

A konvektív és a teljes csapadék statisztikai vizsgálata a RegCM klímamodellben

DIPLOMAMUNKA
METEOROLÓGUS MESTERSZAK
ELŐREJELZŐ SZAKIRÁNY



Készítette:

Demeter Szilvia

Témavezetők:

Dr. Pieczka Ildikó

Soósne Dr. Dezső Zsuzsanna

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2018

Tartalom

1. Bevezetés	3
2. Csapadéktípusok elkülönítése	4
2.1. Elkülönítési módszerek	4
2.1.1. Radar- és műholdas méréseken alapuló elkülönítés	4
2.1.2. Állomási méréseken alapuló elkülönítés	8
2.1.3. Csapadéktípusok és modelleredmények közötti kapcsolat	12
2.2. Állomási adatsorok feldolgozása	16
2.2.1. Adatok és módszerek	16
2.2.2. Eredmények	18
3. A RegCM4 modell	23
4. Saját eredmények	28
5. Összefoglalás	39
Köszönetnyilvánítás	40
Irodalomjegyzék	40

1. Bevezetés

A csapadéktípusok elkülönítése felhőfizikai vizsgálatok és meteorológiai modellek validálása szempontjából fontos lehet. A csoportosítás többféleképpen is megvalósítható. Szétválaszthatjuk őket halmazállapotuk, intenzitásuk, illetve a csapadékelemek mérete alapján, továbbá a csapadékok eredetét vizsgáló módszerek is segítségül szolgálhatnak.

Az időjárási és éghajlati modellekben gyakran a légköri labilitás alapján különválasztják a nagyskálájú és a konvektív folyamatokat. Ezért a teljes csapadékösszeg a konvektív és a nagyskálájú csapadék összegeként jelenik meg a modellekben. Emiatt érdemes olyan adatbázist felhasználni, amely rendelkezik ezekkel a paraméterekkel. Ez segítséget nyújthat a modellek értékeléséhez, fontos szerepet játszhat a felmerülő hibák javításában és a modellek validációjánál. Továbbá ez az osztályozás hasznos lehet az éghajlatváltozás és a csapadék közötti kapcsolat elemzéséhez.

A BSc szakdolgozatomban (*Demeter, 2016a*) a csapadékok elkülönítésével foglalkoztam. A pestszentlőrinci meteorológiai állomás SYNOP táviratait felhasználva statisztikai vizsgálatokat végeztem a csapadéktípusok különválasztására a *Rulfová és Kysely (2013)* tanulmányában bemutatott módszerek segítségével a 2000–2015 közötti időszakra.

Ezt a vonalat követve a TDK dolgozatomban (*Demeter, 2016b*) is hasonló témájú vizsgálat elvégzését tűztem ki célul, azonban ebben az esetben több meteorológiai állomás adatsorát is felhasználtam a statisztikai számítások elvégzéséhez. A magyarországi meteorológiai állomások közül az országban egyenletesen elosztva kiválasztottam néhányat, és ezeknek az adatsorait dolgoztam fel a 2000-től 2015-ig tartó időszakra.

A diplomamunkámban ezt a kutatást folytatva kiterjesztem a vizsgálatot a RegCM4.3 (Regional Climate Model) klímamodell csapadékeredményeire. A RegCM4.3 modell eredményei egy tíz éves intervallumra, 1981-1990-re állnak rendelkezésemre, melyen elvégezhetők a korábbi vizsgálatok során alkalmazott statisztikai számítások.

2. Csapadéktípusok elkülönítése

2.1. Elkülönítési módszerek

A csapadék osztályozása konvektív és réteges típusba számos meteorológiai és klimatológiai alkalmazásban hasznos. Mivel ezek a típusok jellemzően különböző csapadékmennyiséggel járnak, ezért először is fontos a felhőfizika megértése. Továbbá a csapadék ilyen jellegű osztályozásával meghatározható lehet a konvektív és réteges csapadék szerepe a légköri cirkulációban, ugyanis mindkét típus másképp járul hozzá a látens hő vertikális profiljának alakításához (*Lin et al.*, 2004; *Mapes és Houze*, 1995; *Steiner és Smith*, 1998).

A szétválasztás többféle módszerrel is megvalósítható, az elkülönített csapadéktípusokra vonatkozó adatok pedig felhasználhatók az éghajlati modellek értékelésére (*Rulfová és Kyseľ*, 2013). Emellett az éghajlatváltozás csapadékkal kapcsolatos hatásainak elemzéséhez is segítséget nyújthat az ilyen jellegű osztályozás.

Az elkülönítéshez több különböző típusú módszert is kifejlesztettek az elmúlt évtizedekben. Korábban olyan algoritmusokat hoztak létre, melyek felszíni mérések alapján különítik el a konvektív és rétegfelhőből hulló csapadéktípusokat. Például néhányan a szétválasztáshoz szinoptikus térképek analízisét használták fel szélsőséges csapadék esetében (például *Štekl et al.*, 2001), vagy a relatív térbeli eloszlást vették alapul (például *Ungewitter*, 1970).

2.1.1. Radar- és műholdas méréseken alapuló elkülönítés

A csapadéktípusok elkülönítésére kidolgozott újabb módszereknél már gyakran radar- és műholdas mérésekből származó adatokat használnak (például *Sempere-Torres et*

al., 2000; Anagnostou, 2004; Lam et al., 2010). Az időjárási radar megfigyeli a csapadék struktúráját, amit a radar-reflektivitási tényező mezőivel számszerűsítnek. A radar-reflektivitási méréseket olyan tényezők befolyásolhatják, mint például a cseppméret-eloszlás változékonysága és a függőleges légmozgás (feláramlás és leáramlás), különösen a konvektív típusú felhőknél (például Austin, 1987; Joss és Waldvogel, 1990; Smith és Krajewski, 1993). Ezek a módszerek a csapadékmennyiség adatokon alapulnak (Houze, 1973), ahol a meghatározott küszöbértéket meghaladó csapadékmennyiségeket konvektívnek minősítették (ez azonban nem mindig indokolt). Ez a technika (background-exceeding technique – BET) pedig általában azonosítja a konvekció magját. Ezt a technikát két dimenzióra bővítették radar reflektivitási megfigyelések alkalmazásával, ahol a BET által azonosították a konvektív magokat, majd egy meghatározott hatósugarat alkalmaztak a konvektív területek kijelölésére (Churchill és Houze, 1984). Steiner et al. (1995) ezt a megközelítést pontosította azzal, hogy változó hatósugarat használt változó küszöbértékek mellett, miközben mind a sugár, mind a küszöb a területileg átlagolt háttér-reflektivitás függvényei voltak. Alder és Negri (1988) a BET egy olyan változatát alkalmazták a konvektív és réteges csapadék szétválasztására, amelynél infravörös műholdadatokat használtak, a konvektív mag helyét pedig a felhőtető lokális minimumhőmérsékletével keresték.

A radaros megfigyeléseken alapuló csapadék elkülönítésére egy másik példa Anagnostou (2004) tanulmánya, aki a konvektív és rétegfelhőből hulló csapadéktípusok osztályozására olyan algoritmust javasolt, mely a földbázisú radarral mért reflektivitás alapján konvektív és réteges típusba sorolja a csapadékot.

A felhő-meteorológia, a csapadékbecslés és az energiacsere kérdéseinek megismerése érdekében 1997-ben elindították a Trópusi Csapadékmérő Misszió (TRMM – Tropical Rainfall Measurement Mission) műholdat. A TRMM korszerű csapadékradarral (PR – precipitation radar) rendelkezik, amely alacsony magasságú pályán (350 km) haladva rendkívüli pontossággal detektálja a csapadék háromdimenziós eloszlását a trópusokon és a szubtrópusokon. A PR csapadék algoritmus része a csapadéktípus osztályozására szolgáló eljárás, amelyet 2A23 algoritmusnak neveznek (Kummerow et al., 2000). A legfontosabb 2A23 algoritmus kimenetek közé tartozik a fényes sáv (BB – bright band: az olvadási szint magasságát jelzi) felismerése és magasságának meghatározása (abban az esetben, amikor létezik), illetve az esőtípus besorolása, valamint a meleg eső kimutatása (Awaka et al., 1997). Anagnostou (2004) kutatásának célja, hogy a csapadéktípusok elkülönítésére vonatkozó javított algoritmus

kidolgozásában a PR elkülönítési információit felhasználja az egyidejű alacsonyszintű WSR-88D (Weather Surveillance Doppler Radar – Időjárási Megfigyelési Doppler Radar) reflektivitási mezőkkel kombinálva. Ennek földbázisú, többszintű reflektivitási mezők szolgálnak alapjául.

A kifejlesztett algoritmus a neurális hálót [Neural Network (NN)] használja fel osztályozási eszköz gyanánt. A neurális háló egy többparaméteres nemlineáris technika, amely hasznos a mintafelismeréshez, reprodukálja a többdimenziós valós terek közötti leképezéseket és komplex adatosztályozást. Ebben a hálózatban hat betáplált tulajdonság (a csapadékoszlop tetejének magassága; reflektivitási érték 2 km-es magasságban; a csapadékoszlop teteje és annak a maximum reflektivitási szintje közötti magasságkülönbség; a reflektivitás standard horizontális eltérése; a reflektivitás vertikális gradiense; a csapadékoszlop tetejének magasságának és a 2 km-es magasságban mért reflektivitási értéknek az együttese) határozza meg a legfőbb különbségeket a konvektív és réteges csapadék között, amelyek a két különböző csapadérendszer fizikai karakterisztikáin alapulnak. Az algoritmust olyan viharos esetekre vonatkozó adatokra alkalmazták, amelyek squall line (zivatarlánc) konvekcióval, mezoskálájú konvektív rendszerekkel és kiterjedt réteges csapadékba ágyazott konvektív helyzetekkel hozhatók összefüggésbe. Az alkalmazott módszer egy többlépcsős megközelítés, amely magában foglalja a neurális háló független változóinak kiválasztását, annak kalibrálását, és a független adatbázissal történő validációt. A validációs adatbázis 120 TRMM pályát tartalmaz, melyek közül 37 elsősorban konvektív, míg 83 elsősorban réteges esetre vonatkozik. A vizsgálatban kétféle összehasonlítást alkalmaztak; a teljes validációs adathalmazra vonatkozó ömlesztett statisztikákat, valamint az egyedi esettanulmányok statisztikáit a vizuális megfigyelésekkel összehasonlítva. Az eredmények 4%-os felülbecslést mutatnak a réteges csapadékra vonatkozóan, míg a konvektív csapadék esetén 27%-os alulbecslés volt jellemző (*Anagnostou, 2004*).

Sajnos a sűrűn lakott területek mentén a földrajzi különbségek és a használt adatbázis hibái megnehezítik a súlyos viharok valódi lefedettségének meghatározását (*Groenemeijer et al., 2017*). A villámlást objektívebben detektálják, de a megfigyelőhálózatok térbeli elhelyezkedése inhomogén (*Betz et al., 2009; Pohjola és Mäkelä, 2013; Anderson és Klugmann, 2014*). Ezeknek a problémáknak a leküzdéséhez több kutató is javasolta, hogy kovariánsokat használjanak olyan konvektív paraméterek formájában, amelyek tükrözik a zivatarok számára kedvező környezeti feltételeket (*Doswell et al., 1996*). Ezen paraméterek és a zivatar előfordulásának viszonya

megengedi, hogy proxyként alkalmazhassák a különböző időjárási események bekövetkezési valószínűségét (*Allen és Karoly, 2014*).

Brooks et al., (2018) tanulmányukban az ERA-Interim és szondázó adatok összehasonlításával megvizsgálták a konvektív paraméterek klimatológiai vonatkozásait Európában. A kutatás során több mint egymillió szondázó mérést hasonlítottak össze az ERA-Interim reanalízissel az 1979-2016 közötti időszakra. A fő hangsúlyt a zivatarok fejlődését elősegítő tényezőkre és azok intenzitására helyezték. A nagyméretű adatbázis segítséget nyújt abban, hogy mind tér-, mind időbeli eloszlásban jobb képet kaphassunk a mély konvekció előfeltételeiről Európa-szerte (*Brooks et al.*, 2018).

A szondázó és a reanalízis adatokból a konvektív paramétereket a *Szuster* (2016) által kidolgozott szondázó analízis program segítségével dolgozták fel. Minden egyes profil esetében vertikálisan interpolálták a nyomást, a magasságot, a hőmérsékletet, a harmatpontot, a horizontális szélsébség komponenseket (u és v), és kiszámították a zivatarok előrejelzését segítő paramétereket és azok intenzitását. Elkülönítettek egy hideg (október-március) és egy meleg (április-szeptember) szezont az év során. Ez a villámlás aktivitásán alapult Európa területén, mely áprilistól szeptemberig mutatja a legmagasabb értékeket (*Anderson és Klugmann, 2014*). Ekkor a CAPE (Convective available potential energy – Konvektív hasznosítható potenciális energia) vagy CIN (Convective inhibition – Konvektív gátlás) légköri instabilitást jellemző mérőszámokhoz kapcsolódó paraméterek éves ciklusánál csak a nullától eltérő CAPE értékű eseteket vették figyelembe.

A számítások elvégzéséhez először kizárták a hiányos profilokat és az irreális értékeket. Az éves ciklus vizsgálatának érdekében például kizárták az összes olyan állomást, amelyek havonta 100 szondázó mérésnél kevesebbet végeztek el. A vizsgálat egyik korlátját jelenti a rádiószondás mérések időben változó mennyisége és minősége (különösen a nedvesség esetében), amelyek fontosak a származtatott változók szempontjából (például CAPE és CIN) (*Guichard, 2000; Cady-Pereira et al., 2008*). Egy másik korlátozás az ERA-Interim által generált pszeudo-szondázáshoz kapcsolódik. Ekkor a reanalízis felbontása miatt az éles határvonalakon, például a hegyeknél, vagy a partmenti területeknél elhelyezkedő szondák nem feltétlenül szerepelnek a modell adataiban. Bizonyos esetekben előfordulhat, hogy az állomáshoz legközelebbi rácspontról kiválasztásának módszere nem reprezentálja kellőképpen a megfigyeléseket. Az is lehetséges, hogy a modell formulája okozhat problémákat. Például az ERA-Interim horizontális felbontása mellett konvektív parametrizáció szükséges (*Brooks et al.*, 2018).

Az ERA-Interim az alapvető nedvességre vonatkozó paramétereket viszonylag jól

becsüli, ám az olyan származtatott instabilitási paramétereket, mint a CAPE, már kevésbé, feltehetőleg a határreteg ábrázolásának problémái miatt. Az instabilitás Európa déli részén túlbecsült, míg keleten alulbecsült. A vertikális szélnyírási paraméterek jobban korreláltak, mint a CAPE, ám $1-2 \text{ ms}^{-1}$ alulbecslés tapasztalható. A fokozott instabilitási értékek májustól szeptemberig figyelhetők meg.

Az ilyen típusú vizsgálat eredményei hozzásegítenek az európai mély nedves konvekció klimatológiai hatásainak pontosabb leírásához. Az eredmények zivatarok környezetére vonatkozó jövőbeli tanulmányok háttereként is használhatók (*Brooks et al.*, 2018).

A radar- és műholdas adatokon alapuló módszerek fő előnye, hogy térben homogénebbek az állomási adatoknál, és könnyebben összehasonlíthatók a térbeli rácsformátummal rendelkező modellkimenetekkel is. A hátrányuk viszont az, hogy a csapadékmennyiségeket nem közvetlenül radarral és műholddal mérik, hanem empirikus képletek alapján becsülik. Ráadásul a viszonylag rövid idősorok és az inhomogenitás miatt ezek az adatok nem alkalmasak a trendek és a szélsőségek elemzésére és az éghajlati modellek eredményeinek validálására (*Rulfová és Kysely*, 2013).

2.1.2 Állomási méréseken alapuló elkülönítés

A csapadéktípusok elkülönítése számos vizsgálat elvégzéséhez hasznos lehet. Az időjárási és éghajlati modellekben elkülönítik a nagyskálájú és a konvektív folyamatokat, leginkább a légköri labilitástól függően. Emiatt a modellekben a teljes csapadékösszeg a konvektív és a nagyskálájú csapadék összegeként mutatkozik meg. Ahhoz, hogy a csapadékhibákat (és azok okait) részletesebb vizsgálatnak lehessen alávetni, hasznos lehet egy olyan adatbázis, amely rendelkezik ezekkel a paraméterekkel (azaz a konvektív és a nagyskálájú csapadék értékével).

Rulfová és Kysely (2013) a konvektív és nagyskálájú csapadék elkülönítéséhez állomási időjárási adatokon alapuló adatbázist javasol. Ennek az algoritmusnak az előnye más módszerekkel összehasonlítva abban rejlik, hogy az elkülönített csapadékmennyiségekből viszonylag hosszú sorozatokat lehet kapni, amely lehetővé teszi

a klimatológiai jellemzők értékelését és az éghajlati modellek validációját (*Kysely et al.*, 2015). Az algoritmust 11 állomásra tesztelték Csehországban az 1982–2010-es időszakra. Az éghajlati jellemzők mellett a konvektív és réteghőből hulló csapadékok trendjeit is elemezték. Vizsgálataik alapján a teljes csapadékmennyiségben megfigyelt növekedés főként a konvektív csapadékmennyiség növekedésének köszönhető, ez a hatás pedig a felszínközeli levegő hőmérsékletének emelkedéséhez köthető. Ez fokozza az instabilitást és biztosítja a körülményeket az erősebb konvekcióhoz. A konvektív és réteges csapadékokhoz tartozó idősorok eredményeinek számos felhasználási lehetősége van, többek között megvizsgálható a szélsőségek eloszlásának valószínűsége, vagy kiértékelhetőek olyan modellek, amelyekben egymástól elkülönül a konvektív és réteges csapadék értéke (*Rulfová és Kysely*, 2014).

