amely doktori kutatásom egyik továbbfejlesztési iránya lehet. Az eltérő csapadékesemény típusok vizsgálatát érdemes kibővíteni különböző évek meteorológia adatai alapján, mivel szárazabb vagy nagyobb csapadékkal rendelkező évek más jellegzetességgel bírhatnak. A több évre vonatkozó vizsgálatok eredményei alapján már fel lehet állítani olyan összefüggéseket, hogy a csapadékesemények hossza, intenzitása és mennyisége milyen mértékben befolyásolja a csapadékvízgyűjtés hatékonyságát.

A csapadékvízgyűjtés lokális szintű vizsgálatát Szegeden végeztem, a mikroléptékű vizsgálatok tapasztalatait felhasználva. Ennek során új módszertant dolgoztam ki, amelynek alapját egy épület adatbázis alapú hidrológiai modellezés képezte. Az alapot az EPA SWMM modellből származó eredmények képezték, amelyek megadták, hogy a vizsgált időszakban az épületek tetőfelületéről mekkora vízmennyiséget lehetséges összegyűjteni. A kutatás további fázisban ezen épülettetők körül pufferzónákat határoltam le, amelyben NDVI növényzeti index segítségével különböző indikátorokat és mutatókat kidolgozva számítottam ki a növényzet felszínborítási arányát, illetve, hogy mekkora öntözésvízigénnyel rendelkeznek a vizsgált időszakban. E vizsgálatok során feltártam, hogy a különböző zónatávolsággal (10 m, 20 m, 50 m) rendelkező pufferzónák esetében, melyek városrészenként az eltérések, illetve mekkora méretű zónák esetében lehet hatékonyan öntözni a növényzetet. A vizsgálatok során külön választottam – az NDVI index alapján – magasabb ökológiai értékkel rendelkezőnek ítélt vegetációt. A különböző vizsgálatok során a teljes vegetáció alapú indikátorokkal, illetve csak a magasabb minőségű vegetációt alapul vevő indikátorokkal külön-külön is elvégeztem a számításokat. Annak érdekében, hogy a csapadékvízgyűjtő rendszerek a megfelelő területeken legyenek létesítve számos kritériumnak kell megfelelni. Az egyik ilyen kritérium a csapadékvízgyűjtés alapját adó tető és hozzátartozó pufferzóna mérete, illetve növényzeti borítottsága közötti összefüggés. Ezek kapcsolata városrészenként is eltérhet. A belvárosi területeken, ahol a tetők mérete és a hozzájuk kapcsolódó pufferzónák kiterjedése lehetővé teszi a csapadékvízgyűjtést, viszont a zónák növényzeti borítottsága alacsony, így öntözési szempontból nem indokolt a csapadékvízgyűjtés. Az öntözéstől függetlenül viszont a lefolyáscsúcsok csökkentésében ezeken a területeken is szerepet játszhatnak a kiépített gyűjtőrendszerek. Ezzel szemben előfordulhatnak külsőbb városrészekben olyan fordított szituációk is, hogy a tetőkről összegyűjthető csapadékvízmennyiség nem képes fedezni a pufferzónák öntözésvízigényét, mivel a zónák növényzeti borítottsága magas. Ilyen esetekben szükséges lehatárolni növényzetet minőségi kategóriák szerint, amellyel prioritizálható, hogy mely területeket lehetséges öntözni a pufferzónákon belül. A csapadékvízgyűjtés lokális léptékű vizsgálata számos ponton továbbfejleszhető, illetve kiegészíthető. A kutatás jelenlegi verziójában a tetőket és a köréjük vont pufferzónákat egy külön egységként kezeltem, azonban a jövőben megfontolandó lehet az, hogy az egymás melletti zónákat és tetőket közös rendszerként kezeljem. Ehhez a módszertan továbbfejlesztése szükséges, viszont ezáltal elérhetővé válna, hogy a különböző csapadékvízgyűjtő rendszerek egy-egy puffer helyett több pufferzónát lássanak el öntözővízzel, ezáltal pedig a csapadékvíz hatékonyabb elosztása is lehetővé válna a zónák között. Így olyan eseteket is lehetne modellezni, amelyekben egy-egy

