

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

Mozgó csapadékfront hatása a csapadékcsatorna- hálózaton lefutó árhullámokra

Varga Laura

Konzulens:

Dr. Buzás Kálmán

XXXII. OTDK

Budapest

2015.

Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék	3
Táblázatjegyzék.....	5
Összefoglalás.....	6
Abstract	7
1. Bevezetés és célkitűzés	8
2. Irodalmi áttekintés	10
3. Anyag és módszer	17
3.1. Fiktív vízgyűjtő terület és a hozzátartozó csatornahálózat bemutatása	17
3.2. A vízgyűjtő alak szerepének vizsgálatához felhasznált modell bemutatása.....	18
3.3. SWMM 5.0 általános bemutatása	21
3.4. Főbb szimulációs beállítások.....	23
3.5. Magyarországi szél- és csapadékviszonyok	23
3.6. A vizsgálat módszere.....	24
3.6.1 Fiktív vízgyűjtő vizsgálata	24
3.6.2 A vízgyűjtő alak szerepének vizsgálata.....	30
4. Eredmények.....	33
4.1. A fiktív vízgyűjtőn végzett vizsgálat eredményei	33
4.2. A vízgyűjtő alak szerepének vizsgálata	49
4.3. Eredmények összegzése	55
5. Következtetések	57
Irodalomjegyzék.....	59

Ábrajegyzék

1. ábra. Esőztető berendezés sematikus rajza (<i>forrás: [3]</i>)	11
2. ábra. Fúvóka alatti intenzitás eloszlás (<i>forrás: [3]</i>)	12
3. ábra. 4 különböző szélességgel lefelé (a lefolyás irányába) illetve felfelé (a lefolyás irányával ellentétes irányba) mozgó csapadék esetén kialakuló árhullámok (<i>forrás: [3]</i>).....	12
4. ábra. Maximális vízhozamok a csapadék sebessége és mozgási iránya függvényében (<i>forrás: [3]</i>).....	13
5. ábra. Maximális vízhozam és összes lefolyó vízmennyiség hányadosa a csapadék sebessége és mozgásiránya függvényében (<i>forrás: [3]</i>)	14
6. ábra. Vizsgált vízgyűjtő domborzati képe (téglalapon belül – vizsgált vízgyűjtő területe, lila szín – legmagasabb, piros szín - legmélyebb részek).....	17
7. ábra. A vizsgált vízgyűjtő terület és az egyesített rendszerű csatornahálózatának SWMM modellje	18
8. ábra. Vizsgált vízgyűjtő alak – négyzet: N	19
9. ábra. Vizsgált vízgyűjtő alak – téglalap: T1 és T2	19
10. ábra. Vizsgált vízgyűjtő alak – háromszög: H1 és H2	19
11. ábra A vízgyűjtő méret szerepének vizsgálatához felhasznált vízgyűjtő területek	20
12. ábra. Alkalmazott modelleszapadék: 2 éves gyakoriságú, 1 órás időtartamú.....	25
13. ábra. Alkalmazott modelleszapadék: 2 éves gyakoriságú, 3 órás időtartamú.....	25
14. ábra. Alkalmazott modelleszapadék: 4 éves gyakoriságú, 15 perc időtartamú	26
15. ábra. Vizsgálati mozgási tengelyek és irányok értelmezés	27
16. ábra. A csapadék mozgási útvonalainak értelmezése	27
17. ábra. A 0 fokos tengelyhez tartozó területfelosztás (rózsaszín pontok – területek súlypontjai, egymástól ~ 450 m-re).....	28
18. ábra. A 45 fokos tengelyhez tartozó területfelosztás	28
19. ábra. A 90 fokos tengelyhez tartozó területfelosztás	29
20. ábra. Mozgó csapadék szimulálása (CsM = „virtuális” csapadékmérő, v = szélesség és a mozgás iránya, i = intenzitás, t = idő, Δt = csapadék idősorok közötti eltolódás)	30
21. ábra. Vizsgált egyszerűsített vízgyűjtő alakok	31
22. ábra. A vízgyűjtő méret szerepének vizsgálatához felhasznált vízgyűjtő modellek	32
23. ábra. Csapadékmozgás a hálózat fő lefolyási irányával megegyező irányba.....	32
24. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0°, pozitív).....	37
25. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0°, pozitív).....	37

26. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (0° , pozitív) ..	38
27. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0° , negatív)	39
28. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0° , negatív)	39
29. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (0° , negatív) ..	40
30. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45° , pozitív)	41
31. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45° , pozitív)	41
32. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (45° , pozitív)	42
33. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45° , negatív)	43
34. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45° , negatív)	43
35. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (45° , negatív)	44
36. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90° , pozitív)	45
37. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90° , pozitív)	45
38. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (90° , pozitív)	46
39. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90° , negatív)	47
40. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90° , negatív)	47
41. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (90° , negatív)	48
42. ábra Egyszerűsített vízgyűjtő alakok hatásának összehasonlítása	52
43. ábra Mozgó árhullám-csúcs és álló árhullám-csúcs vízhozamának hányadosa a csapadékmozgás sebességének és a vízgyűjtő alakoknak a függvényében	53
44. ábra Mozgó árhullám-csúcs vízhozamának alakulása a csapadékmozgás sebességének és a vízgyűjtő alakoknak a függvényében	54

Táblázatjegyzék

1. táblázat. Mért és szimulált árhullámok csúcsainak összehasonlítása (álló csapadék, domináns széladatok és a csapadék alatt jelentkező szél adatok alkalmazásának esetén) (forrás: [16]).....	15
2. táblázat. Mért és szimulált levonuló árhullámok mennyiséinek összehasonlítása (álló csapadék, domináns szél adatok és a csapadék alatt jelentkező szél adatok alkalmazásának esetén) (forrás: [16])	16
3. táblázat. Az álló és mozgó csapadékok maximális vízhozamainak és azok megjelenési időpontjainak összehasonlítása (0°-os mozgási tengely).....	34
4. táblázat. Az álló és mozgó csapadékok maximális vízhozamainak és azok megjelenési időpontjainak összehasonlítása (45°-os mozgási tengely).....	35
5. táblázat. Az álló és mozgó csapadékok maximális vízhozamainak és azok megjelenési időpontjainak összehasonlítása (90°-os mozgási tengely).....	36
6. táblázat Vizsgált egyszerűsített négyzet és téglalap alakú vízgyűjtők eredményei	50
7. táblázat Vizsgált egyszerűsített egyenlő oldalú háromszög alakú vízgyűjtők eredményei	51

Összefoglalás

A csapadékmozgás jelentős mértékben befolyásol/hat/ja az egyesített rendszerű és a csapadékcatorna hálózatok működését, a levonuló árhullámokat. A tradicionális tervezési módszerekben a csapadék mozgásának figyelmen kívül hagyása csökkent a szimulációs eredmények pontosságát.

A vizsgálat első részét egy fiktív városi vízgyűjtő területen és a hozzá tartozó egyesített rendszerű csatornahálózaton végeztük el. A szimulációkat az SWMM 5.0 szoftverrel, a csapadék események mozgási irányának és sebességének változtatásával hajtottuk végre. Három modelleschapadékokat mozgattunk a vízgyűjtő terület felett három különböző sebességgel, hat különböző irányba. Ennek a módszernek az eredményeit hasonlítottuk össze az álló csapadékkal végzett szimulációk eredményeivel, a hálózat kifolyási pont előtti csatornaszakaszán. Megállapítható, hogy a csapadékmozgás a választott vízgyűjtőn, illetve annak csatornahálózatában jelentős hatást gyakorol a csatornahálózatban levonuló árhullámokra. A mozgás irányától függően az álló csapadékhoz képest nagyobb, illetve kisebb maximális vízhozamok jöttek létre. Kimutatható, hogy a front mozgási pályái közül a végponti árhullám-csúcsra a hálózat fő lefolyási tengelyével párhuzamos pályán mozgó csapadéknak van a legnagyobb hatása. A hatás növekszik a csapadék időtartamának és a front mozgási sebességének csökkenésével, illetve az intenzitás növekedésével. Ha pedig az ilyen pályán a front mozgási sebessége harmonizál a hálózati lefolyás átlagos sebességével, az árhullám-csúcs megváltozásának szélső értékeihez jutunk. A hálózati lefolyás és a csapadékmozgás irányának azonossága esetén a legnagyobb növekedés, míg az ellentétes iránynál a legnagyobb csökkenés állt elő. Továbbá feltételeztük, hogy a hatások számszerű mértékében a vízgyűjtő méretének és alakjának is szerepe lehet. Ezért a vizsgálat második részében azonos területű és egyéb paraméterű, de különböző, egyszerűsített alakokkal rendelkező vízgyűjtőkön végeztünk vizsgálatokat. Vízgyűjtő alakonként hasonló, de nagyságrendjében eltérő jelenségeket figyeltünk meg.

Megállapítható tehát, hogy a hagyományos tervezési módszerekben a csapadékmozgás folyamatának figyelmen kívül hagyása az *árhullám-csúcsok alul-, illetve felülbecsléshez* vezethet, amely a csatornahálózatokban kapacitásproblémákat okozhat. Felléphetnek olyan csapadék események, amelyek előidézhetik a csatornahálózat túlterhelését, kiöntését. Az anyagi károkon túl egyesített rendszerű hálózatok esetén a szennyvíz kiömlése egészségügyi gondok forrása is lehet.

Abstract

The movement of cloud mass has/can have a great impact on functioning of combined and storm sewage networks. Most design methods assume that the time of the occurrence of precipitation is the same in all subbasins. However, ignoring storm movement decreases the accuracy of simulation results.

The effect of storm movement was studied at a fictitious urban catchment and in its combined sewer system. Using SWMM 5.0 software, simulations were made by varying the direction and speed of rainfall events. Three model storms were moved above the watershed with three different velocities in six directions. The results of this method, using wind data, were compared with the findings related to stationary storms. Storm movement had an essential effect on hydrographs emerging in the combined sewerage network. Moving rainfalls induced higher and lower peak discharges than stationary storms, depending on wind direction. Highest peak discharges occurred when the storm was moving over the catchment in the same same direction as the main flow direction on the catchment and in the combined sewer system. When the wind direction was the same as before mentioned and the moving speed also harmonised with system's mean-flow velocity, resulted the highest changes of peak discharges. The biggest increase was observed when the system's and storm's direction of movement were the same, and the biggest decrease when they were reverse. The effect of the direction and speed of wind on runoff volume was negligible. In addition, it was assumed that in the numerical extent of the impacts catchment size and shape may also play a role. Therefore, in the second part of the study, catchments with same area and with other parameters, but with different and simplified shapes were investigated. As for the shape the same phenomena yet different extent was observed on all catchments.

Results showed that traditional design methods ignoring storm movement can lead to *over- and under-estimation of peak discharges*, which can cause capacity problems in sewage networks. Storm events can occur which overload and flood the sewer system. Apart from causing property damages combined sewer systems waste water flooding may also become a source of health problems.

1. Bevezetés és célkitűzés

Napjainkra időszerű feladattá vált az egyesített rendszerű és a csapadékvíz elvezető csatornák felülvizsgálata. A változó éghajlati körülmények és a tény, hogy sok hálózatot régen, akár több mint 100 éve terveztek és építettek meg, indokolja a rendszerek felújítását, továbbá a hagyományos tervezési módszerek újragondolását. A csapadékcatornák tervezése és rekonstrukciója során figyelembe kell vennünk számos tényezőt, melyek befolyásolják a kielégítő működést.

Az egyik ilyen a városiasodás következtében egyre növekvő beépített területek aránya. A burkolt felületek növekvő kiterjedésének hatására kisebbé vált a zöld felületek aránya, vagyis a beszivárgás lehetősége, és így növekszik a csapadékcatornákat terhelő lefolyás mértéke.

Ezen felül nem hanyagolható el a megváltozott időjárási viszonyok figyelembe vétele sem. A klímaváltozás hatására átalakult csapadékvízviszonyok következtében a rövidebb időtartamú, nagyobb intenzitású és kedvezőtlenebb intenzitás-eloszlású csapadékok gyakorisága növekszik, és ezek hatására nő az elvezetendő csapadék aránya, illetve mennyisége [1].

A csatornatervezési metódusok felülvizsgálata számos ok miatt szükséges lenne. Sokszor előfordul, hogy a szakszerűen megtervezett vízelvezető rendszerek nem bírják a terhelést és kiöntenek. Ez a jelentős pénzügyi károk mellett egyesített rendszerű csatornák esetén egészségügyi veszélyekkel is járhat. Ezért fontos, hogy a tervezés során minél pontosabb, a valóságot minél inkább közelítő adatokkal dolgozzunk.

A jelenlegi tervezési módszerek azt feltételezik, hogy egy adott vízgyűjtő minden pontjára egyszerre azonos mennyiségű vízterhelés érkezik, tehát hogy a csapadék áll a terület felett. Azonban ez a valós folyamatok nagymértékű egyszerűsítése. A felszíni lefolyást nagyban befolyásolják a csapadék jellemző vonásai, a térben való változékonysága és a csapadék mozgása [2], továbbá ritkán fordul elő, hogy egy adott vízgyűjtő összes részvízgyűjtő területén azonos időpontban jelentkezik az esőzés [16]. A csapadékmovement hatásának figyelmen kívül hagyása a csatornahálózaton levonuló árhullám-csúcsok alul-, illetve felülbecsléséhez vezethet. E tanulmány keretében fő célkitűzésünk a mozgó csapadékfrontnak a csatornahálózaton levonuló árhullámokra gyakorolt hatásának vizsgálata volt.

Először egy fiktív vízgyűjtő terület felett különböző sebességekkel és eltérő irányokba mozgatott modellcsapadékok által generált árhullámokat tanulmányoztunk a hálózat kifolyási pontja előtti csatornaszakaszán. Ezeket hasonlítottuk össze az álló csapadékokból keletkező árhullámokkal, és az eltérésekből következtettünk arra, hogy a csapadék időtartama és gyakorisága, a csapadékmovement sebessége és iránya milyen mértékben befolyásolja a lefolyást,

illetve hogy a hagyományos tervezési módszerek mennyire pontatlan eredményt adhatnak. Mivel egy vízgyűjtő és a hozzátartozó csatornahálózat igen komplex rendszert alkotnak, ezért ahhoz, hogy a csapadékmozgás hatását jobban megismerjük számos egyéb tényezőt is figyelembe kell vennünk a vizsgálatok során. A tanulmány második részében ezért a vízgyűjtő terület alakjának és méretének szerepét elemeztük a kialakuló árhullámok tekintetében.

2. Irodalmi áttekintés

Ebben a részben ismertetünk néhány olyan nemzetközi tanulmányt, amely a csapadékmozgás lefolyásra gyakorolt hatásaival foglalkozik.

A mozgó csapadékok problémakörét, azaz hogy milyen mértékben befolyásolják a felszíni lefolyást (az árhullám alakját és a kialakuló csúcsot), már jóval korábban felismerték és vizsgálták [2, 5, 8, 17]. A csapadékmozgás jelenségének figyelmen kívül hagyása az árhullám-csúcsok alul-, illetve felülbecsléséhez vezethet [2, 5, 8, 17].

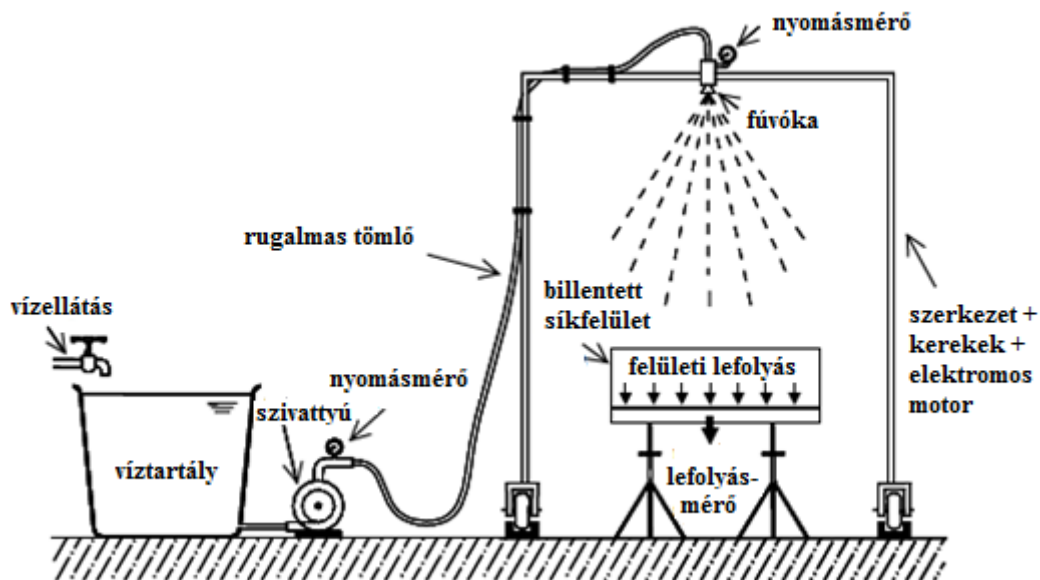
De Lima és Singh (2002) a különböző csapadékintenzitás eloszlás típusoknak a terepi lefolyásra gyakorolt hatását tanulmányozták [2]. Egy síkfelületen különböző sebességekkel lefelé (lefolyás irányába) és felfelé (lefolyás irányával ellentétes irányba) mozgó csapadékot vettek alapul. A vizsgálatot a kinematikus hullámegyenlet megoldásával hajtották végre, a csapadékmozgás irányának (hosszirányú tengelyen fel vagy le mozgott), sebességének (0,5-5 m/s), hosszának (rövidebb, egyenlő vagy hosszabb, mint a lejtő hossza) és az intenzitás eloszlások változtatásával. Az egyszerűsítés kedvéért számos feltételezéssel éltek, ezek közül néhány: a lefolyás egydimenziós; a felület vízzáró; a hidrosztatikus nyomáseloszlás érvényes minden mélységben; a felületi feszültség erői elhanyagolhatók és a lejtő szöge kicsi.

Mivel a tanulmányban a különböző csapadékintenzitás eloszlások hatásaira koncentráltak, ezért a felület geometriáját a lehető legegyszerűbbre vették fel. Így az idealizált vízgyűjtő vízzáró, síkfelületű és téglalap alakú, továbbá 100 m hosszú és 1 m széles, esése pedig 10 %-os. A felület érdességi jellemzőit konstansak feltételezték, vagyis a Manning-féle érdesség mindenhol egységesen $k_M = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. A vizsgálat során a mozgó csapadékot a sík felett mozgatott térben változó csapadékintenzitás eloszlás típusokkal szimulálták. Az esőzés sebességét 0,5 és 5 m/s között változtatták. Az alkalmazott intenzitás eloszlás mintáknak ugyanakkora az átlagos csapadékintenzitása (30 mm/h), és ebből kifolyólag azonos sebességek esetén azonos mennyiségű csapadékot és összes lefolyást generálnak. A tanulmány legfontosabb megállapítása az, hogy a maximális vízhozamok és az árhullámok alakja erősen függ a csapadékintenzitás térbeli eloszlásától. Ezeket a jellemzőket nagymértékben befolyásolják a vízgyűjtő terület karakterisztikái, illetve a mozgás iránya és sebessége is. A kisebb sebességgel mozgó csapadékok nagyobb eltéréseket generáltak a levonuló árhullámok alakjában (felfutási időkben és az árhullámok csúcsaiban), és az eltérés csökken, ahogy nő a sebesség. Ez a lefelé (lefolyás irányába) és a felfelé (lefolyással ellentétes irányba) történő mozgásnál is igaz, viszont a két irány esetén keletkező árhullámok között jelentős eltérést figyeltek meg. A lefolyás

irányával ellentétesen haladó csapadékokból keletkező árhullámokat a korai felfutás, az alacsony árhullám-csúcs, a nem túl meredek emelkedő ág és a hosszú levonulási idő jellemzi. Azonban a lefolyás irányába mozgó csapadékok esetén a felszíni lefolyás később indul meg (a csapadéksebességtől és felületi lefolyási sebességtől függően), viszont nagyobb árhullám-csúcsok és meredekebb emelkedő ágak jelentkeznek. Ezen felül a sebesség növekedésével csökken a lefolyás érzékenysége a különböző intenzitás eloszlásokra.

De Lima és Singh (2003) laboratóriumi körülmények között tanulmányozta a csapadékmozgás felszíni lefolyásra gyakorolt hatását [3]. A vizsgálatot egy vízzáró, sima és 5 %-os lejtésű felületen csapadékszimuláló és lefolyásrögzítő berendezések segítségével hajtották végre. Az esőztető berendezést a felület hosszirányú tengelye mentén felfelé vagy lefelé mozgatták különböző sebességekkel, ezáltal száraz-nedves-száraz ciklusokat előállítva.

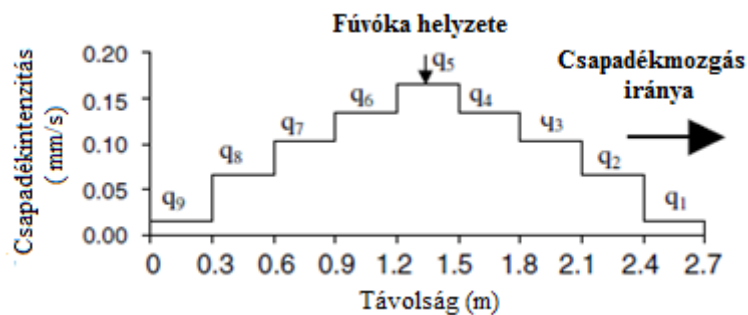
A kereken guruló esőszimuláló készülék (**1. ábra**) legfontosabb részei a vázára erősített permetező fej tölcser alakú fúvókákkal, továbbá két elektromos motor, a szivattyú rendszer és az állandó vízszintű tartály, amelyből egy tömlőn keresztül vezethető a csapvíz a berendezésbe. A szivattyúk segítségével állandó nyomás biztosítható az esetleges intenzitás változások elkerülésére érdekében egy adott csapadék esemény előállítása során.