A konvektív és réteges csapadékok különböző típusú felhőkből hullanak, és általában különböző típusú időjárási eseményekhez kapcsolódnak. A felhőzet típusát, emellett a jelenlegi és a múltbeli időjárási helyzetet az észlelővel rendelkező szinoptikus állomásokon rendszeresen megfigyelik, és ezt a SYNOP táviratokban közlésezzik. *Rulfová és Kysely* (2013) a csapadéktípusok elkülönítéséhez ezeket az adatokat használták fel. Ebben az algoritmusban a fő kritérium a jelenlegi és a múltbeli időjárási helyzet, a másodlagos kritérium pedig a felhőtípus. A jelenlegi időjárási helyzetek kódjai alapján az időjárási helyzetek jellemzően konvektív csapadékokra vonatkozó két fő csoportja közé tartoznak a záporok (80–90-es kódok) és a zivatarok (91–99-es kódok) (1. táblázat). A SYNOP jelentésekben olyan kódok is lehetnek, amelyek úgy mutatnak zivatart vagy záport, hogy a megfigyelés időpontjában az állomáson nem hullott csapadék. Ez úgy lehetséges, hogy a csapadékhullás még a megfigyelés előtt véget ér, vagy éppen csak az adott állomás közelében alakul ki a csapadék (17–19-es, 25–27-es és 29-es kódok). Az időjárási helyzetek tipikusan réteges csapadékokra jellemző három fő csoportját a szitálás (50–59-es kódok), az eső (nem záporos, 60–69-es kódok) és a havazás (nem záporos, 70–79-es kód) alkotják (1. táblázat).

Az állomáson csapadék nem volt		Csapadék, köd, vagy zivatar volt az utolsó órában, de megszűnt	Por-, homok-, vagy hóvihár	Köd	Szítálás	Csendes eső	Havazás	Záporoszerű csapadék, zivatar		
00	A felhőzet változását nem figyelték meg	10 Párászság	20 Szítálás volt	30 Gyenge, sőkkenőben	40 Távoli köd	50 Gyenge szítálás, megszakításokkal	60 Gyenge eső, megszakításokkal	70 Gyenge havazás, megszakításokkal	80 Gyenge záporosó	90 Záporoszerű közepes, vagy erős jégeső
01	A felhőzet szétszórt, vagy vékonyodott	11 Sekély köd, egyes foltokban	21 Eső volt	31 Gyenge, változatlan	41 Köd foltokban, vagy padokban	51 Gyenge szítálás, folytonos	61 Gyenge eső, folytonos	71 Gyenge havazás, folytonos	81 Mérsékelt, vagy erős záporosó	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 szítálás, megszakításokkal	62 Mérsékelt eső, megszakításokkal	72 Mérsékelt havazás, megszakításokkal	82 Igen erős záporosó	92 Közepes v. erős eső, és az elmúlt órában zivatar
03	A felhőzet cialakulóban volt, vagy vastagodott	13 Villogás	23 Havaseső volt	33 Erős, sőkkenőben	43 Gyengült, az ég nem látszik	53 Közepes szítálás, folytonos	63 Mérsékelt eső, folytonos	73 Mérsékelt havazás, folytonos	83 Záporoszerű gyenge havaseső	93 Gyenge havazás, havaseső, jégeső, és az elmúlt órában zivatar
04	Füst által okozott légköri homály	14 Csapadéksáv nem éri el a talajt	24 Ónososó volt	34 Erős, változatlan	44 Változatlan, az ég látszik	54 Erős szítálás, megszakításokkal	64 Erős eső, megszakításokkal	74 Erős havazás, megszakításokkal	84 Záporoszerű közepes, vagy erős havazás	94 Közepes v. erős havazás, havaseső, jégeső és az elmúlt órában zivatar
05	Száraz légköri homály	15 Csapadéksáv 5 km-en belül éri el a talajt	25 Záporosó volt	35 Erős, fokozódott	45 Változatlan, az ég nem látszik	55 Erős szítálás, folytonos	65 Erős eső, folytonos	75 Erős havazás, folytonos	85 Gyenge hózápor	95 Zivatar az észleléskor, gyenge v. közepes esővel v. havazással
06	Lebegő por nagy terület felett	16 Csapadéksáv 5 km-en belül éri el a talajt	26 Hózápor, v. záporoszerű havaseső volt	36 Gyenge, talajmenti hófúvás	46 Erősödött, az ég nem látszik	56 Gyenge szítálás, ónos	66 Gyenge eső, ónos	76 Jégtűk	86 Közepes, vagy erős hózápor	96 Zivatar az észleléskor, gyenge v. közepes jégesővel, darával
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 szítálás, 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 Köd volt	38 Gyenge, magas hófúvás	48 Köd zúmarával, az ég látszik	58 Gyenge szítálás és eső	68 Gyenge havaseső	78 Különálló hókristályok	88 Mérsékelt vagy erős záporoszerű dara	98 Zivatar az észleléskor, por- vagy homokviharral
09	Távoli/ v. elvonult/ porvihár	19 Felhőtölcsér	29 Zivatar volt	39 Erős, magas hófúvás	49 Köd zúmarával, az ég nem látszik	59 Közepes vagy erős szítálás és eső	69 Erős havaseső	79 Fagyott eső	89 Záporoszerű gyenge jégeső	99 Zivatar az észleléskor, erős jégesővel vagy darával

1. táblázat: A jelenlegi időjárásra alkalmazott jelrendszer az időjárési térképeken [2 – nimbus.elte.hu]

Rulfová és Kyselý (2013) tanulmányában az algoritmus három fő lépésből áll. Ha az elmúlt 6 órában hullott mérhető csapadék, akkor minden óránkénti adatot beolvas az időjárési helyzetekről és felhőtípusokról az adott 6 órás periódusra vonatkozóan. Ezt követően különválasztja a csapadékot konvektív és réteges típusokba a fő kritériumot felhasználva. Abban az esetben, amikor az állomáson a csapadék vegyes (az időjárési helyzetek kódjai között konvektív és réteges típusú csapadék egyaránt előfordul a 6 órás intervallumon belül) vagy nem meghatározott (hiányzik az adat az időjárési helyzetről), akkor a másodlagos, felhőtípuson alapuló kritériumot is felhasználja. Ez további szétválasztásokat eredményez. Ezek után pedig minden egyes 6 órás periódust besorol a konvektív, a réteges, vagy a vegyes/meghatározatlan kategóriába, amihez a csapadék

mennyiségét is hozzárendeli (*Rulfová és Kysely, 2013*).

Az algoritmusnak három verzióját fejlesztették ki és hasonlították össze. Az első tesztelt verziónál („szigorú” elkülönítés) a csapadék akkor különíthető el konvektív és réteges típusokra, amikor az időjárási helyzet kódjai (fő kritérium), illetve a felhőtípus (abban az esetben, ha a másodlagos kritériumot alkalmazták) kizárólag az egyik kategóriához (konvektív vagy réteges) kapcsolható a teljes 6 órás periódus alatt. Máskülönben a 6 órás csapadékmennyiség mindig a vegyes/meghatározatlan kategóriába sorolható.

Az algoritmus második verziója maximalizálja az elkülöníthető események számát, és a 6 órás periódusban előforduló (jelenlegi idő vagy felhőtípus) értékek jellemzőin alapul. Ebben az esetben a vegyes/meghatározatlan csapadék jó része tovább bontható konvektív vagy réteges kategóriába. Az algoritmus az erős csapadékhoz (91–99-es és 29-es kódok, 1. táblázat) kapcsolódó eseményeknek nagyobb súlyt ad, mivel az erős konvektív csapadék nagyobb csapadékmennyiséggel jár. Például, amikor van egy zivatar nagy esővel (konvektív esemény) és emellett előfordul szitálás és eső (réteges esemény) a 6 órás periódus alatt, akkor az egész 6 órás csapadékmennyiség konvektív típusba sorolható be. Annak ellenére, hogy ez egy logikus elképzelés és valójában egészen elhanyagolható mennyiségű hibákhoz vezet, ezt a verziót leginkább csak az algoritmus másik két verziójával való összehasonlításra használják fel.

A harmadik verzió lényegében egy kompromisszum a „szigorú” és a „maximum” módszerek között. Első lépésben a „szigorú” módszer segítségével szétválasztják a csapadékot. Ezt követően tanulmányozzák azokat az eseteket, amelyek a kevert/meghatározatlan kategóriába esnek. Megvizsgálják, hogy vannak-e az időjárási helyzethez kapcsolódóan az erős konvektív csapadéknak megfelelő kódok a gyenge réteges csapadéknak megfelelő kódokkal kombinálva, és fordítva. Például, ha a 6 órás periódus alatt a mérsékelt vagy erős zápor (konvektív esemény) mellett csak és kizárólag gyenge szitálás vagy gyenge eső (réteges esemény) fordul elő (mérsékelt vagy erős eső egyáltalán nem), akkor a 6 órás csapadék a konvektív csoportba fog kerülni. Ez a megközelítés abból a feltételezésből indul ki, hogy a csapadék mennyisége gyenge szitálásnál vagy esőnél elhanyagolható a mérsékelt és erős záporokhoz, zivatarokhoz képest (*Demeter, 2016a*). Abban az esetben, amikor a 6 órás periódusban hasonló intenzitású konvektív és réteges csapadék is előfordul, akkor egyik típus sem elhanyagolható, tehát ezek a 6 órás mennyiségek továbbra is a vegyes/meghatározatlan típushoz fognak kerülni (*Rulfová és Kysely, 2013*).

Rulfová és Kysely (2014) ezen bemutatott tanulmányukra alapozva megvizsgálták a konvektív és réteges csapadék karakterisztikáinak trendjeit a Cseh Köztársaságban az 1982 és 2010 közötti időszakra. A vizsgálathoz a meteorológiai állomások SYNOP táviratain alapuló módszert alkalmazták (*Rulfová és Kysely*, 2013). A trendanalízishez négy változót és (évszakosan számított) csapadékindexet (évszakos csapadékmennyiség, csapadékos napok száma, maximum évszakos 6 órás és napi csapadékmennyiség) választottak ki, hogy a konvektív és a réteges csapadék, illetve az extrémumok alapvető éghajlati jellemzőiről szolgáltatassanak információt (*Rulfová és Kysely*, 2014).

Az eredmények alapján a konvektív csapadékmennyiség térbeli átlagos trendje a csapadékindexek átlagainak esetében emelkedik, és a növekedés a téli időszak kivételével minden évszakban jelentős. A konvektív csapadékmennyiség nagyobb az ország nyugati részén az Atlanti-óceán erősebb befolyása miatt. A réteges csapadék jellemzői esetében a trendek általában kisebbek, mint a konvektív csapadék esetén, ám az emelkedések itt is dominálnak. Ezek ősszel jelentősek, különösen az extrém eseményeknél, és nagyobbak az ország keleti részén, ahol a mediterrán ciklonok fontosabb szerepet játszanak. A konvektív csapadék tendenciája inkább a síkvidéken jelentkezik, mint a magasabban fekvő állomásoknál, míg a réteges csapadékmennyiségnél ezzel ellentétes mintázat érvényesül. Az eredmények szerint tavasszal és nyáron, amikor a konvektív csapadék a teljes csapadék összegének jelentős hányadát képviseli Közép-Európában (körülbelül 30-50%-át), a megfigyelt teljes csapadéknövekedés elsősorban a konvektív csapadék növekedésének köszönhető. Ősszel a konvektív és réteges csapadék emelkedése jelentős, és a tendenciák télen a leggyengébbek és a legkevésbé hangsúlyosak (*Rulfová és Kysely*, 2014).

2.1.3. Csapadéktípusok és modelleredmények közötti kapcsolat

A különböző csapadéktípusok elkülönítésével *Rulfová és Kysely* (2013) a későbbiekben is foglalkoztak (*Kysely et al.*, 2015), ám ekkor már modelleredmények értékelésén dolgoztak. A csapadék az éghajlati modellekben az egyik legnagyobb bizonytalansággal rendelkező változó, mivel a szimulációjában nagy mennyiségű

parametrizált folyamat van jelen. Ez különösen igaz a nyári csapadéokra a közepes szélességeken, melyeket a kis skálájú konvektív folyamatok irányítanak (*Rulfová és Kysely, 2013*).

Korábban egy 18 globális klímamodellből (GCM) álló ensemble vizsgálatánál *Dai* (2006) a konvektív csapadék túlbecslését mutatta be a trópusi területekre és általánosságban kisebb eltéréseket a közepes szélességekre vonatkozóan. Számos tanulmány (például *Kysely et al., 2012*) foglalkozott a csapadék jellemzőinek értékelésével regionális klímamodell (RCM) szimulációkban Európára, beleértve a vízszintes felbontástól való függőséget és a légköri cirkulációval való kapcsolatot (*Maraun et al. 2012; Plavcová et al. 2014*). Ennek ellenére kevés figyelmet fordítottak arra, hogy az RCM képes-e a konvektív és a réteges csapadék alapvető tulajdonságait reprodukálni, amelyek a mély konvekción és a kis skálájú csapadék parametrizációkon keresztül szimulálhatók. Ennek az egyik oka a hosszútávon megfigyelt (eredetük alapján konvektív és réteges típusba elkülöníthető) csapadékatok hiánya, amelyekkel a szimulált karakterisztikák összehasonlíthatók lennének (*Kysely et al., 2015*).

Kysely et al. (2015) kutatásukban tanulmányozták a konvektív és réteges csapadék karakterisztikáit együttes (ensemble) éghajlati modell szimulációkban. Egy olyan algoritmust alkalmaztak, amely a megfigyelt csapadékatokat a korábban bemutatott módszer alapján (*Rulfová és Kysely, 2013*) konvektív és réteges típusba különíti el, és ezzel validálja a parametrizált konvektív (szubgrid) és réteges (nagyiskálájú) csapadék karakterisztikáinak eltéréseit 11 RCM szimuláció együttesével Közép-Európa (Cseh Köztársaság) aktuális klímáját tekintve. Minden általuk vizsgált RCM 25 km-es felbontással rendelkezik, és az ERA-40 reanalízis hajtja őket. A konvektív és réteges csapadék relatív arányában jelentkező eltérések azért is fontosak lehetnek, mert a kapcsolódó folyamatok különböző tömeg- és hőmérsékleti profilokon keresztül hatnak a szimulált éghajlat más vonatkozásaira, amely jelentős hatással bírhat a légköri cirkulációra és a termodinamikára vonatkozóan.

A kutatásban az átlagos éves ciklusra, a konvektív csapadék arányára, a magasságtól való függésre és a szélsőséges eseményekre koncentráltak (*Kysely et al., 2015*). A tanulmányban azzal az egyszerűsítéssel éltek, hogy az éghajlati modellekben kiszámított nagyiskálájú csapadék a réteges, míg a szubgrid csapadék a konvektív csapadéknak felel meg a valós légkörben. Mindkét csapadéktípusra vizsgáltak többféle karakterisztikát tíz állomásra és minden rácspontra a csehországi területen az egyes RCM-ekre vonatkozóan. A vizsgált karakterisztikák közé tartozott a havi

csapadékmennyiség átlagos éves ciklusa, a csapadékos napok száma, az eső intenzitására vonatkozó index, a konvektív és réteges csapadék aránya a teljes mennyiséghez képest az egyes évszakokban, az átlagos éves csapadékmennyiségtől való magassági függés és az átlagos éves maximum és 20-éves visszatérési értékek a napi csapadékmennyiségben.

Az eredmények azt mutatják, hogy a teljes csapadékra vonatkozó karakterisztikák általában jobban szimulálhatók, mint a külön-külön értékelt konvektív és réteges csapadék esetén. Míg a konvektív és réteges csapadék éves menete elfogadhatóan jól reprodukálható a legtöbb RCM esetében, addig némelyik jelentősen túlbecsüli vagy alulbecsüli a konvektív csapadék arányát az év során. A konvektív csapadék intenzitását minden RCM alulbecsüli. A magasságtól való függés is jobban szimulálható a réteges és a teljes csapadékra vonatkozóan, mint a konvektív csapadék esetében. A szélsőséges események a konvektív csapadék tekintetében alulbecsültek, míg a réteges csapadéknál kissé túlbecsültek, így az eredmények a teljes csapadékmennyiség szélsőségeit viszonylag jól reprodukálják. Az eredmények szerint az RCM-ek vizsgált együttese jelentős hiányosságoktól szenved a csapadék folyamatok reprodukálásában. Emellett megerősíti azokat a korábbi állításokat, amelyek szerint az éghajlati modellek csapadék karakterisztikákhöz kapcsolódó hibái főként a konvekció reprezentálásának hiányosságaihoz köthetők (*Kysely et al.*, 2015).

A jelenlegi globális és regionális éghajlati modell integrációk bizonytalansága részben összefügg a felhők, a nedves konvekció és a komplex topográfia ábrázolásával, ez pedig ösztönzőleg hat a konvekciót expliciten számoló modellek használatára. Az éghajlati időskálákra vonatkozó tanulmányoknál konvekciót expliciten számoló módszereket ugyan alkalmaztak, de ezek használata a hosszútávú scenáriós szimulációkra igen korlátozott volt azok nagy számításigénye miatt.