városrész vagy utca rendszerei egymással összekapcsolódva működhetnek a magasabb fokú hatékonyság végett. Az NDVI növényzeti index segítségével könnyen előállítható a pufferzónák növényborításáról képet adó információ, azonban a pontosabb öntözővízigény meghatározáshoz a szegmens alapú osztályozás módszerét is be lehet építeni a folyamatba. Ezáltal nem csak azzal lehetne számolni, hogy milyen minőségben és arányban van jelen a növényzet a pufferzónában, hanem annak típusáról és térbeli eloszlásáról is képet lehetne kapni. A doktori disszertációmban az alábbi kutatási kérdéseket válaszoltam meg:

#### **A növényzeti felszínborítás és a városi vízháztartás mélyreható elemzése:**

- **A növényzet csapadékkal kapcsolatos interakcióinak mik a jellegzetességei a vizsgált területeken? A városi növényzet fenntartható vízgazdálkodásban betöltött szerepét alátámasztják-e a vizsgálatok?**

A városi növényzet szerepét a fenntartható vízgazdálkodásban alátámasztják a vizsgálatok, amely leginkább a felszíni lefolyás csökkentés mutatkozik meg. Ez mind a scenárió vizsgálatban, mind a két eltérő felszínborítású városrész összehasonlítása során megállapítható. A scenárió vizsgálat során, amikor a növényzet arányának növelésére került sor a felszíni lefolyás mértéke csökkent, a két városrész összehasonlítása során pedig abban a városrészben volt alacsonyabb a felszíni lefolyás aránya, amelyben a növényzet aránya magasabb volt. A növényzet arányának növelése során a lombkorona áthullása és az áteresztő felszínek lefolyása is nő, azonban ez a vízgazdálkodás szempontjából nem jelent kedvezőtlen irányt, mivel a kompenzáló folyamatok is növekednek, mint az intercepció és az infiltráció, így összeségében a vízháztartás szempontjából a folyamatok kedvező mértékben módosulnak.

- **A növényzet felszínborítási arányának megváltoztatása milyen irányba (kedvező, kedvezőtlen) mozdítja el a városi területek hidrológiai folyamatait a vizsgált mintaterületek alapján?**

A minterületi vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a növényzet felszínborítási arányának megváltoztatása jelentős mértékű változásokat okozhat a városi területek hidrológiai folyamataiban. A növényzet felszínborítási arányának növelése a városi vízgazdálkodás szempontjából kedvező irányba mozdíthatja el a hidrológiai folyamatokat, hiszen a tompító folyamatok, mint az intercepció és az evaporáció mértéke is megnő. Ezzel szemben a növényzet arányának csökkentése a felszíni lefolyás mértékének növekedésével jár, amely a vízgazdálkodás szempontjából kedvezőtlennek tekinthető.

- **Mennyire határozza meg a hidrológiai folyamatokat és városi vízgazdálkodás továbbfejlesztését az adott mintaterület felszínborítása és meglévő épület, úthálózati struktúrája?**

A különböző felépítésű városrészek összehasonlítása során olyan eredmények születtek, amelyek azt támasztják alá, hogy a külsőbb nyitottabb beépítettséggel rendelkező városrész, hidrológiai folyamatai kedvezőbbek a városi vízgazdálkodás szempontjából. Ez annak is köszönhető, hogy az épületek közötti területek, nyitottabbak és a zöld felületek aránya is nagyobb. Ezekben a területeken nagyobb mértékű zöldinfrastrukturális fejlesztéseket lehet megvalósítani, mint a szűkebb terekkel és utcákkal rendelkező belvárosi területen, ahol csak kisebb mértékű módosítások alkalmazhatók az épület és utcahálózat miatt.

- **Az i-Tree Hydro modell alkalmas-e hazai mintaterületeken történő vizsgálatokra?**

Az i-Tree Hydro alkalmas lehet hazai területeken történő hidrológiai vizsgálatokra, azonban alkalmazását az inputadatok előállításának bonyolultsága akadályozhatja. Ez a jövőben változhat, hiszen a jövőbeni fejlesztések egyszerűbbé tehetik a hazai adatbázisokkal történő munkát, amely nagyban elősegítheti használatát. A modell

eredményei hasznosak lehetnek megalapozó tanulmányok támogatására, így a fenntarthatóbb döntéshozási folyamatok elősegítésére is.