1. ábra. Esőztető berendezés sematikus rajza (forrás: [3])

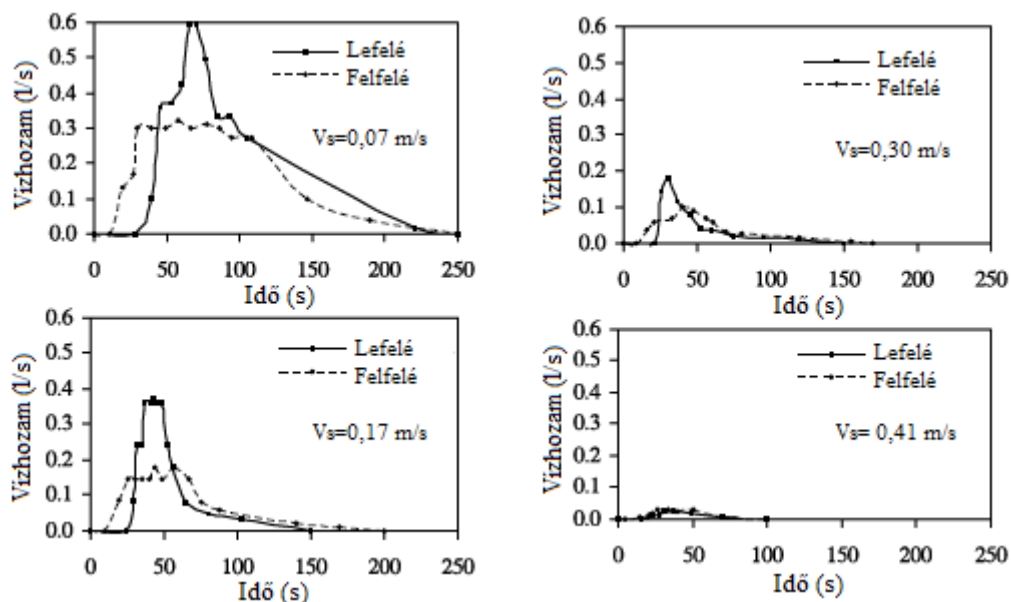
Az egyes csapadék események által generált lefolyásokat felület alacsonyabb végén elhelyezett konténerben gyűjtötték össze, és a rögzítő berendezés folyamatosan mérte a létrejövő vízszintmagasságokat, a kialakuló árhullámokat.

Mivel a tanulmány célja csapadékmozgás hatásának bemutatása, így az előállított esőzést hosszirányban különböző sebességekkel lefelé (a lefolyás irányába), illetve felfelé (a lefolyás irányával ellentétes irányba) mozgatták az 5 %-os lejtőn. Meghatározták az átlagos felületi lefolyás sebességét ($U=0,23$ m/s), és ehhez képest nagyobb és kisebb csapadéksebesség értékeket alkalmazva hajtották végre a vizsgálatot. Ezek a következők: 0,07 m/s, 0,17 m/s, 0,30 m/s és 0,41 m/s. Továbbá egyetlen, hosszirányban végighaladó csapadékinzintenzitás eloszlás típust alkalmaztak, amelyet a **2. ábra** mutat be.



2. ábra. Fúvóka alatti intenzitás eloszlás (forrás: [3])

A mozgó csapadék hatására levonuló árhullámok a **3. ábrán** láthatók.



3. ábra. 4 különböző szélességgel lefelé (a lefolyás irányába) illetve felfelé (a lefolyás irányával ellentétes irányba) mozgó csapadék esetén kialakuló árhullámok (forrás: [3])

A mozgási sebességek és irányok függvényében jelentős eltérések mutatkoztak a lefolyások térfogatában, az árhullámok alakjában, felfutási idejében és a kialakuló csúcspontokban (**3. ábra**).

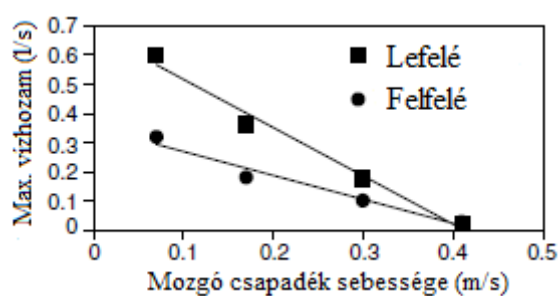
A tanulmány során, amint a szimulált eső elérte a száraz vízzáró felszínt, a felületi feszültség következtében a víz elkezdett felhalmozódni azon lefolyás nélkül. Miután a víz mennyisége egy bizonyos nagyságot ért el, mely következtében a felületi feszültség már nem tudta legyőzni a gravitációs erő hatását, a felületi lefolyás megindult.

Amikor a csapadék lefelé, vagyis a folyási iránnyal megegyező irányba mozog, a lefolyás megindulásának kezdete a felület alacsonyabb végén függ a csapadék sebességétől és a felületi lefolyás sebességétől. Ha az előző nagyobb, mint az utóbbi, a csapadék előbb éri el az alacsonyabb magasságú véget, és kezdetben a lefolyás a kifolyási pont környékén figyelhető meg. Ezért a magasabb részekről érkező vizek késleltetése figyelhető meg.

Amikor a csapadék felfelé mozog, vagyis a folyási iránnyal ellentétes irányba, a lefolyás kezdete az alacsonyabb végen kevésbé függ a felületi lefolyási és a csapadék sebességétől, és nem sokkal a csapadék megjelenése után várható. Így a felfelé mozgás esetében sokkal korábban elkezdődik a lefolyás, mint a másik iránynál (3. ábra).

Mivel a szimulált esőzés intenzitása változatlan a teljes kísérlet időtartama alatt, így a sebesség változtatásával megfigyelhető, hogy a lassabban mozgó csapadékok várhatóan nagyobb mennyiségű és csúcsú árhullámot, továbbá hosszabb lefutási időt produkálnak. Ezzel szemben a nagyobb sebességek során kisebb térfogatú lefolyás figyelhető meg, és a két irányba történő mozgás árhullámképe közötti különbségek elhanyagolhatók (3. ábra).

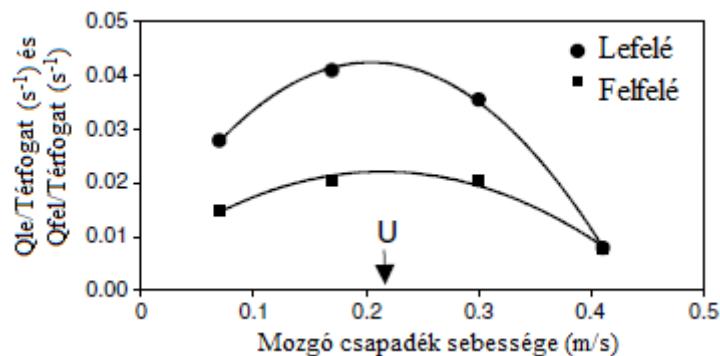
Ezen felül az is jól látható, hogy a lefelé mozgó csapadék nagyobb maximális vízhozamot indukál, mint ugyanaz a felfelé mozgó csapadék azonos sebességgel (3. ábra). A két irány árhullám-csúcs értékei közötti különbség a csapadék sebességének függvénye (4. ábra).



4. ábra. Maximális vízhozamok a csapadék sebessége és mozgási iránya függvényében (forrás: [3])

A csapadék sebességének és irányának hatását mutatja be az 5. ábra, ahol a maximális vízhozam és az összes lefolyás térfogatának hányadosát ábrázolták a sebesség függvényében, a felfelé és a lefelé mozgó csapadékok esetén. A folyási iránnyal megegyező és ellentétes irányba mozgó csapadékoknál megfigyelték, hogy a relatív legnagyobb árhullám-csúcs annál a

csapadék sebességénél keletkezett, amely megegyezett a lefolyás átlagos levonulási sebességével.



5. ábra. Maximális vízhozam és összes lefolyó vízmennyiség hányadosa a csapadék sebessége és mozgásiránya függvényében (forrás: [3])

Nunes és társai (2006) [9] a MEFIDIS eróziós modell segítségével a mozgó csapadék hatását elemezték a portugáliai Alenquer vízgyűjtő területén. A lefolyás és az erózió mértékének alakulását vizsgálták, és laboratóriumi kísérletekkel is tesztelték a modellt.

Kilenc modellcsapadék eseményt mozgattak különböző területi kiterjedéssel és sebességgel (0,5, 1 és 2 m/s) a vízgyűjtő hosszirányú tengelye mentén lefelé (a lefolyás irányába) és felfelé (a lefolyás irányával ellentétes irányba). A csapadékok összehasonlíthatóságát az összes lehulló csapadék magasságának konstans 50 mm-en való tartása biztosította. A területi lefolyás irányával megegyező irányú mozgások jelentős mértékben nagyobb lefolyási csúcsokat és nettó eróziót generáltak, mint az ellenkező irányba mozgó csapadékok, továbbá az intenzitás növekedésével nőtt a csúcsok értéke is. A kialakuló árhullámok alakjában is eltérések mutatkoztak. A lefelé mozgó csapadékok esetén a lefolyás később indult meg és az árhullám emelkedő ága meredekebb, ezzel szemben a felfelé mozgásnál a lefolyás szinte azonnal jelentkezett és az emelkedő ág kevésbé meredek volt. A laboratóriumban és az Alenquer vízgyűjtőn végzett szimulációk eredményei egyaránt azt mutatták, hogy a csapadékmozgás iránya, főleg extrém csapadék események esetén, jelentős mértékben befolyásolta a lefolyás és az erózió mértékét.

Sardoii és társai (2012) az iráni Karaj Dam vízgyűjtőn végezték vizsgálatukat [16]. A 778 km² nagyságú terület magassági viszonyai 1836 és 4368 méter között változnak. A legkisebb éves átlagos csapadék mért értéke 214 mm, a legnagyobb éves átlagosé 1170 mm. A lefolyás szimulálásához a HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) 3.5 szoftvert használták. A csapadék részvízgyűjtőkön való megjelenésének időpontját három különböző módszer szerint határozták meg. Az első esetben a legközelebbi csapadékmérő állomás adatait használták fel, mivel az egyes részvízgyűjtőkön külön-külön nem történik csapadék esemény mérés. Általában ezt az eljárást alkalmazzák a lefolyás szimulációk során, míg a másik két metódust ezzel összehasonlítva vizsgálták ebben a tanulmányban.

A második módszer a Karaj Dam mérőállomáson, a csapadék esemény ideje alatt rögzített szél adatok (irány és sebesség) felhasználásával határozza meg a csapadék megjelenési idejét az egyes részvízgyűjtőkön. A harmadik módszer a domináns szél adatokkal dolgozik. Mivel néhány esetben a csapadékok alatt nem történt szélesemény rögzítés, így a régióra jellemző havi szélrózsza adatok felhasználásával oldották meg a második módszernél felhasznált egyenleteket. A vizsgálat során hat csapadék esemény mért és szimulált eredményeit hasonlították össze, és a kapott értékek alapján elemezték, hogy melyik módszer esetén volt a legkisebb eltérés köztük, azaz hogy melyik módszer adja a legpontosabb eredményeket. Ezek összegzését a **1. és 2. táblázat** mutatja be.

Csapadék esemény	Mért vagy szimulált?	Álló csapadék		Domináns szél		Csapadék alatt mért szél	
		Árhullám-csúcs (m ³ /s)	Különbség (Chi-square Teszt)	Árhullám-csúcs (m ³ /s)	Különbség (Chi-square Teszt)	Árhullám-csúcs (m ³ /s)	Különbség (Chi-square Teszt)
11/08/1999	Mért	10,1	0,0521276	10,1	0,016495	10,1	0,0164948
	Szimulált	9,4		9,7		9,7	
05/04/2001	Mért	12,8	0,0203252	12,8	0	12,8	0,0072
	Szimulált	12,3		12,8		12,5	
04/21/2003	Mért	12,6	0,03	12,6	0,000787	12,6	0,0069767
	Szimulált	12		12,7		12,9	
10/30/2003	Mért	36,4	0,0518518	36,4	0,0024930	36,4	0,004444
	Szimulált	37,8		36,1		36	
11/03/2008	Mért	7,7	0,01216216	7,7	0,001316	7,7	0,0013157
	Szimulált	7,4		7,6		7,6	
04/29/2009	Mért	42,08	0,5760761	42,08	0,001876	42,08	0,0340440
	Szimulált	47,3		41,8		40,9	

1. táblázat. Mért és szimulált árhullámok csúcsainak összehasonlítása (álló csapadék, domináns szél adatok és a csapadék alatt jelentkező szél adatok alkalmazásának esetén) (forrás: [16])

Csapadék esemény	Mért vagy szimulált?	Álló csapadék		Domináns szél		Csapadék alatt mért szél	
		Árhullám- csúcs (m ³ /s)	Különb- ség (Chi- square Teszt)	Árhullám- csúcs (m ³ /s)	Különbség (Chi-square Teszt)	Árhullám- csúcs (m ³ /s)	Különb- ség (Chi- square Teszt)
11/08/1999	Mért	399,6	0,908031	399,6	0,9080315	399,6	0,908031
	Szimulált	381		381		381	
05/04/2001	Mért	348,48	0,001329	348,48	0,0013295	348,48	0,001329
	Szimulált	347,8		347,8		347,8	
04/21/2003	Mért	343,44	1,331446	343,44	1,3314462	343,44	1,331446
	Szimulált	365,5		365,5		365,5	
10/30/2003	Mért	1414,08	18,04684	1414,08	17,072182	1414,08	18,04684
	Szimulált	1263,1		1263,4		1263,1	
11/03/2008	Mért	343,94	0,350773	343,94	0,3507338	343,94	0,322507
	Szimulált	355,1		355,1		352,5	
04/29/2009	Mért	1676,45	25,40165	1676,45	20,22	1676,46	15,54
	Szimulált	1482,4		1499,3		1533,7	

2. táblázat. Mért és szimulált levonuló árhullámok mennyiséinek összehasonlítása (álló csapadék, domináns szél adatok és a csapadék alatt jelentkező szél adatok alkalmazásának esetén) (forrás: [16])

Az eredményekből látható, hogy a két metódus, melyek során a csapadékmozgás hatását is figyelembe vették, növelte a lefolyás szimuláció pontosságát. A szél irányának és sebességének számításba vevésével a részvízgyűjtőkön meghatározható a csapadék megjelenésének időpontja, ezáltal a maximális vízhozam értékére is közelebbi becslést kaphatunk. Ezzel szemben a csapadékmozgás a terepi lefolyás mennyiségét elhanyagolható mértékben befolyásolta.

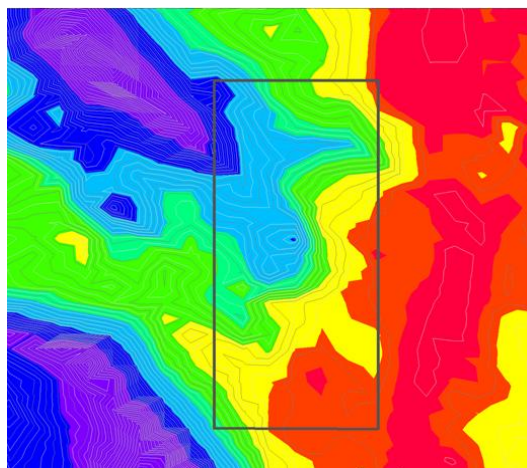
3. Anyag és módszer

3.1. Fiktív vízgyűjtő terület és a hozzátartozó csatornahálózat bemutatása

A vizsgálat első részét egy fiktív vízgyűjtő területen és annak egyesített rendszerű csatornahálózatán végeztük (fiktívnek nevezzük, mivel egy létező magyarországi vízgyűjtő területről van szó, azonban a vizsgált modell nem teljesen felel meg a valóságos hálózatnak).

A vízgyűjtőt keletről egy folyó határolja, ahova a teljes rendszer terhelését vezetjük ki. A területet egy átlagos városi résznek feltételezzük, ahol panelházak és családi házak a jellemzőek, ezáltal a burkolt felületek aránya magas - 60 és 100 % között változik az egyes részvízgyűjtők vízzárósága. Főként nyugaton találhatók zöldebb, vízáteresztőbb területek, ahol több csapadék szivárog a talajba, és ebből kifolyólag kevesebb lefolyás terheli a csatornahálózatot.

A vizsgált vízgyűjtő 4,5 km hosszú, a legszélesebb része 2,6 km, a területe megközelítőleg 6 km². A domborzati képén jól látszik, hogy a terület észak- északnyugat felől lejt dél - délkelet felé. A legalacsonyabb pontok (piros színnel jelezve a térképen) 102 mBf-i (méter Balti felett), a legmagasabb pontok (sötétkék színnel jelezve a térképen) 270 mBf-i magasság körül mozognak (6. ábra).



6. ábra. Vizsgált vízgyűjtő domborzati képe (téglalapon belül – vizsgált vízgyűjtő területe, lila szín – legmagasabb, piros szín - legmélyebb részek)

A vízgyűjtő terület és az egyesített rendszerű csatornahálózat SWMM-ben létrehozott modelljét a 7. ábra mutatja be.



7. ábra. A vizsgált vízgyűjtő terület és az egyesített rendszerű csatornahálózatának SWMM modellje

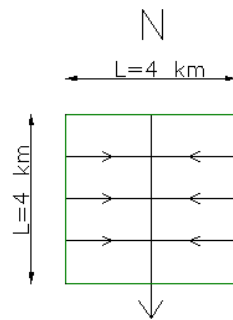
A modell nem kalibrált, mivel a vizsgálat során a tendenciák kimutatása volt a célunk.

Minden részvízgyűjtő esetén szükséges volt bevinni azokat a jellemző adatokat, melyek segítségével a program meghatározza az adott területekről történő felszíni lefolyás mértékét.

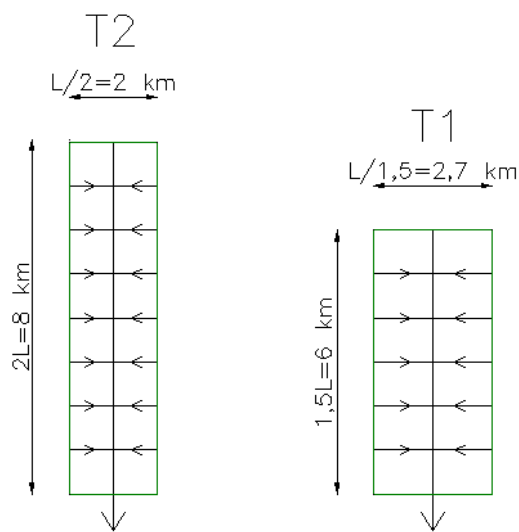
A hálózat jellemzően gravitációs csatornaszakaszokból áll. A zárt szelvények főként kör, néhol viszont tojás alakúak. Minden cső esetén meghatároztuk a kezdő és végaknát, a cső aknafenéktől mért távolságát, továbbá a szelvényalakot, a csőátmérőt, a hosszt, az érdességet (0,011-0,012), a kilépési és belépési veszteségeket (0,6-ot vettünk fel mindkettő értékre minden szakaszra).

3.2. A vízgyűjtő alak szerepének vizsgálatához felhasznált modell bemutatása

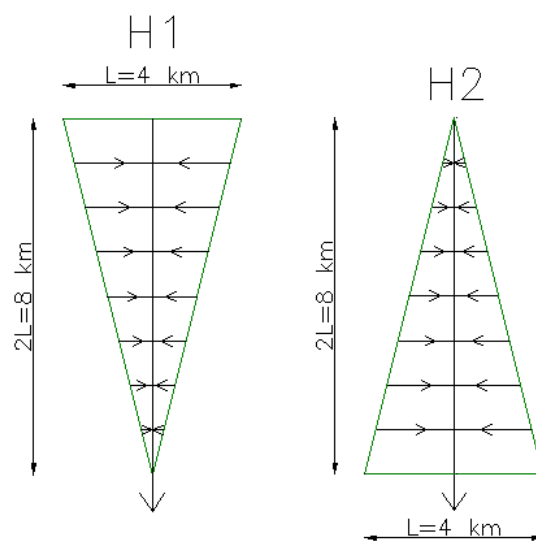
A vizsgálat második felében azt tanulmányoztuk, hogy a vízgyűjtő terület alakja milyen mértékben befolyásolhatja a csatornahálózaton levonuló árhullámokat. Ehhez különböző egyszerűsített alakokkal rendelkező vízgyűjtő területek és a hozzájuk tartozó csatornahálózat modelljeit építettük meg. Ezek sematikus rajzai a következő ábrákon (8.– 10.) láthatóak.



8. ábra. Vizsgált vízgyűjtő alak – négyzet: N



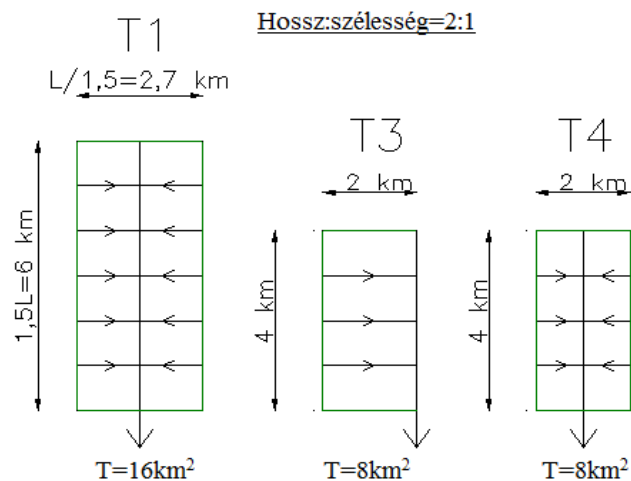
9. ábra. Vizsgált vízgyűjtő alak – téglalap: T1 és T2



10. ábra. Vizsgált vízgyűjtő alak – háromszög: H1 és H2

A vizsgált modellek esetén minden paramétert azonosra vettünk fel (csőátmérő, csőesés, részvízgyűjtők területe, stb.), a területet is (16 km^2), csak az alakot változtattuk. A csatornahálózat minden csőszakasza 100 méter hosszú, és minden aknára egy 1 hektáros részvízgyűjtő területre hulló csapadékot terhelünk rá. A csatornahálózat főgyűjtőjére 100 méterenként csatlakoznak be az oldalágak.

A vízgyűjtő alakok szerepének elemzése után egy rövidebb vizsgálat keretében tanulmányoztuk a **vízgyűjtő terület méretének** hatását a csatornahálózatban kialakuló árhullámokra. Ehhez az előzőleg vizsgált egyszerűsített téglalap alakú vízgyűjtő modellt (T1- 16 km^2) és két fele akkora területű (8 km^2), de ezzel közel megegyező hossz-szélesség (2:1) arányú vízgyűjtő területet elemeztünk. Ezek a következő ábrán (**11. ábra**) láthatóak.