Ban et al. (2014) egy olyan vizsgálatot végeztek el, amely egy konvekciót expliciten számoló szimulációt mutat be egy tíz éves időszakra (1998-2007), amelyet a COSMO (Consortium for Small-Scale Modeling – Konzorcium a kisskálájú modellezésért) modell felhasználásával készítettek. Két egyirányú beágyazott rácsot alkalmaztak: egy 2,2 km-es horizontális felbontásút, amit a konvekciót expliciten számoló szimulációhoz (CRM2) használnak egy kiterjesztett Alpesi tartományra (1100 km x 1100 km), és egy 12 km-es horizontális felbontásút, amit pedig egy egész Európát lefedő konvektív parametrizációs szimuláció (CPM12) esetében alkalmaznak. A CPM12-t az ERA-Interim reanalízis oldalsó határfeltételei vezérlik, a validáció a nagyfelbontású felszíni adatokkal történik.

A CRM2 erősen javítja a csapadék és hőmérséklet napi ciklusainak szimulációját. A CPM12-nek van egy rossz napi ciklusa, amely a parametrizált konvekció használatával hozható összefüggésbe. Mindkét szimuláció kissé alulbecsli a téli átlaghőmérsékletet. A CPM12 enyhe felülbecslést mutat a nyári átlaghőmérséklet tekintetében, amely a CRM2 esetében még fokozottabb. A napi hőmérsékleti tartományt pontosabban megadja a CRM2 (különösen a nyári szezonban). A csapadéokra vonatkozó napi statisztikák esetében mindkét modell jól teljesít, a CRM2 azonban a magasabban fekvő területek csapadékát túlbecsüli, ami a megfigyelések bizonytalanságával magyarázható. Az óránkénti csapadék esetében a CPM12 alulbecsüli a heves óránkénti események gyakoriságát, míg a CRM2 jó egyezést mutat a megfigyelésekkel. Az extrém csapadékos eseményeket tekintve megállapítható, hogy mindkét szimuláció megfelelően tükrözi a napi események gyakoriságintenzitását nyáron, de az óras csapadéknál nagy eltérések tapasztalhatók (*Ban et al.*, 2014).

Giorgi et al. (2016) tanulmányukban megvizsgálták az Alpok magas vonulataihoz köthető fokozott konvektív csapadékot az éghajlatváltozás vonatkozásában. A kutatásukat arra alapozták, hogy annak ellenére, hogy a globális éghajlati előrejelzések következetesen jelzik a jövőbeli nyári csapadékmennyiség csökkenését például az Alpokban, a topográfia jelentősen befolyásolhatja a csapadékviszonyok alakulását. Például a topográfiai akadályok árnyékoló hatása módosíthatja a téli csapadékmintázatokat és az orografikus konvekció is fontos szerepet játszhat.

A vizsgálatukban elemezték az alpesi térség nyári csapadékviszonyait a nagyfelbontású regionális klímamodellekkel kapott 21. századi ensemble előrejelzések alapján, amelyeket az aktuális globális modell-szimulációk hajtanak. Mindkét modell-együttes kiterjedt nyári csapadékcsökkenést prognosztizál. A regionális modellek azonban az alpesi magasságokban a csapadék növekedését jelzik előre, ami nem szerepel a globális szimulációkban. Ennek hátterében a konvektív csapadék növekedése áll, mivel a magasabban fekvő területek melegedése és a több rendelkezésre álló nedvesség fokozott potenciális instabilitást eredményez.

Tanulmányukban nagyfelbontású RCM-ekből álló ensemble előrejelzéseket használtak fel, amelyek kifejezetten a mediterrán és európai térségekre készültek a CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment – Koordinált Regionális Éghajlati Leskálázási Kísérlet) program részeként, ezen belül is az EURO-CORDEX és a MED-CORDEX kezdeményezésekben. Elemezték négy meghajtó GCM és hat egymásba ágyazott RCM ensemble előrejelzést. Emellett egy nagyfelbontású (5 km) rácsra

interpolált megfigyelési adatbázis állt rendelkezésükre az Alpok régiójára vonatkozó modellértékelésekhez. Ezek segítségével lehetségessé vált a komplex topográfia csapadékváltozásra gyakorolt hatásának vizsgálata. Az eredmények megkérdőjelezik az Alpok térségében előrejelzett nyári csapadékcsökkenést.

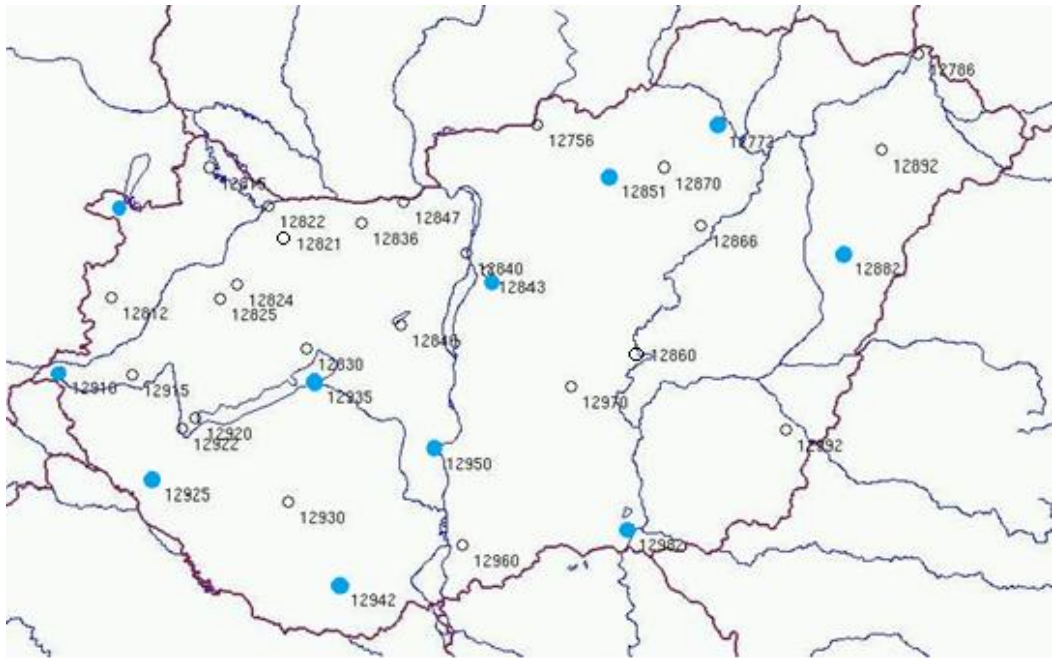
A regionális éghajlati modelleknél a konvektív aktivitás rossz időzítése és alulbecsült intenzitása erősen befolyásolja a légköri profilok napi fejlődését, ami végső soron a napi hőmérsékleti tartomány alulbecslését eredményezi (*Brockhaus et al.*, 2008). Az RCM-ek általában alulbecslik a heves események csapadékintenzitását és gyakoriságát a komplex topográfiájú régiókban, bár ez függhet az adott szezontól vagy a felbontástól is (*Frei et al.*, 2003). Ugyan a horizontális felbontás növekedése általában javítja a napi ciklus amplitúdóját, a csapadék időzítésére kevés hatása van abban az esetben, ha a konvekció parametrizált (*Dirmeyer et al.*, 2012).

2.2. Állomási adatsorok feldolgozása

2.2.1. Adatok és módszerek

Rulfová és Kyselý (2013) csapadéktípusok elkülönítésére vonatkozó vizsgálatai alapján a TDK dolgozatom (*Demeter*, 2016b) keretein belül statisztikai vizsgálatokat végeztem a 2000–2015 közötti időszakra 11 magyarországi meteorológiai állomáson észlelt és mért adatok felhasználásával (1. ábra, 2. táblázat).

A vizsgálat azért a 2000-es évektől kezdődik, mert az annál korábbi adatok csak hiányosan elérhetők. A felhasznált adatok forrása a National Climatic Data Center [*1 – ncdc.noaa.gov*]. Az adatsorokat egy FORTRAN 90 nyelven írt program segítségével dolgoztam fel a letöltést, a kitömörítést, majd a megfelelő formátumra alakítást követően. A vizsgált időszak során kiadott összes SYNOP táviraton belül a csapadékokra vonatkozó adatokat vizsgáltam a 2.1.2-es alfejezetben bővebben kifejtett *Rulfová és Kyselý* (2013) által alkalmazott „szigorú” és a módosított „maximum” elkülönítési módszerek segítségével. Az elemzésekhez az adatbázisban szereplő óránkénti jelenidő-kódokat és a csapadékmennyiségeket használtam fel (*Demeter*, 2016b).



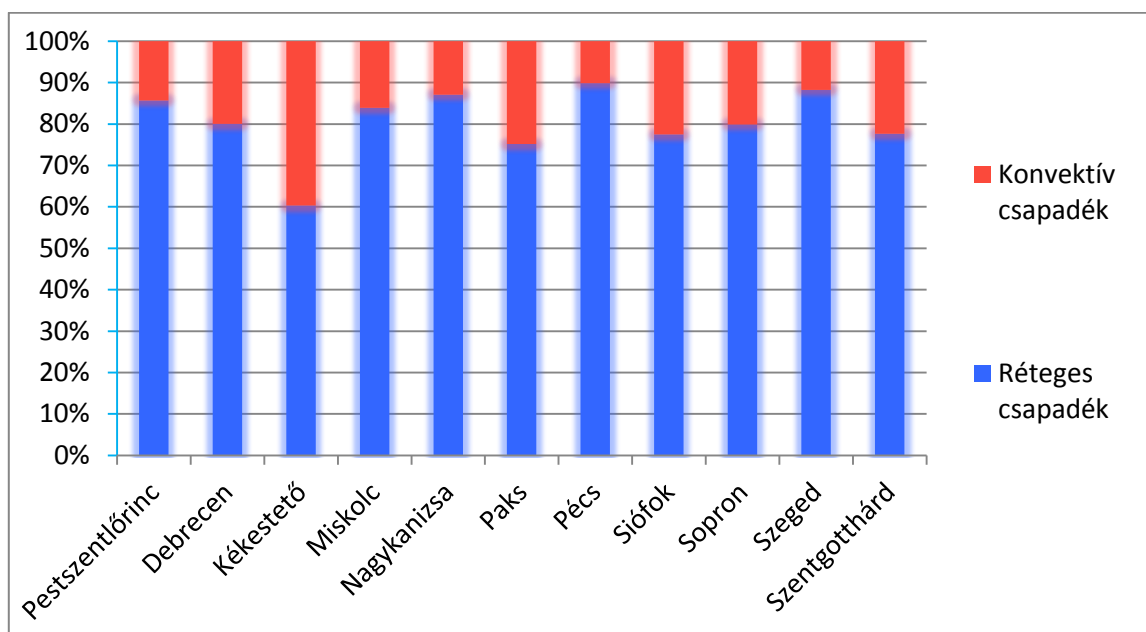
1. ábra: Az állomások földrajzi elhelyezkedése. (A kék pontok jelzik az általunk vizsgált SYNOP állomásokat.)

Állomáskódok	Állomások helye
12882	Debrecen
12851	Kékestető
12982	Szeged
12942	Pécs
12805	Sopron
12772	Miskolc
12843	Budapest/Pestszentlőrinc
12925	Nagykanizsa
12935	Siófok
12910	Szentgotthárd/Farkasfa
12950	Paks

2. táblázat: Állomások kódjaihoz tartozó állomásnevek

2.2.2. Eredmények

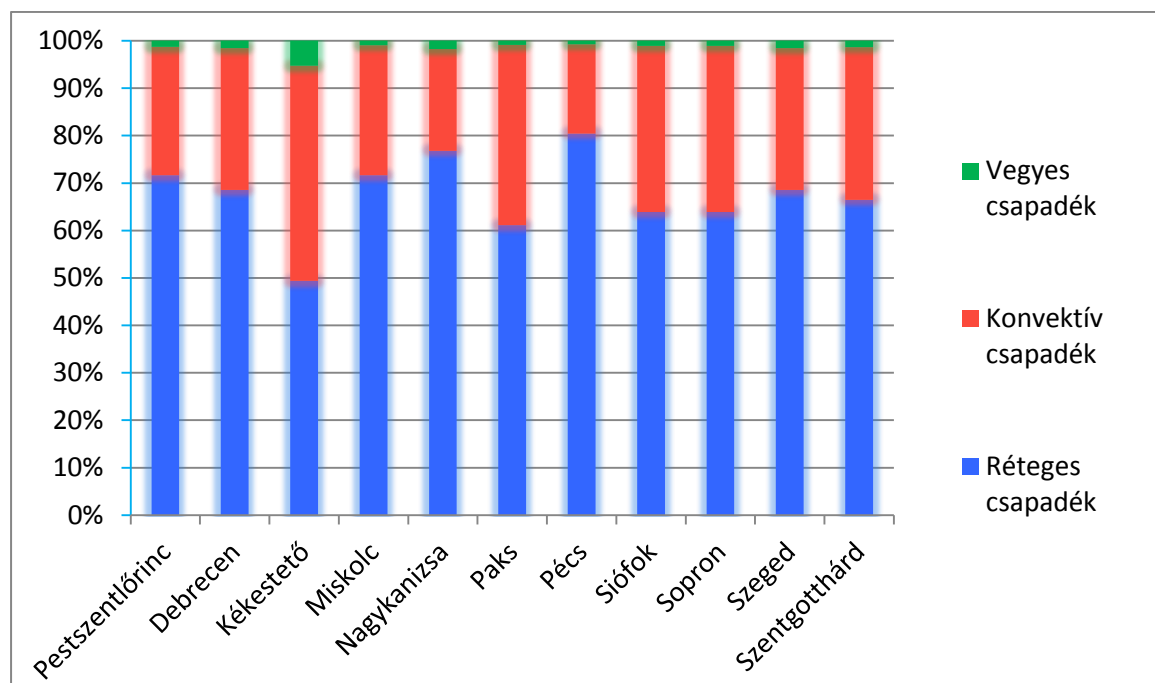
A vizsgálat során először a SYNOP kódok előfordulását tanulmányoztam, amely azt mutatta, hogy hazánkban a leggyakrabban előforduló csapadékforma a gyenge eső (60-as, 61-es kódok). A jelenidőre és csapadékmennyiségre vonatkozó adatokat felhasználva vizsgáltam a csapadéktípusok előfordulási arányát, amiből kiderült, hogy a rétegfelhőből hulló csapadék dominál leginkább az esetszámokat tekintve (2. ábra).



2. ábra: Konvektív és réteges csapadékkal járó esetek aránya órás SYNOP észlelések alapján 2000–2015 között a 11 vizsgált állomáson

A jelenidő-kódokat hat órás felosztásban is kiszámoltam, így a konvektív és réteges típusok mellett egy harmadik típus, a vegyes csapadékok szerint is csoportosítottam. Ehhez két különböző módszert használtam fel *Rulfová és Kysely* (2013) tanulmánya alapján. Az egyik a 2.1.2-es fejezetben kifejtett „szigorú” módszer, a másik pedig a „maximum” módszernek egy módosított változata. Abban különbözik az eredetitől, hogy ha a 6 órás intervallumban erős konvektív helyett bármilyen konvektív csapadék mellett gyenge réteges esemény szerepel (50-es, 51-es, 60-as, 61-es kód), akkor nem vegyes, hanem konvektív csapadékként kategorizáljuk. Jelen esetben a módosított „maximum” módszerrel kapott eredmények egy részét mutatom be, ugyanis a vizsgálat fő célja a vegyes típusú csapadék minimalizálása volt. A 6 órás időintervallumokra a

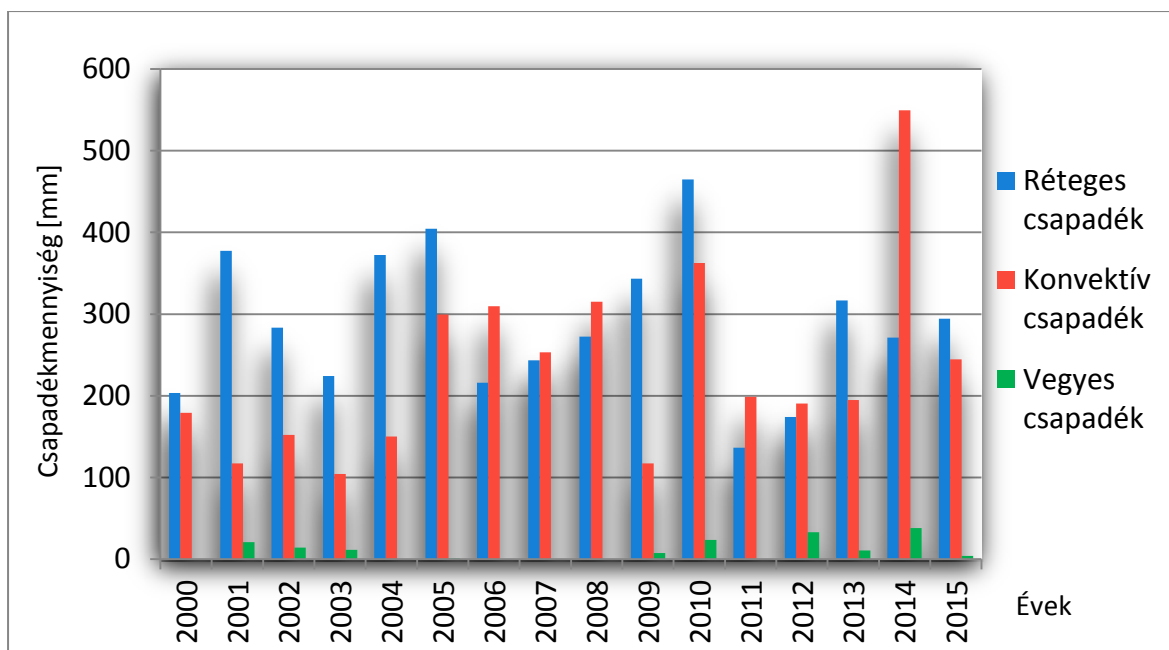
módosított „maximum” módszerrel elvégzett vizsgálat eredményeit 3. ábra mutatja be. Az állomásoknál az arányok hasonlóak, ám a kékestetői adatok valamennyire eltérnek a többitől. Erre az állomás hegyvidéki jellege adhat magyarázatot.



