



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Magyarország konvektív csapadékmennyiségeinek vizsgálata klímamodell és megfigyelések eredményeinek összevetésével

Füssi-Nagy Regő

építőmérnöki BSc szakos hallgató

TDK dolgozat

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék



Konzulens:

Dr. Sándor Balázs

adjunktus, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Tartalom

Összefoglaló.....	3
Abstract.....	3
Ábrajegyzék.....	4
Táblázatjegyzék.....	5
1. Bevezetés.....	6
1.1. A vízgazdálkodás paradigmaváltás küszöbén.....	6
1.2. Lehetnek a vízmegtartásnak kedvező atmoszférikus hatásai?	7
2. A dolgozat célkitűzései.....	9
3. A globális klímaváltozás és a konvektív csapadékmennyiségek növekedése	10
4. Módszertan.....	12
5. Adatok.....	14
5.1. Megfigyelésen alapuló adatok (SYNOP).....	14
5.2. ERA5 reanalízis	16
6. Eredmények	19
6.1. Adattípus összehasonlítás	19
6.2. Változók órás idősorainak vizsgálata.....	23
6.2.1. Debrecen	25
6.2.2. Budapest.....	27
6.3. A változók térbeli viselkedése és esetleges kölcsönhatásai	29
7. Összefoglalás, kitekintés.....	31
Köszönetnyilvánítás	32
Irodalom	33
Függelék.....	38
I. Siófok évek	38
II. Budapest évek	39
III. Kékes-tető évek.....	40

Összefoglaló

A mai időkben a klímaváltozás miatt a vízgazdálkodás paradigmaváltás előtt áll. A mindent elvezetünkben a minél több vizet megtartunkba megy át fokozatosan a társadalom és a szakemberek világgépe. Ez a folyamat nem egyszerű, mivel rengeteg változást követel meg, amire a legjobban akkor tudunk felkészülni, ha tudományosan megvizsgáljuk a részleteket.

A klímaváltozás hatására növekszik a felszíni hőmérséklet és a légköri vízpára koncentráció. Utóbbit tovább fokozza a légoszlopok instabilitása és a feláramlás. Mindezek hatására a konvektív csapadék (helyi csapadék) is növekedő tendenciát mutat. Ez a folyamat talán mesterségesen tovább erősíthető az árvizekből kiengedett nagy mennyiségű vizek által, amelyek nagy felületen terülnek szét.

A munkában szeretnénk egy nagy léptékű elemzés alapjait lefektetni. Ennek első lépéseként megvizsgáljuk az ERA5 reanalízis globális klímamodelljének eredményeit és a SYNOP pontszerű helyi megfigyeléseket.

Abstract

Today, climate change is questioning the paradigm of water management. From draining everything to retaining as much water as possible, the world view of society and professionals is gradually changing. This is not an easy process, as it requires many changes for which we can best prepare by looking at the details scientifically.

Climate change increases surface temperatures and the concentration of water vapour in the atmosphere. The latter is further increased by instability of an air column and vertical advection. As a result, convective precipitation (local rainfall) is also increasing. This process may be artificially accelerated by the release of large amounts of water from floods that spread over large areas.

In this work, we aim to lay the foundations for a large-scale analysis. As a first step, we will examine the results of the ERA5 reanalysis global climate model and the local SYNOP point observations.

Ábrajegyzék

1. ábra: Folyamatábra a talajnedvesség és konvektív csapadék pozitív visszacsatolásáról.....	11
2. ábra: Csapadék típusok arányainak ábrázolása a különféle szigorúsági módszerek esetén. a) Szigorú módszer; b) Maximum módszer (Demeter 2016).....	15
3. ábra: A reanalízis folyamata. (Hersbach 2023).....	16
4. ábra: Az ERA5 reanalízis egy modell futtatásának folyamata (Hersbach 2023).....	17
5. ábra: A konvektív csapadékösszegek összefüggése Debrecenben; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra.....	21
6. ábra: A nagyskálájú csapadékösszegek összefüggése Debrecenben; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra.....	21
7. ábra: Az összegzett csapadéktípusok csapadékösszegeinek összefüggése Debrecenben; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra.....	21
8. ábra: A konvektív csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra.....	22
9. ábra: A nagyskálájú csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra.....	22
10. ábra: Az összes csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra.....	22
11. ábra: Debreceni cella időszora 2010 nyarára a korábban bemutatott változókkal	25
12. ábra: Debreceni cella időszora 2010 nyarára a korábban bemutatott változókkal	26
13. ábra: Budapesti cella időszora 2010 nyarára a korábban bemutatott változókkal	27
14. ábra: Budapesti cella időszora 2012 nyarára a korábban bemutatott változókkal	28
15. ábra: A talajnedvesség átlag értékei 2010 nyarának meghatározott időszakára.	29
16. ábra: A feláramlás átlag értékei 2010 nyarának meghatározott időszakára.	30
17. ábra: A konvektív csapadék összege 2010 nyarának meghatározott időszakára. Megfigyelhető,	30
18. ábra: Egyszerűsített feltételezett modellek a konvektív csapadékok térbeli viselkedésére. a) Homogén talajnedvesség; b) inhomogén talajnedvesség.....	32
19. ábra: Az éves konvektív csapadékösszegek összefüggése Siófokon; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként	38
20. ábra: Az éves nagyskálájú csapadékösszegek összefüggése Siófokon; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként	38
21. ábra: Az éves összes csapadékösszegek összefüggése Siófokon; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként	38

22. ábra: Az éves konvektív csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) idősortként ábrázolva; b) regressziós ábraként	39
23. ábra: Az éves nagyskálájú csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) idősortként ábrázolva; b) regressziós ábraként.....	39
24. ábra: Az éves összes csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) idősortként ábrázolva; b) regressziós ábraként	39
25. ábra: Az éves konvektív csapadékösszegek összefüggése Kékes-tetőn; a) idősortként ábrázolva; b) regressziós ábraként.....	40
26. ábra: Az éves nagyskálájú csapadékösszegek összefüggése Kékes-tetőn; a) idősortként ábrázolva; b) regressziós ábraként.....	40
27. ábra: Az éves összes csapadékösszegek összefüggése Kékes-tetőn; a) idősortként ábrázolva; b) regressziós ábraként	40

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Demeter Szilvia által publikált adatok típusai és állomásai	12
2. táblázat: Szinoptikus kódok és jelölésük. Lilla négyzetben a nagyskálájú csapadékhoz tartozó kódok és zöld négyzetben a konvektív csapadékhoz tartozók. (Demeter 2016)	14
3. táblázat: Demeter Szilvia által megvizsgált és publikált 4 állomás adatai.	15
4. táblázat: ERA5-ből letöltött paraméterek és fontosabb specifikációik	18
5. táblázat: Nyári csapadékösszegek változása a debreceni cellában	24

1. Bevezetés

A dolgozatban a Magyarország fölött helyben képződő csapadék mennyiségi elemzésével foglalkozunk.

Ebben a fejezetben röviden ismertetjük a motivációkat, a vizsgált problémakört és a konkrét célkitűzéseket. A munka interdiszciplinárisnak tekinthető, mivel a konkrét elvégzett vizsgálatok meteorológiai jellegűek, azonban a motivációnk a vízmérnöki tudományterületről érkezik és a vízviszatarással kapcsolatos. Vizsgálatainkból levont következtetések nem tekinthetők tudományosan megalapozottnak a vízviszatarásra nézve. Ugyanakkor bizonyos változók közötti közvetett kapcsolatok feltárásával szándékunk a figyelem ráirányítása a vízviszatarítás lehetséges kedvező hatására a csapadékképződésre.

1.1. A vízgazdálkodás paradigmaváltás küszöbén

A mai időkben a klímaváltozás és a korábbi vízgazdálkodási beavatkozások miatt a hazai vízgazdálkodás paradigmaváltás előtt áll. A társadalom és a szakemberek hozzáállása a vizek levezetése helyett azok megtartásának támogatásába megy át fokozatosan. Azonban ez a változás nagyon lassú és nem is a közelmúltban kezdődött. Kvassay Jenő kultúrmérnök már 1875-ben a Vizeinkről című munkájában a következőket írja: *„utódaink útja és a mi eddigi utunk egymással homlokegyenest ellenkeznek: míg mi folyóink szabályozásával azok vizét gyorsan levezetni törekedünk, addig unokáink gátaakká fogják azokat torlasztani és az országban visszatartani... De bármily gazdagoknak higgyük is magunkat bővizű folyókban, kevés számítás után reájutunk, hogy ha csak nagy vizeinket fel nem fogjuk, kis- és közép vizeinket pedig nem torlasztjuk — vagy az öntözés, vagy a hajózás húzza a rövidebbet.”* (Kvassay, 1875, o. 115). Ezt nem alaptalanul jósolta, mivel már az akkori megfigyelések alapján elkezdődött a helyi klíma megváltozása és megmutatkozott az Alföld aszályra való hajlandósága. *„16 év lefolyása alatt 9 év volt aszályos, tehát több mint fele a mondott éveknek vagy teljesen terméketlen volt, vagy nyomom termést adott — abban már bizonyára a Tisza szabályozásának is van némi része”* (Kvassay, 1875, o. 62).

A folyószabályozások során körülbelül 100 kanyarulatátvágás történt a Tiszán (Vágás, 1995). Ezáltal a folyó hossza nagymértékben rövidült le, esése megnőtt, a sebessége felgyorsult. Ezekkel párhuzamosan a védtöltéseket a folyóhoz közel építették. Ezzel sikerült elérni a meghatározott célokat. Nagy mennyiségű új mezőgazdaságilag művelhető földterület keletkezett, és a hajózás szükségletei is biztosítottá váltak.

Másrészről a folyó elvesztette a kapcsolatát az árterekkel és az árvizek által szállított nagy víztömegek az országon gyorsan vonultak keresztül, megfosztva ezzel az ősártereket például a tápanyag- és talajvízpótlás lehetőségétől. A folyószabályozás mellett a lecsapolásokat is elkezdték. A két folyamat hatására nagy vízfelületek tűntek el, amelynek következtében csökkent a beszivárgás és a párolgás. Magyarországon a vizes élőhelyek mintegy 85%-a tűnt el a becslések szerint (Fluet-Chouinard és mtsai., 2023). Ezek a hatások tovább erősítették az Alföld szárazodásra való hajlamát.

A jelenben ezen körülményekhez adódnak hozzá a globális klímaváltozás hatásai, így az Alföld esetén az aszályoknak való kitettség további jelentős fokozódásáról beszélhetünk. Többek között kijelenthető, hogy az Alföldön szignifikáns talajvízszint-csökkenés következett be az elmúlt néhány évtized során (Szalai, 2011; Szilágyi & Vorosmarty, 1997).

Kvassay Jenő kultúrmérnök Európa nagy vízszabályozásait megvizsgálva és a következtetéseket levonva megoldásként a talajvízszintek csökkenésére, az árvíz kockázat növekedésére és a gátak folyamatos emelésére az akkori nevén a tórendszert, a mai nevén a mélyárteres vízgazdálkodást javasolta, mint a lehetséges módok legjobbját. Ez rendszer jobban alkalmazkodik a folyó szabályozás előtti működéséhez, mivel helyet ad az árvizeknek a tájban. Az árvizekre, mint a társadalom számára felhasználható erőforrás tekint. Az érkező vízmennyiségekkel tavakat lehet feltölteni, tápanyagot juttatni a felső talajrétegekbe és talajvizet is lehet pótolni. A nagyobb területen szétterülő vizek miatt az árvízszintek is csökkennek. Ez a megoldás az évezred elején került megint a figyelem középpontjába és képezte több tudományos vizsgálat tárgyát (Koncsos & Murányi, 2024; Murányi & Koncsos, 2023).

1.2. Lehetnek a vízmegtartásnak kedvező atmoszférikus hatásai?

A vízszabályozásoknak és általában a hasonló volumenű környezeti beavatkozásoknak közvetett hatásai is vannak. A XIX. század nagy vízszabályozásainak az atmoszférára gyakorolt esetleges hatásainak kérdései már röviddel a beavatkozások után felmerültek: *„légtüneti észleletek halmazából a természet processusának ezen mélyen rejlő titkait egy halandó sem aknázza ki annyira, hogy a Tisza-szabályozás előtti mocsárok párolgásaiból a szelek számtalan eshetőségének alávetett törvénye szerint meghatározhatná ama hányadot, miszerint tiszavidéki alföldünk nedvtéri domborzatára a légcsapadék voltaképpen mily osztalékot nyújtott s mit nyújthat ma.”* (Képeßy, 1867).

A klasszikus vízmérnöki megközelítés szerint, a vízkészletek mennyiségi alakulását vizsgálva a párolgás, mint veszteség jelenik meg a vízháztartási egyenletekben; ezáltal könnyen arra következtetésre lehet jutni, hogy ennek csökkentésével több vizünk lesz. Kilépve a klasszikus megközelítésből, a párolgás tekinthető szolgáltatásnak a földfelszínen rendelkezésre álló sugárzási

energia elosztásában való részvételéért és ezáltal a helyi klíma szabályozásában betöltött szerepéért (Báder & Szilágyi, 2023). Ezt a szabályozó szerepet az alábbi energiamérleg-egyenlet jól szemlélteti:

$$Q_n = H + LE \quad (1)$$

amely szerint a felszínen rendelkezésre álló nettó sugárzás (Q_n) vagy a hőmérsékletet, vagy a felszíni páratartalmat növeli rendre a szenzibilis (H) és látens (LE) energiaáram formájában. Vagyis a felszín vagy melegedni, vagy párologtatni kényszerül.

Évtizedes trendeket vizsgálva elmondható, hogy Magyarországon is növekszik a nettó sugárzás. Ezáltal az egyenlet jobb oldalán lévő szenzibilis (hőmérséklet) és látens (párolgás) hőáramok is nőnek, azonban növekedésük üteme nem azonos: „egy Balatonnyi víztérfogatnak megfelelő vízmennyiséggel” (Báder & Szilágyi, 2023) kellene évente több víznek elpárologni a látens és szenzibilis hőáramok egyforma mértékű növekedéséhez, ezáltal a felmelegedés lokális mérsékléséhez.

A vízpára a keletkezésének valamilyen lokálisnak (~10 km) mondható környezetében az úgynevezett nedves konvekció hatására gomolyfelhő és zivatarfelhő képződés mellett csapadék formájában újra a felszínre kerülhet. A nedves konvekció során a feláramlás a száraz konvekcióhoz (termikek) képest lassabban indul el, de jelentős mennyiségű vízpára kerül az atmoszférába, ami a kicsapódás által leadott hő miatt növeli a légoszlop instabilitását és így a feláramlást tovább erősíti. Többek között az ilyen körülmények között keletkező csapadékot hívhatjuk konvektív csapadéknak. (Götz & Rákóczi, 1981; Horváth & Breuer, 2023).

A konvektív csapadékesemények száma és a konvektív csapadékmennyiségek növekedő tendenciát mutatnak világszerte, ami a globális klímaváltozás egyik velejárója, kísérőjelensége. Ennek elsődleges oka a felszín melegedése, ezáltal párolgás növekedése, amelynek mértéke legnagyobb részt a talajnedvességtől függ. Ezekről a folyamatokról a 3. fejezetben beszélünk részletesebben.

Következésképpen a talajnedvesség mesterséges növelésével a páráképződést és transzportot fokozhatjuk, és ezáltal a léghőmérsékletet lokálisan mérsékelhetjük, a konvektív csapadékképződés matematikai valószínűségét növelhetjük. Erre jó példa Göndöcs munkája, aki egy regionális klímamodellben a talajnedvesség növelésével a konvektív csapadékesemények számának növekedését észlelte (Göndöcs, 2015).