11. ábra A vízgyűjtő méret szerepének vizsgálatához felhasznált vízgyűjtő területek

A vizsgálatokhoz felhasznált modellek főbb jellemzői:

- Részvízgyűjtők területe: 1 hektár
- Vízjáró felület aránya: 40 %
- Felszíni esés: 0,5 %
- Manning-féle érdesség értéke a részvízgyűjtő vízjáró részére: 0,011, amely szokványos aszfalttal fedett felületek esetén
- Manning-féle érdesség értéke a részvízgyűjtő vízáteresztő részére: 0,15, amely szokványos rövid, átlagos sűrűségű gyeppel borított felületek esetén
- Depressziós tározás mélysége a vízjáró részek esetén 1 mm, vízáteresztő részek esetén pedig 5 mm ezen a vizsgált vízgyűjtő területén

- Azon vízzáró rész arányának megadása, ahol nincs depressziós tározás, amely esetünkben minden részvízgyűjtő esetében 25%-ban van meghatározva
- Csőszakaszok hossza: 100 m
- Csőszakaszok esése: 3 ezrelék
- Csőátmérő: 3 m
- A vízzáró és vízáteresztő részokról a lefolyás egyenesen a kifolyási pontba történik
- A beszivárgás leírására a Horton-modellt alkalmaztuk
- Talajvíz-, szennyezőanyag- és hőterhelés jelen esetben nincs

A csőátmérőket egységesen minden modellnél a teljes hálózatra 3 méteresre vettük fel. A 3 méteres csőméret nagyság a vizsgálat miatt volt indokolt, hiszen akkora átmérőre volt szükségünk, amelyben bármely sebességgel mozgó csapadék esemény hatására kialakuló árhullám gond nélkül le tud vonulni. Az egész hálózatra azért alkalmaztunk azonos csőátmérőt, mert ezzel tudtuk azt biztosítani, hogy a különböző vízgyűjtő alakok esetén kapott eredményeket össze tudjuk hasonlítani.

3.3 SWMM 5.0 általános bemutatása

A vizsgálatokat az USEPA által forgalomba hozott SWMM 5.0 (Storm Water Management Model) csatorna szimulációs szoftverrel végeztük el, amely jellemzően városi területeken lefolyó csapadék mennyiségi és minőségi szimulációját végző dinamikus modell [4].

Az SWMM-ben *részvízgyűjtőket* hozhatunk létre. A részvízgyűjtőkön belül vízzáró és vízáteresztő részek definiálhatók [4]. Vízzáró területeken veszteség csak a depressziós tározási kapacitás miatt lép fel, vízáteresztő talajok esetén viszont az infiltráció (beszivárgás) hatására is. A vízáteresztő területeken a felsőbb telítetlen talajrétegekbe történő beszivárgás leírására három modell alkalmazására van lehetőség a programban, melyek a következők: a Horton-, a Green-Ampt-, és a CN (Runoff Curve Number – Görbe szám módszer) infiltrációs modell [4]. A *lefolyási modell* a részvízgyűjtőkre hulló csapadékból generál lefolyási és szennyező árhullámot, a hidraulikai rész pedig ebből számolja a lefolyást a csatornában.

A *hidraulikai modellben* tetszőleges méretű hálózat hozható létre, beépített zárt és nyílt felszínű, valamint természetes (tetszőleges alakú) csatorna szelvények felhasználásával. A hálózatot terhelő külső vízhozamok és vízminőségi terhelések a felszíni lefolyásból, a talajvíz hozzáfolyásból, csapadékból származó infiltrációból/hozzáfolyásból, a szennyvíz hozamból és

a felhasználó által meghatározott hozzáfolyásból származnak. A modellezés során választhatunk kinematikus és dinamikus árhullám között.

Az egydimenziós modellezés alapját a térfogat- és az impulzus-megmaradás elvéből levezetett *Saint-Venant egyenletek* képezik. A modell a teljes Saint-Venant egyenleteket – kontinuitás és impulzus-megmaradás egyenlet **(1, 2)** – oldja meg numerikusan az egyes szakaszokra és egy térfogatomegmaradási egyenletet a csomópontoknál minden időlépésben minden csomópontban.

Anyagmegmaradási egyenlet:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

Momentum egyenlet:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \quad (2)$$

Ahol

x - távolság a vezeték mentén,

t – idő,

A - keresztmetszeti felület,

Q – vízhozam,

H – víznyomás,

h_L - egység hosszra vonatkozó energiaveszteség a vezeték mentén,

g – nehézségi gyorsulás.

Az SWMM áramlási modellje a hidraulikai paramétereket, mint a sebesség, a vízhozam, a vízmélység és a nyomás, a vezetékek két végén levő csomópontokban számolja ki, és ezek átlagát őrzi meg a számítás során. A program a vezetékek súrlódási veszteségen kívül a helyi veszteségekkel (be- és kilépési, valamint az egész vezetékre jellemző) is számol. Azonban a helyi veszteségeket a felhasználónak egyedi mérlegelés alapján kell meghatároznia, mivel az SWMM nem veszi figyelembe a hálózat geometriáját. A Saint-Venant egyenletekben a folytonossági egyenlet **(1)** a csomópontokra, a momentum egyenlet **(2)** a vezetékekre vonatkozik, és a helyi veszteségek a vezetékek egyenleteiben vannak benne.

3.4 Főbb szimulációs beállítások

Dinamikus árhullám alkalmazásával a modell a teljes Saint-Venant egyenleteket oldotta meg numerikusan a csomópontoknál - minden időlépésben minden csomópontban. Ez a számítási módszer képes figyelembe venni a hálózati tározást, a felvízi hatásokat, a be és kilépési veszteségeket, az áramlás megfordulását és a nyomás alatti áramlást.

A vízmélység és a vízhozam közötti kapcsolat leírására a modell a Manning egyenleteket használta, a talajba szivárgó csapadék mértékének meghatározására pedig a Horton-féle szivárgást választottuk.

Talajvízzel, szennyvíz-, szennyezőanyag- és hőterheléssel nem számoltunk.

3.5 Magyarországi szél- és csapadékviszonyok

A vizsgálat megkezdése előtt az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapjáról tájékozódunk a Magyarországon jellemző csapadék- és szélviszonyokról, az uralkodó szélirányokról.

Magyarország a mérsékelt éghajlati övben fekszik, és a *csapadékviszonyokat* egyaránt befolyásolja a csapadékosabb óceáni, a kevés csapadékú kontinentális, illetve a nyáron száraz, télen csapadékos mediterrán éghajlat. Ebből kifolyólag az országon belül az időjárás tekintetében jelentős különbségek fordulhatnak elő a viszonylag kis területe és sík felszíne ellenére [10]. Az évi átlagos csapadék 500-750 mm. A legcsapadékosabbak a délnyugati részek és a magasabban fekvő területek, ahol a csapadékösszeg kisebb foltokban a 800 mm-t is meghaladja, míg a legkevesebb (500 mm-nél kevesebb) csapadékot az alacsonyon fekvő Tiszavölgnél jellemző [11].

Dél-Európához hasonlóan Magyarországon is csökken az éves csapadék mennyisége. A klímaváltozás hatására a csapadékviszonyok szélsőségesebbé váltak. Országos átlagban egyre kevesebb a csapadékos nap, és a száraz időszakok hossza, azaz amikor a napi csapadék nem éri el az 1 mm-t, jelentősen megnövekedett a 20. század eleje óta. Viszont enyhe növekedés tapasztalható a 20 mm-t meghaladó csapadékú napok számában is. Nyáron szintén megfigyelhető a napi intenzitás, más néven átlagos napi csapadékoság növekedése. Megállapíthatjuk, hogy **egyre inkább a rövid ideig tartó, intenzív záporok, zivatarok a jellemzőek** [12].

A Kárpát-medencét a Kárpátok, az Alpok és a Dinári-hegység vonulatai veszik körül. A terület a nyugati szelek övében fekszik, és a medencejelleg az uralkodó szélirányokat nagymértékben

módosítja. Az ország területén **a leggyakoribb szélirány az északnyugati**, a délies szeleknek pedig másodmaximuma van [13].

3.6 A vizsgálat módszere

E tanulmány keretében fő célkitűzésünk volt a mozgó csapadékfront hatásának vizsgálata a csatornahálózaton levonuló árhullámokra. Ehhez a hagyományos tervezési módszert, azaz amikor feltételezzük, hogy az összes részvízgyűjtőn azonos időpontban hullik le ugyanaz a csapadék, hasonlítottuk össze a mozgó csapadékfront alkalmazásának esetével.

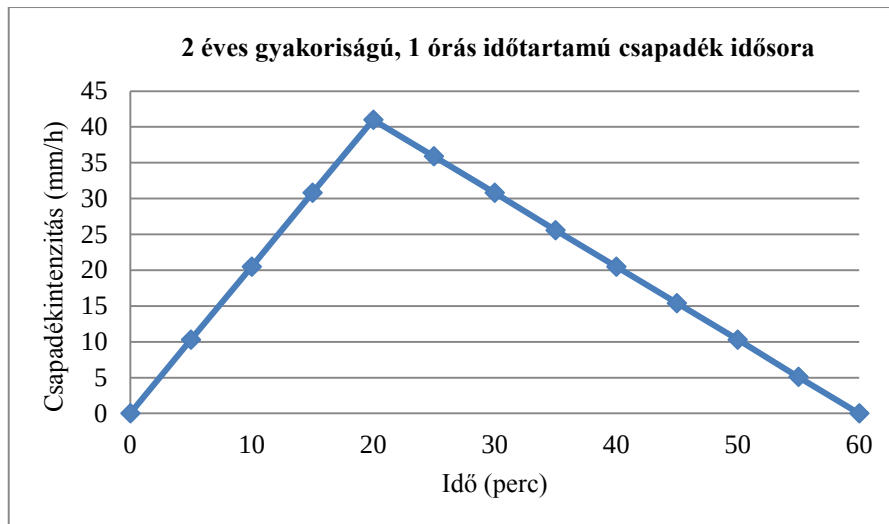
3.6.1 Fiktív vízgyűjtő vizsgálata

A tanulmány első részében egy fiktív vízgyűjtőt és annak csatornahálózatát vizsgáltuk, amelyhez három különböző időtartamú modelleszapadékat vettünk alapul. Először az álló csapadékokkal futtatunk szimulációkat, majd ezeket a csapadék eseményeket mozgattuk a vízgyűjtő terület felett. Változtattuk a csapadékok sebességét (2 km/h, 4,5 km/h, 9 km/h), a mozgásnak a területi és csatornabeli fő lefolyás irányával bezárt szögét és ezen a tengelyen való mozgás irányát (pozitív vagy negatív).

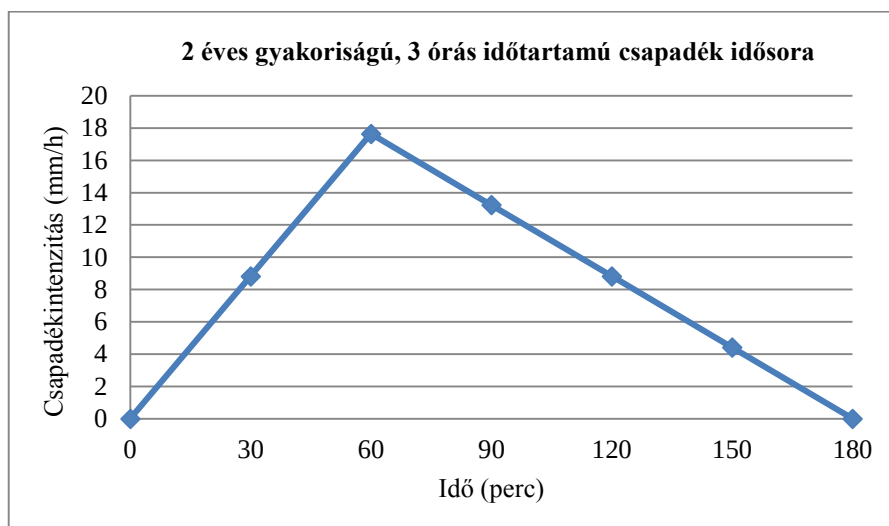
Települések vízrendezése esetén 1, 2, 4 vagy 10 év visszatérési idejű záporcsapadékot lehet mértékadónak tekinteni, ha az összegyülekezési idő kisebb, mint 180 perc [15]. Jelen esetben mi egy 2 éves gyakoriságú (2 éves visszatérési idejű) 1 órás időtartamú, egy 2 éves gyakoriságú (2 éves visszatérési idejű) 3 órás időtartamú és egy 4 éves gyakoriságú (4 éves visszatérési idejű) 15 perc (rövid, nagy intenzitású) időtartamú csapadékokat alkalmaztunk a vizsgálat elvégzése során.

Mivel az időben változó csapadékintenzitás figyelembevétele lehetővé teszi a keletkező árhullám alakjának és a levonulás tetőző hozamának pontosabb meghatározását [15], így a választott modelleszapadéaink is időben változó intenzitásúak. Hazai vizsgálatok alapján általában az összegyülekezési idő első egyharmadánál jelentkezik az időben változó intenzitású, „p” visszatérési idejű csapadékok maximális intenzitása [15]. Ezért háromszög alakú csapadék idősorokat alkalmaztunk, ahol az időtartam egyharmadánál az időben állandónak tekintett intenzitás kétszeresét vettük fel.

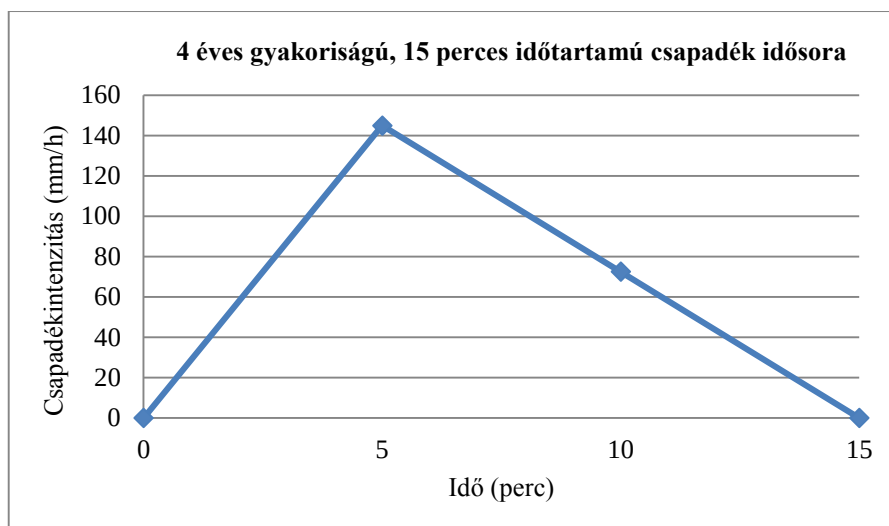
Az alkalmazott modelleszapadékok idősorait a **12 – 14. ábrák** mutatják be.



12. ábra. Alkalmazott modelleszapadék: 2 éves gyakoriságú, 1 órás időtartamú



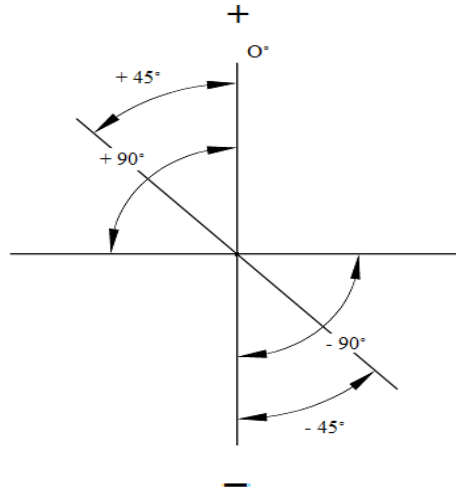
13. ábra. Alkalmazott modelleszapadék: 2 éves gyakoriságú, 3 órás időtartamú



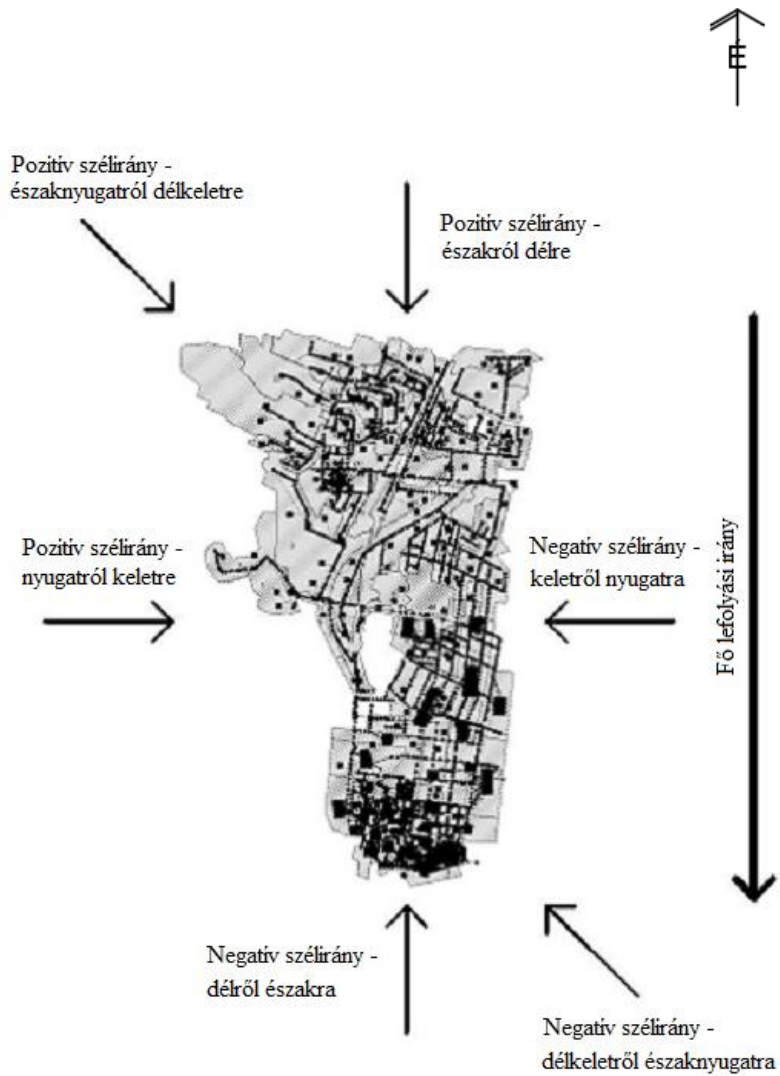
14. ábra. Alkalmazott modelleszapadék: 4 éves gyakoriságú, 15 perc időtartamú

Az SWMM-be bevittük az alkalmazott modelleszapadékok idősorait, majd első lépésként hozzárendeltük őket a részvízgyűjtők „virtuális” csapadékmérőihez. Lemodelleztük azt az esetet, amikor az összes részvízgyűjtőre azonos időpontban ráeresztett, vagyis álló csapadékot vettünk figyelembe. Mindhárom modelleszapadékkal elvégeztük ezt a futtatást, és ezen eredmények tükrében - mint összehasonlítási alap - vizsgáltuk a szél sebességének és irányának hatását a csatornahálózatban kialakuló árhullámképekre.

Mivel az SWMM-ben nincs olyan lehetőség, hogy a program magától mozgassa a terület felett a csapadékot, így ezt nekünk kellett manuálisan beállítani. Ehhez meg kellett határoznunk a csapadékok mozgási útvonalait. A terület és a csatornahálózat fő lefolyási iránya északról illetve északnyugatról dél felé tart, ezért ezt vettük a kiindulási 0 fokos tengelynek. Ezt elforgattuk 45 illetve 90 fokkal, így kaptuk meg a másik két mozgási útvonalat. Mindhárom tengelyen pozitív illetve negatív mozgási irányt vizsgáltunk. Pozitív mozgási eset, amikor a csapadék északról délre, északnyugatról délkeletre és nyugatról keletre tart. Negatív, amikor délről északra, délkeletről északnyugatra és keletről nyugatra halad. A mozgási irányok értelmezését **15. és 16. ábra** szemlélteti.

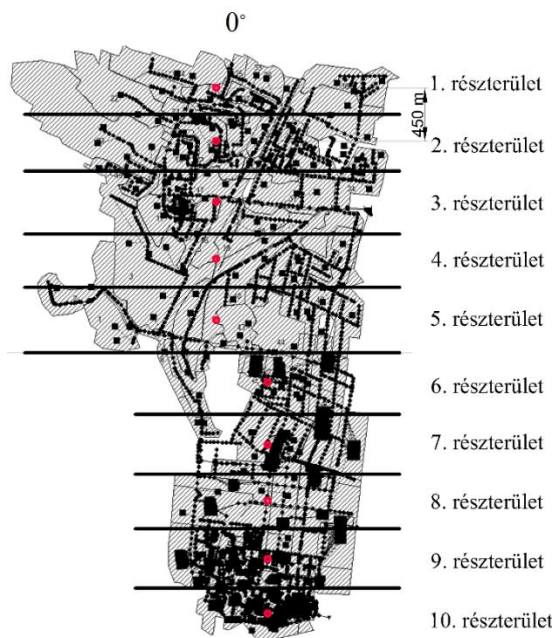


15. ábra. Vizsgálati mozgási tengelyek és irányok értelmezés

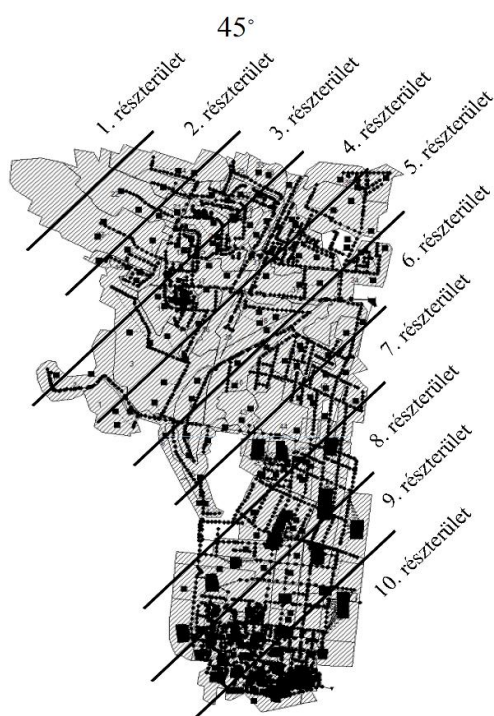


16. ábra. A csapadék mozgási útvonalainak értelmezése

A vízgyűjtő területét a csapadék haladásának irányában felosztottuk közel azonos nagyságú részekre (az egyes részek súlypontjai között átlagosan 450 méter van), és ezek mindegyikéhez külön-külön „virtuális” csapadékmérőt rendeltünk. A mozgásnak a fő lefolyási iránnyal bezárt szöge alapján három területfelosztást készítettünk, melyek a **17 – 19. ábrákon** láthatóak.