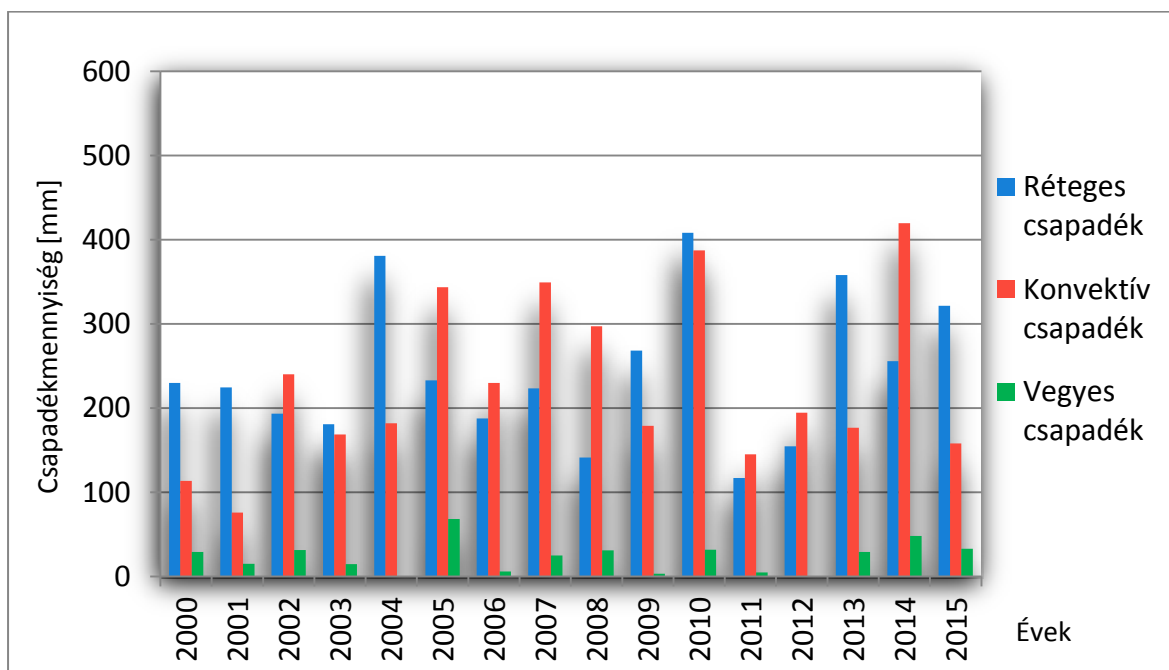
3. ábra: Konvektív, réteges és vegyes csapadékok előfordulási aránya 6 órás észlelések alapján 2000–2015 között a 11 állomásra a módosított „maximum” módszerrel számítva

Ezután éves és havi bontásban végeztem statisztikákat a csapadékmennyiségek és csapadéktípusok közötti összefüggésekre, amihez kiszámoltam a hat órás csapadékmennyiségeket.

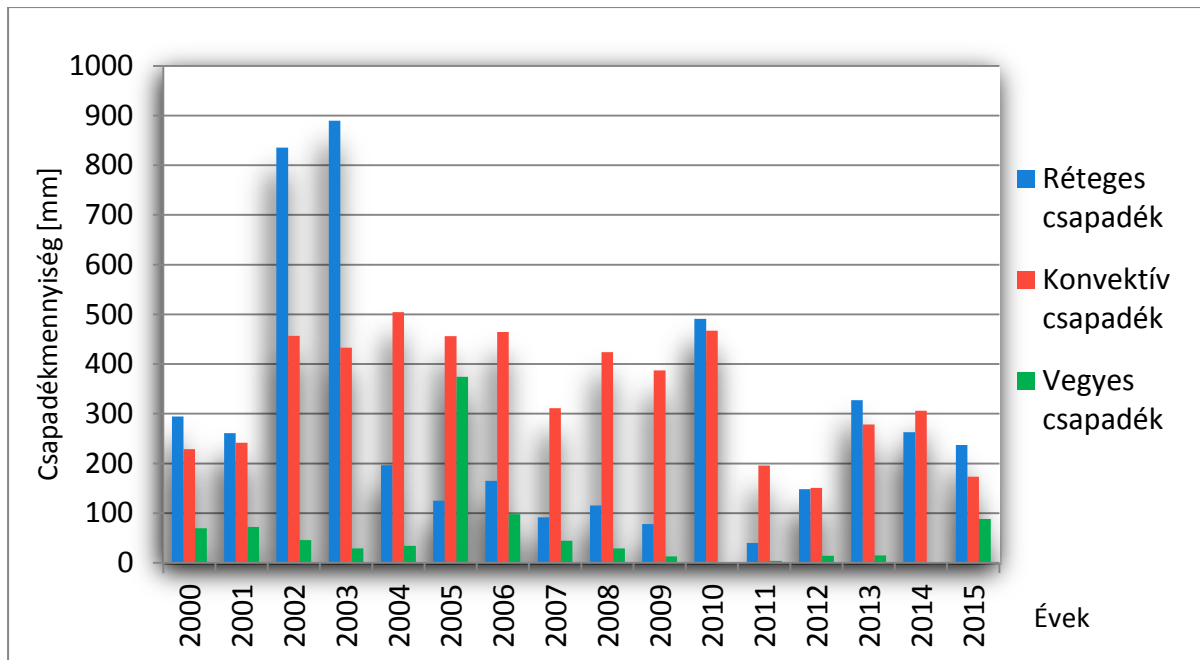
Az egymást követő évek csapadékmennyiségeire vonatkozó vizsgálat eredményeit a 4., 5. és 6. ábra mutatja be Budapestre, Siófokra és Kékestetőre. Az állomások eredményei alapján a 2014-es év konvektív szempontból országosan igen erős évnak számított, ami csapadéktöbbletet eredményezett. Mindez azonban csak az adott állomásokra vonatkozik, azaz csak pontszerű mérések felhasználásával készült el a vizsgálat, ezért erőteljesen befolyásolja az eredményeket, hogy a mérőállomás a konvektív esemény hatóterébe kerül-e vagy sem.



4. ábra: Konvektív, réteges és vegyes csapadékok éves csapadékösszege 6 órás mérések alapján 2000–2015 között Budapesten a módosított „maximum” módszer alkalmazásával

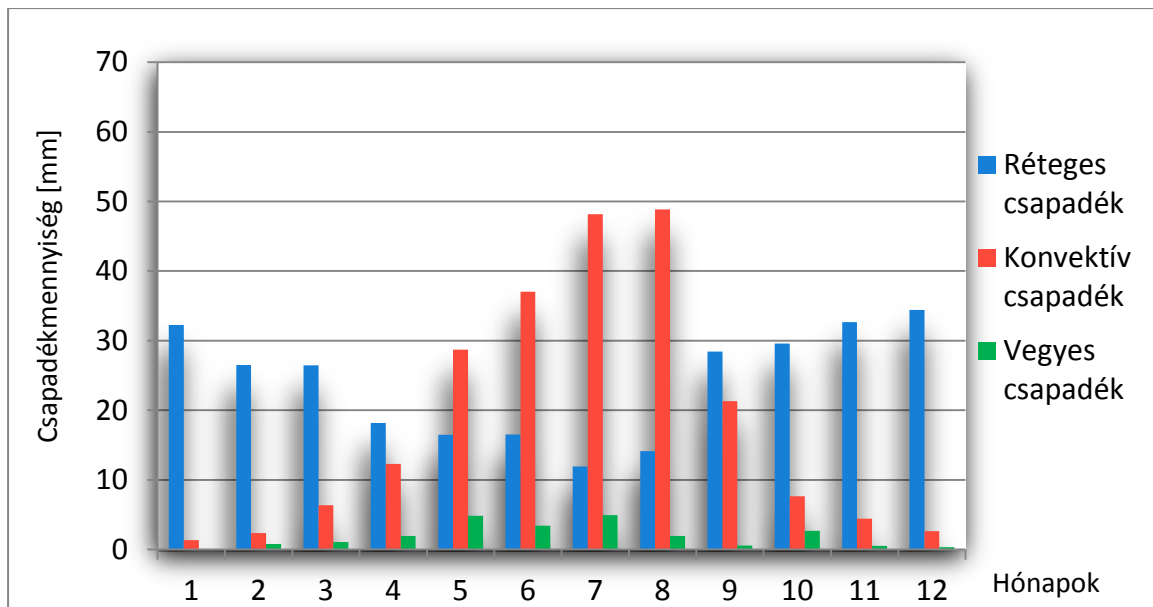


5. ábra: Konvektív, réteges és vegyes csapadékok éves csapadékösszege 6 órás mérések alapján 2000–2015 között Siófokon a módosított „maximum” módszer alkalmazásával

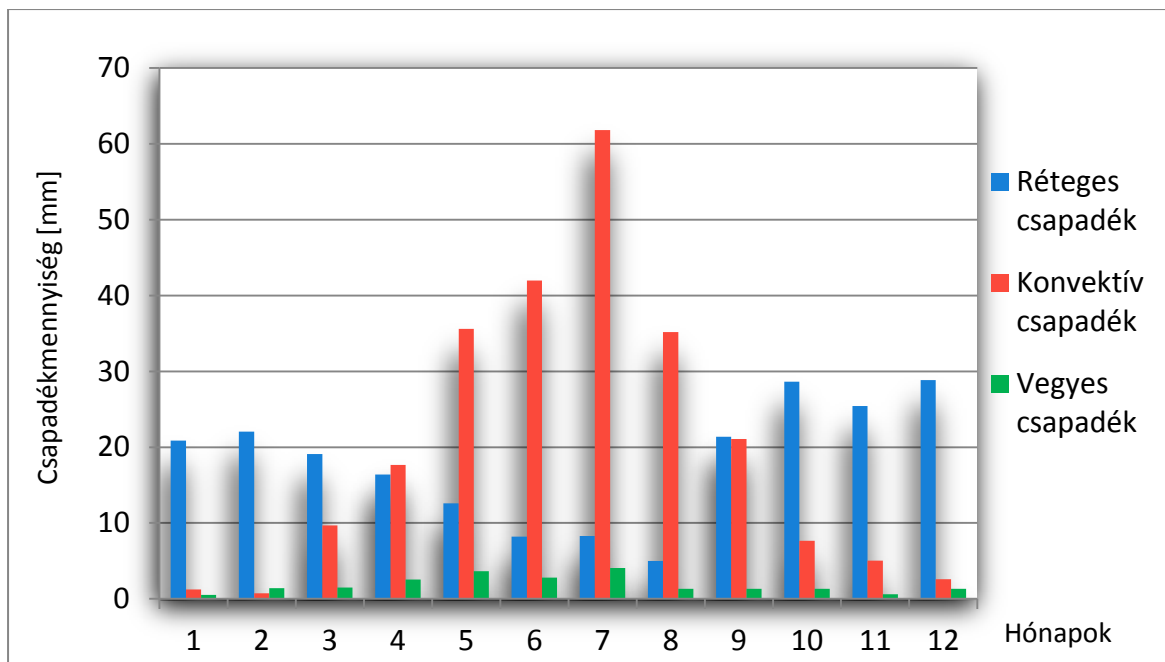


6. ábra: Konvektív, réteges és vegyes csapadékok éves csapadékösszege 6 órás mérések alapján 2000–2015 között Kékestetőn a módosított „maximum” módszer alkalmazásával

A módosított „maximum” módszer segítségével kapott eredményeket a csapadék éven belüli menetére vonatkozóan a Budapestre a 7. és Debrecenre a 8. ábra mutatja. Ezen eredmények alapján a nyári félévben a konvektív csapadék domináns. Vegyes csapadék egészen ritkán fordul elő, főként a tavaszi és nyári hónapokban.



7. ábra: Konvektív, réteges és vegyes csapadékok átlagos havi csapadékösszege 6 órás mérések alapján 2000–2015 között Budapesten a módosított „maximum” módszer alkalmazásával



8. ábra: Konvektív, réteges és vegyes csapadékok átlagos havi csapadékösszege 6 órás mérések alapján 2000–2015 között Debrecenben a módosított „maximum” módszer alkalmazásával

Összességében a vizsgálatból kiderült, hogy a módosított „maximum” módszer alkalmazása esetén a konvektív típusú csapadék aránya jóval megnövekszik a vegyes események arányához képest. Az 50–99 közötti SYNOP jelenidő kódokból a réteges csapadéktípusok közül a 60-as, 61-es, 71-es kódok, a konvektív eseményeket tekintve pedig a 80-as kód fordul elő leggyakrabban. Tehát a folytonos és megszakításokkal járó gyenge esős jelenségek, a folytonos gyenge havazás és a gyenge záporosó a legjellemzőbb. A havi csapadékmaximum a nyári hónapokra jellemző, amikor a konvektív csapadék fordul elő legnagyobb mennyiségben. A csapadékmennyiségek éves összegét tekintve a módosított „maximum” módszer esetében több olyan év van, amikor nem a réteges csapadék dominál, hanem a konvektív. Kékestetőnél a konvektív csapadék a dominánsabb, a vegyes csapadék pedig nagyobb mennyiségeket mutat, mint a többi vizsgált állomásnál (Demeter, 2016b).

3. A RegCM4 modell

Manapság a nagy klímakutató központok globális éghajlati modelljei eljutottak oda a technikai és tudományos kidolgozottság terén, hogy segítségükkel leírhatóvá válik az éghajlati rendszer összetevőinek viselkedése. Azonban a regionális szintű éghajlati változásokról nem adnak pontos információt, ugyanis a térbeli felbontásuk jellemzően 100 km-nél durvább. Ahhoz, hogy az éghajlatváltozás hatásai felmérhetőbbek lehessenek, fontosak a regionális szintű ismeretek, ugyanis ezek akár ellentétesek lehetnek a globális változásokhoz képest. E kisebb skálájú hatások tanulmányozásához leskalázási módszereket fejlesztettek ki, amelyek segítségével területileg pontosíthatóvá válnak a nagyskálájú globális információk.

A legnyilvánvalóbb módszer a változó- vagy nagy felbontású globális modellek alkalmazása, amelyek csak a légkör változásait vizsgálják. Egy másik lehetőség a statisztikai leskalázás, amelynek fő feladata, hogy statisztikai relációt keressen az éghajlati múlthoz kapcsolódó globális és regionális jellemzők között. Ezt a kapcsolatot pedig a globális modellek jövőbeli eredményeihez használják fel. A harmadik leskalázási módszer a regionális éghajlati modellek alkalmazása, amelyek fizikailag megalapozva írják le egy adott területhez kapcsolódó folyamatokat. Ezek a globális modelleknél kisebb területre vonatkoznak, ezért finomabb felbontáson futtathatók kisebb számítógépes kapacitással. A módszer finom felbontása hozzásegít a felszíni és az éghajlati változásokat alakító kiskálájú folyamatok pontosabb jellemzéséhez (*Szépszó et al., 2013*).

A regionális éghajlat-modellezés iránti érdeklődés az elmúlt két évtizedben folyamatos növekedésnek indult (például *Giorgi, 2006*). Ennek eredményeként számos regionális klímamodellt (RCM – Regional Climate Model) hoztak létre. Az egyik ilyen rendszer a RegCM, amelynek első verzióját az 1980-as évek végén fejlesztették ki (RegCM1; *Dickinson et al., 1989; Giorgi, 1990*).

A RegCM modell jelentős változásokon ment keresztül az elmúlt évek során (*Giorgi et al., 1989*). Leginkább a felszíni fizikai folyamatokhoz és a sugárzás-átvitelhez kapcsolódó leírásokban vittek véghez módosításokat, ezzel pedig létrejött a RegCM modellcsalád első generációja (*Dickinson et al., 1993*). Ezt későbbi verziók követték a korai '90-es években (RegCM2; *Giorgi et al., 1993 a,b*), a késői '90-es években (RegCM2.5; *Giorgi & Mearns, 1999*), és a 2000-es években (RegCM3; *Pal et al., 2007*).

A RegCM volt az első olyan korlátos tartományú modell, amelyet hosszútávú

regionális klímaszimulációkra fejlesztettek ki. Felhasználták több regionális modell összehasonlítására, és sokan alkalmazták regionális éghajlati tanulmányokhoz, a folyamatvizsgálatoktól kezdve (*Qian, 2008; Qian et al., 2010*) a paleoklimatológiáig és a jövőbeli éghajlati előrejelzésekig (*Giorgi és Mearns, 1999; Giorgi et al., 2006*).

A RegCM rendszer egy közösségi modell és úgy tervezték meg, hogy nyilvános, nyílt forráskódú, felhasználóbarát kód legyen, amely a világ bármely régiójára alkalmazható.