### **A csapadékvízgyűjtési potenciál-elemzés fejlesztése:**

- **Melyek azok a csapadékesemény jellegzetességek, amelyek befolyásolhatják a csapadékvízgyűjtést?**

A csapadékvízgyűjtés során két olyan jellegzetességet fontos kiemelni, amelyek befolyásolhatják a folyamatokat. A rövid idő alatt lehulló, intenzív csapadékok gyorsan telíthetik a gyűjtő rendszereket. Emellett a hosszan elhúzódó, bár kevésbé intenzív csapadékok is befolyásolhatják a gyűjtés folyamatát, hiszen a hosszú időtartam alatt a jelentős mennyiségű csapadék telítheti a gyűjtőtartályokat, amelyek így nem feltétlenül képesek csökkenteni a lefolyási csúcsokat.

- **A növényzet öntözővízigényének meghatározására létrehozhatóak-e olyan egyszerű indikátorok, amelyek könnyen előállíthatók és alkalmasak csapadékvízgyűjtésre kijelölhető területek városon belüli lehatárolására?**

Az általam kidolgozott – módszerek és eredmények fejezetben részletezett indikátorok alkalmasak lehetnek városon belüli csapadékvízgyűjtésre használható területek kijelölésére és ezzel párhuzamosan a növényzet öntözővízigényének meghatározására. Ezek az indikátorok viszonylag kevés inputadattal dolgoznak, ezért előállításuk is egyszerűen megoldható, akár más városok mintaterületein is, amennyiben az alapadatok rendelkezésre állnak.

- **Mely az a pufferzóna-távolság, amelyen belül hatékony a növényzet öntözése összegyűjthető csapadékvízből? Használható-e a pufferzóna alapú módszertan városi környezetben öntözési igény megállapítására?**

A pufferzónák könnyű lehatárolást tesznek lehetővé városi környezetben, illetve nagy területen is automatizálható az előállításuk a csapadékvízgyűjtő felületek körül. A pufferzónákon belül a növényzet lehatárolása szükséges. Amennyiben a növényzet a zónákon belül pontosan lehatárolható, abban az esetben viszonylag pontos adatok állhatnak elő az öntözendő felületek méretéről. A leginkább kedvező pufferzóna méret 10 méter, mivel ezen belül oldható meg leginkább a teljes növényzet öntözése. A 20 méteres zónák esetében kevésbé fedezi az összegyűjtött csapadékvíz az öntözési igényt, míg az 50 méteres zónák esetén szinte elhanyagolható mértékben.

- **Különböző városrészek esetében melyek az eltérések és melyek azok a jellegzetességek, amelyek a városrészek eltérő csapadékvízgyűjtési potenciálját okozzák?**

A csapadékvízgyűjtési potenciál kapcsán a legfontosabb meghatározó tényező az épületek típusa, amely meghatározza a tető kialakítását és méretét. Szegeden a lakótelepeket magába foglaló városrész (D4), illetve a belváros (D1) az, ahol a tetők átlagos mérete nagy, ezáltal a csapadékvízgyűjtési potenciáljuk is magas a területeknek, hiszen a tetőkről nagy mennyiségű víz gyűjthető össze. Ezzel szemben az említett családi házas övezetekben, – amelyek nagyrészt a D3-as és a D2-es városrészekben találhatóak meg – alacsonyabb a csapadékvízgyűjtési potenciál is a kisebb méretű tetők miatt. A D5-ös városrész, amely többnyire az ipari területeket foglalja magába alapvetően nagy tetőfelületekkel rendelkezik, amelyek a nagyobb csapadékvízgyűjtési potenciálhoz járulnak hozzá. Ezek a jellegzetességek megfeleltethetők más hasonló felépítésű városokra is, hiszen a legtöbb nagyobb méretű magyar településen (Kecskemét, Szolnok, Debrecen stb.) megtalálhatóak a fentebb említett városrész típusok (még ha azok területi aránya és városon belüli elhelyezkedése el is tér). Ebből adódóan a következtetések kiterjeszhetőek ezekre a településekre is.