2. A dolgozat célkitűzései

A motivációként megnevezett vízmegtartási kérdések konvektív csapadékeseményekkel való együttes, tudományos igényességű körüljárása nem célja a jelen dolgozatnak. A bemutatott eredmények alapján teszünk logikai következtetéseket, de a vízmegtartással kapcsolatban célunk elsősorban diskurzus elindítása és távlati behatóbb vizsgálatok előkészítése. A dolgozatban bemutatott konkrét vizsgálatok a vízmegtartáshoz közvetlenül nem kapcsolódnak, de ezen távlati cél felé mutatnak.

Véleményünk szerint ennek van alapja, mivel a talajnedvesség mértéke összefüggésben van a konvektív csapadékok alakulásával, mégpedig pozitív visszacsatolásként (Göndöcs, 2015).

I. cél

A különböző (globális és regionális léptékű) klímamodellek - lévén, hogy kimondottan sok paramétert tartalmaznak - számos bizonytalansággal terheltek. A konvektív és nagy skálájú csapadék a nagyobb bizonytalansággal terhelt változók között említendő, hiszen a légköri turbulencia és a felhőképződés leírására nem létezik kielégítően pontos matematikai modell. Ezért kiemelkedően fontos a modellek jóslatait mérési eredményekkel összehasonlítani. A teljes lehullott csapadékon belül a konvektív csapadék részarányára nem létezik közvetlen mérési módszer, ugyanakkor a meteorológiai állomásokon végrehajtott megfigyelésekből ki lehet indulni.

A dolgozatunk elsődleges célja egy megfigyelésen alapuló módszer Magyarországra kiértékelt eredményeinek (Demeter, 2016, 2018) és az ERA5 reanalízis eredményeinek összehasonlítása a különböző csapadék típusokra nézve, egy 15 éves időszakban (2000-2015).

II. cél

Ha elfogadjuk Göndöcs eredményét a talajnedvesség és konvektív csapadék pozitív visszacsatolásáról (Göndöcs, 2015), akkor a talajnedvesség növekedésével, vagy szándékos növelésével növelni lehet a konvektív csapadékokból hulló vízmennyiséget. A munkánkban keressük az ilyen típusú pozitív visszacsatolásra utaló jeleket időben és térben az ERA5 reanalízis adatbázisát felhasználva.

Ahol a legjobb egyezést találtuk a megfigyelések és a klímamodell eredményei között ott órák időléptékben vizsgáljuk meg a talajnedvesség, konvektív csapadék, nagyskálájú csapadék, léghőmérséklet és vertikális légmozgás változók dinamikáját. Ezen felül a fent említett változók térbeli viselkedését is tanulmányozzuk néhány példán keresztül.

3. A globális klímaváltozás és a konvektív csapadékmennyiségek növekedése

A globális klímaváltozás hatására növekszik a felszínközeli léghőmérséklet, amely a szárazföldek felett a globális átlagot meghaladva történik. Ennek hatására növekszik a párolgás és a levegő vízpára felvevő képessége is. A megnövekedett léghőmérséklet a légoszlop instabilitását is fokozza. Mindezen körülmények a konvektív csapadékesemények számosságának növekedését okozzák, ezt több közelmúltbeli nemzetközi kutatás alátámasztja (Gu és mtsai., 2023; Lenderink és mtsai., 2017; Lenderink & Van Meijgaard, 2008; Poujol és mtsai., 2021). Az idézett munkák szinte mindegyike kiemeli, hogy a többletcsapadék mennyisége meghaladja a *Clausius-Clapeyron* egyenletet alapul vevő várakozásokat.

A Clausius-Clapeyron egyenletből következik, hogy a hőmérséklet növekedésével a felvehető vízpára tartalom 7%-kal növekszik fokként a levegőben. Ez a reláció termodinamikai megfontolások alapján, egy adott légtömeg vízpára felvevőképességét írja le:

$$\frac{1}{e_s} \frac{de_s}{dT} = \frac{L_v}{R_v T^2}, \quad (2)$$

ahol L_v a víz párolgáshője, R_v a vízgőz gázállandója, e_s a telítési párányomás és a T a léghőmérséklet. Ez a szétválasztható változójú közönséges differenciálegyenlet a telítési párányomás alakulását írja le a hőmérséklet függvényében. Ennek az egyenletnek a megoldása az $e_s(T)$ függvény, amely a vízgőz és a víz fázisok közötti határoló görbét jelenti a gőznyomás és hőmérséklet változók által kifeszített fázisdiagramon. A (2) egyenlet geometriailag a fázisgörbe hajlását fejezi ki, a változókat szétválasztva közvetlenül integrálhatóvá válik.

$$\frac{de_s}{e_s} = \frac{L_v}{R_v} \frac{dT}{T^2}. \quad (3)$$

A (3) egyenlet analitikus megoldása:

$$e_s(T) = c_1 \exp\left(\frac{L_v}{R_v T}\right), \quad (4)$$

ahol c_1 integrálási állandó. A (4) megoldás helyett a gyakorlatban a Tetens formulaként ismert közelítés használjuk:

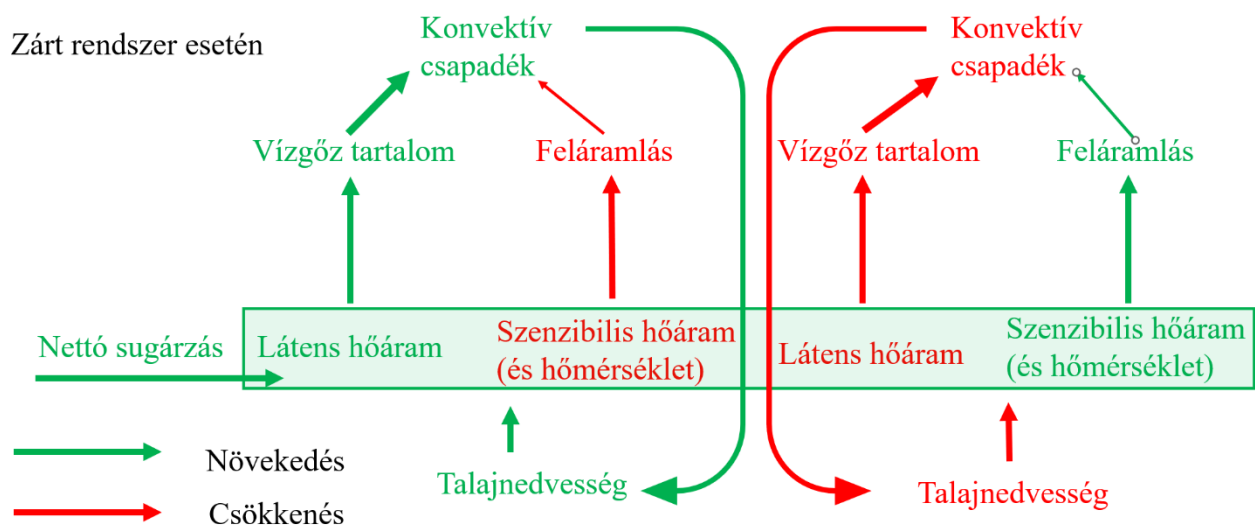
$$e_s(T) = 0.61 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right), \quad (5)$$

ahol e_s [kPa]-ban és T [°C]-ban értelmezett.

A megfigyelések alapján a konvektív csapadékok mennyiségének növekedési üteme meghaladja a Clausius-Clapeyron egyenletből következő, a felmelegedés miatt az atmoszférában felhalmozódni képes vízgőzből kondenzálódó vízmennyiség növekedési ütemét (fokként körülbelül 7%

többletet). Ez azért lehetséges, mivel további hatótényezőként merül fel a vertikális légmozgás (w), a felhőképződés határfoka (ε) és a nagyskalájú folyamatok által szállított vízgőz és víz. Azonban Poujol munkája szerint a három hatótényező közül csak a vízgőz az, amelynek a növekedése mindenképp a csapadék növekedését okozza (Poujol és mtsai., 2021). Hasonló következtetésekre jut Göndöcs is a regionális klímaszimulációja és azon belül a talajnedvesség érzékenyítségvizsgálatai során. A megnövelt talajnedvesség esetén megnövekedett a vízpára (lásd (1) egyenlet), mely a csapadékok növekedését okozta (Göndöcs, 2015).

Mindezek alapján az alábbi folyamatábrán illusztráljuk a konvektív csapadékképződést befolyásoló tényezőket. A talajnedvesség növekedésével növekszik a látens hőáram mértéke és így a vízpára koncentráció. Ugyanakkor az (1) mérlegegyenlet alapján csökken a szenzibilis hőáram és vele a felszíni hőmérséklet, ami mérsékeltebb feláramláshoz vezet. Ez egy csökkentő tényező a konvektív csapadékképződésre nézve, ugyanakkor a talajnedvesség pozitív hatása egyrészt erőteljesebb, másrészt a magasabb légrétegekbe jutó vízgőz kondenzációja során leadott hőenergia fokozza a légoszlop instabilitását és erősíti a feláramlást. Továbbá az egész folyamatot erősíti a globálisan növekedést mutató nettó sugárzás, melynek következtében mind a szenzibilis hőáram (felszín melegekedése), mind a látens hőáram (vízpára növekedés) növekszik. Ennek a hatására mind a két irányba könnyebben el tud indulni a folyamat. Ezek a folyamatok csupán egy zárt rendszer esetén érvényesek, ennyire egyszerűek. A valóságban a nagyskalájú folyamatok ezeket nagyban befolyásolni tudják.



1. ábra: Folyamatábra a talajnedvesség és konvektív csapadék pozitív visszacsatolásáról

4. Módszertan

A megfigyelt és a klímamodellből származó csapadékok összehasonlítása során statisztikai módszereket alkalmazunk. Az órás idősorok és térbeli kapcsolatok vizsgálatánál a fizikai várakozásoknak (1. ábra) megfelelő jellegzetességeket keresünk.

Az adatok feldolgozásához a MATLAB (Matrix Laboratory) szoftvert használtuk, amely a saját programozási nyelvét használja, amit szintén Matlab-nak hívnak. Ez egy magas szintű programozási nyelv és környezet, amely elsősorban mérnöki és természettudományos kutatásokban hasznosítható. Különösen erős a mátrix- és tömbalapú számításokban. Gyorsan és hatékonyan lehet algoritmusokat fejleszteni, nagymennyiségű adatfeldolgozást végezni, és az eredményeket megjeleníteni. A MATLAB számos beépített függvényt kínál, amelyek megkönnyítik a számításokat. A szoftver tudományos adattípusok importálását is lehetővé teszi, mint például a NetCDF (.nc), vagyis Network Common Data Form-t is. Az ERA5 adatbázis adatai ebben a fájltypusban szerezhetők be.

Az I. cél elérése érdekében összegyűjtöttük Demeter Szilvia (ELTE Meteorológiai Tanszék) 2016-os szakdolgozatában és 2018-as diplomamunkájában fellelhető konvektív és nagyskálájú csapadék adatokat az egyes pontszerű helyszínekre a 2000 és 2015 közötti időszakra (Demeter, 2016, 2018) Összesen 4 db meteorológiai állomásra feldolgozott adatokat gyűjtöttünk össze, melyekre az elérhető adattípusokat 1. táblázat szemlélteti.

Állomás	Éves átlagok	Éven belüli havi átlagok
Budapest	igen	igen
Debrecen	nem	igen
Siófok	igen	nem
Kékes-tető	igen	nem

1. táblázat: Demeter Szilvia által publikált adatok típusai és állomásai

Az összehasonlítás másik adatsora az ERA5 reanalízis (részletes bemutatás az 5.2. fejezetben) havi konvektív és nagyskálájú csapadék paraméterei, melyeket internetes adatbázisból töltöttünk le a Duna-vízgyűjtő területére és a Demeter által vizsgált időszakra. Megkerestük azokat a rácspontokat, melyekben a pontszerű megfigyelések történtek. Innentől kezdve csakis ezekkel foglalkoztunk. A két idősort összehasonlítottuk feltüntetve a mért értékeket és a százalékos eltéréseket ((1) egyenlet).

$$\left| \left(\frac{\text{Megfigyelés}}{\text{Klímamodell}} \cdot 100 \right) - 100 \right| \quad (1)$$

Ezenkívül az adatokat közös koordináta rendszerben ábrázoltuk és regressziós egyenest számítottunk a két adattípus között a legkisebb négyzetek elvének felhasználásával. Kiszámítottuk a korrelációs

tényezőt (r), amely megmutatja, hogy a két változó, esetünkben a két adatsor, kapcsolata milyen erős és milyen irányú.

$$r = \frac{\sum \Delta x \cdot \Delta y}{N \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2)$$

- , ahol Δx és Δy az adott pontok átlagtól való eltérése,
- az N az adatpárok száma és az
- σ_x és σ_y az adatsorok szórása.

A korrelációs tényező a $[-1,1]$ tartományban vehet fel értéket, ahol a 0-tól távolodva abszolút értékben nő a kapcsolat erőssége. A negatív értékek az ellentétes összefüggést jelzik; ha az egyik változó nő a másik csökken, míg pozitív értékeknél az egyik változó értékének növekedésével a másik is nő.

A korreláció szignifikanciáját is megvizsgáltuk. A kapcsolat akkor lehet szignifikáns, ha nagy biztonsággal elutasíthatjuk a nullhipotézist. A nullhipotézis azt feltételezi, hogy a két változó között nincs összefüggés. A munkánkban szignifikánsnak tekintjük a kapcsolatot, ha 95% bizonyossággal elutasíthatjuk a null hipotézist, vagyis 5% alatti a valószínűsége, hogy függetlenek egymástól a változók (Kontur és mtsai., 1993). A valószínűségeket a Student-féle t-eloszlás alapján határoztuk meg.

A II. cél eléréséhez időben részletesebben vizsgáltuk a folyamatokat. Kiválasztottunk egy jellegzetesen nedves (2010) és száraz (2011) évet és ezek környezetét (2009, 2012). Az éven belül a nyári hónapokat vizsgáltuk, mivel a konvektív csapadék legnagyobb hányada ekkor keletkezik. Órás idősorokban keresünk arra utaló jeleket, hogy a talajnedvesség és a konvektív csapadékmennyiség között pozitív visszacsatolás áll fenn. Ehhez e két változón kívül további változók – úgymint feláramlás, felszínközeli hőmérséklet, szélsébség (1. ábra **Error! Reference source not found.**) – szerepét is tekintetbe vesszük.

A talajnedvesség, konvektív csapadék és a feláramlás térbeli eloszlását is megvizsgáljuk az említett száraz és csapadékos nyarakra, további nyomok után kutatva ezek térbeli összefüggéseiben is Magyarország területén.

5. Adatok

5.1. Megfigyelésen alapuló adatok (SYNOP)

A SYNOP jelentések (táviratok) órás felbontásúak és a pontszerű mérések és megfigyelések eredményeit tartalmazzák egy kódsorozat formájában, amelyet a FM 12-VII. kódolási szabvány alapján készítenek el. A csapadék típusának meghatározásához a kódsorozat 7. blokkját lehet felhasználni: az első két karakter 01-től 99-ig terjedhet és az elmúlt egy órában megfigyelhető időjárás jelenségeit kategorizálja be (2. táblázat). A harmadik és negyedik karakter a mellékterminusban (az elmúlt 3 órában) és főterminusban (az elmúlt 6 órában) megfigyelhető időjárást jellemzi.