17. ábra. A 0 fokos tengelyhez tartozó területfelosztás (rózsaszín pontok – területek súlypontjai, egymástól ~ 450 m-re)



18. ábra. A 45 fokos tengelyhez tartozó területfelosztás



19. ábra. A 90 fokos tengelyhez tartozó területfelosztás

A területek felosztása után meg kellett oldanunk a csapadékok mozgását. Ezt a csapadék idősorok Δt időtartamokkal való eltolásaival értük el. Az adott mozgási irányban a szélsősebesség függvényében kiszámoltuk, hogy az egyes részterületek súlypontjai között mennyi idő alatt halad át a csapadék. Az egyszerűsítés kedvéért a súlypontokra érkező eltoló csapadék idősorokat vettük figyelembe a teljes részterületekre is. A keresett Δt eltolási időt a **3-as egyenletből** kaptuk meg.

$$\Delta t = s/v \quad (3)$$

Ahol

Δt – a csapadék mozgása során 2 részterület súlypontja közötti út megtételéhez szükséges idő, h,

s – az egyes részterületek súlypontjainak távolsága, km,

v – a csapadékmozgás sebessége, vagyis a szélsősebesség, km/h.

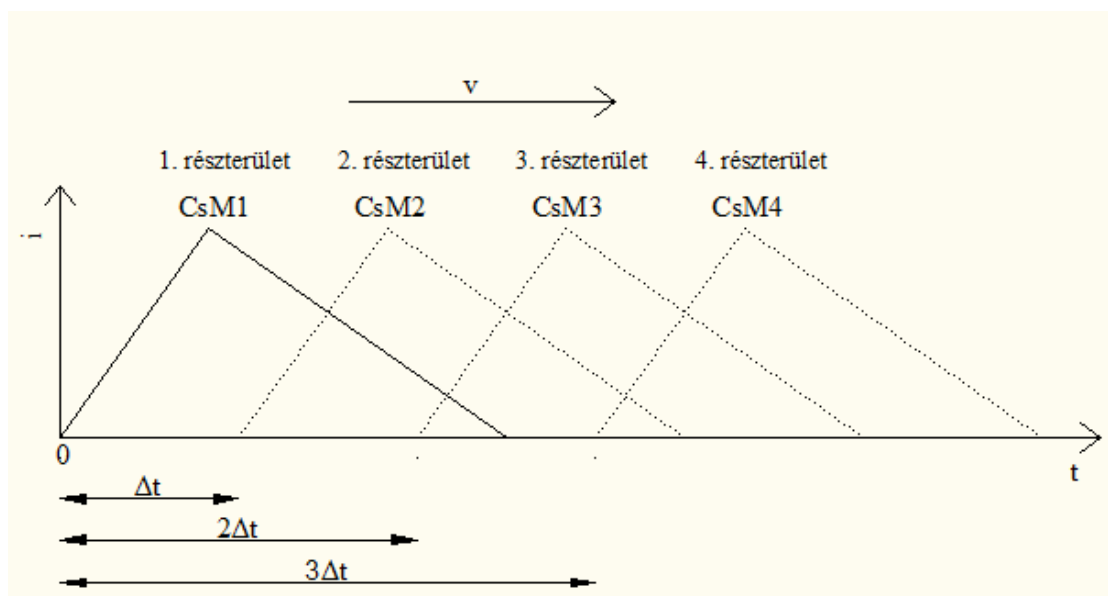
A vízgyűjtőt minden mozgási irányban úgy osztottuk fel, hogy az egyes részterületek súlypontjai között közel 450 méter legyen, és ezért minden esetben $s = 0,45$ km-rel számoltunk. A vizsgálat során három különböző szélsősebességet vettünk figyelembe - 2 km/h, 4,5 km/h és 9 km/h sebességgel mozgattuk a csapadékot. A vízgyűjtő terület hossza a fő felszíni lefolyás irányával párhuzamosan megközelítőleg 4,5 km. Ebből kiindulva határoztuk meg a 4,5 km/h-t,

mint a lefolyás átlagos levonulási sebességét és mint az egyik vizsgálati szélsőbességet. Ennél egy nagyobb, kétszer akkora ($v = 9 \text{ km/h}$) és egy kisebb, közel fele akkora értéket ($v = 2 \text{ km/h}$) alkalmaztunk.

Ezek alapján már az egyes mozgási irányokban számíthatók a csapadék idősorok eltolásai, azaz hogy a csapadék mennyivel később jelenik meg egy adott részterület súlypontján és magán az egész részterületen, mint az azt megelőzőt.

Az időbeli eltolások a következők voltak: 2 km/h-s mozgási sebesség esetén $\Delta t = 14 \text{ perc}$, $4,5 \text{ km/h-s}$ esetén $\Delta t = 6 \text{ perc}$, és 9 km/h-nál $\Delta t = 3 \text{ perc}$.

A megjelenési időpontok értelmezését a **20. ábra** mutatja be.



20. ábra. Mozgó csapadék szimulálása (CsM = „virtuális” csapadékmérő, v = szélsőbesség és a mozgás iránya, i = intenzitás, t = idő, Δt = csapadék idősorok közötti eltolódás)

A haladás irányában az adott szélsőbesség függvényében előállított Δt -vel történik a csapadék idősorának eltolása, és ezt minden sorban következő részterület esetén elvégezzük. Az első részterületre 0 időpontban érkezik a csapadék.

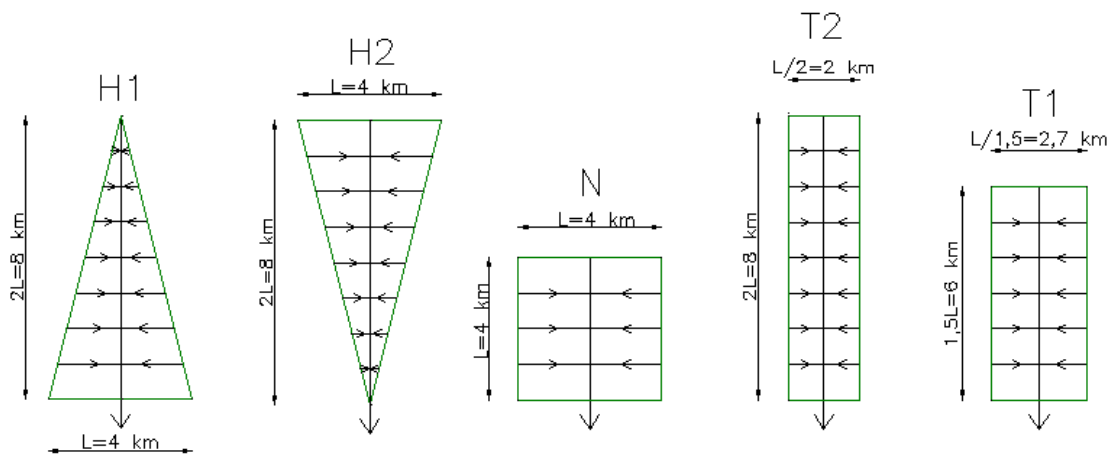
3.6.2 A vízgyűjtő alak szerepének vizsgálata

A vizsgálat második felét egyszerűsített vízgyűjtő alakokon végeztük el. Ehhez olyan vízgyűjtő modelleket hoztunk létre, melyek területét és egyéb paramétereit minden esetben azonosra vettük fel és csak a vízgyűjtő alakját módosítottuk (kivéve egy rövidebb vizsgálat keretében, amikor a vízgyűjtő terület nagyság szerepének vizsgálatához fele akkora területű vízgyűjtőket

használtunk összehasonlításként). A kapott eredmények tükrében következtethetünk arra, hogy a különböző vízgyűjtő alakok milyen mértékben befolyásolják a csatornahálózaton levonuló árhullámokat.

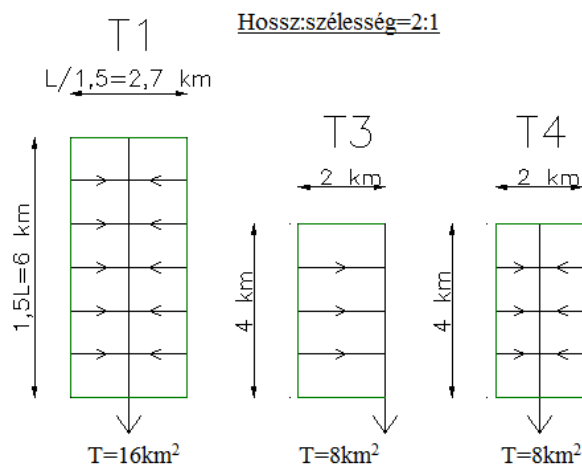
A vizsgálat első felében megállapítottuk, hogy a legnagyobb árhullám-csúcsokat a hálózat fő lefolyási irányával megegyező irányba mozgó csapadékok generálják, ezért ebben a részben az adott vízgyűjtő alakok csatornahálózatának fő lefolyási irányába mozgó csapadékokat vizsgáltuk. Emellett a fiktív vízgyűjtőn a legnagyobb árhullám-csúcsok a rövid idejű, nagy intenzitású, azaz a 4 éves gyakoriságú és 15 perces időtartamú csapadéknál jelentkeztek. Ezért a különböző vízgyűjtő alakok vizsgálatához ezt a csapadék eseményt használtuk fel.

Öt különböző vízgyűjtő alakot vizsgáltunk, melyek a következők: egy négyzet, két téglalap és két háromszög alakú vízgyűjtő (21. ábra).



21. ábra. Vizsgált egyszerűsített vízgyűjtő alakok

A vízgyűjtő méret szerepének vizsgálatához a T1 jelű téglalap alakú vízgyűjtő modellt, melynek területe 16 km^2 , és két fele akkora területű (8 km^2), ugyanolyan alakú és hossz-szélesség arányú (2:1) vízgyűjtőket alkalmaztunk. A T3-as és T4-es jelű vízgyűjtő modell között a különbség az, hogy egy vagy két oldalról terheli-e a csatornahálózat a fő gyűjtőcsatornát (22. ábra).

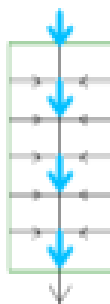


22. ábra. A vízgyűjtő méret szerepének vizsgálatához felhasznált vízgyűjtő modellek

A csapadék mozgását a fiktív vízgyűjtő terület vizsgálatánál ismertetett módszerrel végeztük el, tehát itt is Δt -ket számítottunk, és ezekkel töltük el időben a csapadék idősorát. Itt azonban az s-t, azaz az egyes részvízgyűjtők súlypontjainak távolságát 100 méterre vettük fel.

A csapadék eseményt a hálózati lefolyási átlagos sebességével közel megegyező és annál kisebb, illetve nagyobb sebességekkel mozgattuk a vizsgált vízgyűjtő területek felett. Így a képletből a v értéket, azaz a csapadékmozgás sebességét 0,5 és 50 km/h között változtattuk.

A csapadékmozgás iránya, amely megegyezik az egyes vízgyűjtő területekhez tartozó csatornahálózat fő lefolyási irányával, a következő ábrán látható.



23. ábra. Csapadékmozgás a hálózat fő lefolyási irányával megegyező irányba

4. Eredmények

Először a fiktív vízgyűjtőn és csatornahálózaton, majd a különböző egyszerűsített vízgyűjtő alakokon mutatjuk be a csapadékmozgás hatását, a vizsgálat során kapott eredményeket. Végül összegezzük ezeket, és levonjuk a megfelelő következtetéseket.

4.1. A fiktív vízgyűjtőn végzett vizsgálat eredményei

Az eredmények kiértékelését a csapadékcsonka hálózat legvégső, kifolyási pont előtti csőszakaszán végeztük el. Azonban azt fontos kiemelni, hogy a *modell nem kalibrált*, mivel a vizsgálatunk szempontjából a tendenciák kimutatása volt a fő cél, így a *számszerű értékek sem pontosak*. Feltételeztük, hogy a vízgyűjtő alakja és mérete is befolyásolja a kapott eredményeket. *Ezért a tendenciák általános érvényessége mellett, a növekmények számszerű értékeinek érvényessége csak az adott vízgyűjtőre és annak hálózatára tekinthető elfogadhatónak.* A különböző vízgyűjtő alakok szerepének vizsgálatát a következő részben (4.2. fejezet) mutatjuk be.

Az eredményeket (3– 5. táblázatok) a különböző visszatérési idejű és időtartamú csapadékok, a szélsőbességek, a fő lefolyási iránnyal bezárt szögek és az így kialakult tengelyeken való pozitív vagy negatív (korábban már definiált) irányú mozgások szerint vizsgáljuk meg.

Megállapítható, hogy a csapadékmozgás jelentős mértékben befolyásolja a kialakuló árhullám-csúcsokat és azok megjelenési időpontjait (3 – 5. táblázatok). A 3 – 5. táblázatokban a színessel jelölt értékek mozgási irányonként az árhullám-csúcs megváltozásának szélső értékeit jelölik.

Csapadék sebesség (km/h)	Fő lefolyási iránnyal bezárt szög	Irány	Árhullám csúcs jellemzői	Csapadék esemény		
				2 éves gyakoriságú, 3 órás	2 éves gyakoriságú, 1 órás	4 éves gyakoriságú, 15 perces
Álló			$Q^{csúcs}$ (l/s)	4752.6	4323.5	3946.3
			$t^{csúcs}$ (min)	136	70	22
2 km/h	0°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	5143.6	5626.4	6693.6
			$t^{csúcs}$ (min)	208	158	142
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.08	1.30	1.70
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.53	2.26	6.45
4,5 km/h	0°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	5212.6	6461.4	7929.5
			$t^{csúcs}$ (min)	148	94	70
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.10	1.49	2.01
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.09	1.34	3.18
9 km/h	0°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	5078.8	5875.4	6042.08
			$t^{csúcs}$ (min)	146	78	48
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.07	1.36	1.53
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.07	1.11	2.18
2 km/h	0°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	2273.4	3269.1	3239.9
			$t^{csúcs}$ (min)	262	204	178
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.48	0.76	0.82
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.93	2.91	8.09
4,5 km/h	0°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4115.3	3366.2	3326.3
			$t^{csúcs}$ (min)	182	140	122
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.87	0.78	0.84
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.34	2.00	5.55
9 km/h	0°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4460.7	3496.9	3379.8
			$t^{csúcs}$ (min)	158	110	100
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.94	0.81	0.86
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló}$	1.16	1.57	4.55

3. táblázat. Az álló és mozgó csapadékok maximális vízhozamainak és azok megjelenési időpontjainak összehasonlítása (0°-os mozgási tengely)

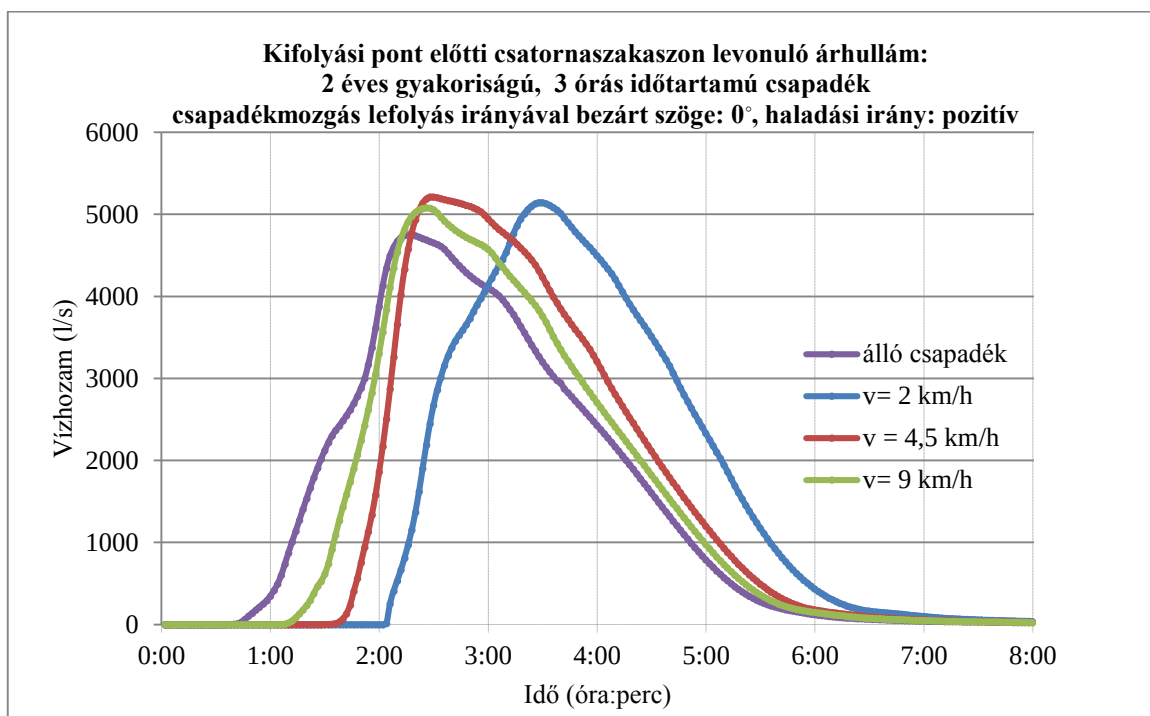
Csapadék sebesség (km/h)	Lefolyás irányával bezárt szög	Irány	Árhullám csúcs jellemzői	Csapadék esemény		
				2 éves gyakoriságú, 3 órás	2 éves gyakoriságú, 1 órás	4 éves gyakoriságú, 15 perces
Álló			$Q^{csúcs}$ (l/s)	4752.6	4323.5	3946.3
			$t^{csúcs}$ (min)	136	70	22
2 km/h	45°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	5344.9	6611.8	8458.5
			$t^{csúcs}$ (min)	216.00	158.00	142.00
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.12	1.53	2.14
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.59	2.26	6.45
4,5 km/h	45°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	5140.1	6484.5	8279.0
			$t^{csúcs}$ (min)	158	98	72
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.08	1.50	2.10
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.16	1.40	3.27
9 km/h	45°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	5050.02	5596.15	5172.45
			$t^{csúcs}$ (min)	150	82	48
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.06	1.29	1.31
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.10	1.17	2.18
2 km/h	45°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	3552.0	3293.4	3237.0
			$t^{csúcs}$ (min)	222	176	158
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.75	0.76	0.82
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.63	2.51	7.18
4,5 km/h	45°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4244.3	3422.7	3357.1
			$t^{csúcs}$ (min)	172	124	108
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.89	0.79	0.85
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.26	1.77	4.91
9 km/h	45°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4551.4	3621.4	3434.6
			$t^{csúcs}$ (min)	154	98	32
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.96	0.84	0.87
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.13	1.40	1.45

4. táblázat. Az álló és mozgó csapadékok maximális vízhozamainak és azok megjelenési időpontjainak összehasonlítása (45°-os mozgási tengely)

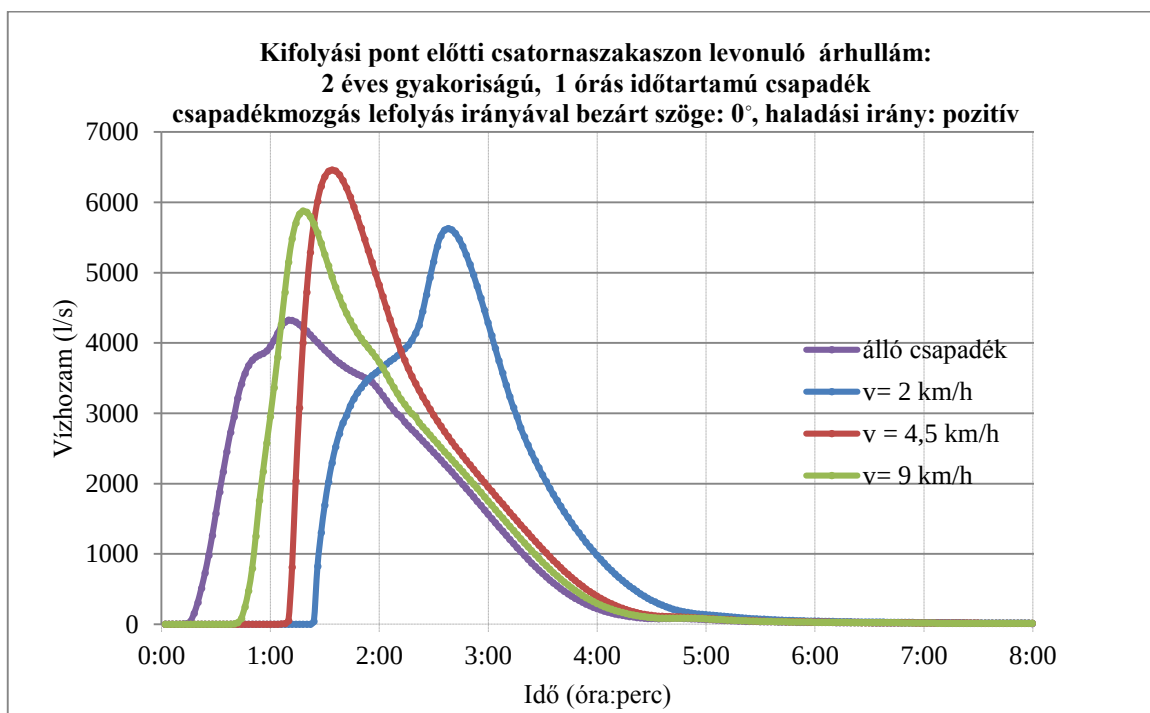
Csapadék sebesség (km/h)	Lefolyás irányával bezárt szög	Irány	Árhullám- csúcs jellemzői	Csapadék esemény		
				2 éves gyakoriságú, 3 órás	2 éves gyakoriságú, 1 órás	4 éves gyakoriságú, 15 perces
Álló			$Q^{csúcs}$ (l/s)	4752.6	4323.5	3946.3
			$t^{csúcs}$ (min)	136	70	22
2 km/h	90°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4877.6	5433.0	5859.3
			$t^{csúcs}$ (min)	184	118	90
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.03	1.26	1.48
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.35	1.69	4.09
4,5 km/h	90°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4792.9	4623.2	4927.6
			$t^{csúcs}$ (min)	156	92	48
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.01	1.07	1.25
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.15	1.31	2.18
9 km/h	90°	pozitív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4729.2	4368.6	4509.1
			$t^{csúcs}$ (min)	146	82	34
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	1.00	1.01	1.14
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.07	1.17	1.55
2 km/h	90°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4611.6	4474.9	4176.0
			$t^{csúcs}$ (min)	170	102	74
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.97	1.04	1.06
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.25	1.46	3.36
4,5 km/h	90°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4674.8	4435.9	4088.4
			$t^{csúcs}$ (min)	154	82	60
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.98	1.03	1.04
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.13	1.17	2.73
9 km/h	90°	negatív	$Q^{csúcs}$ (l/s)	4679.3	4349.3	3936.4
			$t^{csúcs}$ (min)	146	76	58
			$Q^{csúcs}_{mozgó}/$ $Q^{csúcs}_{álló} (-)$	0.98	1.01	1.00
			$t^{csúcs}_{mozgó}/$ $t^{csúcs}_{álló} (-)$	1.07	1.09	2.64