A RegCM3 kiadása óta (*Pal et al., 2007*) a modell mind a szoftver kód, mind a fizikai reprezentációk tekintetében sokat fejlődött, és ez vezetett a modell negyedik verziójának kifejlesztéséhez, a RegCM4-hez, amelyet az ICTP (International Centre for Theoretical Physics – Elméleti Fizikai Kutatóintézet; *Giorgi et al., 2006*) 2010 júniusában adott ki prototípus verzióként (RegCM4.0). Ezt további verziók követték (jelenleg a RegCM4.6 a legfrissebb letölthető verzió).

A RegCM4 dinamikája ugyanolyan maradt, mint a RegCM3-ban, amely lényegében megegyezik a RegCM2 verzióéval (*Giorgi et al. 1993a,b*). A RegCM4 tehát egy sigma-p függőleges koordinátázású modell, amely egy Arakawa B-rácson fut, melyben a szél és a termodinamikai változók horizontálisan eltolódnak. Egy úgynevezett „time-splitting” explicit integrációs sémát alkalmaznak, amelyben a két leggyorsabb gravitációs módust először különválasztják a modell megoldásától, majd kisebb időlépésekkel integrálják őket. Ez lehetővé teszi a hosszabb időlépcsők használatát a modell többi részére is. Lényegében a modell dinamikája megegyezik az MM5 (Mesoscale Model – Mezokálájú Modell) hidrosztatikus verziójával (*Grell et al. 1994*), amelyről *Giorgi et al. (1993a)* és *Grell et al. (1994)* tárgyalnak részletesen.

A RegCM4-ben a sugárzás-átviteli számítások a CCM3 (Community Climate Model – Közösségi Klímamodell) globális modell sugárzás-átviteli sémájával végezhetőek (*Kiehl et al. 1996*). Ez olyan számításokat foglal magában, amelyek a spektrum rövidhullámú és infravörös részeire vonatkoznak, beleértve a légköri gázokat és aeroszolokat. A rendszer magában foglalja az összes fő üvegházhatású gázt, melyek közé tartozik a H₂O, CO₂, O₃, CH₄, N₂O és a CFC gázok.

Jelenleg a RegCM4 három opcióval rendelkezik a cumulus konvekció számítására. Az első *Anthes (1977)* Kuo-sémájának egy egyszerűsített verziója, melyet *Anthes et al. (1987)* írtak le részletesen. A Kuo-séma egy olyan konvektív csapadék séma, amelyben a konvekció akkor indul meg, amikor a nedvesség-konvergencia elér egy adott határértéket a konvektívan instabil légoszlopban. Ez egy viszonylag egyszerű közelítés,

amely durvább felbontáson működik jól, ekkor a nedvesség-konvergencia egy része a légoszlop páratartalmát növeli, a másik része csapadékká alakul (*Elguindi et al.*, 2011). Annak ellenére, hogy ez a séma még mindig elérhető, csak igen ritkán használják, és általában rosszabb csapadékszimulációt biztosít, mint a többi rendelkezésre álló parametrizáció.

A második és egyben a legelterjedtebb séma a Grell séma (*Grell, 1993*). A Grell séma egy lefelé és egy felfelé irányuló áramlás állandó együtteseként tekinti a konvektív felhőt. Ebben az esetben a felhőlevegő és a körülötte lévő légtömeg között nincs közvetlen keveredés az áramlások aljának és tetejének kivételével. Adott magasságon állandó a tömegáram és nincs légbeszívás, illetve légkiáramlás a légoszlop oldalsó határain. A kiindulási szintet, amely meghatározza a fel- és leáramlást, a nedves helyzeti energia maximuma és minimuma jelöli ki. A séma akkor lép működésbe, amikor a feláramlásban az emelkedő légréteg végül eléri a nedves konvekciós szintet. A séma a kondenzációt a feláramlásban egy felemelkedő telített légréteggel számolja (*Grell, 1993*). A sémának két különböző lezárása lehet. Az egyik az Arakawa-Schubert (AS) lezárás, amely a légkör változásával kapcsolja össze a konvektív fluxusokat és a csapadékot. Ekkor az összes felhajtóerő azonnal felhasználódik minden egyes időlépcsőnél (*Arakawa és Schubert, 1974*). A másik a Fritsch-Chappell (FC) típusú lezárás, amely a konvektív fluxusok és a légkör instabilitási foka között összefüggésen alapul. Az FC esetében a konvekció adott idő alatt számolja fel a konvekcióra fordítható felhajtóerőt (*Fritsch és Chappel, 1980*). Számos paraméter szerepel a rendszerben a teljesítmény optimalizálására, melyhez *Giorgi et al.* (1993b) több érzékenységi vizsgálatot is elvégzett. Megállapítható, hogy az a paraméter, amelyre a séma a legérzékenyebb, nagyrészt a leáramlásnál elpárolgott csapadék (Peff, 0-1-ig terjedő értékek), amely lényegében megméri a csapadékhullás határfokát. A Peff nagyobb értékei csökkenő csapadékot jeleznek. A Grell séma a RegCM második változata (RegCM2) óta elérhető és jelenleg ez a leghasználatosabb (*Giorgi et al.*, 2012).

A harmadik sémát a Massachusetts-i Műszaki Egyetemen (Massachusetts Institute of Technology - MIT) dolgozták ki (*Emanuel, 1991; Emanuel és Zivkovic Rothman, 1999*). Az MIT séma figyelembe veszi a felhőben lezajló keveredés időbeli változékonyságát és inhomogenitását. Ebben a parametrizációban a konvekció akkor indul be, amikor a felhajtóerő szintje magasabb, mint a felhőalap szintje (*Emanuel, 1991*). Az MIT séma a legösszetettebb séma a három közül, és számos olyan paramétert tartalmaz, amelyek a modellteljesítmény optimalizálására alkalmazhatók különféle

klímaviszonyokban. A Grell sémától eltérően azonban a kísérleti tapasztalatok nem azonosítanak egyetlen olyan paramétert se, amelyre a modell a legérzékenyebbnek mondható (*Giorgi et al.*, 2012).

A kiterjedt vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy a különböző sémák különböző teljesítményt mutatnak az eltérő régiókra, különösen a szárazföldek és az óceánok esetében. Például az MIT séma túlságosan nagy mennyiségű csapadékot mutat a szárazföldi területeken, főleg a nagyon intenzív egyedi csapadékesemények előfordulása során. Ezzel szemben a Grell-séma viszont gyenge csapadékot jelez a trópusi óceánok felett. Ezek az előzetes vizsgálatok azt sugallták, hogy a kevert konvekciós megközelítés (amely szerint például az MIT-sémát az óceánok felett használják, a Grell-sémát pedig a szárazföldön), a legmegfelelőbb opció lehet a továbbiakban, ezért ezt a lehetőséget is hozzáadták a modellhez. Megjegyzendő, hogy – mint ahogyan az előző verzióban, azaz a RegCM3-ban – ezek a cumulus parametrizációk általában a kora délutáni órákra maximalizálják az esőt, lényegében a napsugárzás felszíni melegítésének hatása miatt (*Giorgi et al.*, 2012).

A RegCM4-ben a nagyskálájú felhőzetre és csapadéokra vonatkozó séma nem változott jelentősen a RegCM3-hoz képest. Ez a séma a felhőzet rácsfelbontásnál kisebb változásait is figyelembe veszi. A séma lényegében a SUBEX (Subgrid Explicit Moisture Scheme - Rácshálózatnál finomabb Explicit Nedvesség Séma) parametrizáción alapul (*Pal et al.*, 2000) és magában foglalja a felhővíz prognosztikai egyenletét.

A RegCM legkorábbi verzióitól kezdve elérhető *Dickinson et al.* (1993) Bioszféra-Atmoszféra Transzfer Sémája (BATS), amelynek segítségével a szárazföldi felszíni folyamatokat számítják. A BATS sémát arra alkalmazzák, hogy leírják a vegetáció és a talajnedvesség okozta változásokat a momentumhoz, energiához és vízgőzhöz kapcsolódó felszín-légkör kölcsönhatásokban. Ez az évek óta alkalmazott séma tartalmaz egy egyrétegű vegetációs modult, egy egyrétegű hómodult, egy „force-restore” (kényszer-egyensúlyba visszaállítás [2 – *met.hu*]) modellt a talajhőmérséklethez, egy háromrétegű talajsémát, és egy egyszerű felszíni lefolyási parametrizációt. Az általános felszíni parametrizációs módszer a RegCM4-ben a BATS (*Dickinson et al.*, 1993) sémája. Ehhez egy rácsfelbontásnál kisebb skálájú (szubgrid) felszíni konfiguráció is alkalmazható, melyhez mindegyik modell rácspontra szabályos szubgrid pontokra osztanak és a szárazföldi felszíni folyamatokat az összes szubgrid pontra kiszámolják a helyi földhasználat és a topográfia figyelembevételével. A földhasználatot, a topográfiát és a talaj textúráját a finom rácshálózat jellemzi. Minden rácsfelbontásnál kisebb cellára

kiszámítják a felszíni fizikát, majd a felszíni fluxusokat a durva rácsra visszacsatolják, amely ezután bemeneti információt ad a légköri modellnek. Ez a szubgrid (a rácsfelbontásnál kisebb térskálájú folyamatokat felhasználó) felszíni séma jelentősen javítja a felszíni klimatológiát az összetettebb terepeken (*Giorgi et al.*, 2003).

Napjainkban az ALADIN-Climate (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational – Korlátos tartományú dinamikus alkalmazás nemzetközi fejlesztése) a PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies – Regionális klímabecslés hatásvizsgálatokhoz), a RegCM és a REMO (Regional Model – Regionális Modell) regionális klímamodelleket használják Magyarországon (*Szépszó et al.*, 2013). Az amerikai eredetű RegCM modellt az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén 2002 óta alkalmazzák (például *Torma et al.*, 2008, 2011), és ettől kezdve folyamatosan zajlanak a modellek futtatásához és adaptálásához köthető kutatások (*Pieczka et al.*, 2014).

A RegCM4.3 felhasználásával *Pieczka et al.* (2017) érzékenységvizsgálatot végeztek az 1981 és 1990 közötti időszakra a Kárpát-medence területére. A kutatás során egyrészt arra próbáltak választ találni, hogy a rácsfelbontásnál kisebb térskálájú folyamatokat is felhasználó BATS szubgrid séma használatával a szimulációk pontosabbak lesznek-e. Emellett érzékenységvizsgálatot végeztek eltérő csapadéksémákkal. Az MIT és a Grell sémát keverten alkalmazták. Ebben az esetben a szárazföldek felett a Grell, míg az óceánok felett az MIT sémát használták fel. Így tehát a Kuo és a kevert MIT/Grell sémával szimulációkat hoztak létre. Az MIT/Grell sémát kipróbálták két különböző lezárási módszerrel [AS (*Arakawa és Schubert*, 1974) és FC (*Fritsch és Chappel*, 1980)], emellett kikapcsolták a szubgrid módszert az FC lezárással az egyik futásnál.

A vizsgálathoz a kezdeti- és a peremfeltételeket az ERA-Interim adatbázisból nyerték ki. Elsőként egy 50 km-es horizontális felbontású RegCM szimulációt végeztek, amely biztosította a kezdeti és oldalsó peremfeltételeket az érzékenységvizsgálathoz. Majd 10 km-es horizontális felbontáson végeztek szimulációkat. A validáció során nyert eredményeket összehasonlították a CarpatClim adatbázissal, melyekből kiderült, hogy a modell leginkább a csapadéksémára érzékeny. Az is világossá vált, hogy csak másodlagosan hat a séma lezárása az eredményekre, a szubgrid módszer alkalmazása pedig nem jelentett számottevő javulást.

4. Saját eredmények

A diplomamunka készítése során vizsgálatokat végeztem a RegCM4.3 különböző futtatásokkal kapott eredményeivel. A modellel négy különböző parametrizációval végrehajtott érzékenységvizsgálatból nyert adatokat R programnyelv segítségével dolgoztam fel.

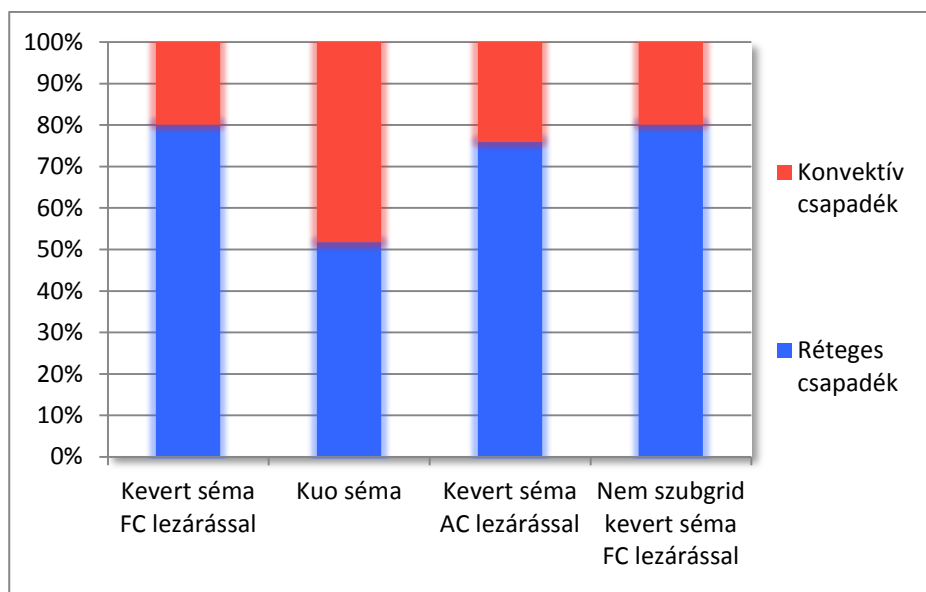
A szimulációk eredményeinek statisztikai vizsgálatait végeztem el a konvektív és réteghőből hulló csapadék elkülönítéséhez kapcsolódóan az 1981-1990 közötti időszakra. Az összes csapadékra és a konvektív típusú csapadékra vonatkozó adatok 6 óránként voltak elérhetők a vizsgált 10 évre, ezek különbségét képezve pedig megállapítható a réteges csapadék mennyisége az adott időszakban az adott rácspontok esetében. A vizsgálatot 11 magyarországi rácspontra végeztem el, melyeket a korábbi tanulmányom alapján választottam ki (1. ábra; 2. táblázat; *Demeter, 2016b*). Ezek a pontok kijelölik az említett vizsgálathoz használt szinoptikus állomásokhoz legközelebb eső rácspontoknak a koordinátáit (*Demeter, 2016a; Demeter 2016b*).

Ezek alapján először megvizsgáltam a konvektív és réteghőből hulló csapadék arányát az esetszámok alapján az összes választott pontra a vizsgált tíz évre. Az esetszámok ebben az esetben arra vonatkoznak, hogy az adott időlépcsőben előfordult-e konvektív vagy réteges csapadék a modell eredményei szerint. Az arányokat tekintve az állomások között nincs nagy különbség az adott futtatásokra vonatkozóan, azaz nincs nagy térbeli változékonyság, ezért az eredményeket a 11 rácspontra átlagolva szemléltetem a 9. ábrán.

A konvektív csapadék aránya a kevert sémánál igen hasonló, körülbelül 20%, a réteges csapadék aránya pedig 80% körüli. A legkisebb arányban akkor fordulnak elő konvektív események, amikor az FC lezárásnál a szubgrid módszer ki van kapcsolva, ekkor megközelíti a 20%-ot. Ez azonban nem számottevő különbség a többi kevert sémával készített futáshoz viszonyítva, ugyanis a szubgrid módszerrel készített szimuláció eredménye alig tér el ettől. Az AC lezárással rendelkező futás eredménye ezt valamivel meghaladja, közel 25%-os benne a konvektív csapadék aránya.

A konvektív csapadékkal járó esetek aránya a Kuo sémával készített szimulációra

kapott eredmények esetében kimagasló a többi sémához képest, körülbelül 50%-os, tehát az esetszámon alapuló csapadékarány körülbelül felét a konvektív felhőből hulló csapadék teszi ki a rétegfelhőből hulló csapadékhoz képest.