WW – IDŐJÁRÁS AZ ÉSZLELÉSKOR

Az állomáson csapadék nem volt		Csapadék, köd, vagy zivatar volt az utolsó órában, de megszűnt	Por-, homok-, vagy hóvihár	Köd	Szitálás	Csendes eső	Havazás	Záporoszerű csapadék, zivatar		
00	A felhőzet változását nem figyelték meg	10 Párás	20 Szitálás volt	30 Gyenge, szökkenően	40 Távoli köd	50 Gyenge szitálás, megszaki-tásokkal	60 Gyenge eső, megszaki-tásokkal	70 Gyenge havazás, megszaki-tásokkal	80 Gyenge záporos	90 Záporoszerű közepes, vagy erős jégeső
01	A felhőzet szétoszlott, vagy vékonyodott	11 Sekély köd, egyes foltokban	21 Eső volt	31 Gyenge, változatlan	41 Kód foltokban, vagy padokban	51 Gyenge szitálás, folytonos	61 Gyenge eső, folytonos	71 Gyenge havazás, folytonos	81 Mérsékelt, vagy erős záporos	91 Gyenge eső, és az elmúlt órában zivatar
02	A felhőzet nem változott	12 Sekély köd, folytonos	22 Havazás volt	32 Gyenge, fokozódott	42 Gyengült, az ég látszik	52 Közepes szitálás, megszaki-tásokkal	62 Mérsékelt eső, megszaki-tásokkal	72 Mérsékelt havazás, megszaki-tásokkal	82 Igen erős záporos	92 Közepes v. erős eső, és az elmúlt órában zivatar
03	A felhőzet kialakulóban volt, vagy vastagodott	13 Villogás	23 Havasodó volt	33 Erős, szökkenően	43 Gyengült, az ég nem látszik	53 Közepes szitálás, folytonos	63 Mérsékelt eső, folytonos	73 Mérsékelt havazás, folytonos	83 Záporoszerű gyenge havasodó	93 Gyenge havazás, havasodó, és az elmúlt órában zivatar
04	Füst által okozott légköri homály	14 Csapadéksáv nem éri el a talajt	24 Önosodó volt	34 Erős, változatlan	44 Változatlan, az ég látszik	54 Erős szitálás, megszaki-tásokkal	64 Erős eső, megszaki-tásokkal	74 Erős havazás, megszaki-tásokkal	84 Záporoszerű közepes, vagy erős havazás	94 Közepes v. erős havazás, havasodó, és az elmúlt órában zivatar
05	Száraz légköri homály	15 Csapadéksáv 5 km-en belül éri el a talajt	25 Záporosodó volt	35 Erős, fokozódott	45 Változatlan, az ég nem látszik	55 Erős szitálás, folytonos	65 Erős eső, folytonos	75 Erős havazás, folytonos	85 Gyenge hózápor	95 Zivatar az észleléskor, gyenge, közepes esővel v. havazással
06	Lebegő por nagy terület felett	16 Csapadéksáv 5 km-en belül éri el a talajt	26 Hózápor, v. záporoszerű havasodó volt	36 Gyenge, talajmenti hófúvás	46 Erősödött, az ég látszik	56 Gyenge szitálás, ónos	66 Gyenge eső, ónos	76 Jégtűk	86 Közepes, vagy erős hózápor	96 Zivatar az észleléskor, gyenge v. közepes jégesővel, darival
07	Helyben felkavart por	17 Dörgés, száraz zivatar	27 Jégeső, vagy darazápor volt	37 Erős, talajmenti hófúvás	47 Erősödött, az ég nem látszik	57 Erős szitálás, ónos	67 Közepes vagy erős eső, ónos	77 Szemcsés hó	87 Gyenge záporoszerű dara	97 Zivatar az észleléskor, erős esővel v. havazással
08	Jól fejlett porforgatag	18 Szélrohamok az észleléskor vagy közvetlenül előtte	28 Kód volt	38 Gyenge, magas hófúvás	48 Kód zú-marával, az ég látszik	58 Gyenge szitálás és eső	68 Gyenge havasodó	78 Különböző hókristályok	88 Mérsékelt vagy erős záporoszerű dara	98 Zivatar az észleléskor, por- vagy homok-viharral
09	Távoli/ v. elvonult/ porvihár	19 Felhőtőlcsér	29 Zivatar volt	39 Erős, magas hófúvás	49 Kód zú-marával, az ég nem látszik	59 Közepes vagy erős szitálás és eső	69 Erős havasodó	79 Fagyott eső	89 Záporoszerű gyenge jégeső	99 Zivatar az észleléskor, erős jégesővel vagy darival

2. táblázat: Szinoptikus kódok és jelölésük. Lilla négyzetben a nagyskálájú csapadékhöz tartozó kódok és zöld négyzetben a konvektív csapadékhöz tartozók. (Demeter 2016)

Cseh kutatók egy módszert dolgoztak ki a konvektív és nagyskálájú csapadékok szétválasztására a SYNOP táviratok felhasználásával (Rulfová & Kysely, 2013). A módszer azon alapszik, hogy a konvektív csapadékok és a nagyskálájú csapadékok különböző fajtájú események során keletkeznek. A konvektív csapadékesemények a zivatarok, záporok, míg a nagyskálájú csapadékesemények a szitálás, vagy eső során keletkeznek. A 2. táblázatban láthatóak a nagyskálájú csapadékhöz köthető időjárási jelenségek kódjai lila keretben, míg a konvektív csapadékhöz kötődőek kódjai zöld keretben.

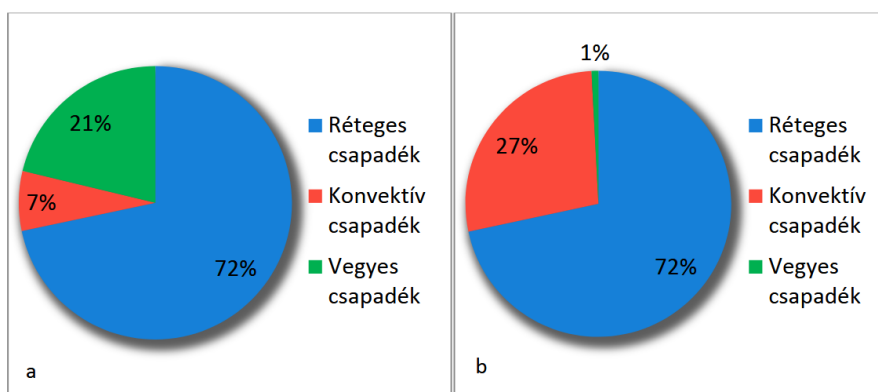
Segédkritériumként felhasználták a felhőtípusokat, melyek szintén jellemzőek az egyes típusokra. A konvektív csapadékesemények Cumulonimbus és Cumulus felhőkkel hozhatók kapcsolatba, míg a nagyskálájú csapadékesemények Nimbostratus, Stratocumulus, Stratus és Altostratus felhőkkel. A kódsorozatban a csapadék mennyisége is rögzítésre kerül.

	Budapest: Pestszentlőrinc	Siófok	Kékes-tető	Debrecen
Állomás szám	44527	36100	53101	64711
Nemzetközi szám	12843	12935	12851	12882
Mérés kezdete	1996.01.04.	1995.05.02.	1995.05.14.	1995.05.14.
Mérés vége:	2024.09.19	2024.09.19	2024.09.19	2024.09.19
Széllesség [°]	47.4292	46.9108	47.8722	47.4844
Hosszúság [°]	19.1822	18.0408	20.0128	21.6056
Magasság [m B.f.]	138.1	107.2	1010.8	112

3. táblázat: Demeter Szilvia által megvizsgált és publikált 4 állomás adatai.

A konvektív és nagyskálájú csapadék elkülönítése nem mindig egyértelmű, ezért egyes eseményeket vegyes kategóriába sorolnak, melyet két szigorúsági kritériummal határoztak meg. A szigorú módszernél, ha mindkét típus megfigyelhető volt a referencia időszakban, akkor a vegyes kategóriába sorolják, míg a maximális módszernél figyelembe veszik a két típus súlyát és amelyik nagyobb részben szerepel a referencia időszakban, ahhoz az eseményhez sorolják.

Ezt a módszert használta fel munkáiban Demeter Szilvia, aki 11 db magyarországi meteorológiai állomás adatait vizsgálta meg (Demeter, 2016, 2018). A fentebb említett különböző szigorúsági kritériumok alkalmazásának következményére láthatunk példát a csapadéktípusok arányaira nézve a Demetertől módosítás nélkül átvett ábrán (2. ábra). Látható, hogy a szigorú módszer esetén (2.a ábra)

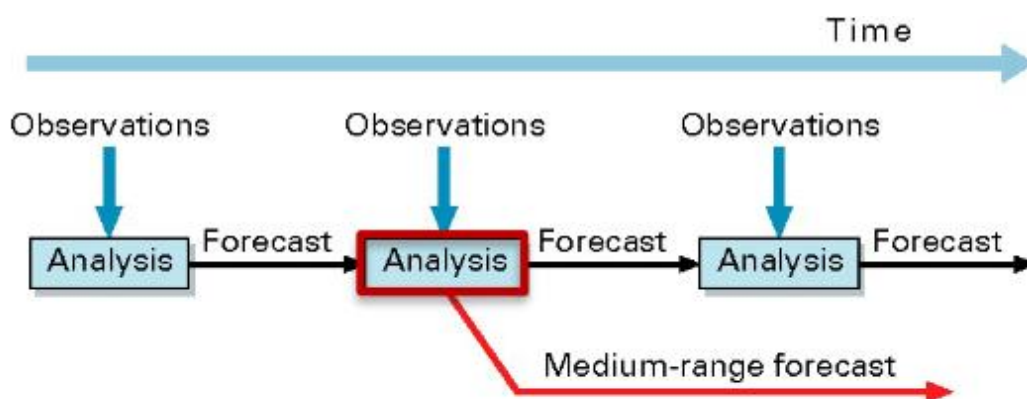


2. ábra: Csapadék típusok arányainak ábrázolása a különféle szigorúsági módszerek esetén. a) Szigorú módszer; b) Maximum módszer (Demeter 2016)

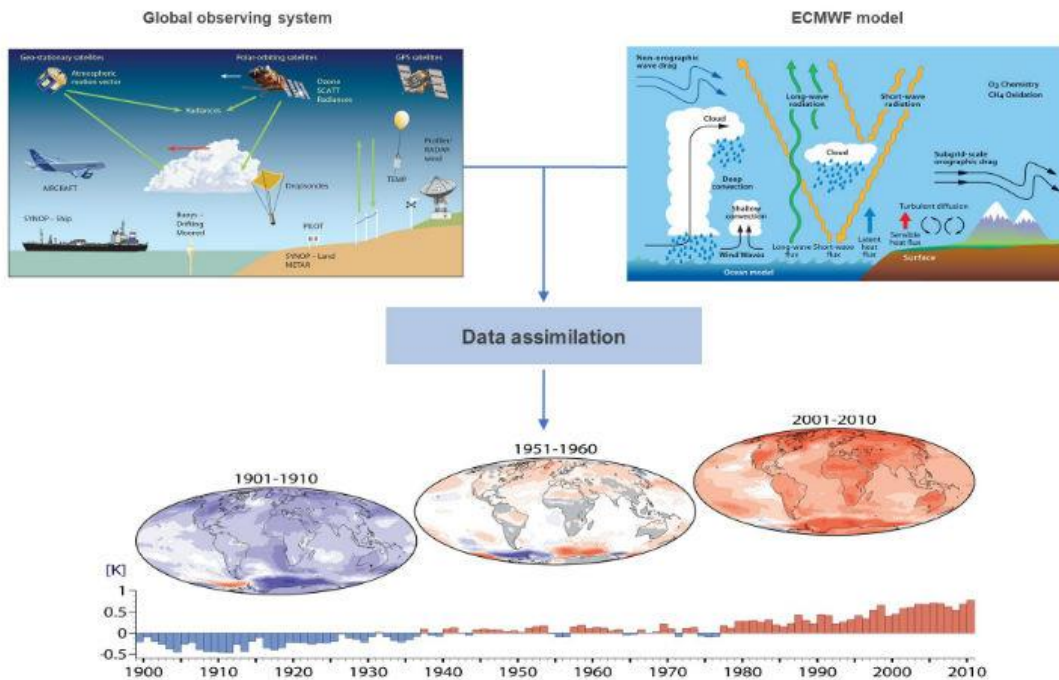
vegyes kategóriába sorolt események a maximum módszer (2.b ábra) alkalmazása során szinte kivétel nélkül konvektív csapadékeseményekként jelennek meg. Ez azt jelenti, hogy ezeknél a csapadékeseményeknél mindkét csapadéktípus jellemzői megmutatkoztak, azonban a konvektív csapadéktípus jellemzői nagyobb mértékben voltak jelen. A munkánkban végzett összehasonlítás során a maximum módszerrel meghatározott adatokat használtuk fel, mivel ebben az esetben az adatok 99%-ban a két csapadéktípus egyikébe került, ezáltal egyértelműbben tudtuk összehasonlítani az ERA5 adatokkal, mivel ott nem definiáltak vegyes csapadékot.

5.2. ERA5 reanalízis

A másik adattípus, melyet a dolgozatban használunk az az European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) szervezet alá tartozó Copernicus Climate Change Service (C3S) által készített ERA5 reanalízis különböző adatgyűjteményeinek adatsorai. Az ERA5 a C3S 5. generációs légköri klíma reanalízise, amely 1940-től a napjainkig készült el (Bell és mtsai., 2021; Hersbach és mtsai., 2020). A reanalízis rövid – 12 órás – modellfuttatásokból áll és minden két futtatás között adat asszimilációt végeznek (3. ábra „Analysis”-al jelölt dobozok) a világ minden részéről gyűjtött megfigyelésekkel. Az adat asszimiláció során hozzáigazítják az észlelt adatokhoz a modell eredményeket (4. ábra). Ezzel az eljárással megakadályozzák, hogy a modell nagy mértékben eltérjen a valóságtól. Röviden úgy lehet ezt értelmezni, mintha egy bonyolult interpolációt végeznének el. Eredményként az egész bolygó felszínére és a légkör 137 rétegére 0.25 szélességi és hosszúsági fokos oldalhosszúságú horizontális cellákon és órás időlépéssel rendelkezésre állnak az adatok. Ezáltal egy időben és térben konzisztens adatbázist hoznak létre a múltra.



3. ábra: A reanalízis folyamata. (Hersbach 2023)



4. ábra: Az ERA5 reanalízis egy modell futtatásának folyamata (Hersbach 2023)

Az ERA5 reanalízisből különböző adatgyűjteményeket készítenek, amelyből 3 fő típus létezik. Ezeket az adatsorokat bárki letöltheti az internetről. Mindegyik típusnak van órás és havi átlagolt típusa:

- Felszíni rétegre integrált adatgyűjtemény: minden cellára összegzik az atmoszféra teljes magasságában az értékeket, ezáltal egy 2 dimenziós adatgyűjteményük lesz az egyes időlépésekre. Ez a gyűjtemény tartalmazza a csapadékot, felszínközeli hőmérsékletet, vertikális integrálokat. Az órás és havi adatgyűjtemény pontos nevei:
 - o ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present (Hersbach és mtsai., 2023b)
 - o ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present (Hersbach és mtsai., 2023d)
- Nyomás szintenként számított adatgyűjtemény: minden cella 137 nyomás szintjére számítanak értékeket. Ez a gyűjtemény tartalmazza a függőleges légmozgásokat, szélsébségeket, felhőzettséget stb. Az órás és havi adatgyűjtemény pontos nevei:
 - o ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present (Hersbach és mtsai., 2023a)
 - o ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present (Hersbach és mtsai., 2023c)
- Szárazföld felett számított adatgyűjtemény: csak a szárazföldi cellák felszínére számítanak adatokat, azonban jobb, 0.1 fokos térbeli felbontással.
 - o ERA5-Land hourly data from 1950 to present (Muñoz-Sabater, 2023a)

o ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present (Muñoz-Sabater, 2023b)

A felsorolt és bemutatott adatgyűjteményekből a 4. táblázatban bemutatott paramétereket töltöttük le,

4. táblázat: ERA5-ből letöltött paraméterek és fontosabb specifikációik

Paraméterek	Adatgyűjtemény	Időintervallum	Terület	Felbontás	Cél
CP, LSP	ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present	2000-2015 Január-December	Duna vízgyűjtő 42,5°N-50,5°N 8°E-30°E	0,25°x0,25° 18-21x28 km	I-II.
w 1000 hPa, 975 hPa, 950 hPa	ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present	2009-2012 Május-Szeptember	Duna vízgyűjtő 42,5°N-50,5°N 8°E-30°E	0,25°x0,25° 18-21x28 km	II.
T2, SWV1, LSP, CP, VIMD, VIWVD	ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present	2009-2012 Május-Szeptember	Duna vízgyűjtő 42,5°N-50,5°N 8°E-30°E	0,25°x0,25° 18-21x28 km	II.

ahol

- a CP a konvektív csapadék,
- az LSP a nagyskalájú csapadék,
- a w a vertikális légmozgás nagysága különböző nyomás szinteken,
- a T2 a 2 méteren mért léghőmérséklet,
- az SWVL1 a talaj legfelső rétegének nedvessége,
- a VIMD a légoszlop teljes magasságában integrált nedvesség divergencia, és
- a VIWVD a légoszlop teljes magasságában integrált nedvesség divergencia fluxus.