5. táblázat. Az álló és mozgó csapadékok maximális vízhozamainak és azok megjelenési időpontjainak összehasonlítása (90°-os mozgási tengely)

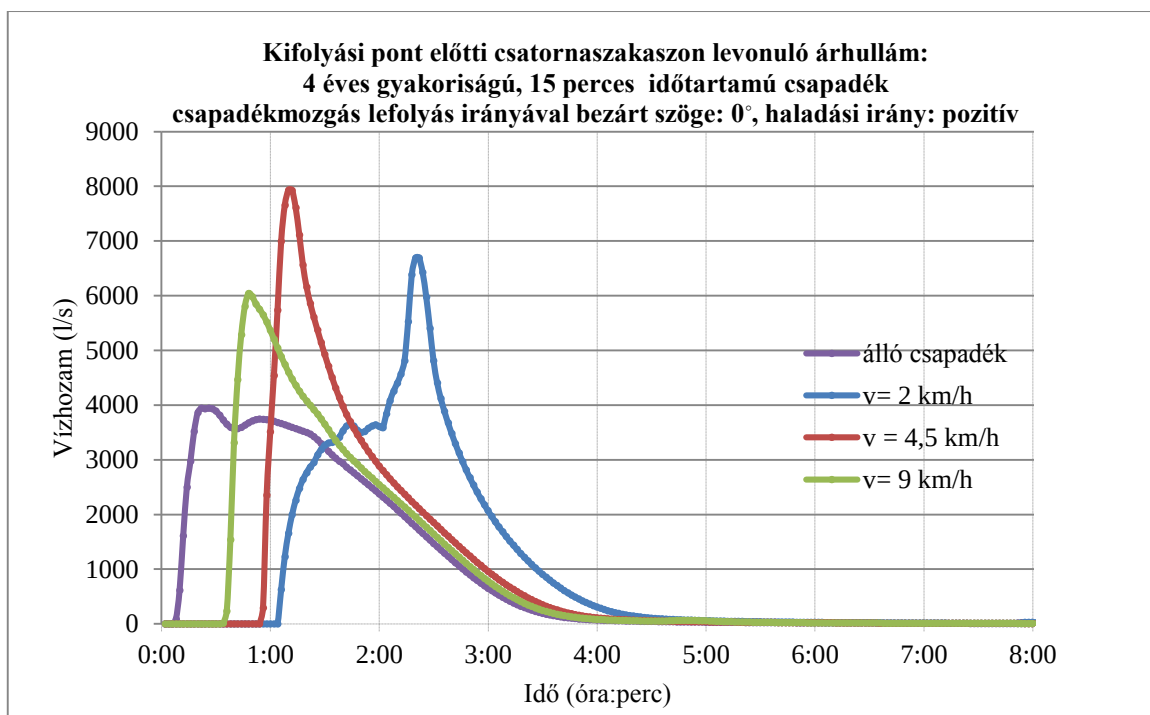
A következő ábrákon a vizsgált csatornaszakaszon az álló, illetve a mozgó csapadék események hatására keletkező árhullámok kerülnek bemutatásra. A **24 – 26. ábrák** a fő lefolyással 0 fokot bezáró, pozitív irányba mozgó csapadékok hatására levonuló árhullámokat mutatják be.



24. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0°, pozitív)



25. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0°, pozitív)

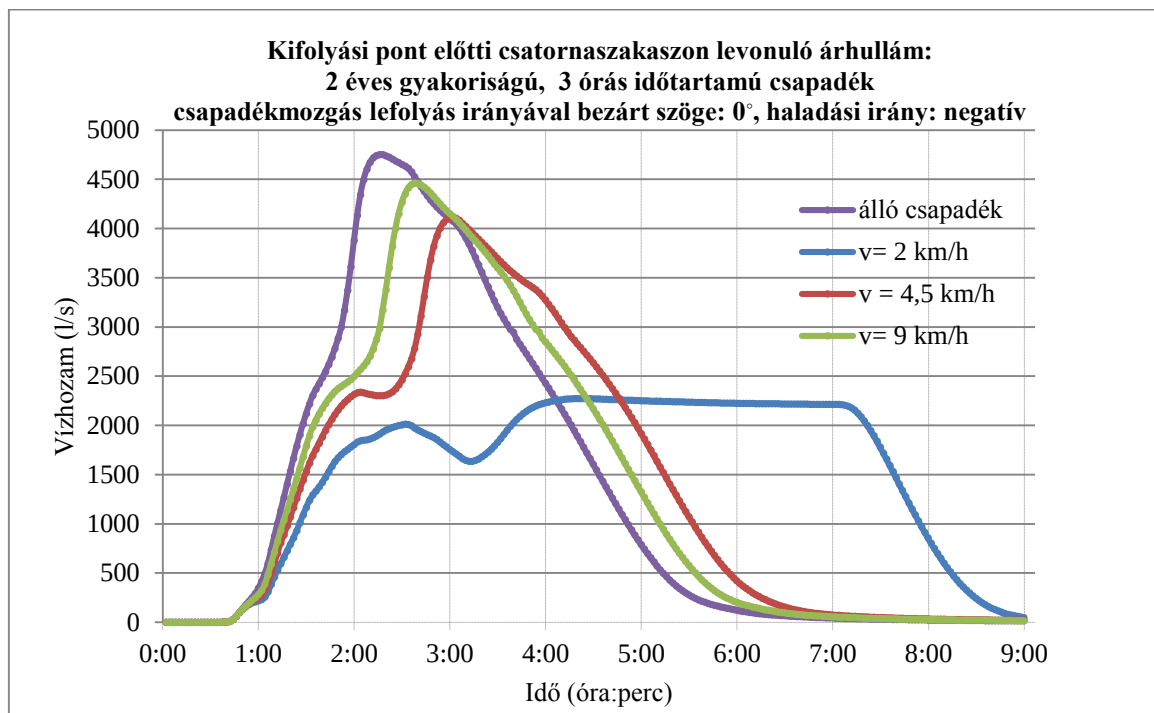


26. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (0°, pozitív)

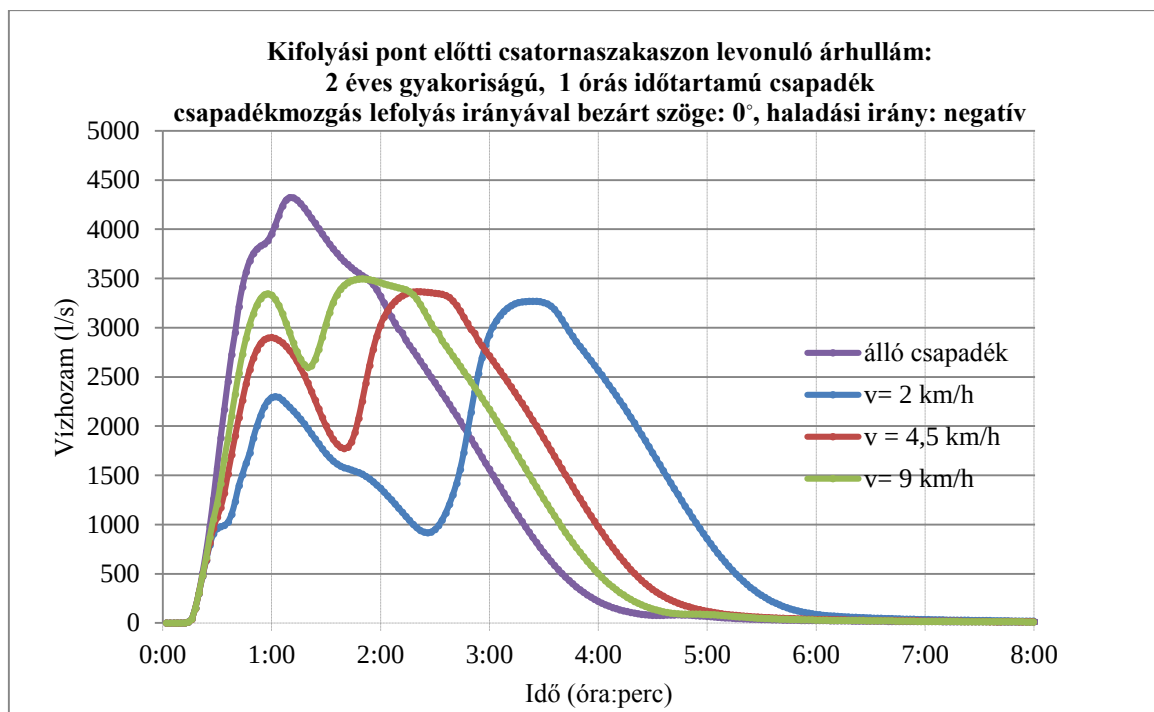
Az eredményekből a következőket állapíthatjuk meg. A **0 fokos tengelyen pozitív irányba** (vagyis a vízgyűjtő terület és a hálózat fő lefolyási irányába) mozgó csapadék esetén jól látható, hogy jelentős mértékben növekedtek az árhullám-csúcsok az álló csapadékokhoz képest, így a hagyományos tervezési módszer alkalmazásával *alulbecsülnénk* a keletkező legnagyobb vízhozamokat. Ez bármely mozgatott modelleszapadék esetén igaznak bizonyult. Továbbá minél kisebb a mozgatott csapadék időtartama, annál nagyobb csúcs jött létre. A sebességek hatására bekövetkező változások vizsgálatából megállapítható, hogy az a mozgási sebesség okozza a legnagyobb vízhozamot, amelyik leginkább harmonizál a hálózati lefolyás átlagos sebességével, vagyis a 4,5 km/h-s. A legkritikusabb eset az, amikor a 4 éves gyakoriságú, 15 perces időtartamú csapadék 4,5 km/h sebességgel halad végig a vízgyűjtő felett, mert ilyenkor közel kétszer akkora árhullám-csúcs keletkezik, mint az azonos csapadék esemény állónak feltételezésével (**24 – 26. ábrák**).

A maximális vízhozamok megjelenési időpontjai alapján megállapítható, hogy minden esetben később jelentkezték a csúcsok, mint az álló csapadék esetén. Minél kisebb a szélesség és minél kisebb a csapadék időtartama, annál nagyobb az álló és mozgó csapadék felfutási időpontja közötti különbség. Ez a 4 éves gyakoriságú, 15 perces időtartamú csapadék 2 km/h-val való mozgás esetén majdnem 6,5-ször később jelentkező csúcsot jelent (**24 – 26. ábrák**).

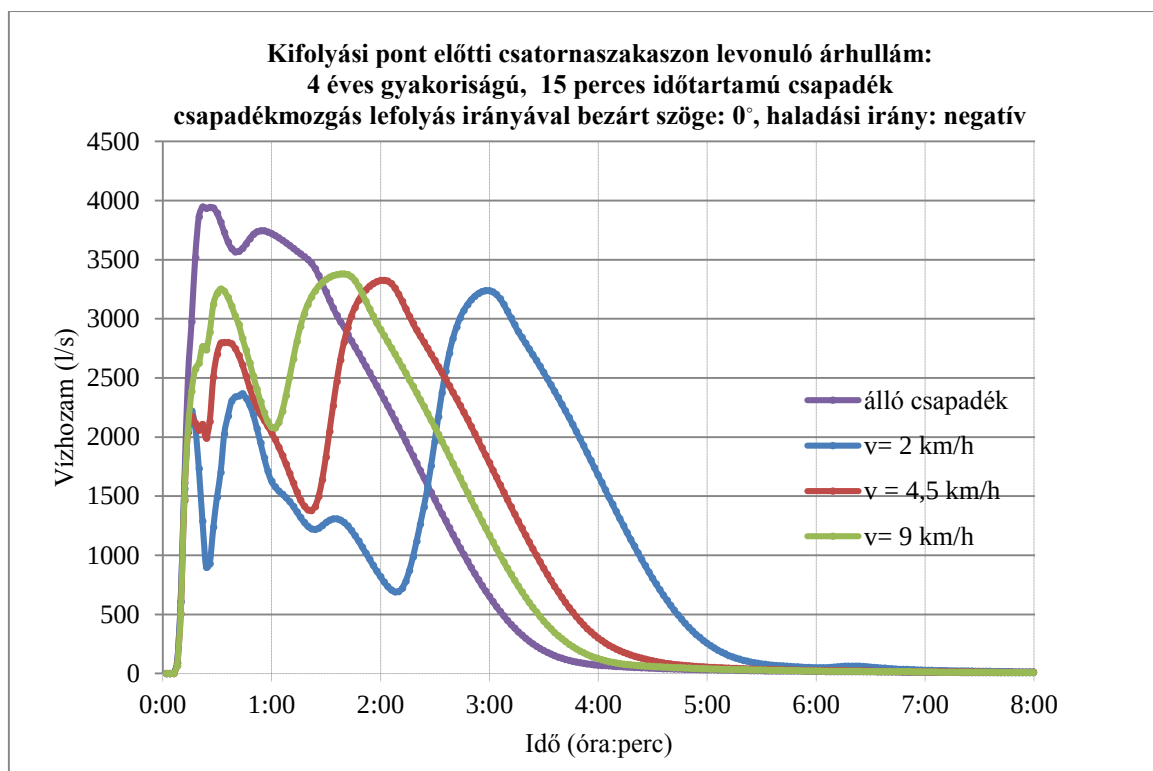
A 27 – 29. ábrák a fő lefolyással 0 fokot bezáró, negatív irányba mozgó csapadékok hatására levonuló árhullámokat mutatják be.



27. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0°, negatív)



28. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (0°, negatív)

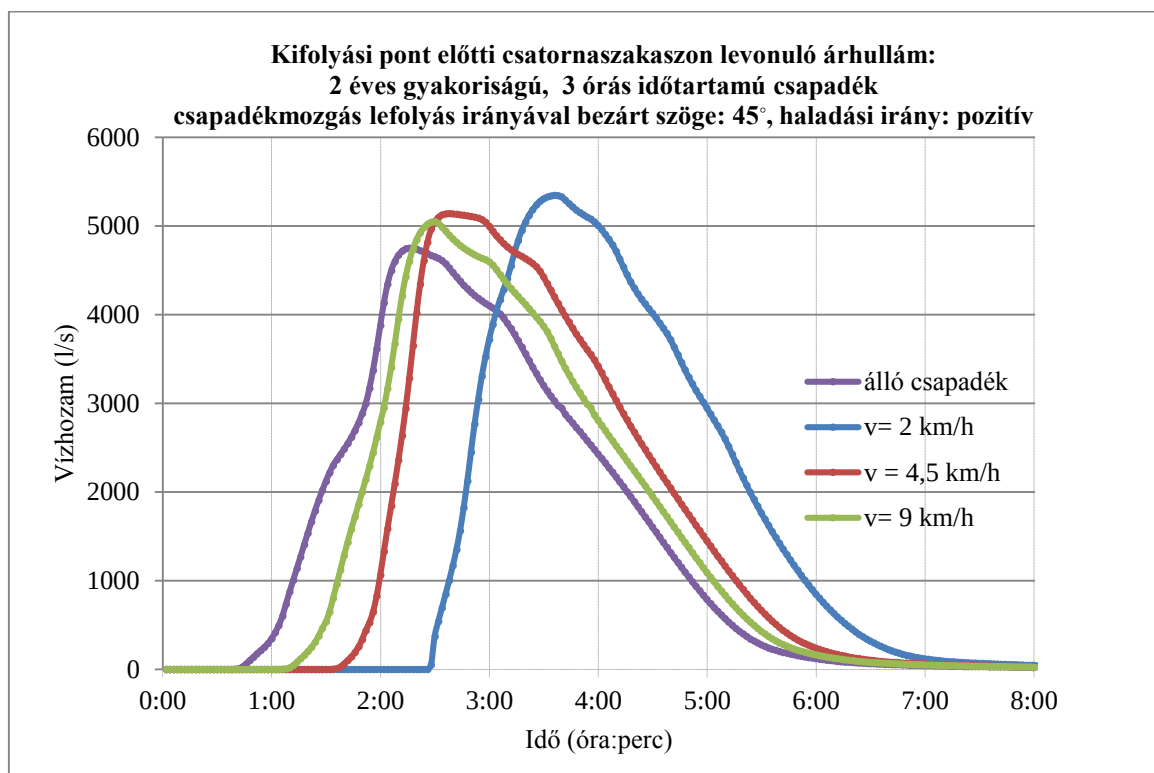


29. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (0°, negatív)

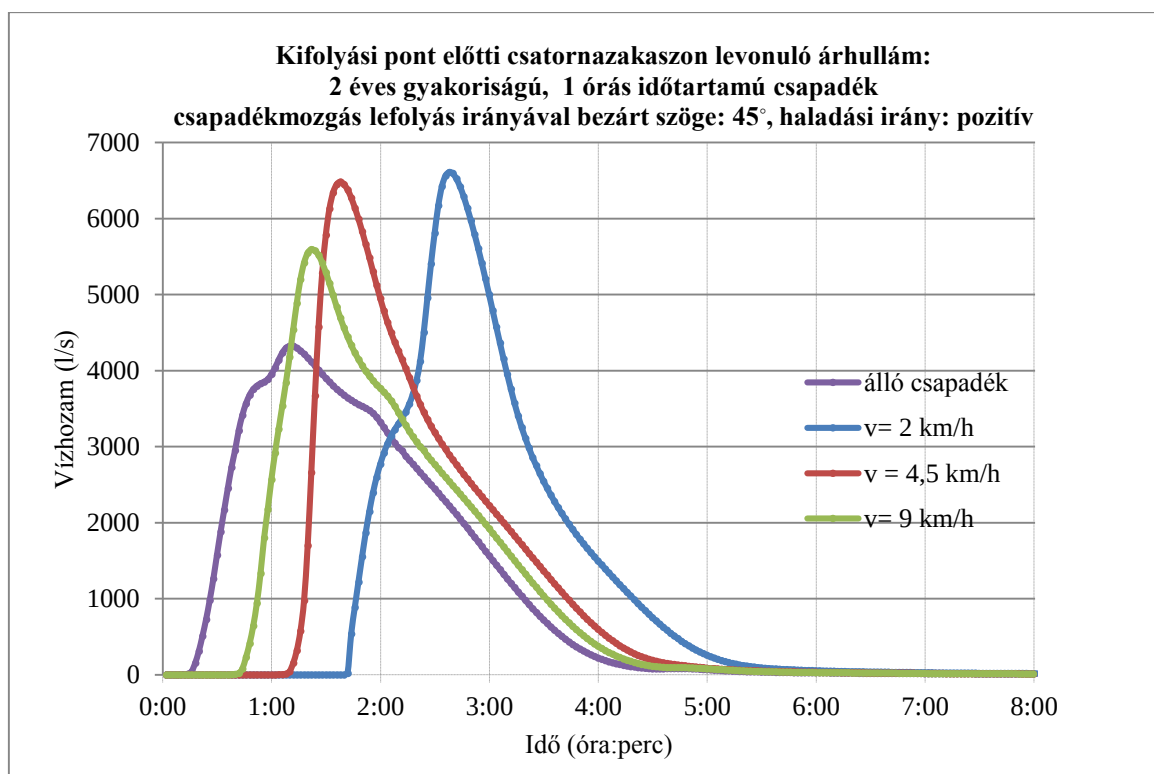
A **0 fokos tengelyen negatív irányba** (azaz a vízgyűjtő terület és a hálózat fő lefolyási irányával ellentétesen) mozgó csapadék eredményei azt mutatják, hogy ebben az esetben az álló csapadékkal történő méretezéssel a kialakult maximális vízhozamok *felülbecslése* történne. Bármely vizsgált modellcsapadék esemény, bármely szélességgel való mozgatása során a keletkező árhullám-csúcs kisebb, mint az álló csapadék esetén, átlagosan 10 – 20 %-kal. Ezen felül konstatálható, hogy minél kisebb a sebesség, annál kisebb a kialakult csúcs. A 2 éves visszatérési idejű, 3 órás csapadékból, 2 km/h-s mozgatási sebességgel közel fele akkora maximális vízhozam keletkezik, mint ugyanezen csapadék esemény állónak tekintése során. A legnagyobb csúcsot ugyanezen csapadék 9 km/h-s haladási sebessége esetén jött létre, ez már megközelíti az álló csapadék maximális értékét. Továbbá minél rövidebb a csapadék időtartama, annál kevésbé okoz eltérést az árhullám-csúcsok nagyságában a mozgatási sebesség változtatása (27 – 29. ábrák).

Ennél a mozgási iránynál a maximális vízhozamok később jelentek meg, mint az álló csapadéknál. Minél kisebb a csapadék időtartama és a sebessége, annál nagyobb lesz az álló és a mozgó csapadék árhullám felfutásának kezdő időpontja közti különbség. A csúcs a 4 éves gyakoriságú, 15 perces időtartamú csapadék és a 2 km/h-s szélesség esetén jelent meg legkésőbb (több mint 8-szor később) (27 – 29. ábrák).