9. ábra: Konvektív és réteges csapadékok előfordulási aránya az esetszámok alapján 1981-1990 között a 11 állomásra átlagolva a vizsgált sémák eredményei alapján

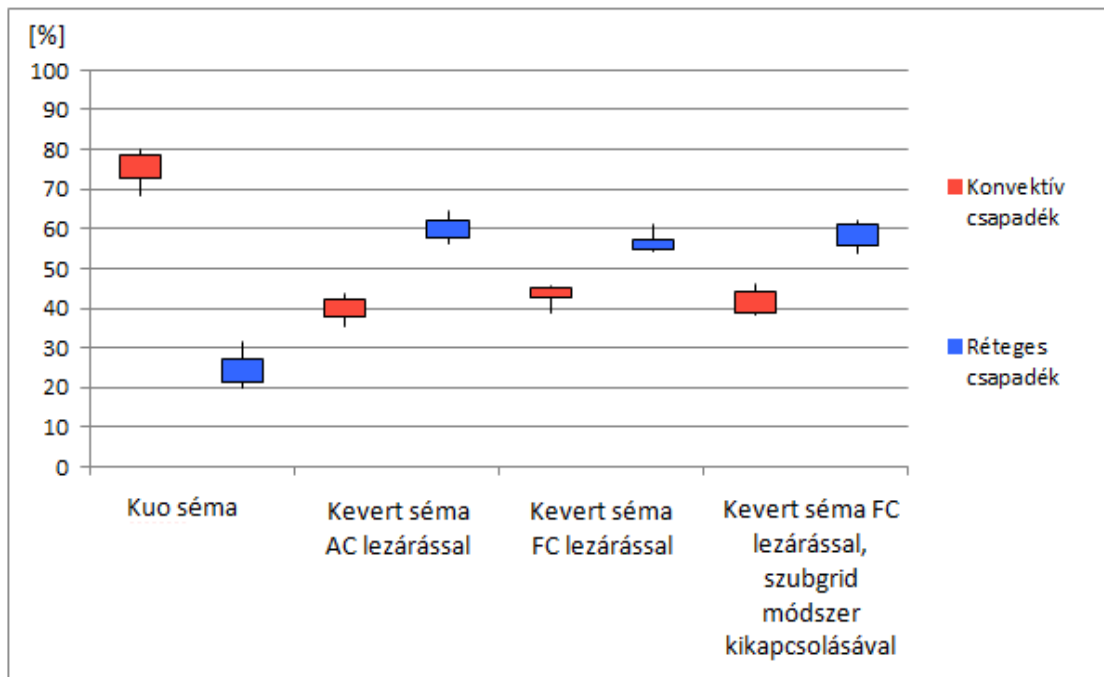
Ezt követően a konvektív és réteges típusú csapadékarányokat a csapadékösszegek alapján is megvizsgáltam a 11 állomásra mind a négy sémára vonatkozóan. Az ehhez kapcsolódó eredményeket a 10. ábra mutatja be.

A csapadékösszegek alapján végzett vizsgálatra is elmondható, hogy az a szimuláció, amelynél a Kuo sémát használták, jelentősen nagyobb konvektív típusú csapadékarányt eredményezett a többi szimulációhoz képest. Ebben az esetben a Debrecenhez köthető minimum konvektív csapadékarány meghaladja a 68%-ot, míg a Sopronra kapott maximum csapadékarány pedig 80% körüli. Az átlagos érték körülbelül 76%, amely több, mint 25%-kal meghaladja az esetszámon alapuló konvektív csapadékarányt. Az is jól látható, hogy a Kuo sémával futtatott szimuláció jelentősen kisebb réteges típusú csapadékarányt eredményezett a többi szimulációhoz képest. A Sopronhoz köthető minimum konvektív csapadékarány majdnem eléri a 20%-ot, míg a Debrecennél kapott maximum csapadékarány is csak 32% körüli. Az átlagos érték közel 24%-os, amely körülbelül 25%-kal kisebb, mint az esetszámon alapuló réteges csapadékarány esetében.

A kevert sémáknál ebben az esetben is hasonlóak az arányok, a 11 állomásra kapott minimum konvektív csapadékarány 35-39% között, a maximum pedig 43-47% között ingadozik. A kevert sémáknál az FC lezárással készített szimuláció eredményeinél a konvektív csapadékarány minimuma Sopronhoz köthető, míg az AC lezárásnál Szegedhez. A maximumarányok esetében az FC lezárási kevert séma felhasználásával készült eredményeknél Paks, míg a másik kettő (AC lezárási és nem szubgrid FC lezárási) kevert sémánál Miskolc a legmeghatározóbb. A területileg átlagolt konvektív csapadékarányok körülbelül 40-45%-osak, amely 15-26%-kal meghaladja az esetszámok alapján kapott eredményeket.

Nyilvánvalóan a kevert sémáknál a réteges csapadékra vonatkozóan is hasonlóak az arányok (ami a konvektív típusra kapott eredményekből is kikövetkeztethető), a 11 állomásra kapott minimum réteges csapadékarány 53-57% között, a maximum pedig 61-65% között változik. A minimumarányok esetében az FC lezárással rendelkező kevert sémával készített szimulációknál Paksra jellemző a legkisebb arány, míg a másik kettő kevert sémájú futtatásoknál (AC lezárási és FC lezárási a szubgrid módszer kikapcsolásával) Miskolcnál a legkisebb a réteges csapadék aránya. A kevert sémáknál az FC lezárással készített szimulációra kapott eredményeknél a maximum réteges csapadékarány Sopronhoz köthető, míg az AC lezárási esetében Szegedhez. Az területileg átlagolt réteges csapadékarányok körülbelül 55-60%-osak, amely 15-26%-kal kisebb arány, mint az esetszámok alapján kapott eredményeknél.

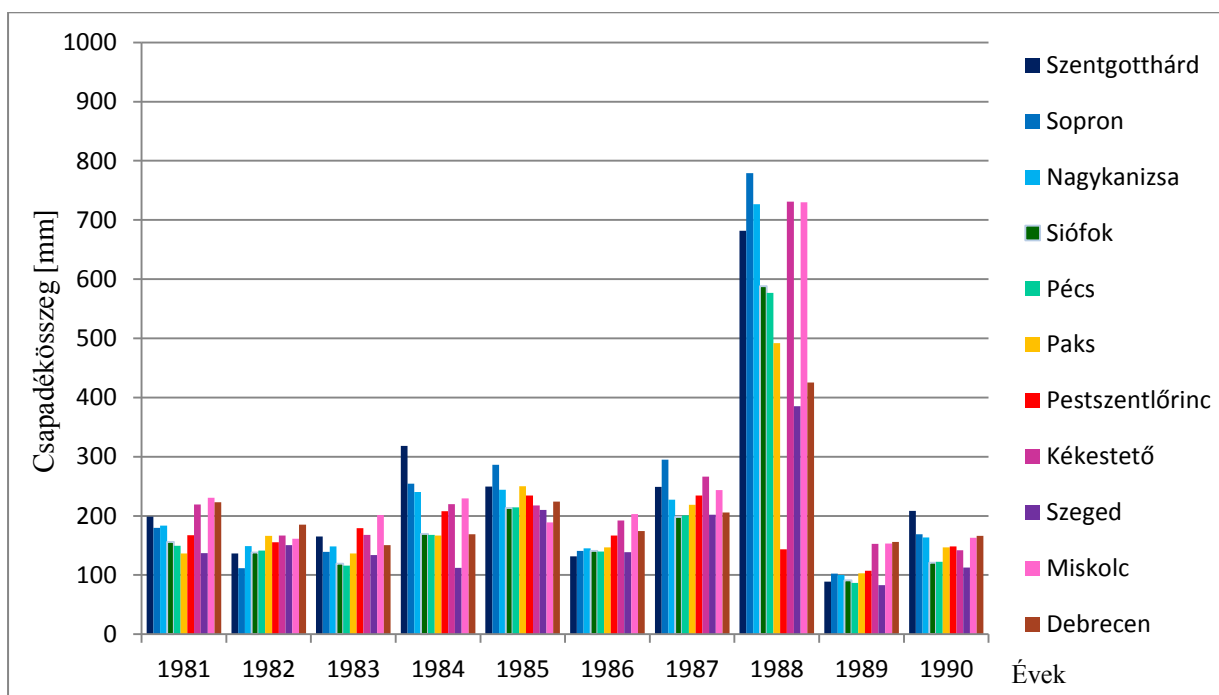
Tehát összességében elmondható, hogy az esetszámok alapján kapott eredményekhez képest a 20%-ot is meghaladja a különbség a csapadékmennyiség szerinti arányoknál és mindkét esetben a Kuo sémával készített szimulációnál egyértelműen nagyobb a konvektív csapadék aránya a többi sémához képest.



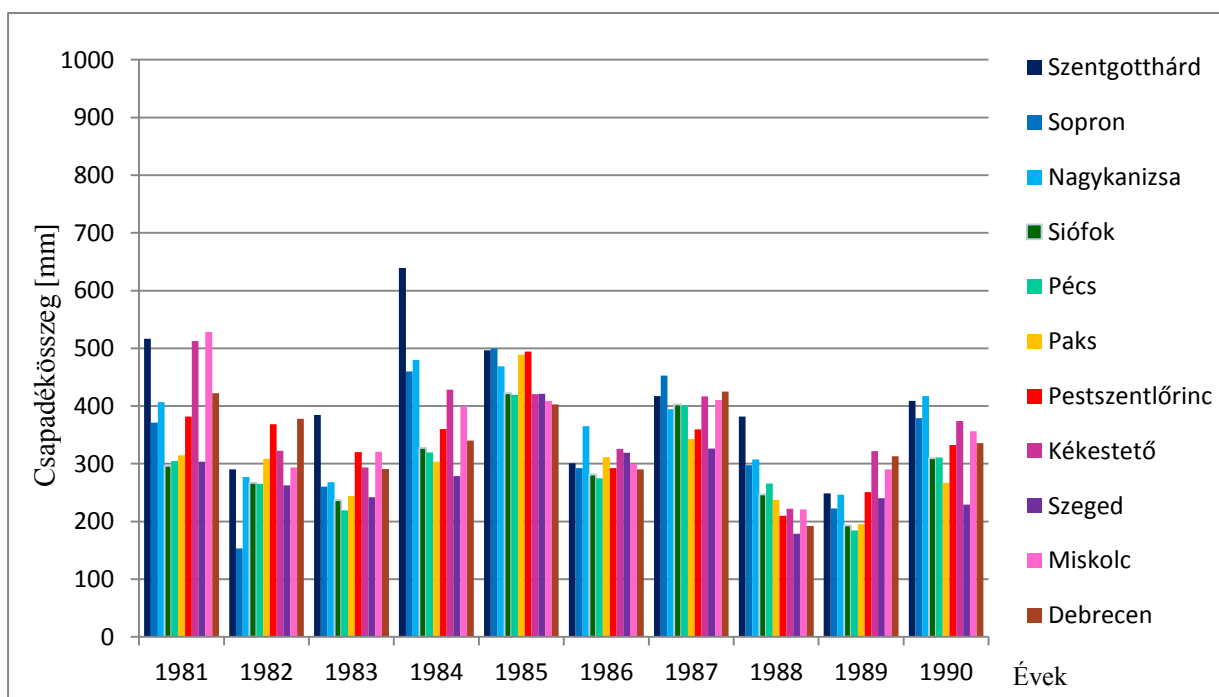
10. ábra: Konvektív és réteges csapadék aránya a csapadékösszegek alapján 1981-1990 között a 11 állomásra a vizsgált sémák eredményei alapján

A kétféle csapadéktípus éves csapadékösszegét is megvizsgáltam az adott rácspontokra vonatkozóan. Az ezeket szemléltető ábrákon a rácspontok nyugat-kelet irányú sorrendben jelennek meg a területi változékonyság bemutatása végett.

A 11. és a 12. ábra a réteges csapadék összegét mutatja be évenként a 11 állomásra vonatkozóan. A Kuo sémával rendelkező szimulációra kapott eredményeket a 11. ábra szemlélteti. Az 1988-as évben Miskolcon a csapadékösszeg megközelíti a 800 mm-t több állomással (például Nagykanizsa, Kékestető, Miskolc) egyetemben. A többi évben azonban a különböző sémákhoz képest alacsonyabb csapadékösszeg látható. A legkisebb éves csapadékösszeg 1989-re tehető, amikor több állomáson a 100 mm-t sem érte el a mennyisége (például Szentgotthárd, Siófok, Pécs). Ettől eltérő eredmények születtek a kevert sémák használatánál. Mindhárom futtatásnál hasonló eredmények jöttek ki, ezt az FC lezárással rendelkező kevert sémás szimuláció eredményein keresztül mutatom be a 12. ábrán. Ebben az esetben a legnagyobb éves csapadékösszeg Pestszentlőrincre tehető 1984-ben, amikor közel 640 mm-es a csapadék mennyisége az eredmények szerint. A legkisebb érték pedig Sopronhoz köthető 1982-ben, a 150 mm-t éppen meghaladva.



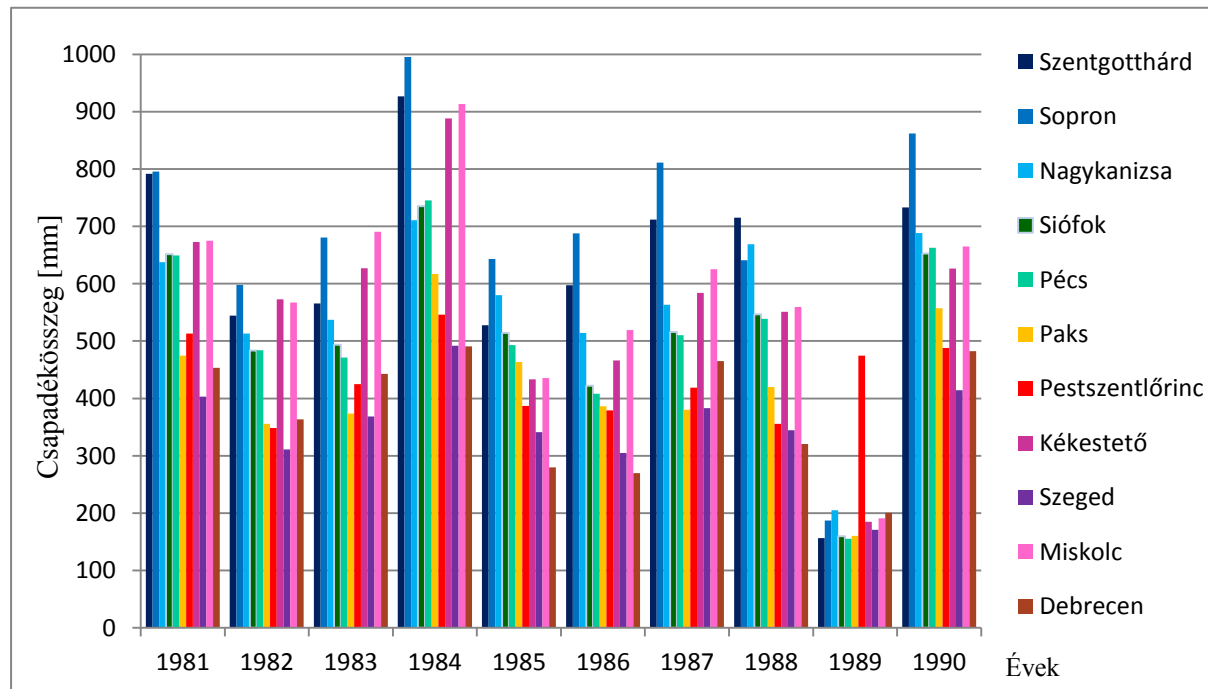
11. ábra: Réteges csapadék éves csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a Kuo séma eredményei alapján



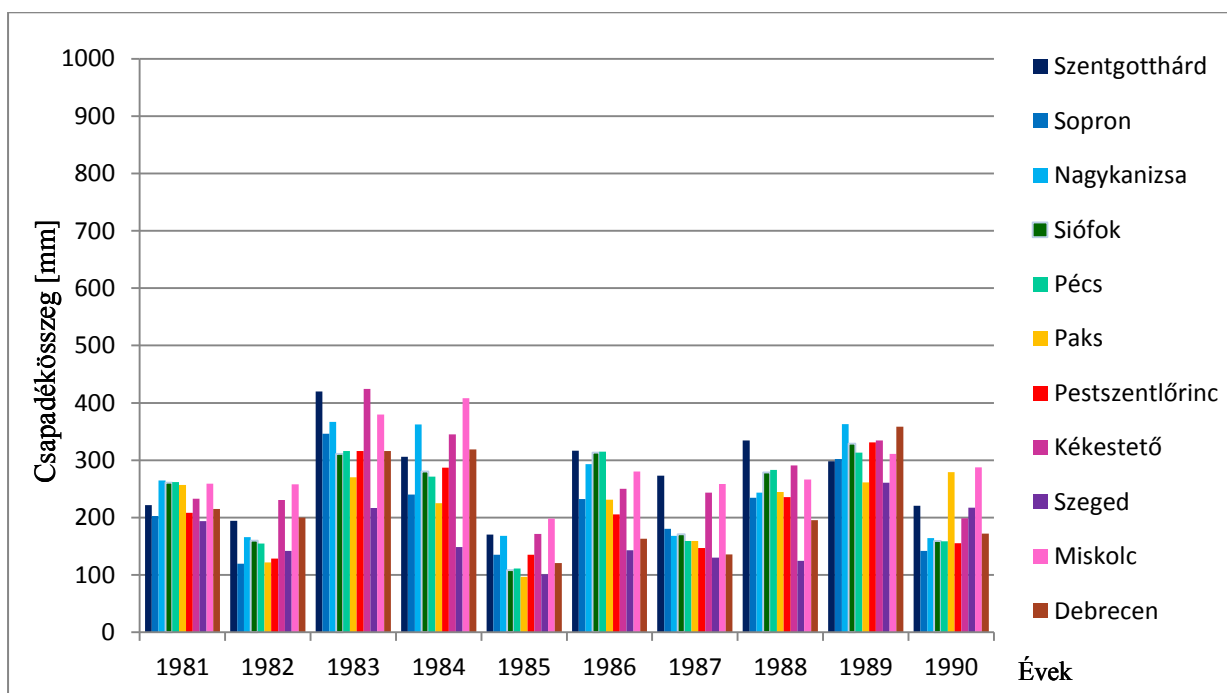
12. ábra: Réteges csapadék éves csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a kevert séma AS lezárással rendelkező szimuláció eredményei alapján

A 13., 14. és 15. ábrák a konvektív felhőből hulló csapadék éves csapadékösszegeire vonatkoznak. A 13. ábra a Kuo sémával futtatott szimulációra kapott eredményeket mutatja az éves konvektív csapadékösszegek esetében. Az ábrán látható, hogy igen nagy a változékonyság, Miskolcon a csapadékösszeg 1984-ben megközelíti az 1000 mm-t, az 1989-es évben azonban a legtöbb rácspontnál igen alacsony volt a csapadékmennyiség, több helyen 150 mm körüli értéket láthatunk.