- **Milyen mértékben képes fedezni az összegyűjtött csapadékvíz a növényzet öntözővíz igényét és Szegeden melyek azok a területek, ahol gyűjtőrendszerek kiépítésében érdemes gondolkodni?**

Azoknak a területeknek a kijelölése, ahol gyűjtőrendszerek kiépítését érdemes megfontolni két főbb tényezőn alapul. Az épülettetőkről összegyűjthető víz mennyiségén, illetve az öntözendő növényzet kiterjedésén. Szegeden a pufferzónák növényzeti borítottsága a lakótelepi (D4), és a családi házas övezetekben a legmagasabb (D3 és kisebb részben a D2). E területek közül a D4-es esetében az összegyűjthető csapadékvíz mennyisége is magas, így leginkább ebben a városrészben indokolt a gyűjtőrendszerek kialakítása. A D3 és D2 városrészekben a növényzet aránya szintén magas azonban a megvalósítható öntözővízigények elmaradnak a D4-es területtől mivel az átlagosan kisebb tetőméret miatt kevesebb az összegyűjthető csapadékvíz mennyisége. Azonban a családi házas területeken ennek ellenére is érdemes megfontolni a gyűjtőrendszerek kiépítését hiszen még ha nem is képesek teljes mértékben fedezni a pufferzónák öntözővízigényét abban az esetben is hozzájárulhatnak a fenntarthatóbb öntözéshez, mivel csökkentik a csapvízből vagy talajvízből történő öntözést. A D1-es városrészben, amely a főbb belvárosi területeket foglalja magába Szegeden, az összegyűjthető csapadékvíz mennyisége magas, azonban a növényzet aránya elmarad például a D4-es területétől. Itt nem a növényzet öntözése miatt érdemes csapadékvízgyűjtésben gondolkodni, hanem a lefolyáscsúcsok csökkentése végett, amely az erősen burkolt belvárosban jelentős problémaforrás lehet.

Doktori kutatásomban olyan vizsgálati módszerek használatára és kidolgozására törekedtem, amellyel a hazai fenntartható vízgazdálkodási tervezési folyamatok támogathatóak. Több olyan mintaterületi vizsgálatot végeztem, amely segítségével feltártam a növényzet fenntartható vízgazdálkodásban betöltött szerepét, illetve a csapadékvízgyűjtés és az ebből fedezett öntözés városon belüli jellegzetességeit. A kidolgozott módszertanok lehetőséget biztosítanak más hazai városokban történő vizsgálatokhoz is, a módszertan kiterjesztésének tesztelése a kutatás egyik lehetséges jövőbeli iránya. Bízom benne, hogy a kutatásom eredményeit és módszereit hasznosítani lehet a hazai városi vízgazdálkodás fenntarthatóvá tétele során.

## 10.2. Summary in English

The mitigation of the climate change related negative effects is an important task of urban planning. Therefore, for the sake of sustainability, the integration of green-blue infrastructure-based solutions into the water management is an important task for urban planners. In my doctoral research, I investigated the role of vegetation and green infrastructure in the urban water management using GIS and various modeling tools. In addition, I also examined the role of rainwater harvesting – as a part of the green-blue infrastructure – in the urban water management and its usage in the irrigation of vegetation. The evaluations were carried out in various sites within Szeged study area however, the methodology can also be extended to other Hungarian cities with a similar structure.

As the first step a pilot study was conducted to examine the effect of the vegetation on the water management in Szeged downtown study area. I examined the applicability of the hydrological model (i-Tree Hydro) that was used in my research and compiled a methodology fit for Hungarian study areas. I also carried out scenario analyses in the study area. The highlight of this part of the research is that reducing the proportion of vegetation can trigger unfavorable hydrological processes, such as an increase in the ratio of surface runoff. On the other hand, increasing the ratio of vegetation is associated with a decrease in the surface runoff and overall favorable change in these hydrological processes. As part of the framework of the present study, I also examined the vegetation interactions that take place during precipitation events. I investigated the changes in canopy interception, evaporation and storage capacity as well. Tree

canopy interception is highly dependent on the length of rainfall and the time between rainfall events. At the beginning of the rainfall events, the interception increases until the point where the stored precipitation water reaches the canopy's maximum capacity. If a longer period elapses between two rainfall events, the canopy may be able to intercept again until the maximum storage capacity is reached. Accurate knowledge of the processes during rainfall events can provide important information, as it can contribute to a more accurate understanding of the hydrological processes and the identification of water management intervention points in the study areas.