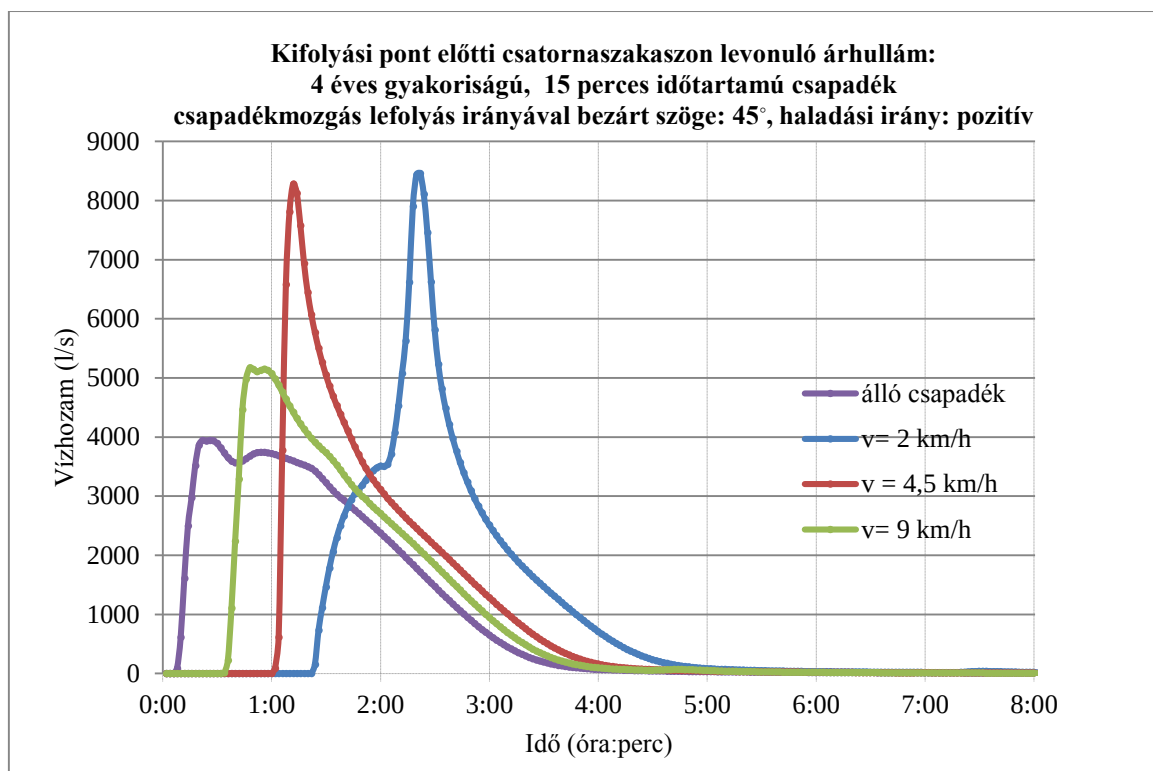
A **30 – 32. ábrák** a fő lefolyással 45 fokot bezáró, pozitív irányba mozgó csapadékok hatására levonuló árhullámokat mutatják be.



30. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45°, pozitív)



31. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45°, pozitív)



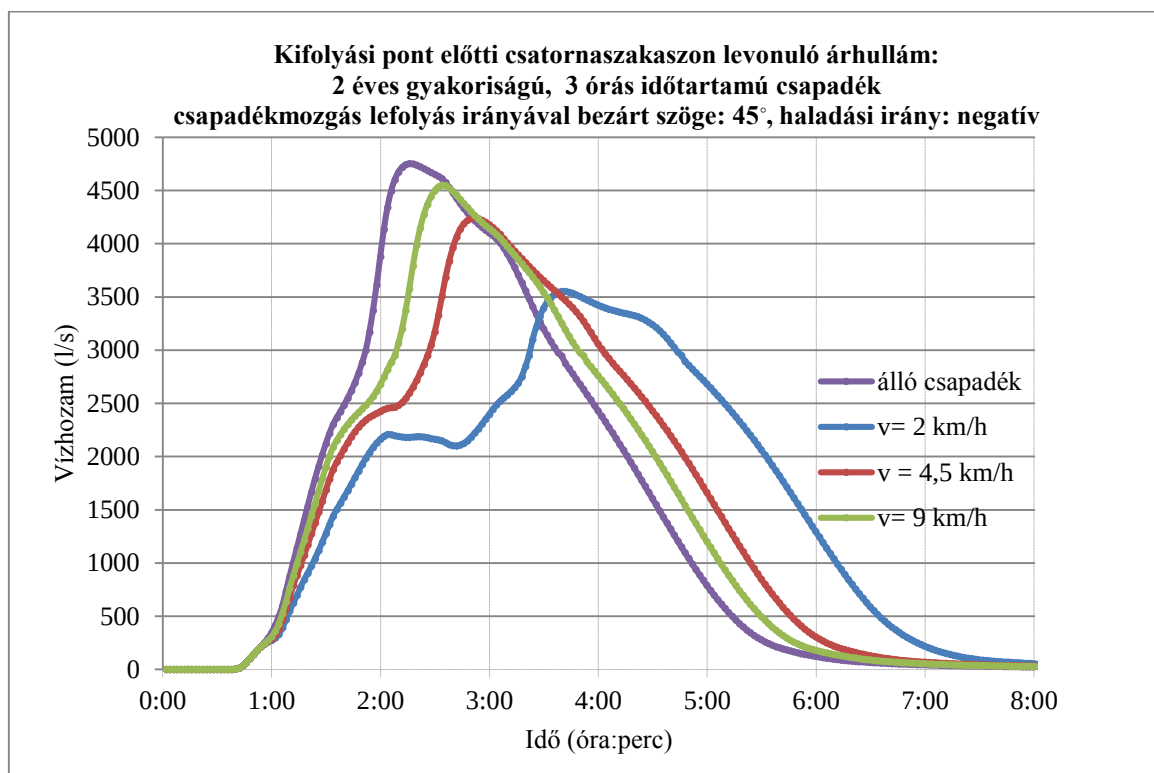
32. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (45°, pozitív)

A **45 fokos tengelyen való pozitív haladási irány** eredményei alapján megállapítható, hogy minél rövidebb a csapadék időtartama és minél a kisebb csapadékmozgás sebessége, annál nagyobb csúcs-vízhozam alakul ki. Tehát ebben az esetben ez azt jelenti, hogy a legnagyobb árhullám-csúcs a 4 éves gyakoriságú, 15 perces időtartamú csapadék 2 km/h-val való mozgataása során jelentkezett, pontosan 2,14-szerese, mint az álló csapadék esetén, amely már igen jelentős növekedésnek nevezhető. Mivel ez az irány is közelít még a terület és a hálózat fő lefolyási irányához, és ahogy a 0 fokos pozitív mozgási iránynál, itt is feltételezhetően az átlagos levonulási sebességgel való harmonizálás következtében keletkezik a 4,5 km/h-s sebességek esetén szignifikánsan nagy nagyságrendű csúcs.

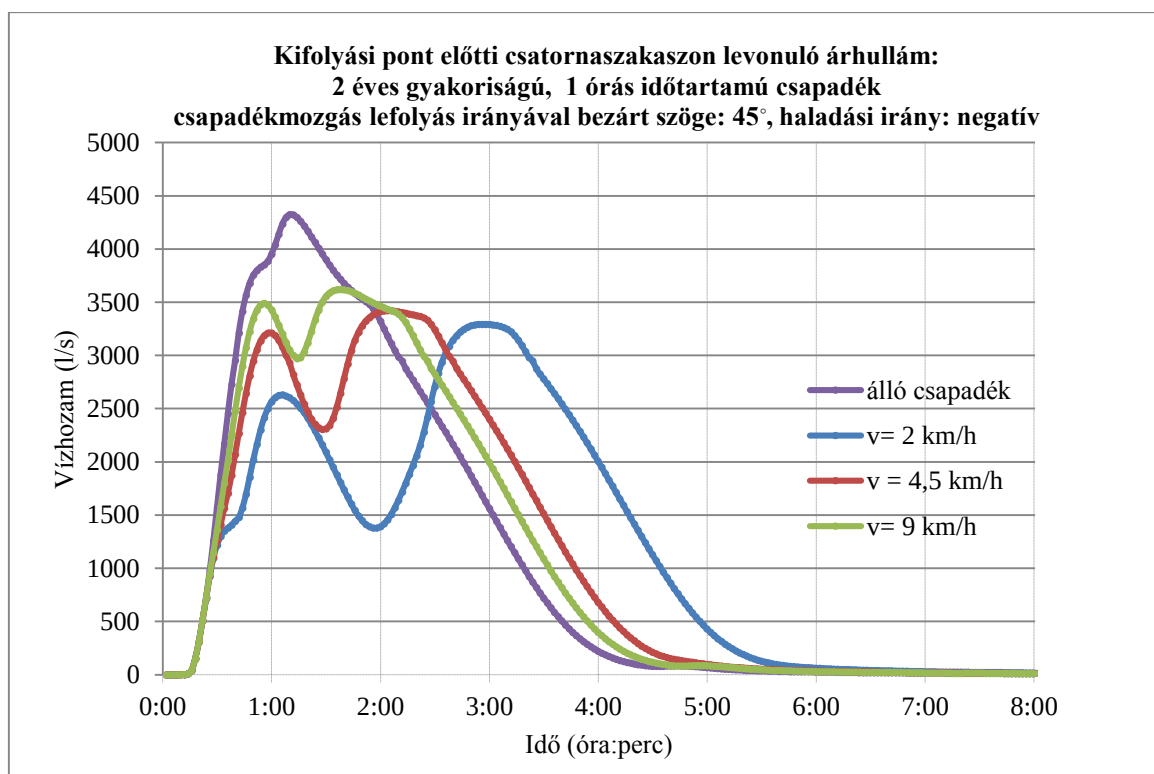
Belátható, hogy ha az összes részvízgyűjtő felett az álló csapadékot vennénk csak figyelembe, akkor nagymértékben *alulbecsülnénk* a valóságban kialakuló maximális vízhozamokat (**30 – 32. ábrák**).

Ahogy a 0 fokos tengelyen, itt is bármely modelles csapadék bármely szélsősebességgel való mozgataása során később jelentek meg a csúcsok, mint az álló esetében, és a legnagyobb eltolódást a 4 éves gyakoriságú, 15 perces időtartamú csapadék és a 2 km/h-s szélsősebesség adta (**30 – 32. ábrák**).

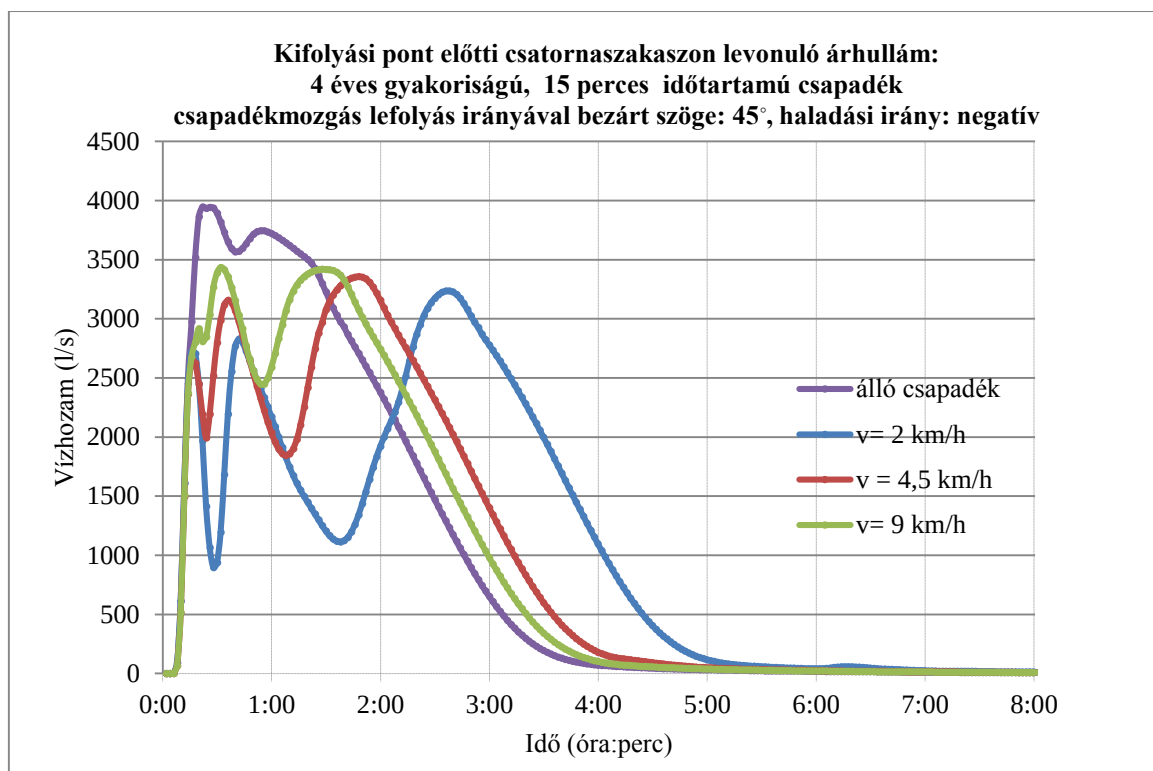
A 33 – 35. ábrák a fő lefolyással 45 fokot bezáró, negatív irányba mozgó csapadékok hatására levonuló árhullámokat mutatják be.



33. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45°, negatív)



34. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (45°, negatív)

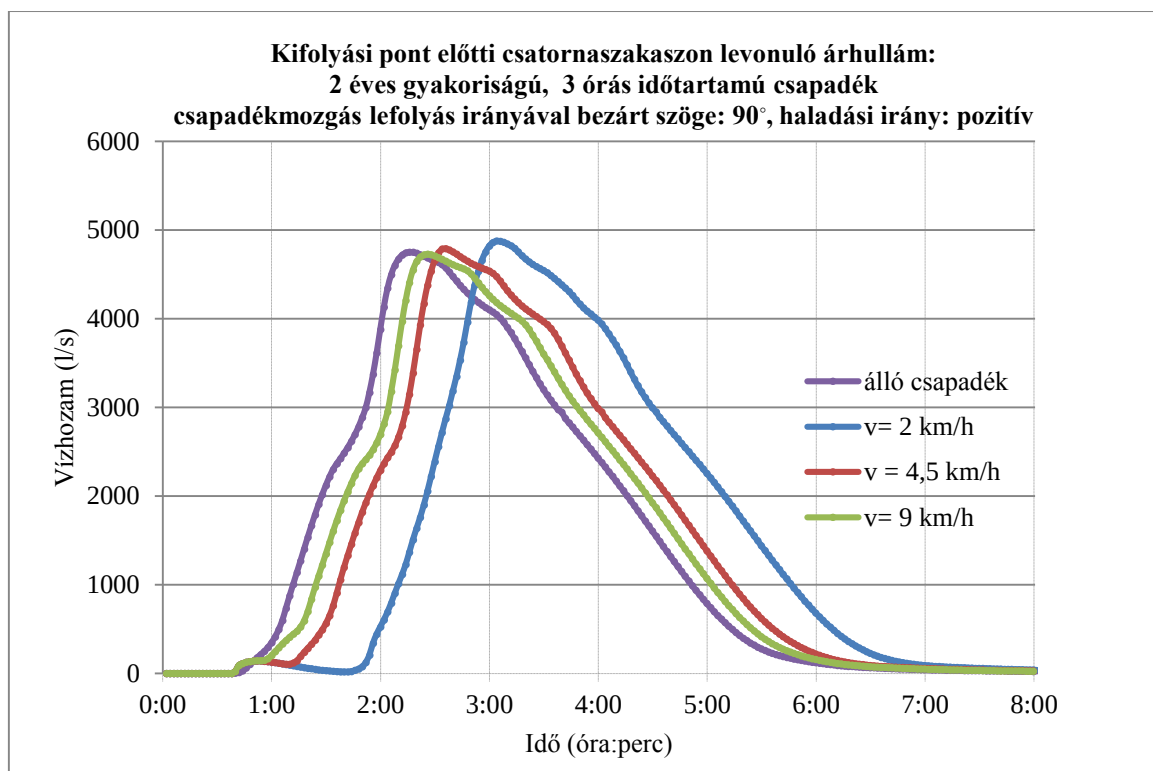


35. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (45°, negatív)

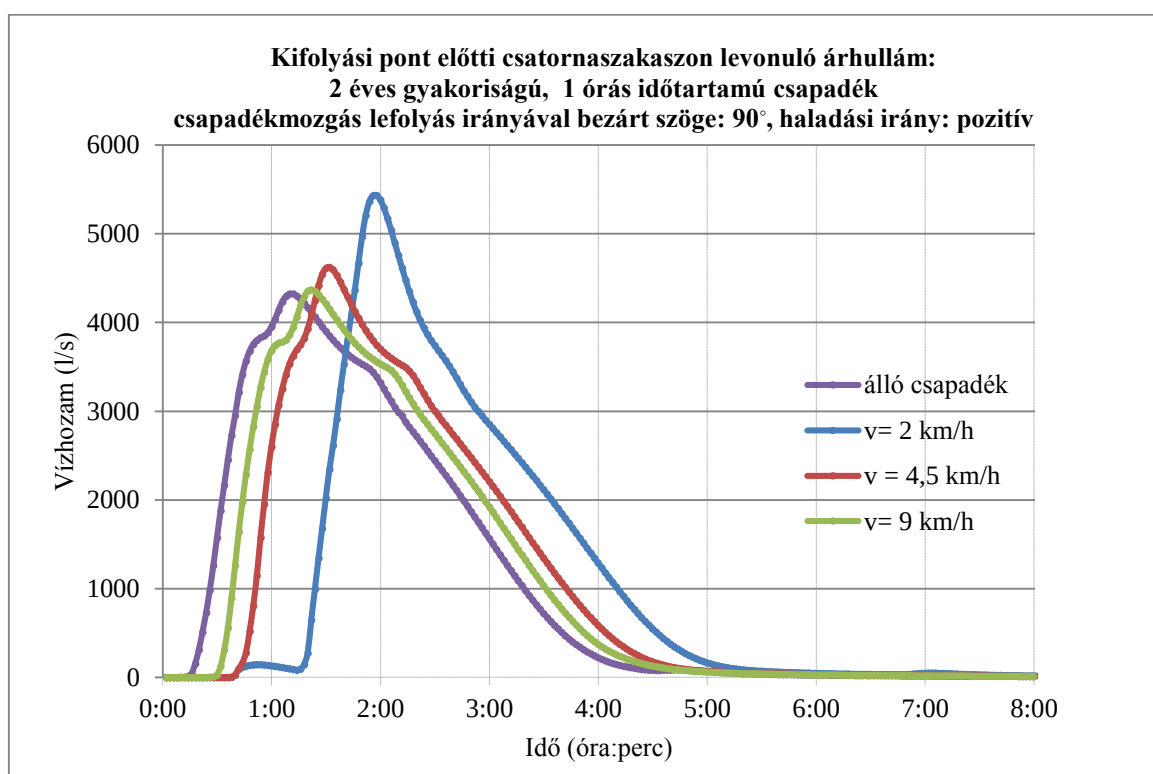
A **45 fokos tengely negatív irányú** csapadékmozgásánál – ugyanúgy, mint a 0 fokos tengely negatív irányánál – minden sebesség és csapadék esemény kombináció során kisebb árhullám-csúcs keletkezett, mint az álló csapadékoknál. Így ebben az esetben szintén *felülbecsülnénk* a maximális vízhozamot, ha csak az álló csapadékokat vennénk figyelembe. A legnagyobb csúcs a 2 éves gyakoriságú, 3 órás időtartamú és 9 km/h-val mozgó csapadéknál jött létre, amely így 4 %-kal kisebb, mint az állónál. A legkisebbet ugyanennek a modelleszapadéknak a 2 km/h-s mozgatásával kaptuk. Megfigyelhető még az is, hogy ha 2 km/h-val mozgott a csapadék, akkor a csökkenő csapadék időtartam növekvő árhullám-csúcsot generált, míg ez a 4,5 és 9 km/h-s szélső esetén pontosan fordítva alakult (**33 – 35. ábrák**).

Bármely modelleszapadék, bármely szélsősebességgel való mozgatása során később jelentek meg a csúcsok, mint az álló esetében, és a legnagyobb eltolódást itt is a 4 éves gyakoriságú, 15 perces időtartamú csapadék és a 2 km/h-s szélsősebesség adta, amely több mint 7-szer később jelentkező maximális vízhozamot eredményezett. Továbbá az is konstatálható, hogy minél rövidebb a csapadék hullási időtartama és minél kisebb sebességgel mozog, annál később jelentkezik a csúcs (**33 – 35. ábrák**).

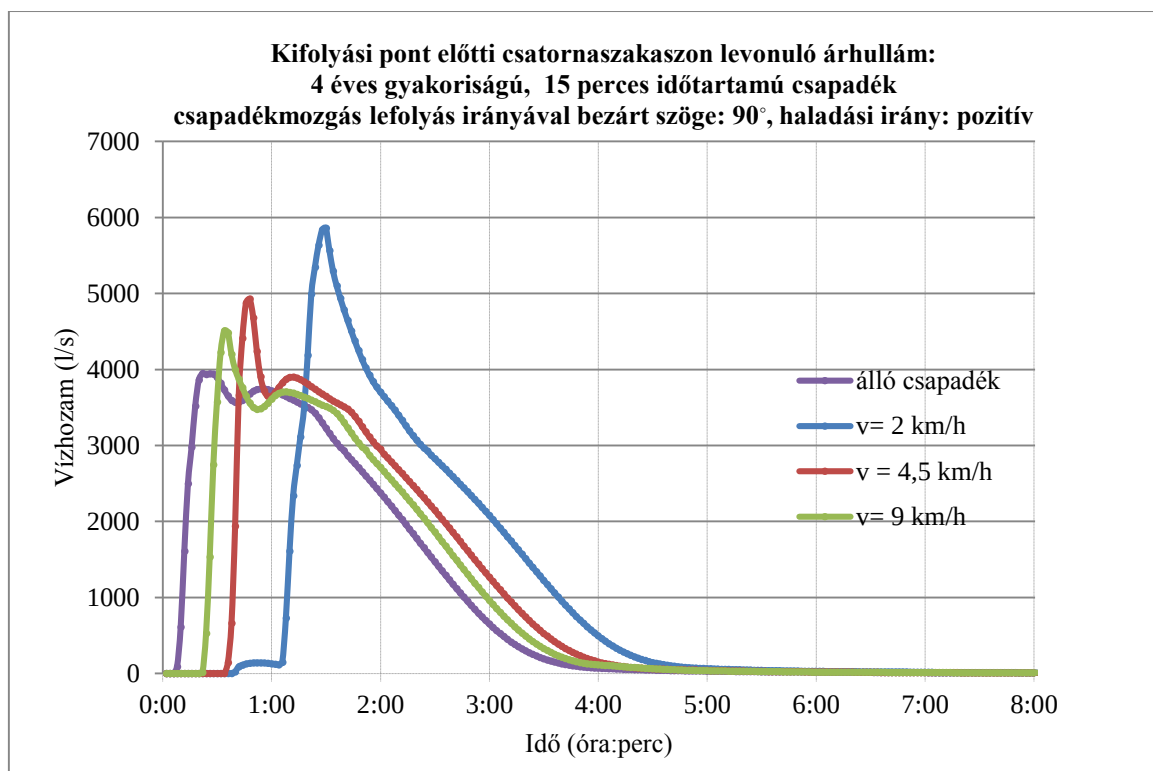
A **36 – 38. ábrák** a fő lefolyással 90 fokot bezáró, pozitív irányba mozgó csapadékok hatására levonuló árhullámokat mutatják be.



36. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90°, pozitív)



37. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90°, pozitív)

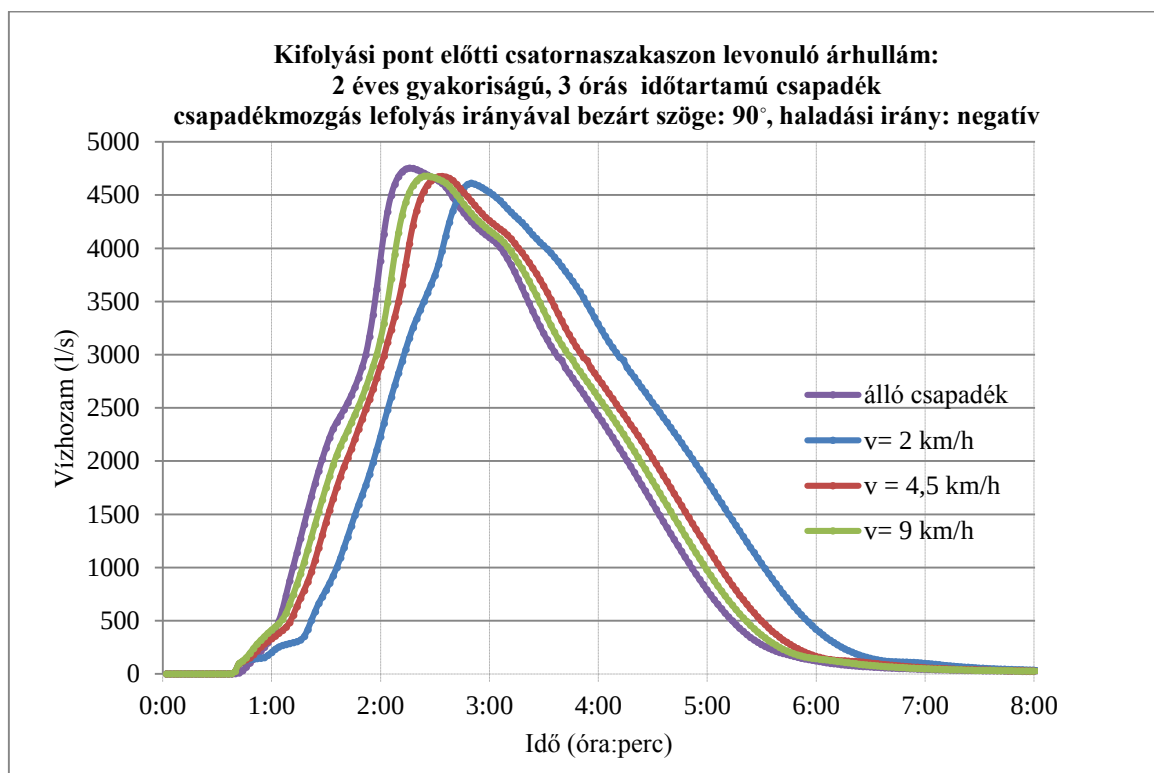


38. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (90°, pozitív)

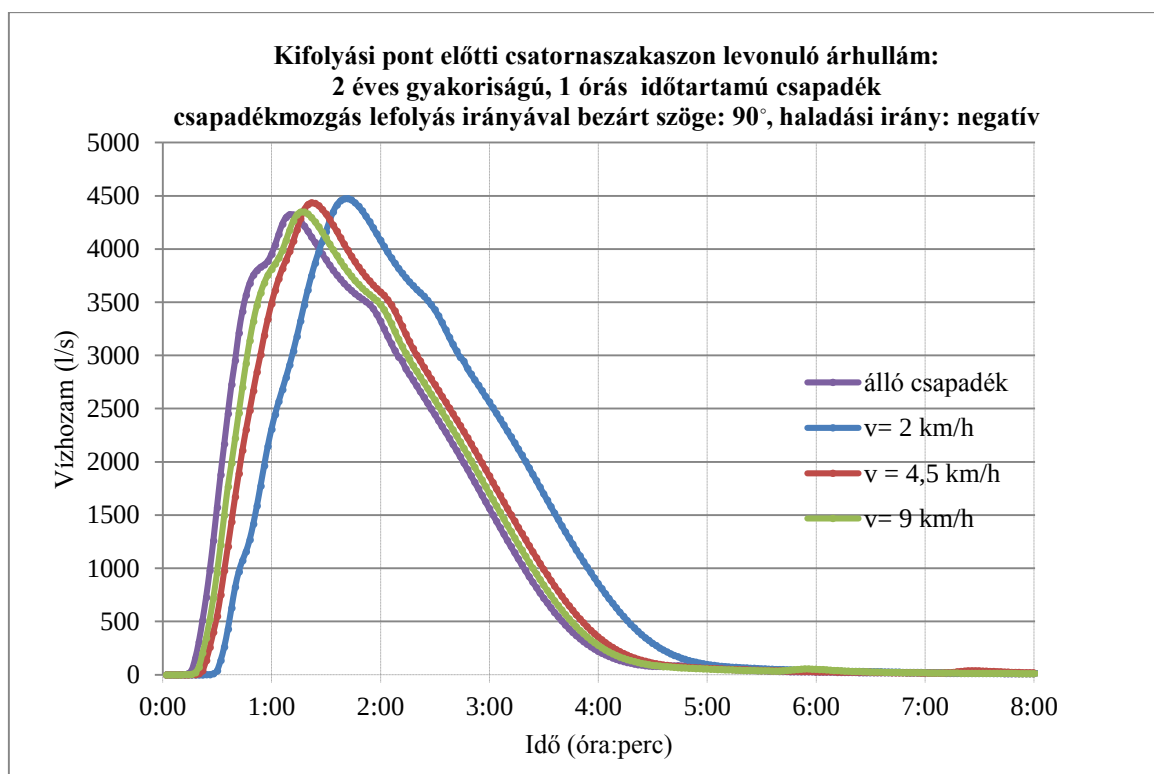
A **90 fokos tengelyen pozitív irányba** mozgó csapadék eredményeit megvizsgálva megállapítható, hogy egy esetet kivéve (a 2 éves gyakoriságú, 3 órás időtartamú csapadék, $v = 9$ km/h), a mozgó csapadékok nagyobb árhullám-csúcsot produkáltak, mint az álló. Tehát ebben az esetben is *alulbecsülnénk* a maximális vízhozamot, ha nem vennénk figyelembe a csapadék mozgásának hatását. Továbbá jól látható, hogy minél rövidebb a csapadék időtartama és minél kisebb a szélesség, annál nagyobb csúcs keletkezik. Így ebben az irányban a tervezés szempontjából a legkritikusabb a 4 éves visszatérési idejű, 15 perces 2 km/h-s sebességgel haladó csapadék volt, mely az álló csapadékhöz képest majdnem 1,5-szer nagyobb maximális vízhozamot generált (36 – 38. ábrák).

Az árhullámok csúcsai a mozgó csapadékok esetén később jelentkeztek, mint az álló csapadéknál, és megállapítható, hogy minél kisebb a sebesség, és minél rövidebb a csapadék időtartama, annál inkább késleltetve alakult ki a csúcs. Ebben az esetben is a 4 éves gyakoriságú, 15 perces időtartamú 2 km/h-s sebességgel haladó csapadék megjelenési időpontja tért el legnagyobb mértékben az álló csapadékétól (36 – 38. ábrák).

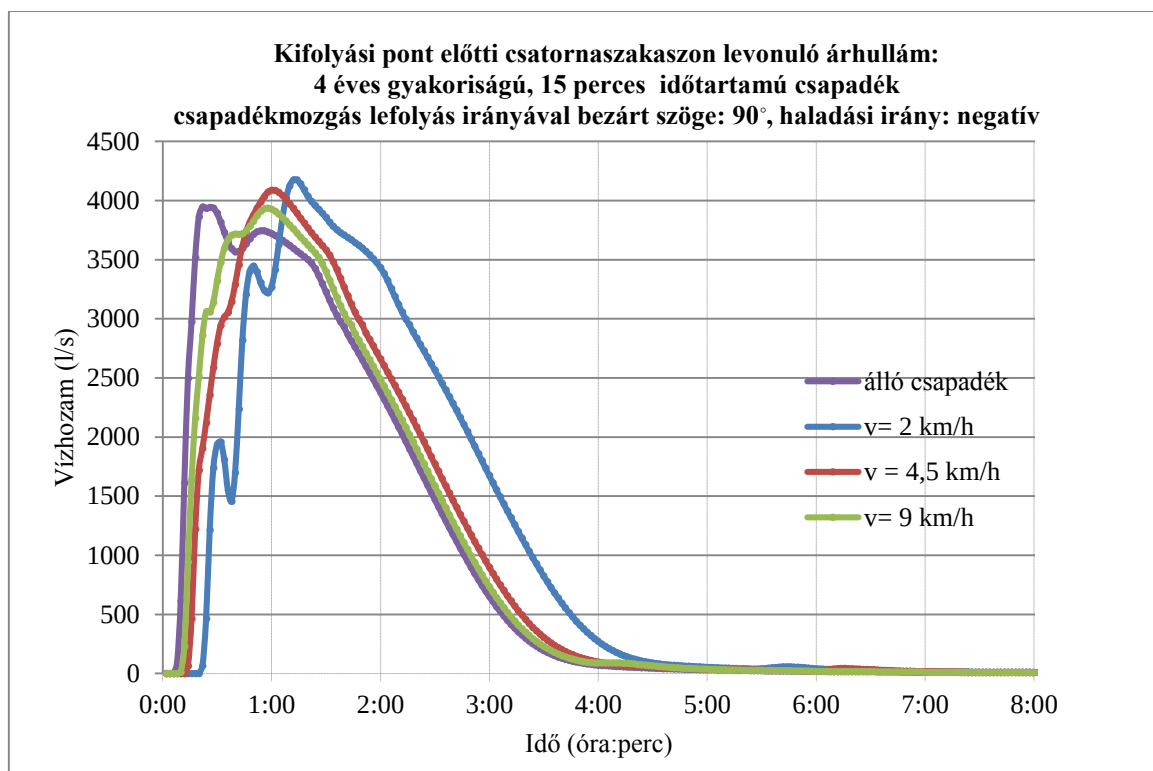
A 39 – 41. ábrák a fő lefolyással 90 fokot bezáró, negatív irányba mozgó csapadékok hatására levonuló árhullámokat mutatják be.



39. ábra. 2 éves gyakoriságú, 3 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90°, negatív)



40. ábra. 2 éves gyakoriságú, 1 órás csapadék hatására levonuló árhullám (90°, negatív)



41. ábra. 4 éves gyakoriságú, 15 perces csapadék hatására levonuló árhullám (90°, negatív)

Megállapítható, hogy a **90 fokos tengelyen való negatív mozgási irány**nál a csapadék időtartama szerint eltérő jelenségeket figyelhetünk meg. A két rövidebb időtartamú modellcsapadéknál, azaz a 15 percesnél és az 1 órásnál, minél kisebb a szélesség, annál nagyobb árhullám-csúcs keletkezik, továbbá ez a csúcs nagyobb (vagy közel akkora), mint az álló csapadéké. Viszont az eltérés nem jelentős mértékű. Ezzel szemben a 2 éves gyakoriságú, 3 órás időtartamú csapadéknál minél nagyobb a sebesség, annál nagyobb maximális vízhozam alakul. Ezek kisebbek az álló csapadék csúcsértékénél, azonban az eltérés itt sem jelentős mértékű. Konstatálható, hogy rövidebb időtartamú csapadékok esetén már pozitív irányként „viselkedik” a mozgástengely, és ezzel magyarázhatók a különböző időtartamú csapadékok eltérő folyamatai. Összefoglalva megállapítható, hogy ebben az irányban *nincs szignifikáns különbség* az álló csapadék és a különböző sebességekkel mozgatott csapadékokkal végzett szimulációk eredményei között (39 – 41. ábrák).

A maximális vízhozamok minden esetben később alakultak ki, mint az álló csapadékoknál. Minél kisebb a szélesség, és minél rövidebb a csapadék időtartama, annál nagyobb az időbeli eltolódás. Tehát itt is a 4 éves visszatérési idejű, 15 perces időtartamú és 2 km/h-val mozgó csapadék csúcsa jelenik meg a legkésőbb. (39 – 41. ábrák).

4.2 A vízgyűjtő alak szerepének vizsgálata

Az előző fejezetben (4.1. fejezet) egy fiktív vízgyűjtőn és annak csatornahálózatán vizsgáltuk a csapadékmozgás hatását a csatornahálózaton levonuló árhullámokra. Továbbá feltételeztük, hogy a vízgyűjtő alakjának és méretének is befolyása lehet a kapott eredményekre. Ezért ebben a fejezetben különböző egyszerűsített vízgyűjtő alakokon végzett vizsgálatok eredményeit mutatjuk be.

Mivel a különböző vízgyűjtő alakok esetén olyan eredményekre volt szükségünk, melyek összehasonlíthatóak, ezért a vízgyűjtők összterületét és az egyéb vízgyűjtő- és hálózati paramétereket (részvízgyűjtők területe, vízzárósága, a csatornahálózat csőátmérője, esése, stb.) azonosnak vettük fel a különböző vízgyűjtő alakokhoz tartozó modellek esetén. Eltérő nagyságú vízgyűjtő területet csak egy rövid elemzéshez, a vízgyűjtő méret szerepének bemutatására vizsgáltunk.

Ebben az esetben csak egy - a fiktív vízgyűjtőn a három vizsgált modelles csapadék közül a legnagyobb árhullám-csúcsokat generáló – csapadék eseményt, a 4 éves gyakoriságú és 15 perces időtartamú modelles csapadékot mozgattuk a vízgyűjtők felett, a hálózat fő lefolyási irányával megegyező irányba. A sebességeknek szélesebb tartományát (0,5 km/h -50 km/h) tanulmányoztuk, hogy átfogóbb képet kapjunk az árhullám-csúcs sebesség szerinti változásáról. Az árhullám-csúcsokat az egyes vízgyűjtők kifolyási pontja előtti csatornaszakaszán elemeztük ki.

Az **6 -7. táblázatok** az azonos területű (16 km²), de különböző alakú vízgyűjtők esetén kapott eredményeket foglalják össze. A táblázat rózsaszínnel kiemelt mezői az álló- és mozgó csapadékból generálódott árhullám-csúcsok legnagyobb különbségét mutatják.

Hossz h (km)	Szélesség d (km)	h/d (-)	Álló/ mozgó	Sebesség v (km/h)	Árhullám- csúcs Q ^{csúcs} (l/s)	Q ^{csúcs} mozgó/Q ^{csúcs} álló (-)	Q ^{csúcs} mozgó/ Q ^{csúcs} állónégyzet (-)
Vízgyűjtő alak: N-négyzet (Terület=16km ²)							
4	4	1	álló	-	9339	1.00	1.00
4	4	1	mozgó	50	9505.55	1.02	1.02
4	4	1	mozgó	27	9626	1.03	1.03
4	4	1	mozgó	13.5	9856	1.06	1.06
4	4	1	mozgó	7	10431	1.12	1.12
4	4	1	mozgó	3.5	11915	1.28	1.28
4	4	1	mozgó	2	14104	1.51	1.51
4	4	1	mozgó	1	17130.37	1.83	1.83
4	4	1	mozgó	0.7	14677.42	1.57	1.57
4	4	1	mozgó	0.5	6585.37	0.71	0.71
Vízgyűjtő alak: T1-téglalap (Terület=16km ²)							
6	2.7	2.2	álló	-	7287.4	1.00	0.78
6	2.7	2.2	mozgó	50	7464.38	1.02	0.80
6	2.7	2.2	mozgó	27	7608.76	1.04	0.81
6	2.7	2.2	mozgó	13.5	7849.29	1.08	0.84
6	2.7	2.2	mozgó	7	8248	1.13	0.88
6	2.7	2.2	mozgó	3.5	9663	1.33	1.03
6	2.7	2.2	mozgó	2	12059	1.65	1.29
6	2.7	2.2	mozgó	1	15564.57	2.14	1.67
6	2.7	2.2	mozgó	0.7	9618.18	1.32	1.03
6	2.7	2.2	mozgó	0.5	3936.37	0.54	0.42
Vízgyűjtő alak: T2-téglalap (Terület=16km ²)							
8	2	4	álló	-	5994	1.00	0.64
8	2	4	mozgó	50	6158.06	1.03	0.66
8	2	4	mozgó	27	6290	1.05	0.67
8	2	4	mozgó	13.5	6502.00	1.08	0.70
8	2	4	mozgó	7	6881	1.15	0.74
8	2	4	mozgó	3.5	8264	1.38	0.88
8	2	4	mozgó	2	10674.75	1.78	1.14
8	2	4	mozgó	1	14234.43	2.37	1.52
8	2	4	mozgó	0.7	7954.49	1.33	0.85
8	2	4	mozgó	0.5	2787.88	0.47	0.30

6. táblázat Vizsgált egyszerűsített négyzet és téglalap alakú vízgyűjtők eredményei

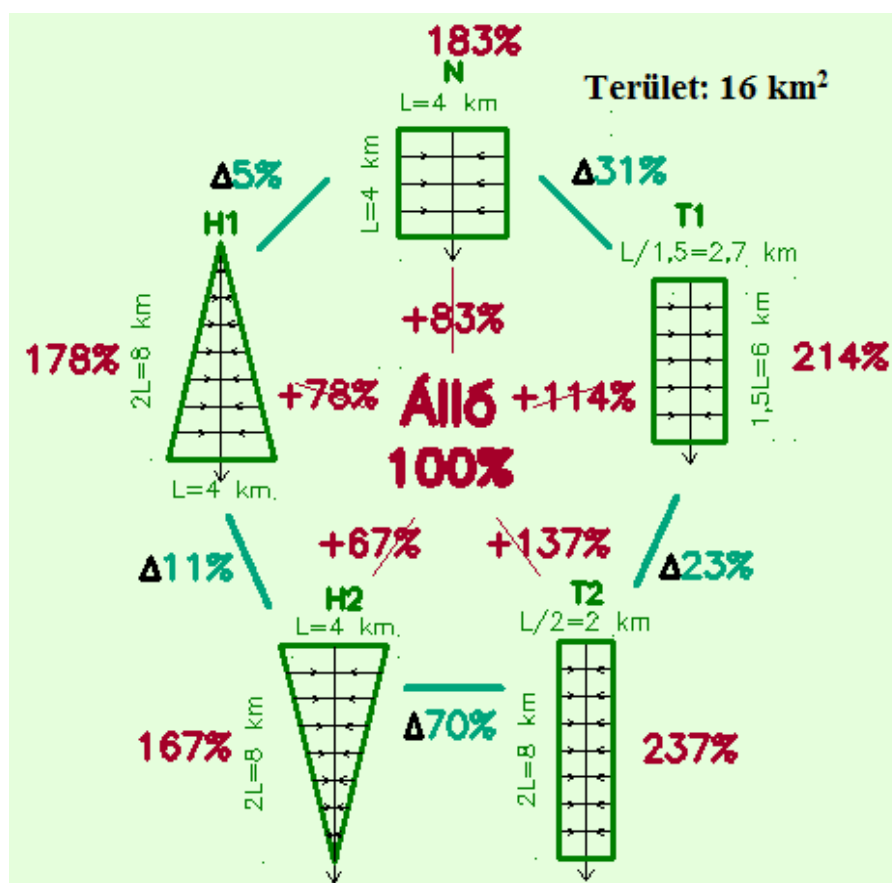
Hossz h (km)	Szélesség d (km)	h/d (-)	Álló/ mozgó	Sebesség v (km/h)	Árhullám- csúcs Q ^{csúcs} (l/s)	Q ^{csúcs} mozgó/Q ^{csúcs} álló (-)	Q ^{csúcs} mozgó/ Q ^{csúcs} állónégyszet (-)
Vízgyűjtő alak: H1-háromszög (Terület=16km ²)							
8	4	2	álló	-	9209.77	1.00	0.99
8	4	2	mozgó	50	9380.99	1.02	1.00
8	4	2	mozgó	27	9509.57	1.03	1.02
8	4	2	mozgó	13.5	9751.33	1.06	1.04
8	4	2	mozgó	7	10328.64	1.12	1.11
8	4	2	mozgó	3.5	11773.99	1.28	1.26
8	4	2	mozgó	2	13921.77	1.51	1.49
8	4	2	mozgó	1	16407.33	1.78	1.76
8	4	2	mozgó	0.7	11444.92	1.24	1.23
8	4	2	mozgó	0.5	5910.84	0.64	0.63
Vízgyűjtő alak: H2-háromszög (Terület=16km ²)							
8	4	2	álló	-	6781.99	1.00	0.73
8	4	2	mozgó	50	6852.49	1.01	0.73
8	4	2	mozgó	27	6913.98	1.02	0.74
8	4	2	mozgó	13.5	7061.43	1.04	0.76
8	4	2	mozgó	7	7327.47	1.08	0.78
8	4	2	mozgó	3.5	7954.49	1.17	0.85
8	4	2	mozgó	2	8891.98	1.31	0.95
8	4	2	mozgó	1	11331.72	1.67	1.21
8	4	2	mozgó	0.7	7396.12	1.09	0.79
8	4	2	mozgó	0.5	4821.94	0.71	0.52

7. táblázat Vizsgált egyszerűsített egyenlő oldalú háromszög alakú vízgyűjtők eredményei

A 6. és 7. táblázat eredményei alapján megállapítható, hogy a vízgyűjtő alakja is jelentős mértékben befolyásolhatja azt, hogy mekkora árhullám-csúcs vonul le a hálózatban, illetve hogy az állónak feltételezett és a mozgatott csapadék események hatására kialakuló csúcs-vízhozamok között mekkora eltérés tapasztalható.