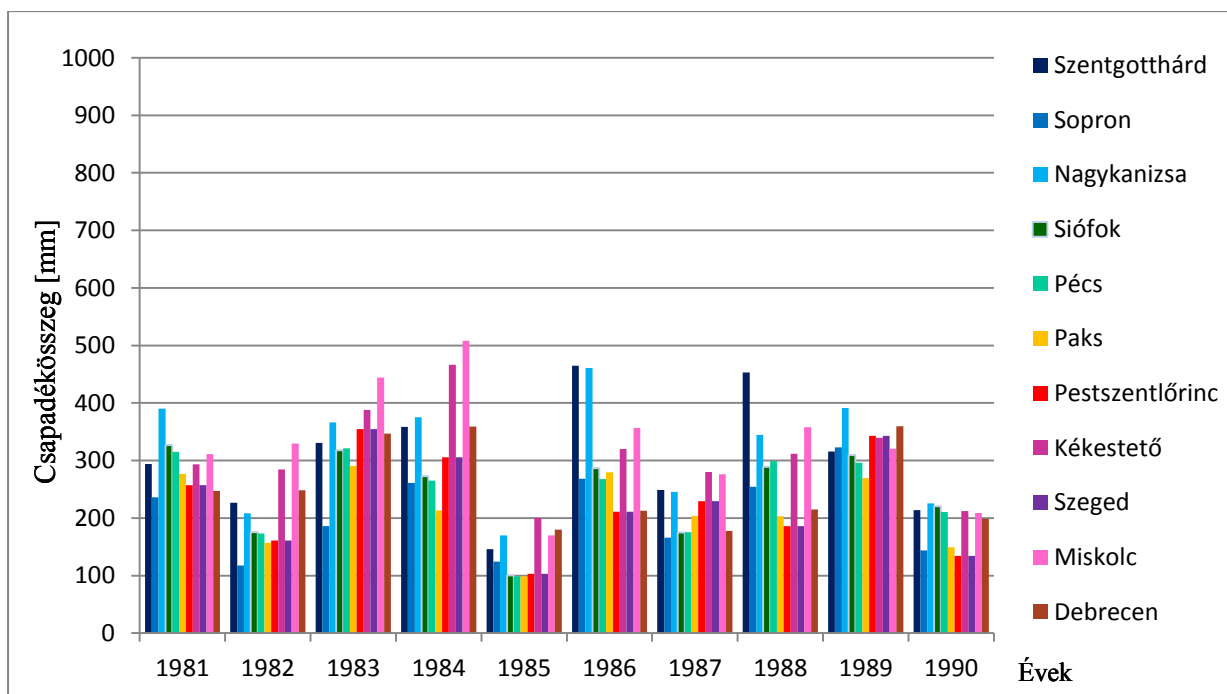
A kevert sémák használatával kapott eredmények ebben az esetben is hasonlóak, bár valamivel több az eltérés közöttük. A 14. ábra az AS lezárással rendelkező kevert sémás szimuláció eredményeit, a 15. ábra pedig az FC lezárású szimuláció eredményeit mutatja be abban az esetben, amikor a szubgrid módszer ki lett kapcsolva. A minimumértékekben nagyon hasonlóak a csapadékösszegek (közel 100 mm), az utóbbi sémánál azonban nagyobb az évenkénti minimumok és maximumok közötti eltérés. Ebben az esetben a legnagyobb csapadékösszeg az 500 mm-t is meghaladja Miskolcon 1984-ben. Az AS kevert sémával rendelkező szimulációnál a legnagyobb csapadékösszeg 400 mm-en túlmutat Kékestetőnél 1983-ban és Miskolcon 1984-ben.



13. ábra: Konvektív csapadék éves csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a Kuo sémával rendelkező szimuláció eredményei alapján



14. ábra: Konvektív csapadék éves csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a kevert séma AS lezárással rendelkező szimuláció eredményei alapján



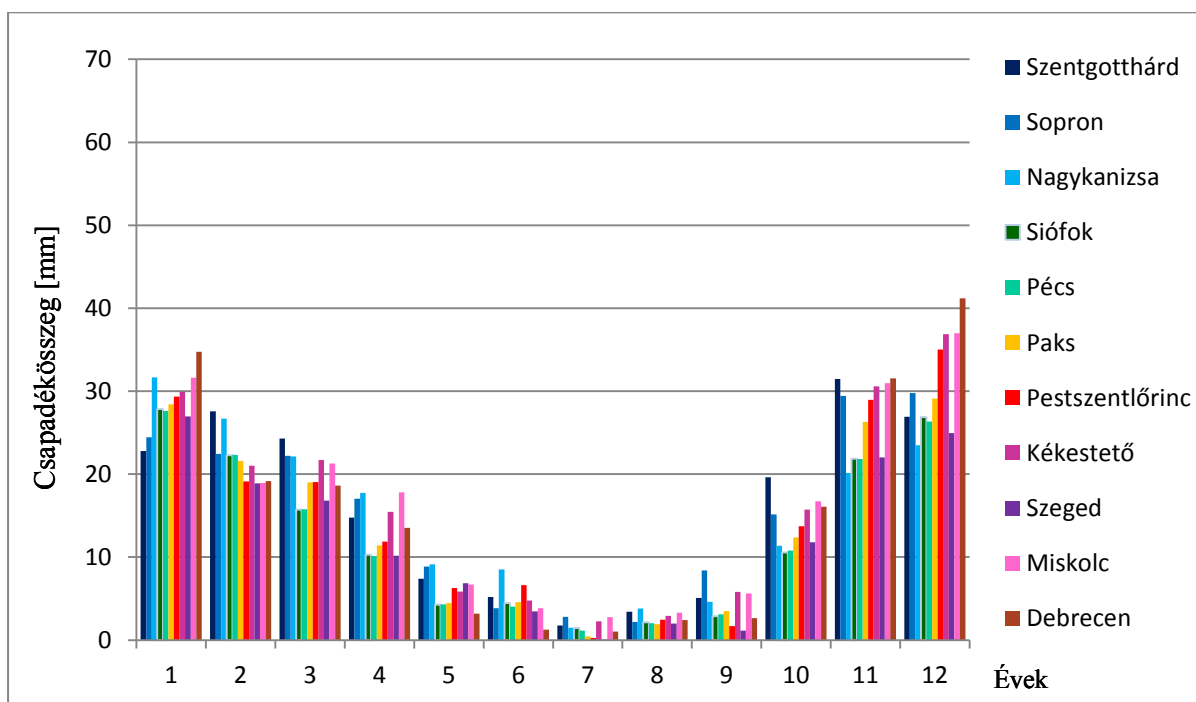
15. ábra: Konvektív csapadék éves csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a nem szubgrid kevert séma FC lezárással rendelkező szimuláció eredményei alapján

Az 10 évre átlagolt havi csapadékmennyiségekre végzett vizsgálatok eredményeit a 16-19. ábrák szemléltetik. A 16. ábrán szemléltetett Kuo sémával rendelkező szimulációval kapott eredmények esetén a rétegfelhőből hulló csapadék vizsgálatánál szembetűnőek a nyári alacsony és a téli magas értékek. A legnagyobb értékek decemberre, a legkisebbek pedig júliusra estek. A legalacsonyabb átlagos réteges csapadékmennyiség Szegedhez köthető a júliusi hónapra vonatkozóan, amely körülbelül 0,1 mm, míg a legmagasabb átlagos csapadékösszeg Debrecenre jellemző a decemberi hónapban, közel 42 mm-es értékkel.

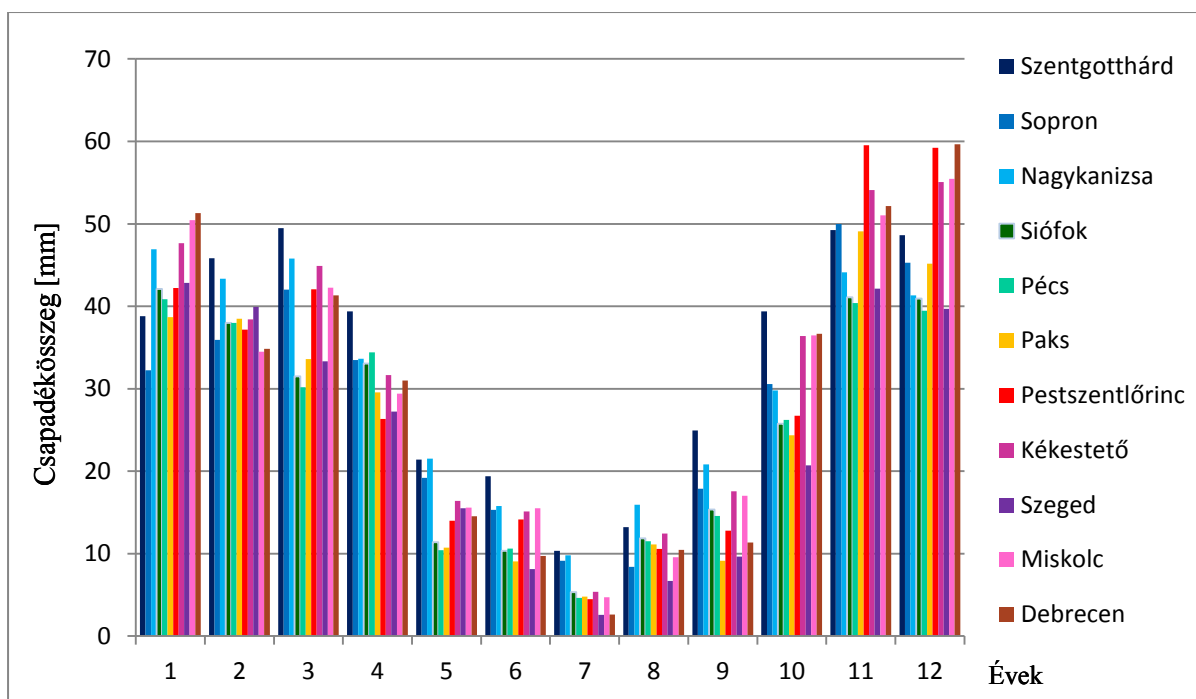
Ebben az esetben is közel megegyező eredmények tapasztalhatók a kevert sémákra vonatkozóan. Ezeket az AS lezárással rendelkező kevert sémájú szimuláció eredményein keresztül mutatom be a 17. ábrán. Ennél a szimulációnál is hasonló a tendencia a Kuo sémát használt esetéhez, ám itt valamivel magasabbak a csapadékmennyiségek értékei. A legalacsonyabb átlagos réteges csapadékösszeg szintén Szegedre jellemző júliusban, amely körülbelül 2,6 mm. A legmagasabb átlagos csapadékmennyiség a decemberi hónapra vonatkozóan Debrecenhez köthető, amely majdnem eléri a 60 mm-t.

Az átlagos havi konvektív csapadékmennyiségekre kapott eredményeket a 18. és a 19. ábra mutatja be. A 18. ábrán látható Kuo séma eredményei szerint sok esetben jóval magasabb lett az átlagos havi csapadékmennyiség a többi séma eredményeihez képest. Tavasz és ősz között változnak a nagyobb mennyiségek állomásonként. A legkisebb átlagos csapadékmennyiség Szegedhez köthető a decemberi hónapban, amely megközelíti a 15 mm-t, a legnagyobb pedig Miskolchoz köthető júniusban, amely meghaladja a 125 mm-t.

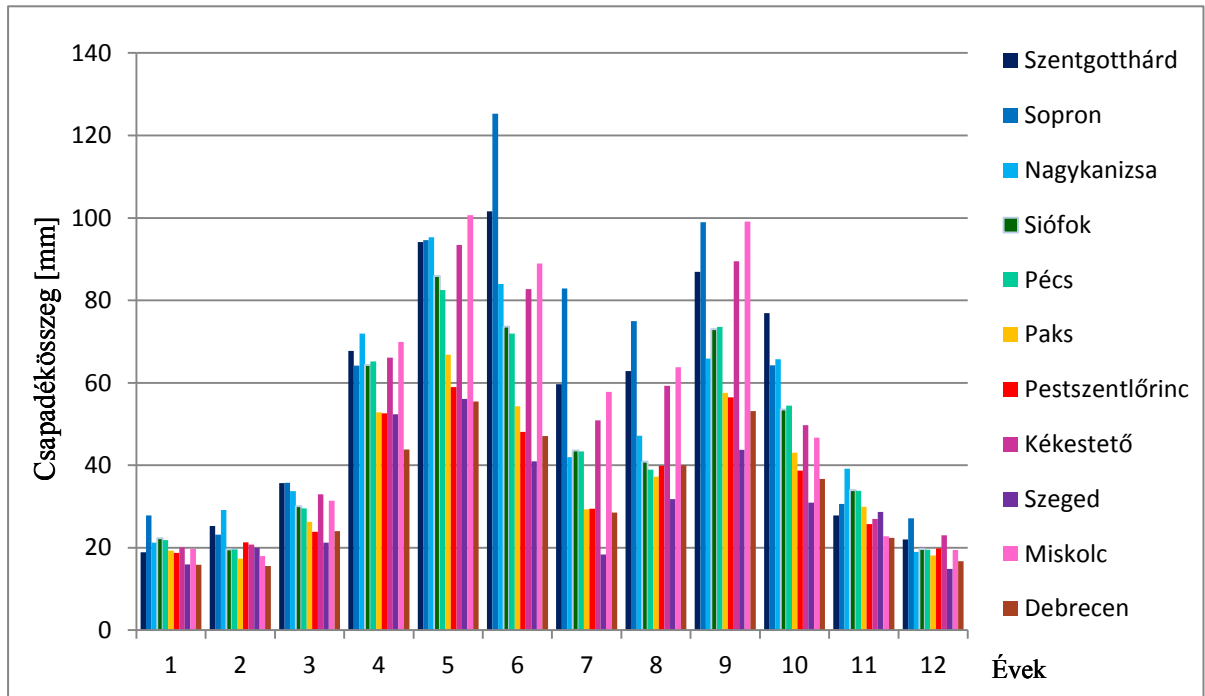
A kevert sémákra jellemző eredményt ebben az esetben is az AS lezárással rendelkező kevert séma szemlélteti (19. ábra). A konvektív csapadék vizsgálatánál jellemzően a nyári hónapok a legfontosabbak, ugyanis ekkor hullik a legtöbb csapadék konvektív típusú felhőkből. A kevert sémák szerint a májusi és júniusi hónapokban a legjellemzőbb a konvektív csapadék. A legnagyobb átlagos csapadékmennyiség májusra tehető, amely közel 80 mm-es, még hozzá Miskolcon. A téli hónapokban pedig igen alacsony a konvektív csapadék mennyisége valamennyi rácspont esetében, a legkisebb mennyiség decemberre vonatkozik Debrecenben, amely 1 mm alatti.



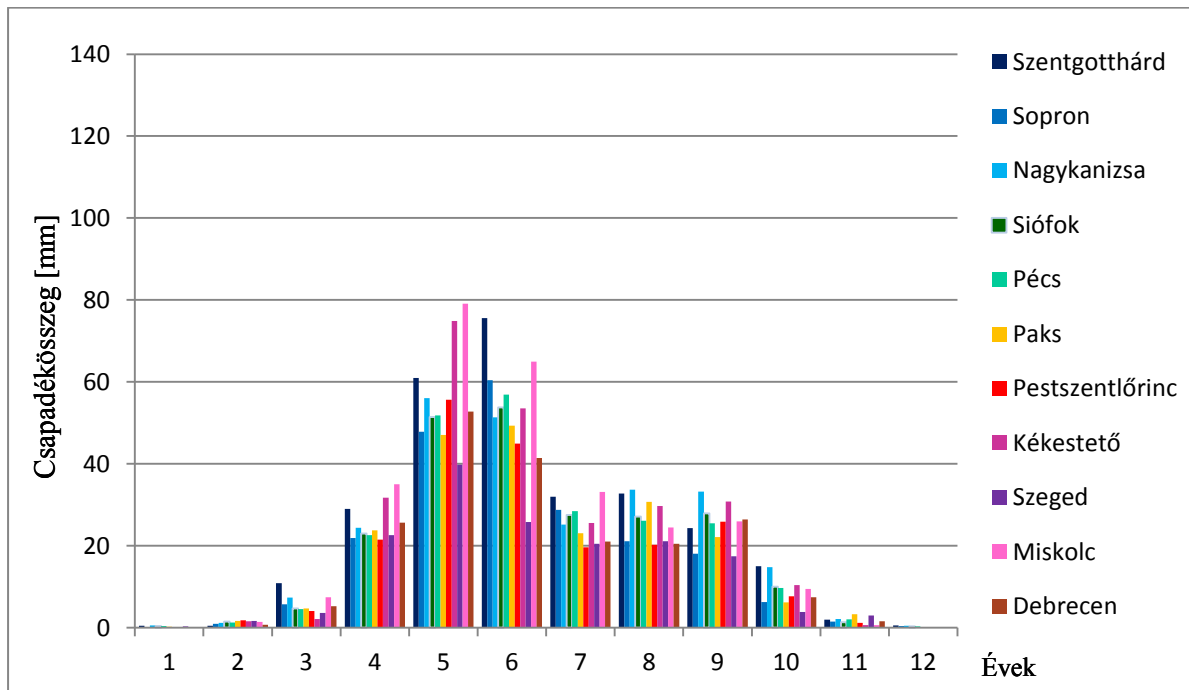
16. ábra: Réteges csapadék átlagos havi csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a Kuo sémával rendelkező szimuláció eredményei alapján



17. ábra: Réteges csapadék átlagos havi csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a kevert séma AS lezárással rendelkező szimuláció eredményei alapján



18. ábra: Konvektív csapadék átlagos havi csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a Kuo sémával rendelkező szimuláció eredményei alapján



19. ábra: Konvektív csapadék átlagos havi csapadékösszege 1981-1990 között a 11 állomásra a kevert séma AS lezárással rendelkező szimuláció eredményei alapján

Összességében a vizsgálat alapján elmondható, hogy a Kuo sémával rendelkező szimuláció eredményei nagymértékben eltérnek a többi szimuláció eredményeitől, ugyanis ennél a sémánál jóval nagyobb a konvektív csapadék jelentősége. A kevert sémákkal kapott eredmények között kicsi a különbség, összhangban *Pieczka et al.*, (2017) vizsgálatával. Az eredmények jól reprezentálják, hogy bár a réteges csapadék az esetek számát tekintve gyakrabban fordul elő, a csapadék mennyiségének arányánál ez már nem feltétlenül mondható el. A Kuo sémával rendelkező szimulációval kapott eredményeknél ebben az esetben például a konvektív csapadék aránya jóval meghaladja a réteges csapadék arányát, míg a többi kevert sémánál megközelíti egymást a két arány. Az éves és havi vizsgálatok alapján is látszik, hogy a Kuo séma használatánál a konvektív csapadék mennyisége kiemelkedő, és meghaladja a réteges csapadékmennyiséget, ellentétben a többi esettel. Látható az éves menet is, nyáron a konvektív csapadék ér el kimagasló mennyiséget, télen pedig inkább a réteges csapadék. A havi számításoknál feltűnik valamilyen szinten egy nyugat-kelet irányú területi változékonyság, emellett bizonyos állomásoknál a hegyvidéki jellegből fakadó magasabb csapadékmennyiség.