A vertikális légmozgást (w) Pa/s-ben adták meg. Ezt a jobb érthetőség kedvéért durva becslések során átváltottam m/s-be a Meteorológia alapismeretek című könyv alapján (Bartholy és mtsai., 2013). A becslésekből adódó pontatlanság nem zavaró esetünkben, mivel az áramlás irányát és egymáshoz viszonyított mértékét nem befolyásolja. A számítás során feltételeztem, hogy a gravitációs gyorsulás és a levegő sűrűsége (20 °C) konstans a vizsgált légrétegben. Ezeknek a mértékét ismerve fajlagos felületre kiszámítható az 1 Pa-nak megfelelő levegő magassága, amelynek mértéke a (3) összefüggésben látható.

$$11,76 \frac{\text{Pa}}{\text{s}} \sim 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3)$$

6. Eredmények

6.1. Adattípus összehasonlítás

A bemutatott korrelációs ábrákon és oszlopdiagramokon a szinoptikus észlelésekből (zöld színnel jelölve) és az ERA5-ből (narancssárga színnel jelölve) származó konvektív, nagyskálájú és összes csapadékmennyiségeket hasonlítottuk össze. A szinoptikus megfigyelésekből származó adatokat Demeter munkáiból olvastuk ki. Alább a budapesti és a debreceni állomásra a 15 évre átlagolt havi csapadék mennyiségek összehasonlítását mutatjuk be. Az évekre vonatkozó összehasonlítás ábrái a függelékben találhatóak állomásonként felsorolva.

A debreceni és budapesti állomásnál, a havi átlagok összehasonlító ábráit elemezve elmondható, hogy az ERA5, mind a konvektív (Debrecen: 5. *ábra*, Budapest: 8. *ábra*), mind a nagyskálájú (Debrecen: 6. *ábra*, Budapest: 9. *ábra*) csapadékot úgy becsüli túl, hogy a regressziós egyenes közel párhuzamos a tökéletes egyezést jelentő, origóból kiinduló egységnyi tangensű egyenessel (amely a korrelációs ábrákon szaggatott fekete vonallal került feltüntetésre).

Ez azt jelenti, hogy az ERA5 modell abszolút értékben közel egyforma mértékben becsüli túl a konvektív és nagyskálájú csapadékmennyiségeket (amennyiben a regressziós egyeneshez viszonyítunk). Ennek további jelentése, hogy a konvektív csapadékmennyiség növekedésével a relatív pontatlanság csökken. Így érthető, hogy a relatív legjobb egyezések a nyári hónapokban vannak, amikor a legnagyobb a konvektív csapadék részaránya a teljes lehullott csapadékon belül és a legrosszabbak, amikor kicsi a részaránya.

Az összes csapadék tekintetében szintén erős összefüggést találtunk, azonban a regressziós egyenes nem párhuzamos a tökéletest jelentő egyenessel, hanem a nagyobb csapadékok felé tartva közelít hozzá (Debrecen: 7. *ábra*, Budapest: 10. *ábra*). Ennek a jelentése, hogy a minél nagyobb a csapadékmennyiség annál pontosabb eredményt ad a reanalízis.

Az ERA5 szabályos túlbecsülését már más változókra is megfigyelték. (Báder & Szilágyi, 2023).

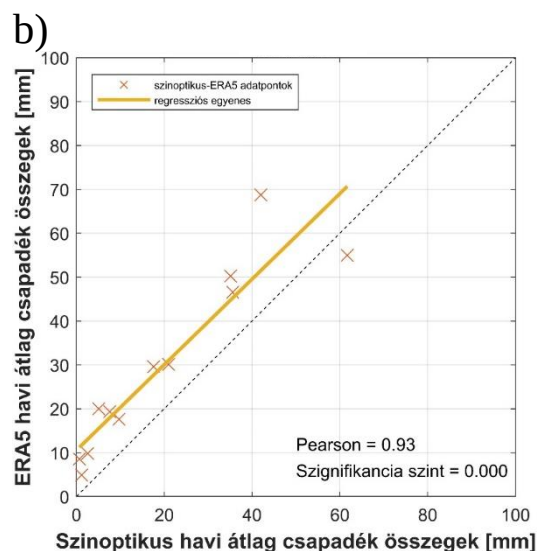
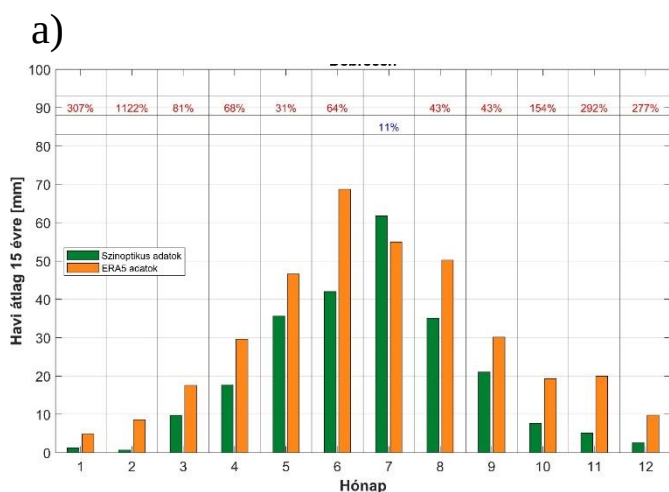
A korreláció számításból kapott kapcsolat erősségét a korrelációs tényezővel jellemeztük. Ez a konvektív csapadék esetén a legerősebb, de a nagyskálájú és összegzett mennyiségnél is erősnek mondható. Azonban felmerül a kérdés, hogy a mintán végzett számítás eredménye reprezentatív-e az összes adatra, mivel a vizsgálatunk során a hipotetikus összes létező adatkár helyett csupán néhányat vizsgáltunk. Ehhez megvizsgáltuk a korrelációs tényező szignifikanciáját, ahol 5%-os szignifikancia szintet vettünk fel. A számításunk szerint a kapcsolat szignifikánsnak mondható.

A korrelációs ábrán tapasztalt erős és szignifikáns kapcsolat felveti egy egységes transzformációs összefüggés konstruálásának lehetőségét is a regressziós egyenes egyenletéből kiindulva, ezáltal átszámíthatókká válnak egymásba az adatok.

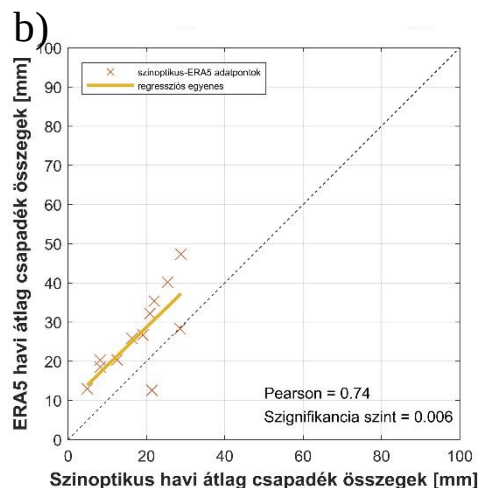
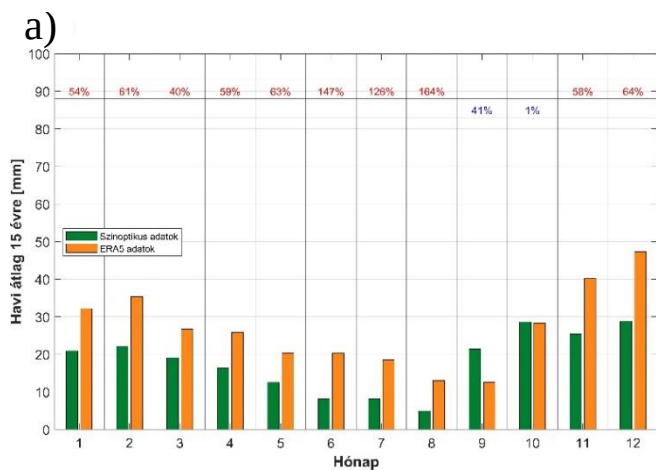
$$ERA5 = a \cdot SYNOP + b \quad (4)$$

Esetünkben az a változó egy 1-hez közeli szám lesz és b pedig körülbelül 10-re adódik. Ennek jelentése, hogy bármely ERA5 adatot 10 mm-rel csökkentünk, akkor megkapjuk a szinoptikus adatot. Ennek az összefüggésnek a kijelentéséhez természetesen további, nagy mennyiségű adaton elvégzett összehasonlító vizsgálatra van szükség.

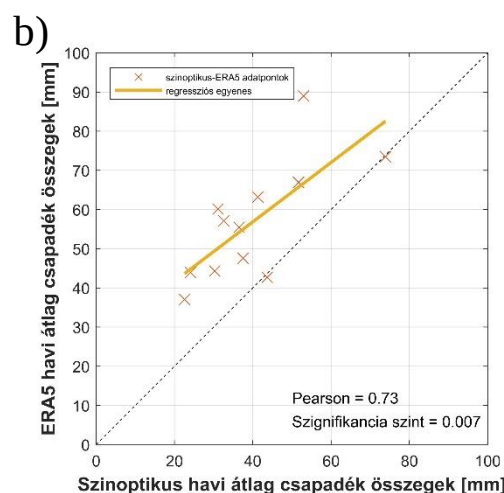
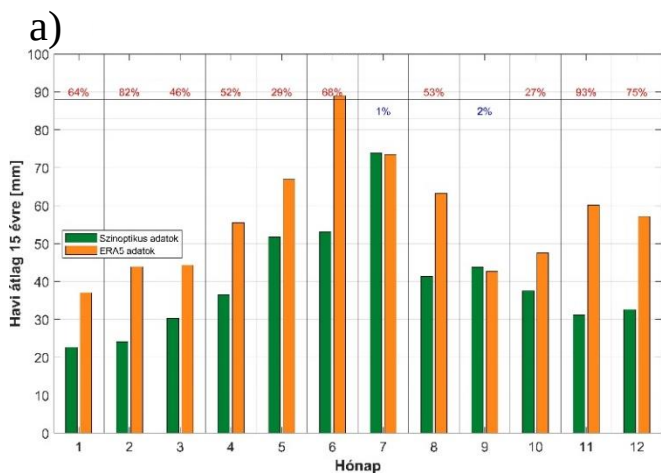
A függelékben található éves összehasonlító ábrák esetében a konvektív csapadékról mondható el, hogy minél csapadékosabb volt egy év annál jobb egyezést láthatunk a modellezett és megfigyelt változók között. A kékes-tetői állomás esetében nem találtunk összefüggést, amit az okozhat, hogy az ERA5 felbontásához képest az állomás nagyon lokális domborzati viszonyok között fekszik.



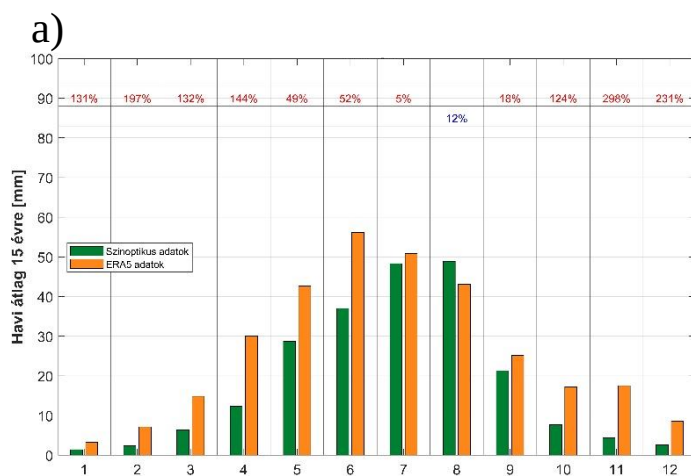
5. ábra: A konvektív csapadékösszegek összefüggése Debrecenben; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra



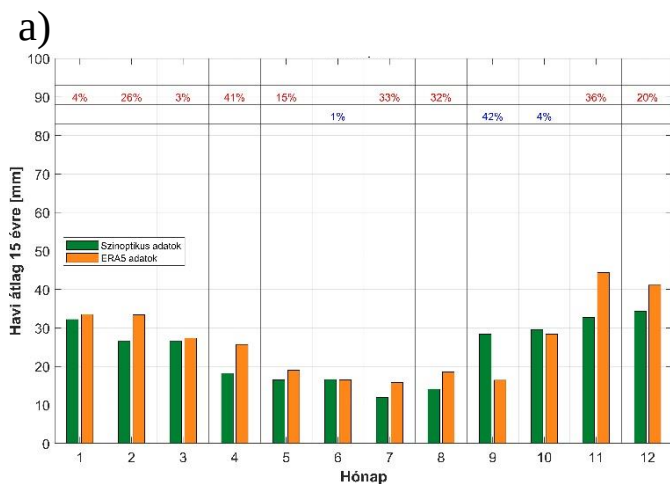
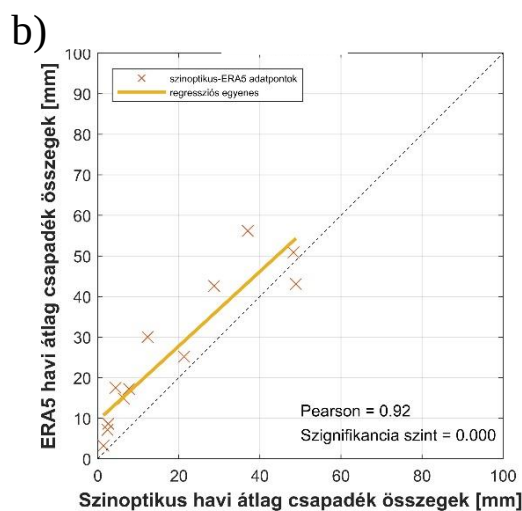
6. ábra: A nagyskalájú csapadékösszegek összefüggése Debrecenben; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra



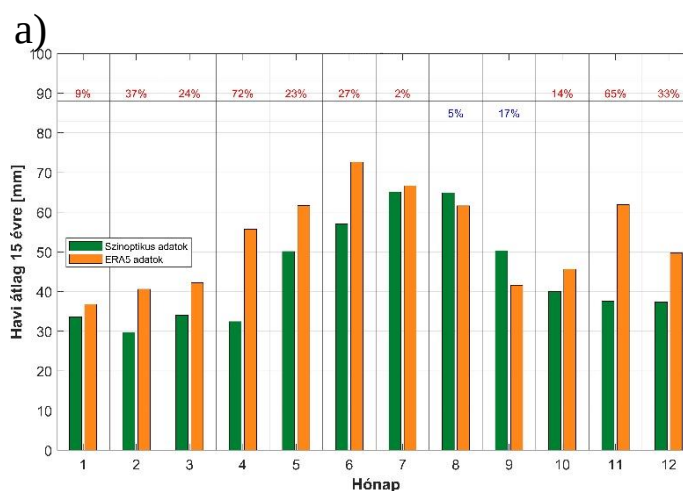
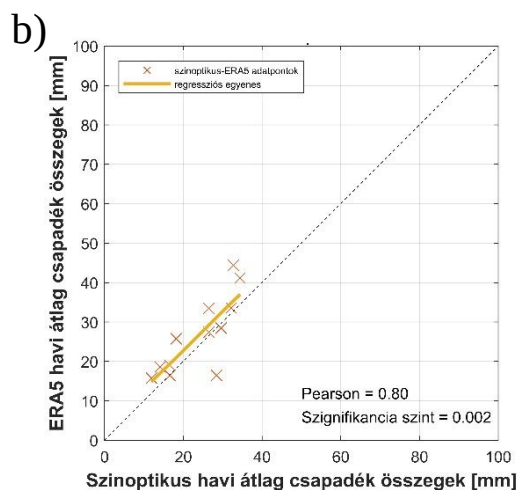
7. ábra: Az összegzett csapadéktípusok csapadékösszegeinek összefüggése Debrecenben; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra



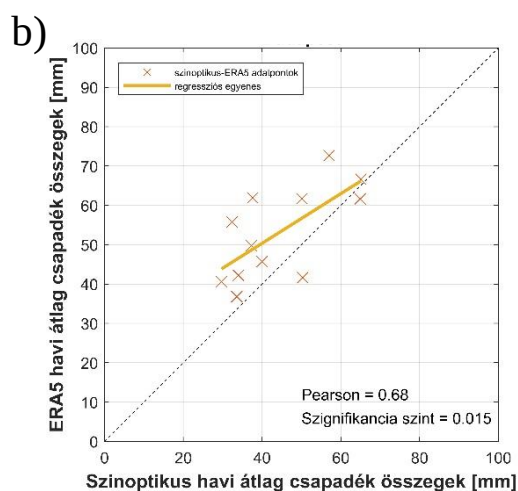
8. ábra: A konvektív csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra



9. ábra: A nagyskalájú csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra



10. ábra: Az összes csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) 15 évre átlagolt havi értékek; b) regressziós ábra



6.2. Változók órás idősorainak vizsgálata

A budapesti és a debreceni megfigyelőállomáshoz tartozó ERA5 cellákban a konvektív csapadék, a nagyskalájú csapadék, a feláramlás, a felszínközeli hőmérséklet, talajnedvesség és a vízszintes szélesség változók órás idősorait ábrázoljuk. Két, az összehasonlító elemzésben is vizsgált év, 2010 és 2012 nyári hónapjait vizsgáljuk, előbbi kimondottan csapadékos (360 mm), utóbbi meglehetősen száraz (175 mm) volt.