A négyzet és a két téglalap alakú vízgyűjtő esetén két fontos dolgot figyelhetünk meg. A négyzetes alaknál (N) jelentkeztek a csatornahálózatban a legnagyobb vízhozamok, és ahogy nyúlt és keskenyedett a vízgyűjtő alak (h-hossz nőtt, d-szélesség csökkent), úgy csökkentek ezek. Ezzel szemben az álló csapadék és a mozgó csapadék közötti eltérés pont fordítva változott. A legnagyobb különbség a T2-es, azaz a leghosszabb (8 m) és legkeskenyebb (2 m) téglalap alakú vízgyűjtőnél adódott, ahol az álló- és mozgó csapadékból létrejövő maximális árhullám-csúcsok eltérése 137 %-ra adódott, ugyanez a T1-es vízgyűjtő alak esetén 114%, míg a négyzet alakúnál 83 %.

A vízgyűjtő alakok hatása a következő ábrán látható, melyen az egyes egyszerűsített vízgyűjtő alakoknál az álló csapadékkal (100%) futtatott szimulációból kapott árhullám-csúcs és a mozgó csapadékból kialakuló legnagyobb maximális vízhozam különbsége kerül bemutatásra.



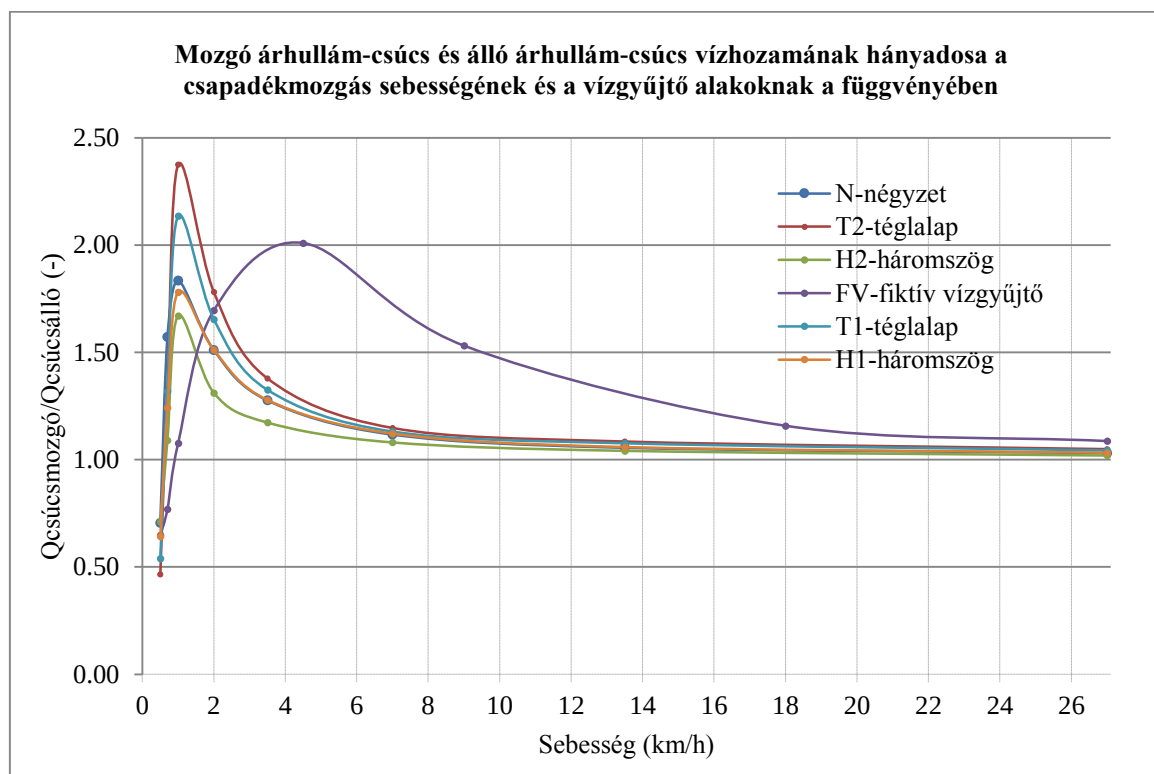
42.ábra Egyszerűsített vízgyűjtő alakok hatásának összehasonlítása

A 7. táblázat eredményeiből és a 42. ábra alapján konstatálható, hogy az egyenlő oldalú háromszög vízgyűjtő alakok is jelentős mértékben befolyásolták a hálózaton levonuló árhullám-csúcsokat. Az is látható, hogy hiába egyezik meg az alakjuk és minden egyéb méretük, paraméterük, az eredményekben szignifikáns eltérés mutatkozott. A különbség oka az, hogy míg a H1 jelű egyenlő oldalú háromszög alapja a kifolyási pontnál, addig a H2-es háromszög alapja pont az ellentétes oldalon helyezkedik el. Így a H1-es jelű vízgyűjtő terület esetén jelentősen nagyobb árhullám-csúcsok alakultak ki. Az álló csapadékhöz viszonyítva a mozgó csapadékok hatására kialakuló maximális vízhozamok is nagyobb különbséget mutatnak, amely az 1 km/h-s csapadék mozgási sebességnél a H1-es jelű vízgyűjtőnél $+78\%$, míg a H2-es jelűnél csupán $+67\%$.

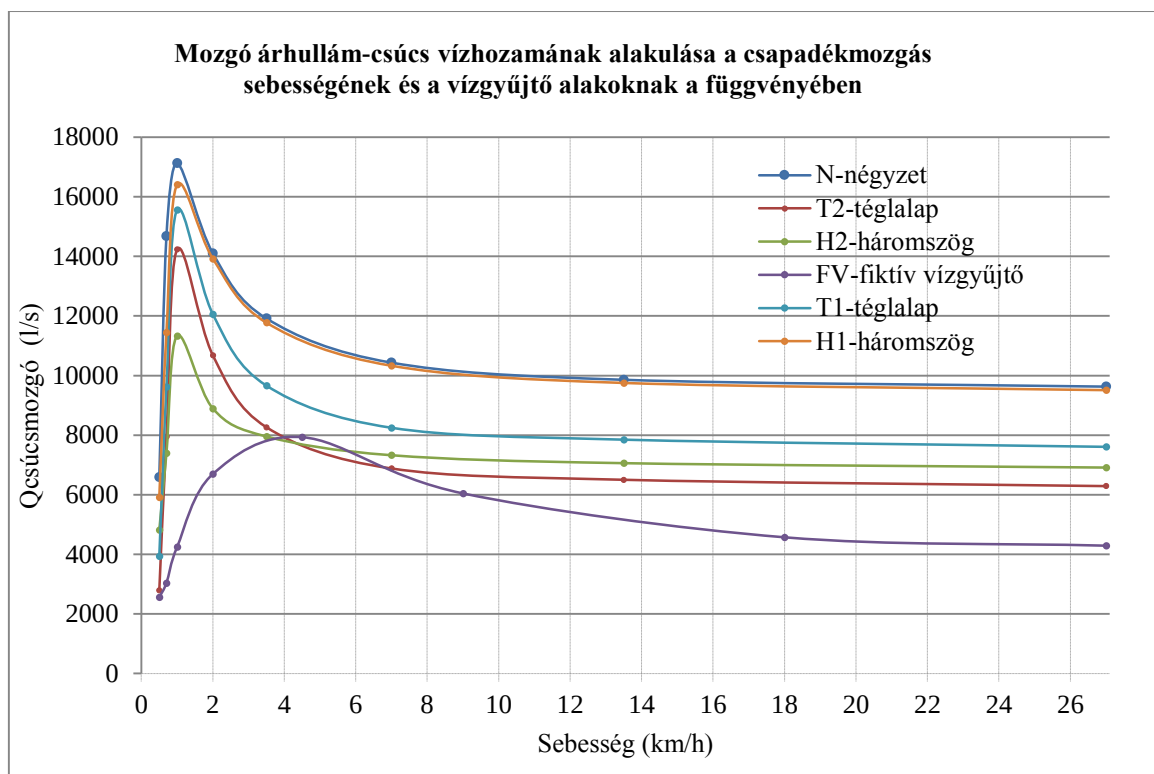
Ezek mellett a H1-es háromszög alakú vízgyűjtő alaknál megfigyelhető, hogy a kapott eredmények nagymértékben hasonlítanak a négyzet (N) alakú vízgyűjtő eredményeihez.

A **sebességek** széles tartományával (0,5-50 km/h) mozgatott csapadékkal vizsgáltuk a kialakuló árhullám-csúcsokat. Minden vizsgált vízgyűjtő esetén igaznak bizonyult, hogy *annál a csapadék mozgási sebességénél alakult ki a legnagyobb maximális vízhozam, amely leginkább harmonizált a hálózati lefolyás átlagos levonulási sebességével*. Ez a fiktív vízgyűjtőnél 4,5 km/h, míg az egyszerűsített vízgyűjtő alakoknál 1 km/h volt. Az ezeknél nagyobb, illetve kisebb sebességgel mozgatott csapadék esetén az árhullám-csúcsok fokozatos csökkenését tapasztaltuk. Az álló csapadék eseménnyel futtatott szimulációk során kapott maximális vízhozam értékeket leginkább a legnagyobb vizsgált csapadék mozgási sebesség (50 km/h) és az alacsonyabb sebesség tartományban (0,5-0,7 km/h) mozgó sebességek által generált árhullám-csúcsok közelítették meg.

A **43. ábrán** a mozgó árhullám-csúcsok és az álló árhullám-csúcsok vízhozamának hányadosát, a **44. ábrán** pedig a mozgó árhullám-csúcsok vízhozamának alakulását ábrázoltuk a csapadékmozgás sebességének és a vízgyűjtő alakjának a függvényében.



43. ábra Mozgó árhullám-csúcs és álló árhullám-csúcs vízhozamának hányadosa a csapadékmozgás sebességének és a vízgyűjtő alakjának a függvényében



44. ábra Mozgó árhullám-csúcs vízhozamának alakulása a csapadékmozgás sebességének és a vízgyűjtő alakoknak a függvényében

A **43. és 44. ábrán** jól látszik, hogy a vizsgált egyszerűsített vízgyűjtő alakok közül a legnagyobb árhullám-csúcsot a négyzet alakú vízgyűjtő generálta. Ezzel szemben az álló csapadékhoz viszonyítva a mozgó csapadék hatására kialakuló árhullám-csúcsok közül a legnagyobb eltérést, vagyis közel 2,5-ször (2,37) nagyobb csúcsértéket a T2-es jelű (a leghosszabb, legkeskenyebb) téglalap alakú vízgyűjtőnél figyeltünk meg, a hálózati lefolyás átlagos levonulási sebességével megegyező sebességnél (1 km/h).

A vízgyűjtő alak és a csapadék mozgási sebességek szerepének elemzése mellett egy rövidebb vizsgálat keretében tanulmányoztuk a **vízgyűjtő terület méretének** hatását a csatornahálózatban kialakuló árhullámokra. Ehhez az előzőleg vizsgált téglalap alakú vízgyűjtő modellt (T1- 16 km²) és két fele akkora területű (8 km²), de ezzel közel megegyező hossz-szélesség (2:1) arányú vízgyűjtő területet elemeztünk. A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy *az alak mellett a méret is befolyással bír(hat) a levonuló maximális vízhozamok nagyságára*. Azonos alak és hossz-szélesség arány mellett a nagyobb területű (T1) vízgyűjtő esetén a legtöbb sebességnél nagyobb csúcsértékekkel vonultak le a hálózaton az árhullámok a mozgó csapadékok hatására, mint a fele akkora területű vízgyűjtőknél. Azonban

az álló csapadék hatására kialakuló maximális vízhozam a kisebb területű T3-as jelű vízgyűjtő területnél nagyobbra adódott, mint a T1-esnél.

Az álló csapadékhoz viszonyítva a nagyobb területű vízgyűjtő (T1) terület esetén alakult ki a legnagyobb árhullám-csúcs a mozgó csapadék hatására. A T3-as és T4-es vízgyűjtő azonos területtel (8 km²), alakkal (négyzet) és hossz-szélesség (2:1) aránnyal rendelkeznek, azonban a T3-as jelű egy oldalról, míg a T4-es jelű két oldalról folyik össze a főgyűjtőcsatornába. Összehasonlítva az eredményeket megállapíthatjuk, hogy *nem csak a terület és az alak számít, hanem az is, hogy a hálózat az egyes oldalokról milyen arányban terheli a főgyűjtőcsatornát.*

4.3 Eredmények összegzése

Az eredményeket összegezve a következőket állapíthatjuk meg a fiktív vízgyűjtő területen végzett vizsgálat alapján. *A mozgó csapadékok hatására levonuló árhullámok csúcspontjainak nagysága és megjelenési időpontjai sok esetben igen jelentős eltérést mutatnak az álló csapadékokhoz viszonyítva. A vizsgált mozgási irányok közül azok a legkritikusabbak, melyek nagymértékben harmonizálnak a vízgyűjtő terület és a csatornahálózat főlefolyási irányával (északról, illetve északnyugatról dél- délkelet felé).* Ez jól látszik az eredményekből, hiszen a legnagyobb maximális vízhozamokat – ugyanazon csapadék esemény állónak feltételezett esetéhez képest – a 45 és a 0 fokos (északnyugat és délkelet, illetve észak és dél között húzódó) tengelyeken pozitív irányba haladó csapadékok generáltak. Ezeken belül is a 4 éves visszatérési idejű, 15 perces időtartamú, 2 km/h-s és 4,5 km/h-s sebességű csapadékok, melyek több mint kétszer nagyobb árhullám-csúcsot produkáltak, mint az álló csapadékok. A 4,5 km/h-s csapadék mozgási sebesség hatására kialakuló maximális vízhozamok a 0 fokos tengelyen nagyobbak, a 45 fokos tengelyen meg majdnem akkorák lettek, mint a 2 km/h-s sebességnél. Ez a jelenség feltételezhetően azzal magyarázható, hogy *ez a mozgási sebesség a hálózati lefolyás átlagos levonulási sebességének nagyságával és irányával is harmonizál, amely jelentősen befolyásolja a levonuló árhullámot.* Továbbá a 90 fokos tengelyen mozgó csapadékokból keletkező csúcsokat is alulbecsülnénk, ha azt feltételeznénk, hogy az összes részvízgyűjtőre azonos pillanatban hullik le a csapadék és nem mozog. Azonban *a csatornahálózat fő lefolyási irányára merőlegesen mozgó csapadékok esetén szignifikáns tendencia nem volt kimutatható.*

Ezzel szemben a 0 és 45 fokos tengelyen negatív irányba, azaz *a hálózat fő lefolyási irányával ellentétesen mozgó csapadékoknál az álló csapadékokhoz képest kisebb maximális vízhozamok alakultak ki, így ezeknél a hagyományos tervezési módszerrel felülbecsülnénk a keletkező csúcsokat.* A legnagyobb eltérést a 0 fokos tengelyen negatív irányba mozgó 2 éves

gyakoriságú, 3 órás időtartamú, 2 km/h-s sebességgel mozgó csapadék esetén tapasztaltuk, ahol fele akkora a kialakult árhullám csúcsa, mint az állónál.

Mindemellett az eredményeket áttekintve konstatálható, hogyha a csapadék mozog, akkor a csúcs-vízhozamok minden esetben később alakultak ki, mint az álló csapadékoknál. A vizsgált mozgási irányoknál minél kisebb a sebesség, annál nagyobb mértékben tolódik el a megjelenési időpont.

A tanulmány második felében végzett vizsgálatok alapján bizonyítottuk, hogy *a csatornahálózaton levonuló árhullámokat a vízgyűjtő terület alakja és mérete is jelentős mértékben befolyásolhatja. A legkritikusabb, azaz a legnagyobb árhullám-csúcsot generáló csapadékmozgási sebesség minden esetben az volt, amelyik a leginkább megközelítette a csatornahálózati lefolyás átlagos sebességét.*

5 Következtetések

A csapadék, elsősorban a rövid időtartamú csapadék térben és időben igen változékony. A pontszerű mérésre alkalmas földi mérőhálózat nem elég sűrű ahhoz, hogy kellő felbontású képet alkothassunk a lehullott csapadékok térbeli eloszlásáról. Habár a közvetett, meteorológiai radaros mérések pontosabb információt szolgáltatnak, a probléma megszüntetésére ezek sem alkalmasak. A legnagyobb változékonyság a helyi záporok, zivatarok esetén észlelhető. Gyakran előfordul, hogy azoktól a területektől, ahol felhőszakadás van, mindössze pár száz méterre nem, vagy csak jelentéktelen mértékben esik [14]. A csapadékok területi kiterjedése is igen eltérő lehet, míg a hevesebb csapadék események (főként a kumulatív felhőképződésből keletkezők) kisebb, addig más csapadékok nagyobb területekre koncentrálnak. Mindemelllett a csapadékok mozgása is gondot okozhat a lefolyások meghatározási pontosságában. A szél sebessége és iránya, illetve a különböző intenzitás-eloszlások is befolyásolják a terepi lefolyást és a csatornahálózatokban kialakuló árhullámokat. Ráadásul a hálózat és a vízgyűjtő terület mérete és alakja, valamint a vízzáró felületek eloszlása is hatással van az eredményekre [18]. A hagyományos tervezési módszerek során egy adott idősorú csapadékot azonos időpontban eresztünk rá az összes részvízgyűjtőre, amelyről könnyen belátható, hogy ez a valóságban lezajló folyamatok durva egyszerűsítése. Az ilyen méretezés alapján elkészült csatornahálózatok élettartama során gyakoribb kapacitáshiányok keletkezhetnek, mint amik a méretezési csapadék előfordulási gyakorisága alapján várhatók. A csapadék mozgásának figyelmen kívül hagyása az adott széliránytól és sebességtől, illetve a vízgyűjtő terület és a hálózat jellemzőitől függően a rendszerben kialakuló *árhullám-csúcsok alul-, illetve felülbecsléséhez* vezethet, ahogy ezt ebben a tanulmányban is bemutatjuk. Az anyagi károkon túl az egyesített rendszerű hálózatok esetén a szennyvíz kiömlése közegészségügyi veszélyforrássá is válhat. Ezen felül nem hanyagolható el az a tény sem, hogy a klímaváltozás hatására átalakult csapadékviszonyok következtében rövidebb időtartamú, nagyobb intenzitású és kedvezőtlenebb intenzitás-eloszlású csapadékok jelentkeznek [1], melyek hirtelen nagy terhelést jelentenek az egyesített rendszerű és a csapadékcatorna hálózatok számára, így növelik a fentebb említett problémák kialakulásának valószínűségét. Az általunk végzett modellszámítások eredményei is azt támasztották alá, hogy a legnagyobb árhullám-csúcsok a rövid és nagyintenzitású, a hálózat fő lefolyási irányával és a hálózati lefolyás átlagos sebességével harmonizáló irányban és sebességgel mozgó csapadékokból keletkeztek. A modellezés korlátain belül azt is kimutattuk, hogy a vízgyűjtő alakja és mérete jelentősen befolyásolhatja a levonuló árhullám-csúcsokat. Mivel egy vízgyűjtő és a hozzá tartozó

csatornahálózat összetett, nem lineáris rendszert alkot, további tényezők (csatornahálózat sűrűsége, esésviszonyok, földrajzi elhelyezkedés – csapadékjellemzők, stb.) hatásának vizsgálata szükséges a hagyományos méretezés pontatlanságainak értelmezéséhez.

Az eddigi eredményeink és a nemzetközi szakirodalom alapján megállapítható, hogy hasznos lenne a jelenlegi tervezési módszer olyan módosítása, amelyben szerepet kap a mozgó csapadékfrontok hatása is. Ehhez azonban további kutatásokra van szükséges.

Irodalomjegyzék

- [1] Buzás K.: Klímaváltozás, települési csapadékvíz-gazdálkodás. Vízmű Panoráma, 16. évf. 4. sz., pp. 11-12., Magyar Víziközmű Szövetség (2008).
- [2] De Lima J.L.M.P., Singh, V.P.: The influence of the pattern of moving rainstorms on overland flow. *Advances on Water Resources*, 25 (7), 817-828 (2002).
- [3] De Lima J.L.M.P., Singh V.P.: Laboratory experiments on the influence of storm movement on overland flow. *Journal Physics and Chemistry of the Earth*, 28 (6-7), 277-282 (2003).
- [4] EPA (Environmental Protection Agency): Storm Water Management Model, User's Manual Version 5.0 (2010).
- [5] Jensen M.: Runoff pattern and peak flows from moving block rains based on linear time-area curve. *Nordic Hydrology*, 15, 155-168 (1984).
- [6] Knolmár M.: Csatornahidraulikai szimulációs program fejlesztései, Konferencia kiadvány, XXVIII. Országos Vándorgyűlés, Magyar Hidrológiai Társaság, Sopron (2010).
- [7] Kontur I., Koris K., Winter J.: Hidrológiai számítások. Linograf Kft., Gödöllő (2003).
- [8] Maksimov V.A.: Computing runoff produced by a heavy rainstorm with a moving center. *Soviet Hydrology*, 5, 510-513 (1964).
- [9] Nunes J.P., De Lima J.L.M.P., Singh, V.P., De Lima, MIP. and Vieira, G.N.: Numerical modeling of surface runoff and erosion due to moving rainstorms at the drainage basin scale. *J. Hydrol*, 330, 709- 720 (2006).
- [10] Országos Meteorológiai Szolgálat:
http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/altalanos_leiras/ (2013.05.01.)
- [11] Országos Meteorológiai Szolgálat:
http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/csapadek/ (2013.05.01.)
- [12] Országos Meteorológiai Szolgálat:
http://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_valtozasok/Magyarorszag/ (2013.05.01.)
- [13] Országos Meteorológiai Szolgálat:
http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/szel/ (2013.05.01.)

- [14] Országos Meteorológiai Szolgálat:
http://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/idojaras_eforejelzes/szinoptikus_klimatologia/Teli_nagy_csapadekos_helyzetek.pdf (2013.05.01.)
- [15] Sali E.: Csatornázás: Tervezési segédlet. Műegyetemi Kiadó, Budapest (2002).
- [16] Sardoi E.R., Sigarodi S.K., Salajagheh A., Farizendhi G.M.: Increasing the accuracy of runoff simulation using direction and velocity of wind, a case study of Karaj Dam basin, Iran. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, 7 (4), 247-256 (2012).
- [17] Yen B.C., Chow V.T.: A study of surface runoff due to moving rainstorms. Hydraulic Engineering Series No. 17, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, USA (1968).
- [18] Zawilski M., Brzezińska A.: Spatial rainfall intensity distribution over an urban area and its effect on a combined sewerage system. 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil (2011).