5. Összefoglalás

A jelen diplomamunka célja a RegCM4.3 szimulációkkal kapott teljes és konvektív csapadékeredmények alapján konvektív és réteges típusba elkülönített csapadékokra különböző statisztikák kinyerése, melyek pontosabb képet adhatnak a modell értékeléséhez, validálásához.

A vizsgálatot az 1981-1990 közötti időszakra végeztem el a RegCM4.3 négy különböző futtatással kapott eredményeinek segítségével 11 kiválasztott rácspontra, amelyek a korábbi tanulmányaim során vizsgált szinoptikus állomásokhoz legközelebb eső pontokat jelölik ki. A négyféle szimulációból három a kevert (MIT/Grell) sémához kapcsolódik, amelyet különböző lezárásokkal alkalmaztak (AS és kettő FC). A második FC lezárásnál pedig kikapcsolták a szubgrid módszert. A negyedik séma pedig a Kuo séma, amely a legeltérőbb eredményeket adta a vizsgálat során. A 6 óránkénti összecsapadéokra és konvektív csapadéokra vonatkozó adatok feldolgozását R programnyelv segítségével végeztem el.

Mind a csapadékos esetek, mind a csapadékösszegek alapján kiszámított konvektív és rétegfelhőből hulló csapadékarányoknál a Kuo sémával kapott eredmények mutatták a legnagyobb konvektív arányt a többi sémához képest. A kevert sémákkal rendelkező szimulációk eredményei igen nagy hasonlóságot jeleztek. Az éves csapadékösszegekre vonatkozó elkülönítésnél is hasonlóan a Kuo séma eredményezte a kimagasló konvektív értékeket. Ahogyan a SYNOP kódokon alapuló vizsgálatnál (*Demeter, 2016b*), ebben az esetben is megmutatkozik az átlagos havi számításnál a konvektív és réteges csapadék éves menete, tehát a konvektív csapadék nyáron, míg a réteges télen jellemzőbb. Emellett az is leolvasható az ábrákról, hogy a konvektív csapadék egyszerre nagyobb csapadékmennyiséget adhat, mint a réteges. A térbeli változékonyság az átlagolt havi csapadékmennyiségekre vonatkozó ábrán megjelenik, így látható valamelyest a nyugat-kelet irányú csapadékmennyiség változása, és a hegyvidéki jelleg befolyásoló hatása.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőimnek, Dr. Pieczka Ildikónak és Soósné Dr. Dezső Zsuzsannának, hogy az elmúlt évek során végig segítettek, támogatták és folyamatosan figyelemmel kísérték munkámat. Továbbá köszönöm Kristóf Erzsébetnek a programozásban nyújtott segítséget.

Irodalomjegyzék

Alder, R.F., Negri, A.J., 1988: A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J. Appl. Meteorol.* 27, 30–51.

Allen, J. T., D. J. Karoly, 2014: A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979–2011: Inter-annual variability and ENSO influence. *Int. J. Climatol.*, 34, 81–97.

Anagnostou, E.N., 2004: A convective/stratiform precipitation classification algorithm for volume scanning weather radar observations. *Meteorol. Appl.* 11 (4), 291–300.

Anderson, G., D. Klugmann, 2014: A European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data. *Nat. Hazard. Earth. Sys.*, 14, 815–829

Anthes, R.A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon Weather Rev* 105: 1423–1438

Anthes, R.A., Hsie, E.Y., Kuo, Y.H., 1987: Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). National Center for Atmospheric Research Tech Note TN-282+ STR, NCAR, Boulder, CO

Arakawa, A., Schubert, W.H., 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment. Part I *J Atmos Sci* 31:674–701

Austin, P. M., 1987: Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Mon. Wea. Rev.* 115: 1053–1070.

Awaka, J., Iguchi, T., Kumagai, H., Okamoto, K., 1997: Rain type classification algorithm for TRMM precipitation radar. Proceedings of the IEEE 1997 International Geosci. Remote Sen. Symposium. 3–8 August, Singapore, 1636– 1638.

Ban, N., Schmidli, J., Schär, C., 2014: Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 7889–7907.

Betz, H. D., K. Schmidt, P. Laroche, P. Blanchet, W. P. Oettinger, E. Defer, Z. Dziewit, and J. Konarski, 2009: LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmos. Res.*, 91, 564–573.

Brockhaus, P., Lüthi, D., Schär, C., 2008: Aspects of the diurnal cycle in a regional climate model, *Meteorol. Z.*, 17, 433–443.

Brooks, H.E., Czernecki, B., Fortuniak, K., Szuster, P., Taszarek, M., 2018: Climatological aspects of convective parameters over Europe: a comparison of ERA-Interim and sounding data. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0596.1

Cady-Pereira, K. E., M. W. Shephard, D. D. Turner, E. J. Mlawer, S. A. Clough, and T. J. Wagner, 2008: Improved daytime column-integrated precipitable water vapor from Vaisala radiosonde humidity sensors. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 25, 873-883.

Churchill, D.D., Houze Jr., R.A., 1984: Development and structure of winter monsoon cloud cluster on 10 December (1978). *J. Atmos. Sci.* 41, 933–960.

Dai, A., 2006: Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *J. Clim.* 19, 4605–4630.

Demeter, Sz., 2016a: Konvektív és rétegfelhőből hulló csapadék statisztikai vizsgálata állomási mérések alapján, Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Témavezetők: Dr. Pieczka Ildikó, Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna), 49 p.

Demeter, Sz., 2016b: Konvektív és rétegfelhőből hulló csapadék statisztikai vizsgálata magyarországi állomási mérések alapján, TDK dolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Témavezetők: Dr. Pieczka Ildikó, Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna), 37 p.

Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989: A regional climate model for the western United States. *Clim Change* 15: 383–422.

Dickinson, R.E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P., 1993: Biosphere–atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model. Tech Rep, National Center for Atmospheric Research Tech Note NCAR.TN-387+STR, NCAR, Boulder, CO

Dirmeyer, P. A., et al. 2012: Simulating the diurnal cycle of rainfall in global climate models: Resolution versus parametrization, *Clim. Dyn.*, 39, 399–418.

Doswell, C. A., III, H.E. Brooks, and R. A. Maddox, 1996: Flash flood forecasting: An ingredientsbased methodology. *Wea. Forecasting*, 11, 560-581.

Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zakey, A., Giuliani, G., 2011: Regional climatic model RegCM Reference Manual version 4.3. 32p. ITCP, Trieste, Italy.

Emanuel, K.A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J Atmos Sci* 48(21):2313–2335.

Emanuel, K.A., Zivkovic-Rothman, M., 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J Atmos Sci* 56: 1766–1782.

Frei, C., Christensen, J.H., Dčquč, M., Jacob, D., Jones, R.G., Vidale, P.L., 2003: Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps, *J. Geophys. Res.*, 108(D3), 4124.

Fritsch, J. M., Chappell, C.F., 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 37, 722–1733.

Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 3, 941–963.

Giorgi, F., Bates, G. T., 1989: The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Monthly Weather Review*, 117, 11, 2325-2347.

Giorgi, F., Marinucci, M. R., Bates, G. T., 1993a: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 2794– 2813.

Giorgi, F., Marinucci, M. R., Bates, G. T., DeCanio, G., 1993b: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 2814–2832.

Giorgi, F., Mearns, L. O., 1999: Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104, 6335-6352.

Giorgi, F., Francisco, R., Pal, J., 2003: Effects of a subgrid-scale topography and land use scheme on the simulation of surface climate and hydrology. Part I: effects of temperature and water vapor disaggregation. *J Hydrometeorol* 4(2): 317–333.

Giorgi, F., Pal, J.S., Bi, X., Sloan, L., Elguindi, N., Solmon, F., 2006: Introduction to the TAC special issue: the RegCNET network. *Theor Appl Climatol* 86: 1–4.

Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M.B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G.T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U.U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T.A., Tawfik, A.B., Shalaby, A., Zakey, A.S., Steiner, A.L., Stordal, F., Sloan, L.C., Brankovic, C., 2012: RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim Res* 52:7–29.

Giorgi, F., Torma, Cs., Coppola, E., Ban, N., Schär, C., Somot, S., 2016: Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming, *Nat. Geosci*, 9, 584–589.

Grell, G.A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121,764-787.

Grell, G., Dudhia, J., Stauffer, D.R., 1994: A Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5).NCAR technical note NCAR/TN-398+STR,121 p.

Groenemeijer, P., T. Pučik, A. M. Holzer, B. Antonescu, K. Riemann-Campe, D. M. Schultz, T. Kuhne, B. Feuerstein, H. E. Brooks, C. A. III Doswell, H. J. Koppert, and R. Sausen, 2017: Severe convective storms in Europe: Ten years of research at the European Severe Storms Laboratory. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* in press, doi:10.1175/BAMS-D-16-0067.1.

Guichard, F., D. Parsons, and E. Miller, 2000: Thermodynamic and radiative impact of the correction of sounding humidity bias in the tropics. *J. Climate*, 13, 3611-3624.

Houze Jr., R.A., 1973: A climatological study of vertical transport by cumulus-scale convection. *J. Atmos. Sci.* 30, 1112–1123.

Joss, J., Waldvogel, A., 1990: Precipitation measurement and hydrology. In: D. Atlas (ed.), *Radar in Meteorology*, Am. Meteorol. Soc., pp. 577–606.

Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G.B., Boville, B., Briegleb, B., Williamson, D., Rasch, P., 1996: Description of NCAR community climate model (CCM3). In: Tech. Note NCAR/TN-420 + STR. National Center for Atmospheric Research. 152 p.

Kummerow, C., Simpson, J., Thiele, O., Barnes, W. et al. 2000: The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *J. Appl. Meteorol.* 39(12): 1965–1982.

Kyeslý, J., Begueria, S., Beranova, R., Gaal, L., Lopez-Moreno, J.I., 2012: Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. *Glob Planet Change* 98-99:63-72.

Kyeslý, J., Rulfová, Z., Farda, A., Hanel, M., 2015: Convective and stratiform precipitation characteristics in an ensemble of regional climate model simulations. *Clim. Dyn.* 46, 227–243.

Lam, H.Y., Luini, L., Din, J., Capsoni, C., Panagopoulos, A.D., 2010: Stratiform and convective rain discrimination for equatorial region. Paper presented at the Proceeding, 2010 IEEE Student Conference on Research and Development—Engineering: Innovation and Beyond, SCORed 2010, pp. 112–116.

Lin, J., Mapes, B., Zhang, M., Newman, M., 2004: Stratiform precipitation, vertical rating profiles, and the Madden–Julian oscillation. *J. Atmos. Sci.* 61, 269–309.

Mapes, B.E., Houze Jr., R.A., 1995: Diabatic divergence profiles in western Pacific mesoscale convective systems. *J. Atmos. Sci.* 52, 1807–1828.

Maraun, D., Osborn, T.J., Rust, H.W., 2012: The influence of synoptic airflow on UK daily precipitation extremes. Part II: regional climate model and E-OBS data validation. *Clim Dyn* 39:287–301.

Pal, J.S., Small, E., Eltahir, E., 2000: Simulation of regional scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J. Geophys. Res.*, 105, 567–594.

Pieczka, I., Bartholy, J., Pongrácz, R., Kelemen, F., Kis, A., André, K., 2014: Regionális klímamodell-becslések a Kárpát-medencére. In: Pongrácz R., Mészáros R., Kis A., Leelőssy Á., Sábitz J. (szerk.): *Légköri folyamatok előrejelzésének módszerei és alkalmazásai. A Meteorológiai TDK 2014. évi nyári iskola előadásainak összefoglalói.* ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. 96-101.

Pieczka, I., Pongrácz, R., André, K. S., Kelemen, F. D., Bartholy, J., 2016: Sensitivity analysis of different parameterization schemes using RegCM4. 3 for the Carpathian region. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-14.

Plavcova, E., Kysely, J., Štěpanek, P. 2014: Links between circulation types and precipitation in Central Europe in the observed data and regional climate model simulations. *Int J Climatol* 34:2885–2898.

Pohjola, H., and A. Makela , 2013: The comparison of GLD360 and EUCLID lightning location systems in Europe. *Atmos. Res.*, 123, 117–128.

Qian, J.H., 2008: Why precipitation is mostly concentrated over islands in the maritime continent. *J Atmos Sci* 65: 1428–1441.

Qian, J.H., Robertson, A.W., Moron, V., 2010: Interactions among ENSO, the monsoons, and diurnal cycle in rainfall variability over Java, Indonesia. *J Atmos Sci* 67: 3509–3524.

Rulfová, Z., Kyselý, J., 2013: Disaggregating convective and stratiform precipitation from station weather data. *Atmospheric Research*, 134, 100-115.

Rulfová, Z., Kyselý, J., 2014: Trends of Convective and Stratiform Precipitation in the Czech Republic, 1982–2010. *Advances in Meteorology*, 2014, 11 p.

Sempere-Torres, D., Sanchez-Diezma, R., Zawadzki, I., Creutin, J.D., 2000: Identification of stratiform and convective areas using radar data with application to the improvement of DSD analysis and Z–R relations. *Phys. Chem. Earth*. 25 (10–12), 985–990.

Smith, J. A., Krajewski, W. F., 1993: A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships. *Water Resources Res.* 29: 2505–2514.

Steiner, M., Houze Jr., R.A., Yuter, S.E., 1995: Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J. Appl. Meteorol.* 34, 1978–2007.

Steiner, M., Smith, J.A., 1998: Convective versus stratiform rainfall: a micrometeorological and kinematic conceptual model. *Atmos. Res.* 47–48, 317–326.

Štekl, J., Brázdil, R., Kakos, V., Jež, J., Tolasz, R., Sokol, Z., 2001: Extreme daily precipitation on the territory of the Czech Republic in the period 1879–2000 and their synoptic causes. Czech Hydrometeorological Institute, Prague, Volume 31, 140 p.

Steppeler, J., Doms, G., Schattler, U., Bitzer, H., Gassmann, A., Damrath, U., Gregoric, G., 2003, Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 82, 75–96.

Szépszó, G., Bölöni, G., Horányi, A., Szűcs, M., 2013: A numerikus időjárásmodellek felépítése: tér- és időskála, adatasszimiláció, diszkrétizáció, parametrizációk, valószínűségi előrejelzések, éghajlati modellezés. In: Gyöngyösi, Z., Weidinger, T. (szerk.): *Alkalmazott számszerű előrejelzés: numerikus időjárásmodellek és csatolt modellek a gyakorlatban*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 254 p.

Szuster, P., 2016: The implementation of computing system for determining the temperature change for trial air particles, M.S. thesis, Dept. of Computer Science, Tadeusz Kościuszko Cracow University of Technology, 42 p.

Torma, Cs., Bartholy, J., Pongracz, R., Barcza, Z., Coppola, E., Giorgi, F., 2008: Adaptation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Idojaras*, 112, 3-4, 233-247.

Torma, Cs., 2011: Átlagos és szélsőséges hőmérsékleti és csapadék viszonyok modellezése a Kárpát-medencére a XXI. századra a RegCM regionális klímamodell alkalmazásával. Doktori értekezés, ELTE Bp. 125 p.

Ungewitter, G., 1970: Studien über tägliche Niederschlagssummen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Meteorol. Rundsch. 23 (4), 114–117.

Internetes források

[1 – ncdc.noaa.gov] <https://www.ncdc.noaa.gov/>

[2 – met.hu]

http://www.met.hu/doc/rendezvenyek/OMEK_2017/OMEK2017_SzintaiB.pdf