Elsősorban a talajnedvesség és a konvektív csapadékesemények száma közötti kapcsolatra, a köztük fennálló pozitív visszacsatolásra fókuszálunk, de a többi változó erősítő vagy gyengítő hatását is tekintetbe vesszük (lásd a folyamatot az 1. ábra).

A következő alfejezetekben bemutatott ábrák (11. ábra, 12. ábra, 13. ábra, 14. ábra) a következő elvek szerint épülnek fel:

- az ábrák idősorokat jelenítenek meg, a felső blokkok három hónapos idősorokat mutatnak (június 01.-augusztus 31.), az alsó blokkokban pedig egy-egy részletesebben bemutatni kívánt részidőszakot láthatunk (zöld kerettel jelölve);
- egy-egy blokk további három részre tagolódik: a felső sorban a 6 óránként kumulált csapadékösszegek tüskékként jelennek meg (késsel a nagyskalájú, zölddel a konvektív csapadéktüskék), piros folytonos vonallal pedig a talajnedvesség órás adatai; a középső sorban kék folytonos vonallal a feláramlás órás 6 órás mozgóátlag idősora látható (világoskék színnel a feláramláshoz, sötétkék színnel a feláramláshoz tartozó időszavokat rendeltük), narancssárgával befestett folytonos vonallal a horizontális szélesség 6 órás mozgóátlagának abszolút értékét láthatjuk; az alsó sorban a felszíni hőmérséklet órás idősorát (piros folytonos vonal) és 24 órás mozgóátlagát (kék folytonos vonal) láthatjuk;
- az alsó blokkokban a feláramlás 6 órás mozgóátlagát három különböző légnyomáshoz tartozó szinten (ami három különböző tengerszint feletti magasságnak felel meg) is ábrázoltuk.

Az elsőre talán legszembetűnőbb összefüggés a durván heti léptékben észlelhető negatív visszacsatolás a talajnedvesség és a felszíni hőmérséklet között. Néhány, ezt a kapcsolatot bemutató időszakot piros téglalappal emelünk ki az ábrákon. Ez a kapcsolat jól magyarázható az (1) energiaegyenlettel: a sugárzási energia vagy a felszíni hőmérsékletet növeli vagy párologtat. Ha rendelkezésre áll megfelelő mértékű talajnedvesség, akkor az energia nagyobb része fordítódik párolgásra és így a felszíni hőmérséklet moderáltabbá válik. Ez tulajdonképpen tekinthető a párolgás, mint szolgáltatás lokális klímaszabályozó hatásának.

A növekvő talajnedvességgel szinkronban csökkenő felszíni hőmérséklettel (a stabilabb légrétegződés miatt) a feláramlás is mérséklődik. Ez utóbbi viszont a konvektív csapadékképződésre nézve másodlagos hatótényező, az elsődleges talajnedvességhez képest, mivel a kisebb mértékű feláramlás ellenére nagyobb potenciális konvektív energia áramlik felfele, a megnövekedett párolgás miatt (Göndöcs, 2015). Lásd az 1. ábra a feltételezett visszacsatolásokat.

Vizsgálódásunk középpontjában olyan időszakok állnak, amikor a talajnedvesség megnövekedett és az ezt követő időszakban (1-2 hétben) további, jellemzően konvektív csapadékesemények következnek be.

Ilyen például a csapadékosabb, 2010-es nyáron a debreceni és budapesti cellához tartozó idősorban a június második felét felölelő időszak. Június 18-án, egy majdnem 15 mm csapadékkal járó csapadékesemény után a megnövekedett talajnedvesség mellett a feláramlás és a relatíve csendes horizontális szél együttesen további 12 konvektív csapadékeseményt eredményez az elkövetkező 4-5 nap során. Hasonló tapasztalatokat vonhatunk le ugyanebben az időszakban a budapesti cellán is, és a 2012-es, szárazabb nyárhoz tartozó idősorokból is. Megállapítható, hogy a pár napon belül bekövetkező konvektív csapadéksorozatok esetében a megfelelő (nagyobb) talajnedvesség mellett a feláramlás jelenlétére is szükség van, továbbá az események mérsékeltebb horizontális légmozgás mellett következnek be.

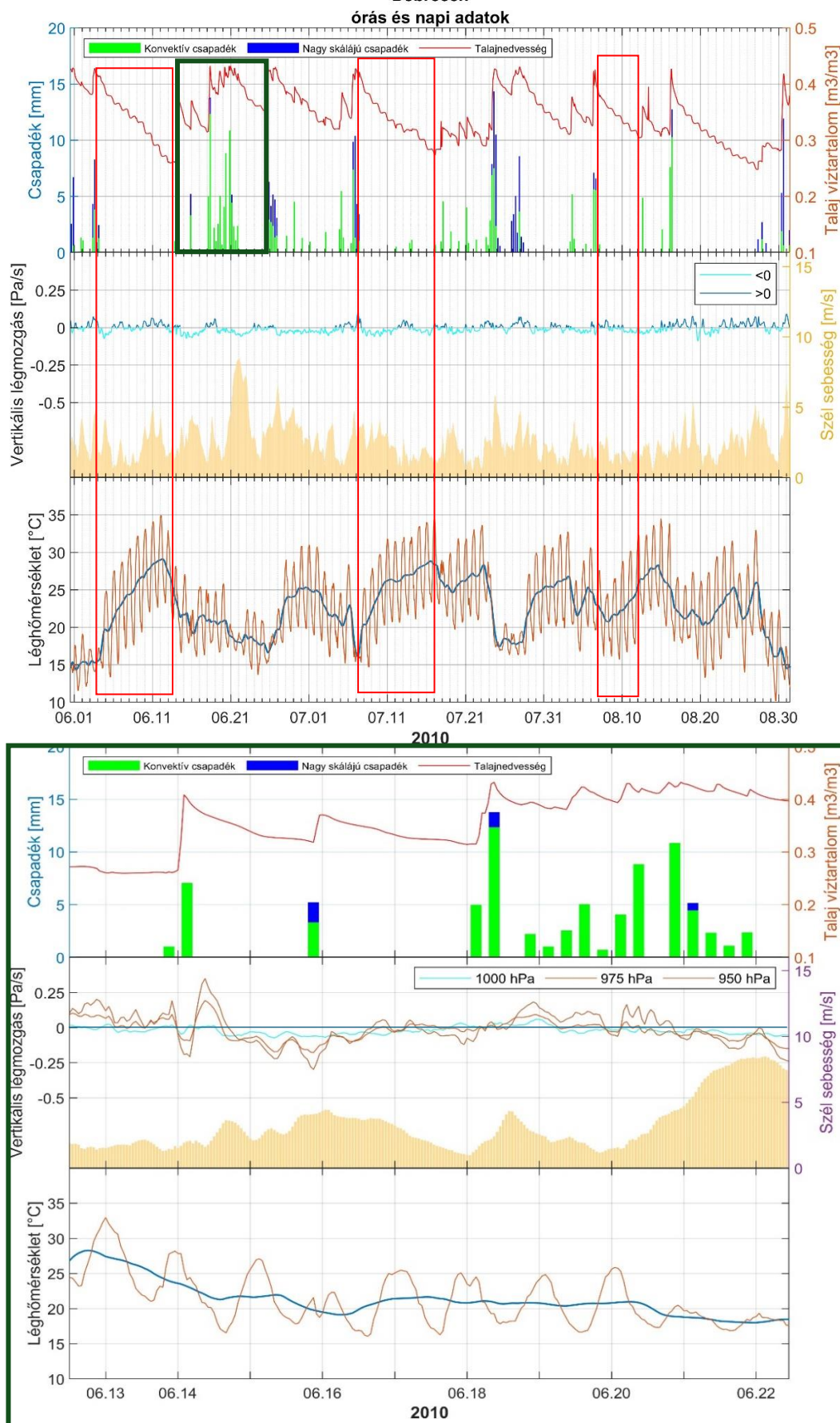
Ezenkívül megvizsgáltuk, hogy évszakos átlagban vannak-e különbségek a csapadékos és száraz években. Megfigyeltük, hogy 2010-ben számottevő (~127mm) nagyskalájú csapadék hullott Debrecenben. Ez egy nagy mennyiségű kívülről érkező víztömeget jelent, ami magasabban tartotta a talajnedvességet. Két év múlva 2012-ben elhanyagolható (~15mm) mennyiségű nagy skálájú csapadék hullott. Izgalmas megfigyelés, hogy 2010-ben 33%-kal több konvektív típusú eső esett mint 2012-ben. Felvetődik a kérdés, hogy talán a nagyskalájú csapadék által behozott nedvesség hatására nőtt meg a konvektív csapadék mennyisége is. Összefüggés felállításához sokkal több adatot meg kellene vizsgálni.

	Konvektív sum [mm]	LSP sum [mm]	SWVL1 [m3/m3]
2010 nyár	232,95	126,75	0,34
2012 nyár	157,91	15,64	0,22

5. táblázat: Nyári csapadékösszegek változása a debreceni cellában

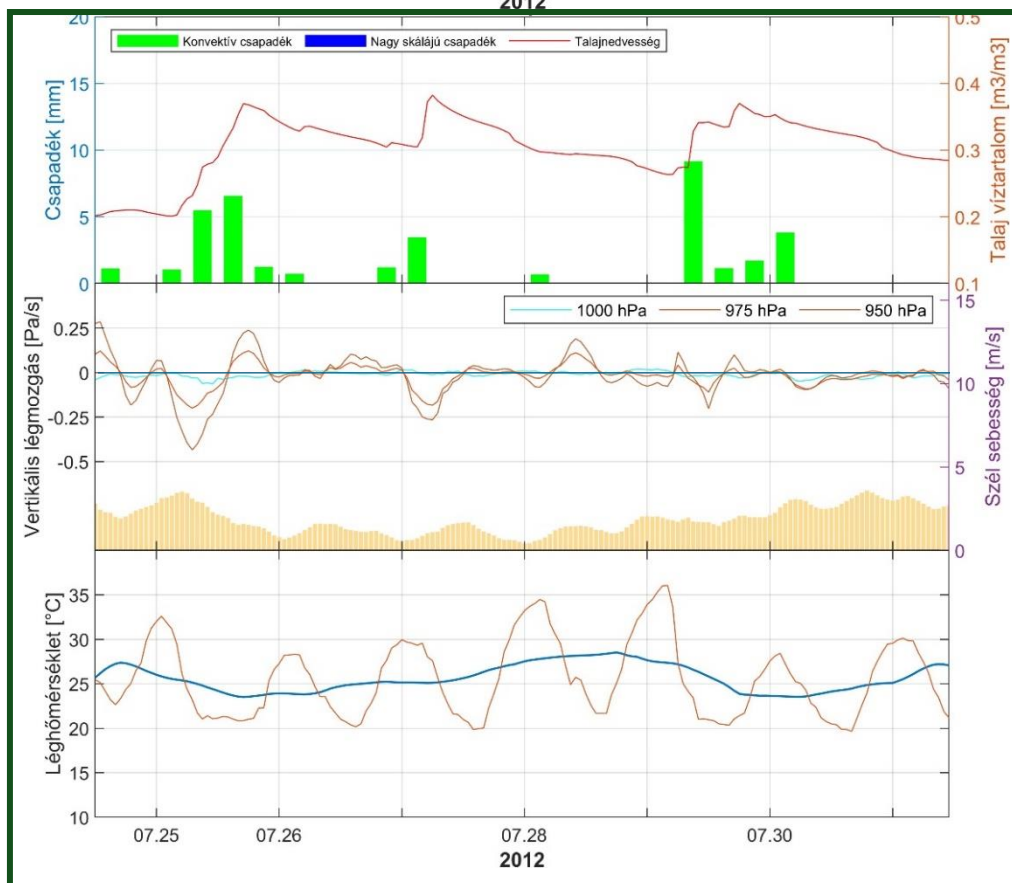
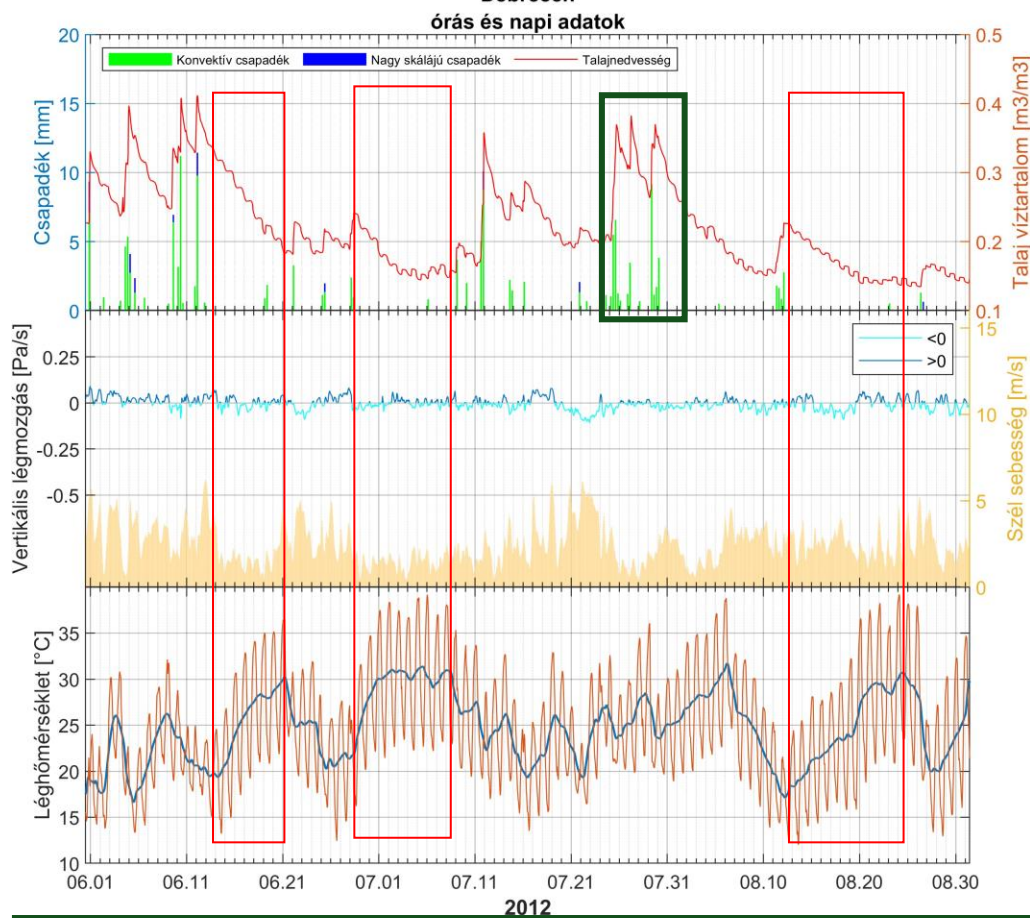
6.2.1. Debrecen