The examined districts (downtown, housing estates) are characterized by different built-up ratio and building geometry, which fundamentally influence water management conditions and the future directions of urban development. While even larger-scale developments can be realized in the housing estates district – which is characterized by more open spaces – in the case of the downtown study area, the narrower, more limited spaces make larger-scale green infrastructural developments less possible. In such cases, the development of smaller-scale solutions (such as rain gardens) can be more feasible. In the examined areas, the storage capacity of the tree canopy shows seasonal differences. The maximums of the storage capacity can be identified during the vegetation period. A peak in the values can be observed in the spring, while a larger decrease occurs at the end of autumn. These two periods can be referred to as spring foliage and autumn leaf fall. As a result, during the maintenance of urban vegetation, it is necessary to keep the canopy as intact as possible for as long as possible, so it can perform its damping function much more effectively.

One of the goals of my doctoral research was to evaluate whether the i-Tree Hydro model in its current form can be applied in Hungarian study areas, and whether its use can support urban planning. There are only few hydrological models similar to Hydro that are able to evaluate the effects and processes of vegetation in such detail. The biggest disadvantage of the Hydro model is that it requires an extensive input database for its use, which is not necessarily available in all Hungarian cities. Another disadvantage is that the model was designed for the United States, making input data availability in US study areas better compared to European ones. The databases of other countries, such as Hungary require lengthy processing and a natural science background from the user. In the initial phase of using the model (pilot study), I used a database created with the help of the model's operators. During the local-scale studies however, I conducted the examinations entirely on the basis of self-produced, Hungarian databases, which resulted in a long experimental phase. These results can nevertheless be used to support decision making processes, since both the scenario analysis and the comparison of districts can be a useful tool in the urban planning. With this model, we can also get information about the effects of changes in green areas on water management or the dampening effect of vegetation during rainfall events.

I carried out the evaluation of the possibilities of rainwater harvesting within the city on a micro and local scale. The micro-scale studies served as the basis for a city-wide study, but also provided a detailed picture of the rainwater harvesting possibilities of the studied areas/buildings. As part of the micro-scale study, I also classified rainfall events by their characteristics. As a result, I identified two distinctive rainfall event types that due to their hydrological effects, need to be taken into account when designing rainwater harvesting systems. Intense rainfall can cause problems due to the large amount of water that arrives suddenly, while prolonged rains can cause long-term difficulties, which can saturate harvesting systems making them less effective in decreasing the runoff peaks. Further investigation of this topic is necessary, which can be one of the future directions for development of my doctoral research. Expanding future investigations to different rainfall event types based on meteorological data from different years could yield valuable results, drier years and years with high amount of precipitation may have different characteristics. Based on the results of studies covering several years, conclusions can be drawn about how the length, intensity and frequency of rainfall events can affect the efficiency of the rainwater harvesting systems.