Csapadék, talajnedvesség és függ. feláramlás ábrája 0.5 mm-es maszkkal
Debrecen



11. ábra: Debreceni cella időszora 2010 nyarára a korábban bemutatott változókkal

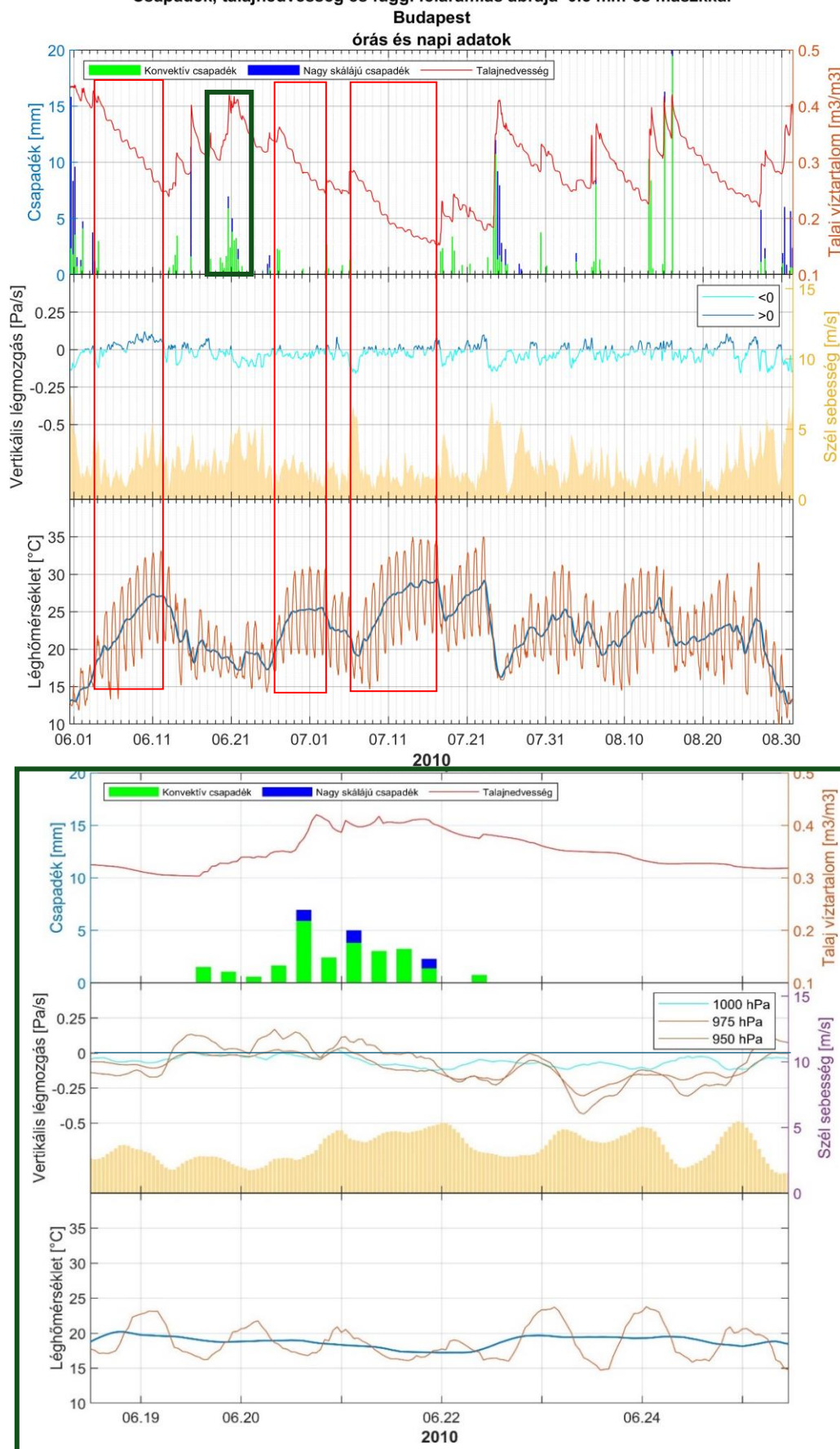
**Csapadék, talajnedvesség és függ. feláramlás ábrája 0.5 mm-es maszkkal
Debrecen**



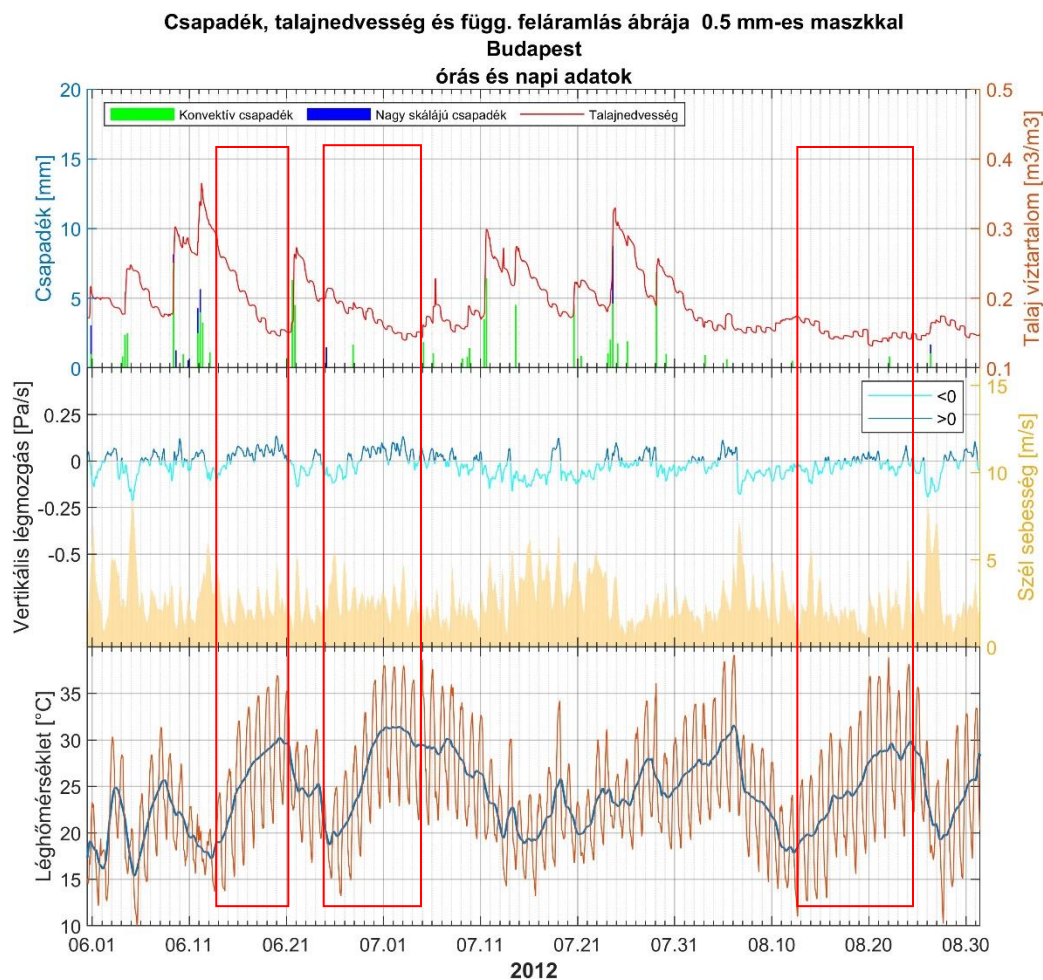
12. ábra: Debreceni cella időszora 2010 nyarára a korábban bemutatott változókkal

6.2.2. Budapest

Csapadék, talajnedvesség és függ. feláramlás ábrája 0.5 mm-es maszkkal



13. ábra: Budapesti cella idősora 2010 nyarára a korábban bemutatott változókkal



14. ábra: Budapesti cella idősora 2012 nyarára a korábban bemutatott változókkal

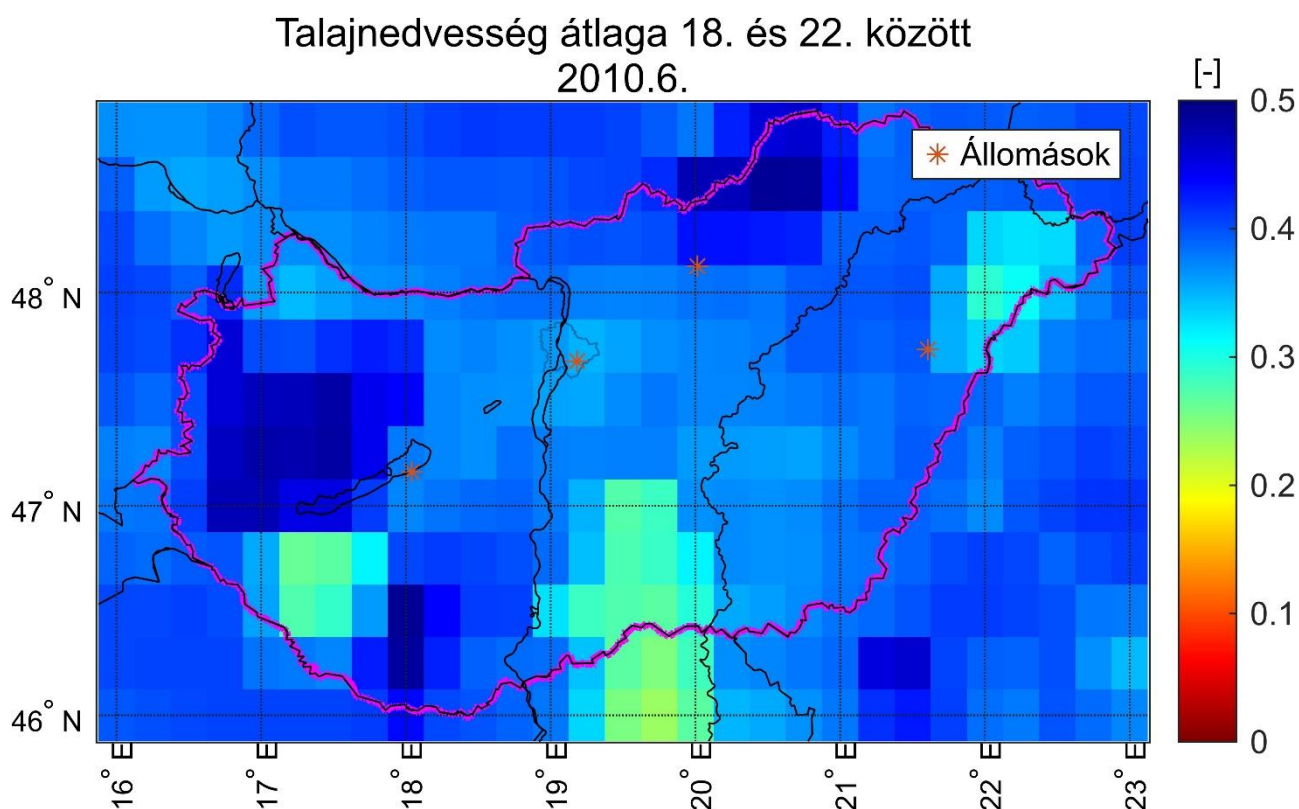
6.3. A változók térbeli viselkedése és esetleges kölcsönhatásai

Kilépve a cellaléptékű megközelítésből, megvizsgáljuk változóink térbeli viselkedését és kölcsönhatásait. Az előző alfejezetben részletesebben bemutatott csapadékos időszakra (2010 június 18-22) megnézzük változóink négynapos átlagának térbeli eloszlását.

A 15. ábra a talajnedvesség és 16. ábra a feláramlások átlaga, a 17. ábra a konvektív csapadékösszegek láthatóak.

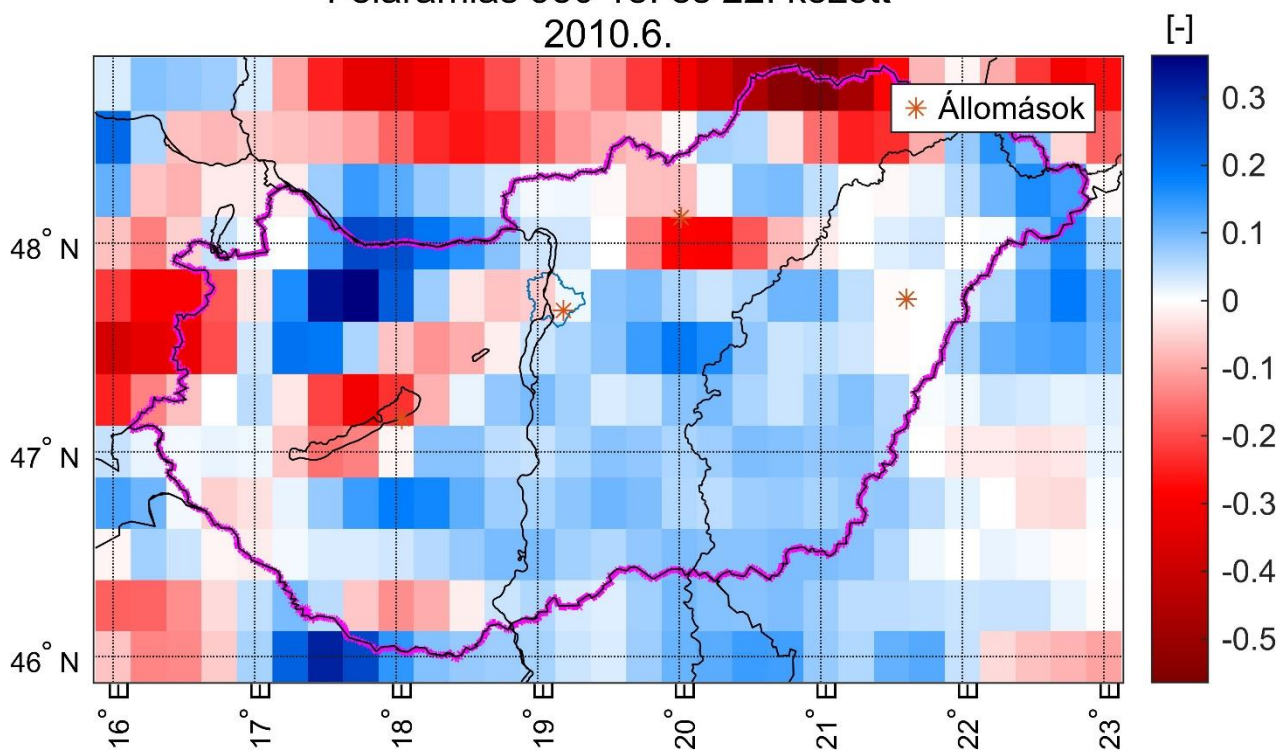
Láthatjuk, hogy Budapesten és Debrecenben lokálisan tapasztalt talajnedvesség növekedés országosan jellemző (az Ormánság, a Homokhátság és a Nyírség egyébként is szárazabb területeknek számítanak). Következésképpen a konvektív csapadékok megnövekedett mennyisége sem lokális jellegű. Ez a tapasztalat megfeleltethető Göndöcs eredményeivel a talajnedvesség egységes változtatása és a konvektív csapadék mennyiségének változását illetően (Göndöcs, 2015).

Megfigyelhető, hogy a konvektív csapadékmennyiségek az Alföldön a legnagyobbak, ahol nagy összefüggő feláramlás is történik.



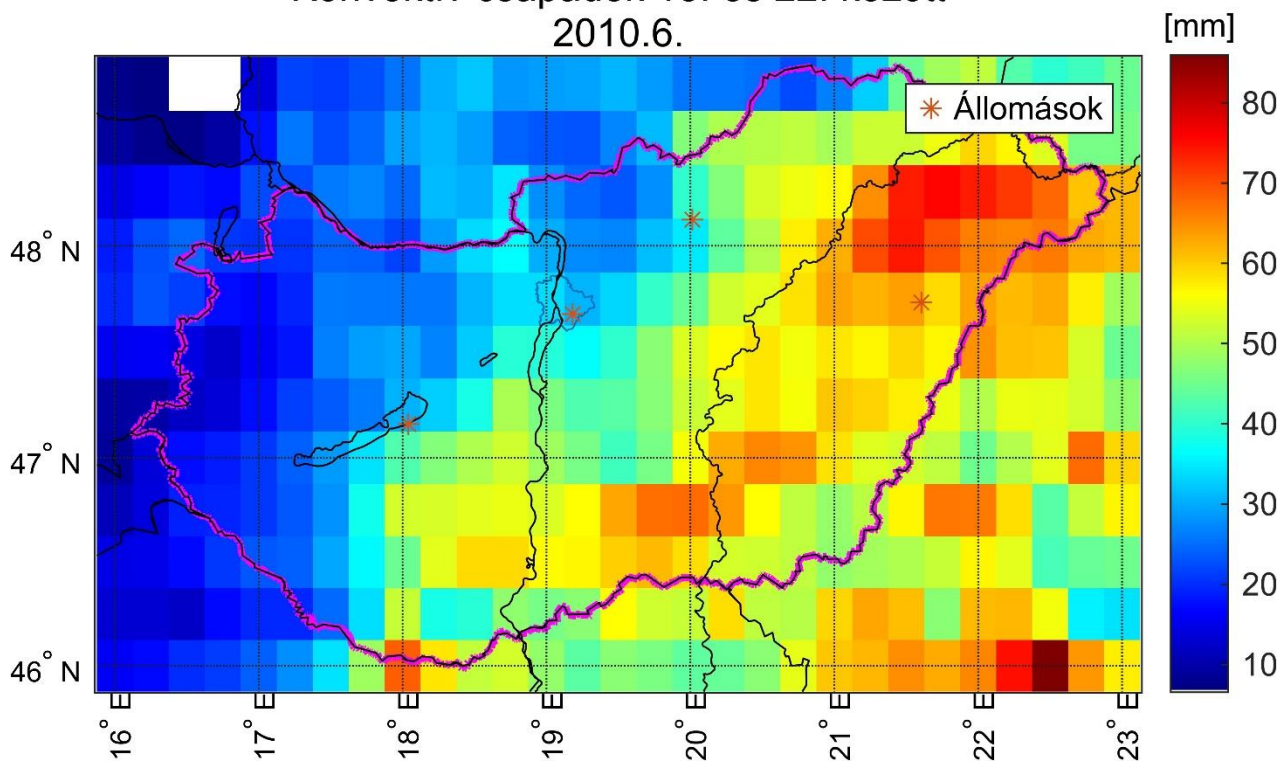
15. ábra: A talajnedvesség átlag értékei 2010 nyarának meghatározott időszakára.

Feláramlás 950 18. és 22. között 2010.6.



16. ábra: A feláramlás átlag értékei 2010 nyarának meghatározott időszakára.

Konvektív csapadék 18. és 22. között 2010.6.



17. ábra: A konvektív csapadék összege 2010 nyarának meghatározott időszakára. Megfigyelhető,

7. Összefoglalás, kitekintés

Vizsgálatainkat három, jól elkülönülő szinten végeztük:

- összehasonlítottuk a konvektív csapadékmennyiségeket lokálisan klímamodell és megfigyelésekből levont következtetések alapján;
- megvizsgáltuk a konvektív csapadékképződés hatótényezőinek dinamikáját lokálisan és órás idősorok alapján;
- végül egy csapadékos időszakban vettük szemügyre a talajnedvesség, vertikális légmozgások és konvektív csapadékmennyiségek térbeli mintázatát.

Elmondhatjuk, hogy a kevés számú vizsgált cellában jól definiálható kapcsolatot találtunk a szinoptikus megfigyelések alapján csoportosított csapadék típusok és az ERA5 csapadék típusok között.

Lokális értelemben és az órás idősorok alapján a talajnedvesség és konvektív csapadékmennyiségek közötti pozitív visszacsatolásra utaló jeleket találtunk.

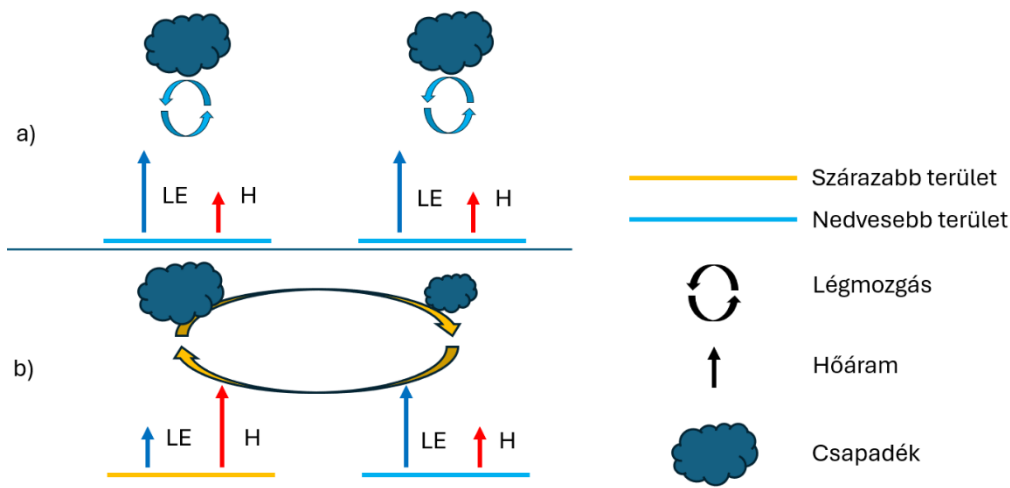
A dolgozatban ilyen jellegű vizsgálatot nem végeztünk, azonban meg kell említenünk, hogy amikor száraz és nedves területek egyszerre vannak jelen, a nedvességtranszport diverzitást és térbeli kiegyenlítődést mutat. Ha a vízkieresztés csapadékképződésre gyakorolt hatásait szeretnénk a jövőben vizsgálni, akkor a fent említett tényt figyelembe kell venni és vizsgálni szükséges.

Ehhez felállítottunk egy, a 18. ábra bemutatott modellt, amely sematikus módon írja le a térben homogén és inhomogén talajnedvességből következő feláramlási és csapadékképződési folyamatokat.

Az *a)* esetben a zárt rendszeren belül homogén talajnedvességet feltételezünk, ezáltal alacsonyabb a hőmérséklet, nagyobb a páratartalom és az 1. ábra bemutatott visszacsatolásokból kiindulva megnövekszik a konvektív csapadékok mennyisége. Az egyenletes nedvesség eloszlás miatt ez a növekedés is egyenletesen oszlik el az egyes területek felett. Erre látunk példát Göndöcs munkájában, ahol a Kárpát-medencében egységesen megnövelte mindenhol a talajnedvességet (Göndöcs, 2015).

A *b)* esetben a nedvességtartalom nem egyenletes oszlik el a modellben, ezáltal a szárazabb terület nagyobb mértékű feláramlása átszívja a nedves területen létrejövő légtömegeket. Ennek hatására a nedvesebb terület felett csökken a csapadék mennyisége, míg a szárazabb terület felett növekszik.

Ez a fizikai kép talán egy lehetséges magyarázata a Szilágyi és Franz által megfigyelt jelenségnek, akik 36 év adatainak vizsgálata alapján negatív változást figyeltek meg aktívan öntözött területekre hullott csapadékmennyiségekben (Szilágyi & Franz, 2020). Az Egyesült Államokban, Nebraska államban megfelelő mennyiségű és minőségű adatok birtokában évtizedekre visszamenően különbségtérképeket tudtak rajzolni az öntözött területek arányára és az éves csapadékmennyiségekre nézve. A vizsgált terület durván 500 km kiterjedésű. A területen az eredmények alapján egyértelműen látszik az ellentétes értelmű változás (negatív korreláció) az öntözés és a csapadék változása között.



18. ábra: Egyszerűsített feltételezett modellek a konvektív csapadékok térbeli viselkedésére. a) Homogén talajnedvesség; b) inhomogén talajnedvesség.

Mindezek alapján a kutatást két lehetséges irányban látjuk folytathatónak. Az egyik további adatelemzésen alapszik: a talajnedvesség és konvektív csapadék és a további változók közötti összefüggések statisztikai vizsgálata sokkal nagyobb adathalmazon. A másik lehetőség egy regionális klímamodell alkalmazása, ebben az esetben modellezhetnénk a vízkieresztesek hatását a talajnedvességek inhomogén beállításain keresztül.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a segítségüket azoknak, akik nélkül nem jöhetett volna létre ez a dolgozat. Elsősorban konzulensemnek Balázsnak, aki időt és energiát nem kímélve egyengette az utamat, hogy ezt a munkát ilyen színvonalon elkészíthessem. Sokat tanultam tőle a tudományos megközelítésekről. Továbbá segítette a munkát még:

- Báder László, és Torma Péter, akik a kutatási irány kiválasztásában segítettek,
- Pieczka Ildikó és Soósné Dezső Zsuzsanna, akik a szinoptikus adatokkal kapcsolatos információkkal láttak el.

A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta.

Irodalom

- Báder, L., & Szilágyi, J. (2023). Widening Gap of Land Evaporation to Reference Evapotranspiration Implies Increasing Vulnerability to Droughts in Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(4), 1028–1037. <https://doi.org/10.3311/PPci.21836>
- Bartholy, J., Mészáros, R., Geresdi, I., Matyasovszky, I., Pongrácz, R., & Weidinger, T. (2013). *Meteorológiai alapismeretek* (J. Bartholy & R. Mészáros, Szerk.). Eötvös Loránd Tudományegyetem. <https://ttk.elte.hu/dstore/document/885/book.pdf>
- Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J.-R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186–4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>
- Demeter, S. (2016). *Konvektív és rétegfelhőből hulló csapadék statisztikai vizsgálata állomási mérések alapján* [Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem]. https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/BSc/2016_2/Demeter_Szilvia_2016.pdf
- Demeter, S. (2018). *A konvektív és a teljes csapadék statisztikai vizsgálata a RegCM klímamodellben* [Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem]. https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MSc/2018_2/Demeter_Szilvia_2018.pdf
- Fluet-Chouinard, E., Stocker, B. D., Zhang, Z., Malhotra, A., Melton, J. R., Poulter, B., Kaplan, J. O., Goldewijk, K. K., Siebert, S., Minayeva, T., Hugelius, G., Joosten, H., Barthelmes, A., Prigent, C., Aires, F., Hoyt, A. M., Davidson, N., Finlayson, C. M., Lehner, B., ... McIntyre, P. B. (2023). Extensive global wetland loss over the past three centuries. *Nature*, 614(7947), 281–286. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05572-6>

Göndöcs, J. (2015). *A talajnedvesség kapcsolata a konvektív csapadékképződéssel WRF szimulációk alapján* [Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem].

https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MSc/2015/GondocsJulia_2015.pdf

Götz, G., & Rákóczi, F. (1981). *A dinamikus meteorológia alapja*. Tankönyvkiadó.

Gu, L., Yin, J., Gentine, P., Wang, H.-M., Slater, L. J., Sullivan, S. C., Chen, J., Zscheischler, J., & Guo, S. (2023). Large anomalies in future extreme precipitation sensitivity driven by atmospheric dynamics. *Nature Communications*, 14(1), 3197.

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-39039-7>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023a). *ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present* [Dataset]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023b). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present* [Dataset]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023c). *ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present* [Dataset]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.6860a573>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023d). *ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present* [Dataset].

Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

<https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Horváth, Á., & Breuer, H. (2023). A víz körforgalma a légkörben és a 2022-es rendkívüli aszály meteorológiai háttere. *Légkör*, 68(1), 2–8. <https://doi.org/10.56474/legkor.2023.1.1>

Képesy, J. (1867). *A magyar alföld hydrographiája, vízműszaki nézetek és Javallatok a földöntözés érdekében.* Emich Gusztáv.

https://library.hungaricana.hu/hu/view/VizugyiKonyvek_109/?pg=0&layout=s

Koncsos, L., & Murányi, G. (2024). A multi-scenario multi-model analysis of regional climate projections in a Central–Eastern European agricultural region: Assessing shallow groundwater table responses using an aggregated vertical hydrological model. *Applied Water Science*, 14(3), 42. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02097-9>

Kontur, I., Koris, K., & Winter, J. (1993). *Hidrológiai számítások* (K. Koris, Szerk.). Akadémia Kiadó. https://library.hungaricana.hu/en/view/VizugyiKonyvek_121/?pg=0&layout=s

Kvassay, J. (1875). *Vizeinkről* (Budapest Gyűjtemény Ballagi Gyűjtemény). Légrády testvérek. <https://saman.fszek.hu/WebPac/CorvinaWeb?action=onelong&showtype=longlong&recnum=565263&pos=1>

Lenderink, G., Barbero, R., Loriaux, J., & Fowler, H. (2017). Super-Clausius–Clapeyron Scaling of Extreme Hourly Convective Precipitation and Its Relation to Large-Scale Atmospheric Conditions. *Journal of Climate*, 30. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0808.1>

- Lenderink, G., & Van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), 511–514.
<https://doi.org/10.1038/ngeo262>
- Muñoz-Sabater, J. (2023a). *ERA5-Land hourly data from 1950 to present* [Dataset]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
<https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Muñoz-Sabater, J. (2023b). *ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present* [Dataset]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
<https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>
- Murányi, G., & Koncsos, L. (2023). Mélyártéri vízkivételek lehetőségének statisztikai elemzése. In B. Somlyódy & J. Váradi (Szerk.), *Magyar Hidrológiai Társaság XL. Országos Vándorgyűlése* (o. 1–17). Magyar Hidrológiai Társaság.
https://hidrologia.hu/vandorgyules/40/word/0321_muranyi_gabor.pdf
- Poujol, B., Mooney, P. A., & Sobolowski, S. P. (2021). Physical processes driving intensification of future precipitation in the mid- to high latitudes. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034051. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdd5b>
- Rulfová, Z., & Kyselý, J. (2013). Disaggregating convective and stratiform precipitation from station weather data. *Atmospheric Research*, 134, 100–115.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.07.015>
- Szalai, J. (2011). Talajvízszint-változások az Alföldön. In *A környezeti változások és az Alföld* (o. 97–110). Nagyalföld Alapítvány. <http://acta.bibl.u-szeged.hu/62614/>
- Szilágyi, J., & Franz, T. (2020). Anthropogenic hydrometeorological changes at a regional scale: Observed irrigation-precipitation feedback (1979-2015) in Nebraska, USA. *Sustainable Water Resources Management*, 6. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00368-w>
- Szilágyi, J., & Vorosmarty, C. (1997). Water-Balance Modeling in a Changing Environment: Reductions in Unconfined Aquifer Levels in the Area Between the Danube and Tisza Rivers

in Hungary. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 45(5), 348–364.