Based on the experience of micro-scale investigations, I carried out the local-level investigation of rainwater harvesting in Szeged. I developed a new methodology, which used a hydrological model based on a building database. The basis of the evaluation was the results from the EPA SWMM model, which provided the amount of water that could be collected from the roofs of the buildings. In the next phase of the study, I delineated buffer zones around these buildings, within which I developed different indicators using NDVI to calculate the landcover ratio of the vegetation, as well as how much irrigation water was needed per buffer zone in the examined time period. In the case of each buffer zone sizes (10 m, 20 m and 50 m) I identified the differences between the various districts and calculated the optimal the size of the buffer zone within which the vegetation can be the most effectively irrigated. In addition, based on the NDVI, I also identified the vegetation patches with higher ecological value. I carried out the calculations indicators both based on the entire vegetation and based only on the higher quality vegetation. In order for rainwater harvesting systems to be established in the appropriate areas, several criteria must be met. One of these criteria is the relationship between the rainwater catchment roof and the size of the associated buffer zone as well as its vegetation cover. This relationship may also differ from district to district. In the downtown areas, where the roof sizes and the extent of the connected buffer zones could enable rainwater harvesting, the vegetation covers are low, rendering rainwater harvesting for irrigation unnecessary. Regardless, rainwater harvesting systems still can play a major role in reducing surface runoff peaks in these areas as well. The opposite trend is observed in the outer city districts, where because of the high ratio of vegetation cover, the amount of rainwater that can be collected from the roofs cannot cover the irrigation water demand of the buffer zones. In such cases, it is necessary to delineate prioritized areas of vegetation based on quality for the most optimal utilization of the collected rainwater. My proposed methodology for the local-scale estimation of rainwater harvesting potential has room for future improvement at several points. For instance, in the current version of the research, I treated the roofs and their corresponding buffer zones as separate units. Treating neighboring zones and roofs as a common system should be considered in the future. This improvement would enable different rainwater harvesting systems to supply several buffer zones with irrigation water at once. Therefore, a more efficient distribution of rainwater between these zones would become possible. This way, connections between city districts or streets could be modeled and established for a higher level of irrigation efficiency. With the help of the NDVI, information on the buffer zones' vegetation cover can be easily acquired, but for a more precise estimation on the irrigation water demand, a segment-based classification method could also be integrated into the process. This would not only enable the estimation the quality and proportion of vegetation present within the buffer zone, but would also provide information on its type and spatial distribution.

In my dissertation, I answered the following research questions:

#### **In-depth analysis of vegetation cover and urban water balance:**

- **What are the characteristics of the vegetation-precipitation interactions in the study areas? Do the results support the role of urban vegetation in a sustainable water management?**

My results support the role of urban vegetation in a sustainable water management, which is most noticeable in the reduction of surface runoff. This is confirmed both by the studied scenario and by the comparison of the two districts with different land covers. The scenario, in which the ratio of vegetation was increased, predicted a decrease in surface runoff. The comparison of the two urban districts showed, that the ratio of surface runoff was lower in the district with the higher vegetation coverage. When the ratio of vegetation is increased, the throughfall of the canopy and the runoff of the pervious surfaces also increase. This however, regarding water management isn't necessarily an unfavorable effect, since compensatory processes (such as interception and infiltration) also increase, resulting in overall favorable conditions.

- **In what way (both favorable and unfavorable) can vegetation cover change alter the hydrological processes of urban areas?**

Based on the results, it can be confirmed that changing the vegetation cover ratio can cause significant changes in the hydrological processes of urban areas. Increasing the vegetation cover (thus the dampening processes such as interception and evaporation) can positively influence the hydrological processes from the viewpoint of the urban water management. Conversely, reducing the ratio of vegetation is associated with an increase in surface runoff, which can be considered unfavorable for the water management.

- **To what extent does the land cover, and the existing building and road network structure of the study area determine the hydrological processes as well as the future development of urban water management?**

The comparison of the urban districts with different land cover revealed that the hydrological processes of the urban district with more open areas are preferable by the urban water management. This is partly because the areas between the buildings are generally wider and more open, plus the proportion of green surfaces is also higher. Larger-scale green infrastructure developments can be implemented in these areas compared to the downtown study area characterized by smaller open spaces and narrower streets. In such places only minor modifications can be implemented.

- **Is the i-Tree Hydro model suitable for research in Hungarian study areas?**

I have found that i-Tree Hydro might be suitable for hydrological research in Hungary, but its application could be hindered by the complexity of the input data production. This might change in the future, as developments could potentially make it more compatible with existing Hungarian databases, which would greatly facilitate the modeling procedure. The modeling results can be useful for supporting foundational studies, thus promoting more sustainable decision-making processes.

#### **Improving the analysis of rainwater harvesting potential:**

- **What are those rainfall event characteristics which can affect the rainwater harvesting?**

Based on my results, two characteristics were found that can influence the rainwater harvesting processes. Firstly, intense rainfall in a short time can quickly fill the harvesting systems. Secondly, long-lasting, but at the same time less intense rainfall can also have an effect on the harvesting process. During a long period of time, a significant amount of rainfall can fill the rain barrels, which blocks their ability to reduce runoff peaks.