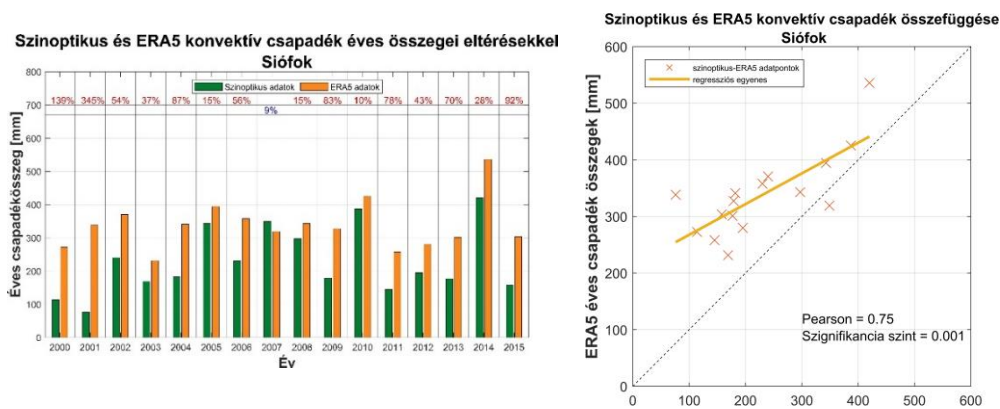
<https://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/1006/>.

Vágás, I. (1995). Gondolatok Vásárhelyi Pál Tisza-szabályozási tervéből. *Hidrológiai Közlöny*, 75(6), 336.

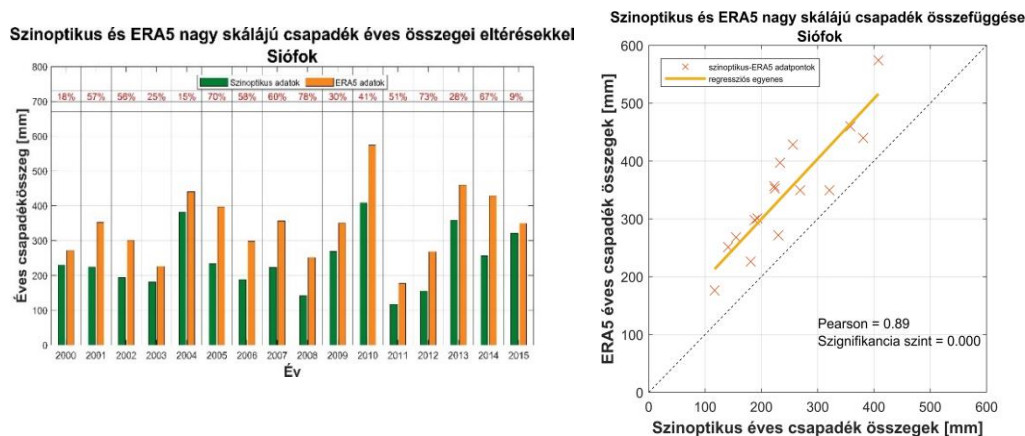
Függelék

I. Siófok évek

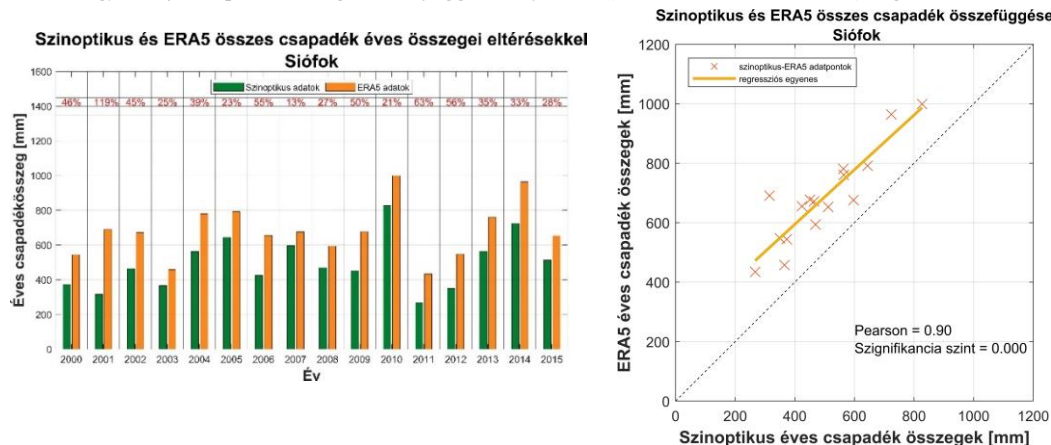
Megvizsgáltuk Siófokra az éves csapadékösszegek összefüggéseit a korábban bemutatott módszerekkel (19. ábra, 20. ábra, 21. ábra). Szignifikáns és erős kapcsolatot találtunk, azonban az egyenes nem párhuzamos a tökéletes egyezést jelentő egyenessel. A konvektív csapadékok esetében az ERA5 túlbecsüli a kisértékeket, azonban a nagyokat nem. A nagyskálájú csapadéknál és az összes csapadéknál egy szabályos túlbecsülést találtunk.



19. ábra: Az éves konvektív csapadékösszegek összefüggése Siófokon; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként



20. ábra: Az éves nagyskálájú csapadékösszegek összefüggése Siófokon; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként

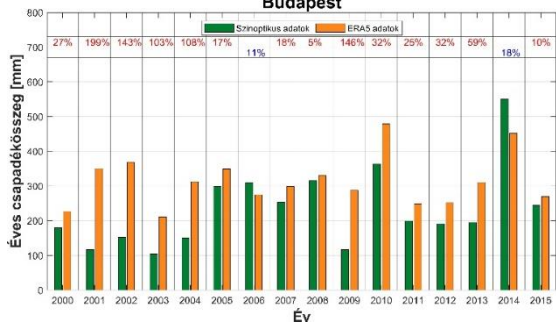


21. ábra: Az éves összes csapadékösszegek összefüggése Siófokon; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként

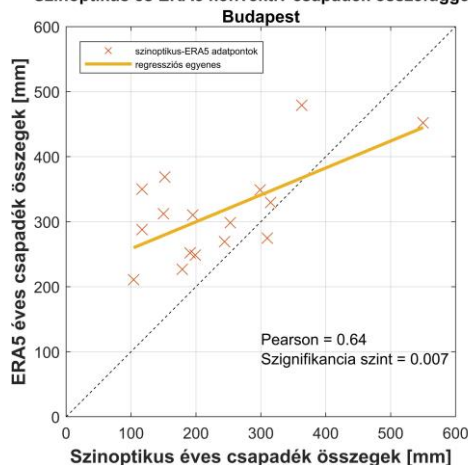
II. Budapest évek

Budapesti állomásra is megvizsgáltuk a 15 év éves összegeinek összefüggését a két adattípus esetén. (22. ábra, 23. ábra, 24. ábra) Itt rosszabb összefüggést találtunk a konvektív csapadékmennyiségek között. Azonban a nagyskalájú és összes csapadéknál itt is erős és szignifikáns kapcsolatot találtunk.

Szinoptikus és ERA5 konvektív csapadék éves összegei eltérésekkel
Budapest

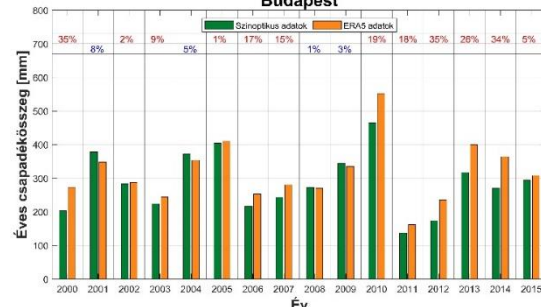


Szinoptikus és ERA5 konvektív csapadék összefüggése

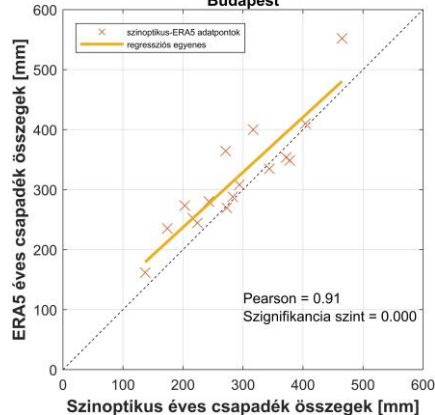


22. ábra: Az éves konvektív csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként

Szinoptikus és ERA5 nagy skálájú csapadék éves összegei eltérésekkel
Budapest

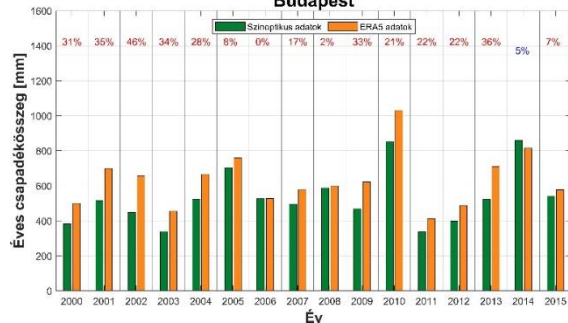


Szinoptikus és ERA5 nagy skálájú csapadék összefüggése
Budapest

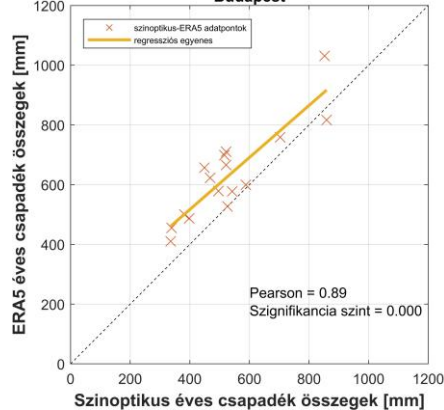


23. ábra: Az éves nagyskalájú csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként

Szinoptikus és ERA5 összes csapadék éves összegei eltérésekkel
Budapest



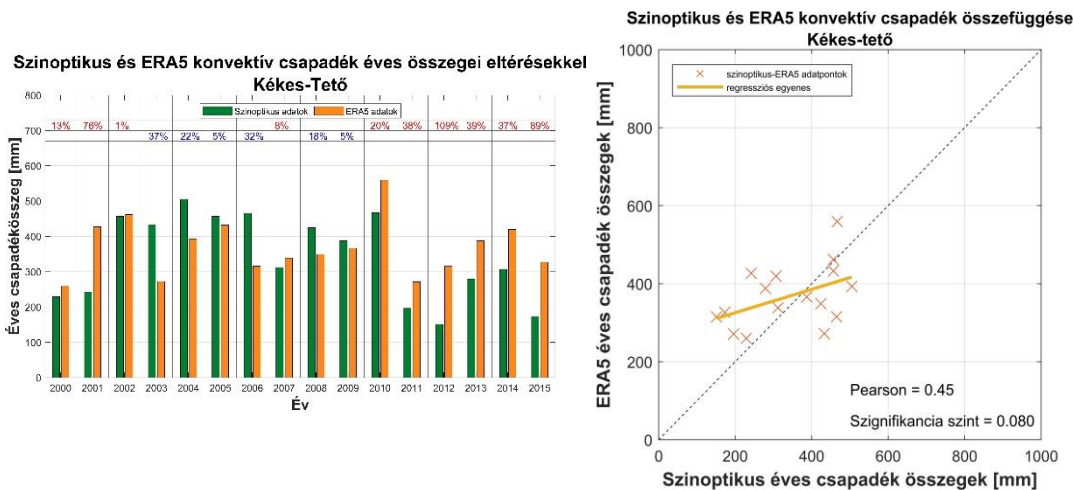
Szinoptikus és ERA5 összes csapadék összefüggése
Budapest



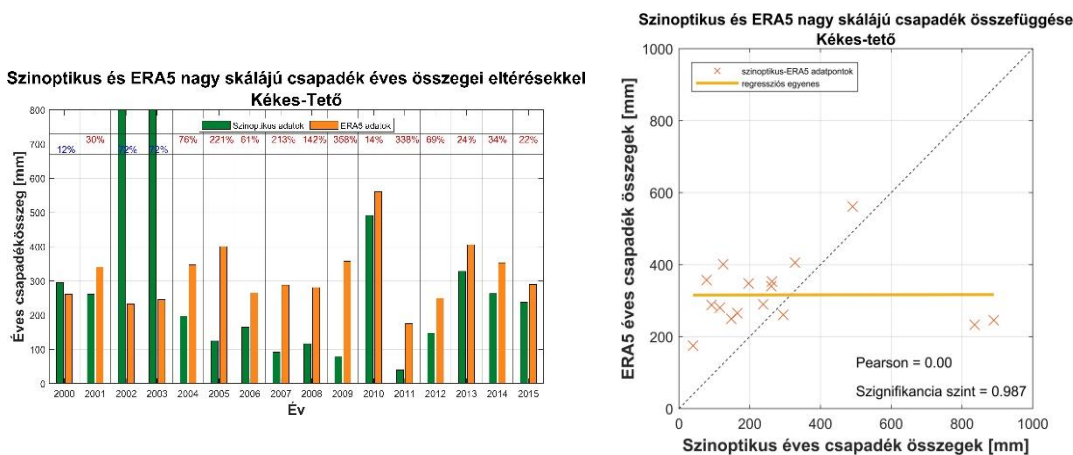
24. ábra: Az éves összes csapadékösszegek összefüggése Budapesten; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként

III. Kékes-tető évek

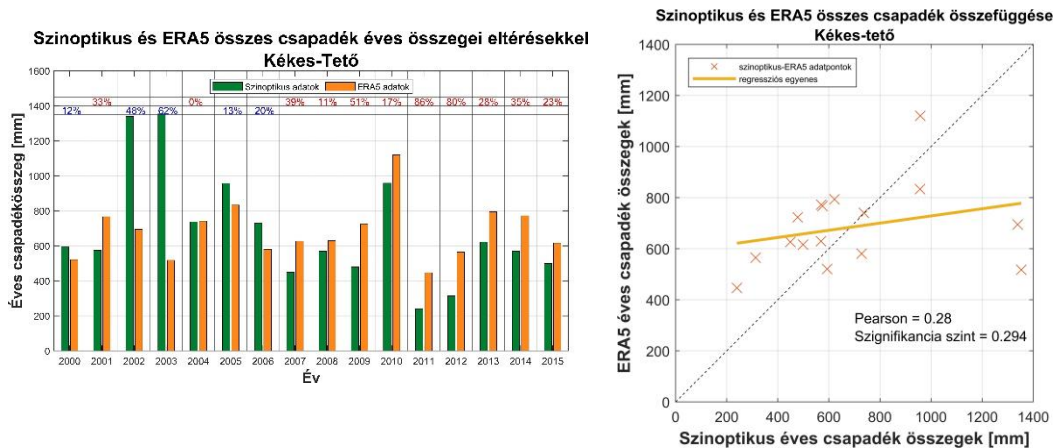
A kékes-tetői állomásra is megvizsgáltuk a 15 év éves összegeinek összefüggését a két adattípus esetén (25. ábra, 26. ábra, 27. ábra). Itt találtuk a legrosszabb összefüggéseket az összes csapadéktípus esetén. A korrelációk gyengék és nem szignifikánsak. A Kékes-tető domborzat viszonyai lokálisnak mondható az ERA5 rácsfelbontásához



25. ábra: Az éves konvektív csapadékösszegek összefüggése Kékes-tetőn; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként



26. ábra: Az éves nagyskálájú csapadékösszegek összefüggése Kékes-tetőn; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként



27. ábra: Az éves összes csapadékösszegek összefüggése Kékes-tetőn; a) időszorként ábrázolva; b) regressziós ábraként