- **Can simple indicators describe the irrigation water demand of vegetation? Are these indicators easily generated and suitable for delineating areas adequate for rainwater harvesting?**

My proposed indicators can be suitable for delineating urban areas that can be utilized for rainwater harvesting as well as for determining the irrigation water demand of the vegetation. These indicators work with a relatively small set of input data, so they are easily produced, even in other cities, given the basic data are available.

- **What is the optimal buffer zone distance within which the irrigation of vegetation from collected rainwater is most effective? Can the buffer zone-based methodology be used to estimate irrigation demands in urban environment?**

Buffer zones enable easy delineation in urban environments, and their production can be automated even in large areas around rainwater collection surfaces. If vegetation covered areas can be precisely identified within the zones, relatively accurate data can

be obtained on the extent of the surfaces that are needed to be irrigated. The most optimal buffer zone size is 10 meters, since this is the largest buffer size within which the irrigation of the entire vegetation can be solved. In the case of 20-meter zones, the collected rainwater covers less than the irrigation demand, while in the case of the 50-meter zones the amount of vegetation proportion that can be irrigated from the collected rainwater is almost negligible.

**What are those unique characteristics that result in different rainwater harvesting potentials in different urban districts?**

Regarding the rainwater harvesting potential of a district, the most important factor is the type of buildings, which determines the design and the size of the roofs. In Szeged, the district with housing estates and the downtown are the two sites where the average roof size large, resulting in a high rainwater harvesting potential. The rainwater harvesting potential in the family house areas is lower due to the smaller roof sizes. The district, which mostly consists of industrial areas with large roof surfaces, also has greater rainwater harvesting potential. These results can be adapted to the other larger Hungarian cities (e.g., Kecskemét, Szolnok, Debrecen, etc.) as well, which cities although in a different proportion and spatial distribution, also possess the district types identified in the present study.

- **To what degree can the collected rainwater cover the irrigation water demands of the vegetation and what are the areas in Szeged where it is worth considering the installation of rainwater harvesting systems?**


The delineation of the areas where it is worth considering the construction of harvesting systems is based on two major factors. The amount of water that can be collected from the roofs of the building and the extent of the vegetation to be irrigated. In Szeged, the vegetation cover of the buffer zones is the highest in the housing estate and the family house areas. In the housing estate areas, the amount of rainwater that can be collected is also high, making the development of harvesting systems especially justified in this part of the city. In the family house areas, where despite the proportion of vegetation is also high, the feasible irrigation water demands are lower than in the housing estate area, because due to the smaller roof sizes less rainwater can be collected here. In areas with family houses however, it is still worth considering the construction of harvesting systems, since even if they are not able to fully cover the irrigation water demands of the buffer zones, they can contribute to a more sustainable irrigation by reducing irrigation from tap water or groundwater. In the downtown areas of Szeged, the amount of rainwater that can be collected is high, but the proportion of the vegetation is generally the lowest. Here, rainwater harvesting for the purpose of irrigation is unnecessary, but with the aim of the reduction of runoff peaks, a serious environmental challenge in the inner city a considerable proportion of impervious surfaces, rainwater harvesting systems should still be considered.

In my doctoral research, I developed research methods that can be used to support the Hungarian sustainable water management planning processes. I carried out assessments in several study sites within Szeged, which helped to reveal the role of vegetation in the sustainable water management, as well as the characteristics of rainwater harvesting and the vegetation irrigation within the city. The developed methodologies also provide an opportunity for investigations in other Hungarian cities, which is one of the possible future directions of this research. I am confident that the results and methods of my research can be used to make the Hungarian urban water management more sustainable.

## Témavezetői nyilatkozat

Tanúsítom, hogy az értekezésben foglaltak a doktorjelölt önálló munkáján alapulnak, az eredményekhez önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés anyagát szakmai szempontból támogathatónak ítélem meg, elfogadását javaslom.

Szeged, 2023. 07. 05.



.....  
Dr. Gulyás Ágnes  
egyetemi adjunktus