

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Földtudományok Doktori Iskola
Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék

**A DÉL-ALFÖLD TALAJVÍZ IDŐSORAINAK
NAGY LÉPTÉKŰ, GEOSTATISZTIKAI ALAPÚ
MODELLEZÉSE**

KÉT MEGKÖZELÍTÉS NEM FOLYTONOS MONITORING
ADATOK EGYÜTTES TÉRBELI ÉS IDŐBELI
SZTOCHASZTIKUS SZIMULÁCIÓJÁRA

Doktori (PhD) értekezés tézisei

FEHÉR ZSOLT ZOLTÁN

Témavezetők:

Dr. Rakonczai János
egyetemi tanár

Dr. Geiger János
egyetemi docens

Szeged

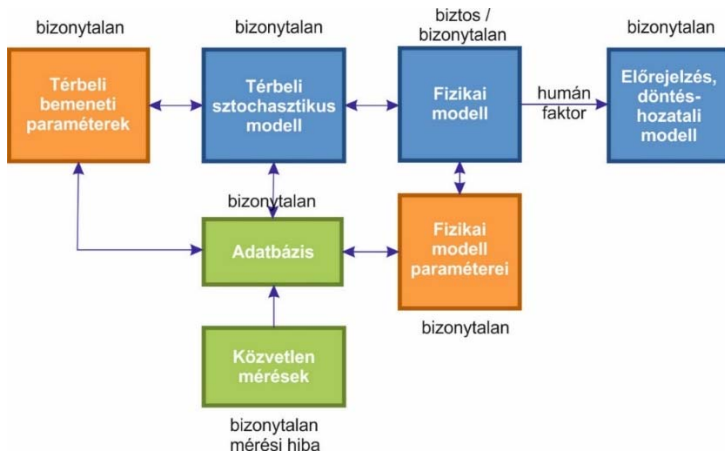
2019

1. Előzmények és célkitűzések

Napjaink egyik fontos környezeti problémája a Földünk édesvíz készleteinek helyzete (szennyezés, egy főre jutó készletek gyors csökkenése). A vegetáció (és így az agrárgazdaság) szempontjából a talajvízkészletnek meghatározó szerepe van, melynek változására az elmúlt évtizedekben a klímaváltozás is jelentős hatást gyakorol. Ezért a készletek mennyiségi változásainak pontos elemzése fontos gazdasági érdek, így az EU Vízügyi Keretirányelve követelménye is tartalmazza. Ugyan a talajvizet a nemzetközi szakirodalom többnyire a rétegvizekkel együtt értelmezi, azonban gyakorlati jelentősége miatt Magyarországon általában külön értékelik.

Bár a talajvízváltozások kutatásának évszázados hazai előzménye van (vízjárásai sajátosságok vizsgálata, vízkészlet-változás térképek stb.), a geostatisztikai megközelítésű elemzésekre alig irányult figyelem. A térben relatíve ritka mérőhálózat és a sok területen elég változatos domborzat miatt a hagyományos interpolációs eljárásokkal készült térképek jelentős becslési hibával terheltek, eddig erre azonban kevés figyelem irányult, hiszen a fő változási tendenciákat mégis jelezték. Emellett hosszú időn keresztül mind a számítástechnikai, mind a geostatisztikai háttér hiánya nem is tette lehetővé a probléma megfelelő mélységű tudományos értelmezését. Ezen háttérfeltételek kedvező változása ugyanakkor napjainkra már elengedhetetlenné teszik, hogy szakmailag megalapozottabb, és több gyakorlati szempontra is figyelemmel levő elemzések készüljenek.

Mivel a talajvíz tényleges állapotáról csak egy-egy időpillanatban, illetve térben pontszerűen nyerhetünk információkat, így a nem megfigyelt térrészekre, adathiányos időszakokra, a vízkészletek változásának, a talajvíz területi mélységének meghatározásához, becslést kell végeznünk (Mucsi et al 2013). A talajvíz pillanatnyi helyzetének becslése a környezeti modellek egyik almodelljeként értelmezhető. Ennek során megtörténik a betáplált talajvíz adatok feldolgozása, és előáll a soktényezős környezeti modell egyik bemeneti adata. A korlátozottan rendelkezésre álló információk, továbbá az egyes környezeti elemek közötti kapcsolatok értelmezhetőségének korlátai miatt a környezeti modellek különféle eredetű bizonytalansági tényezőkkel terheltek (Caers 2011). Ezek a bizonytalanságok minden esetben fennállnak, függetlenül a választott fizikai modelltől (1. ábra).



1. ábra. A földtudományi modellek megbízhatóságát befolyásoló tényezők kapcsolatrendszere (Caers 2011).
(A nyilak a kapcsolatok irányára utalnak)

A talajvíz gyakran a környezeti modellek alsó peremfeltételeként szolgál. *A talajvíz valósághoz hűbb becslése azonban javíthatja az adatvezérelt hidrológiai és környezeti modellek sikeres alkalmazását.* A kis területi sűrűségű talajvíz idősorok számát bővíthetjük sztochasztikus, mesterséges idősorokkal. Ezáltal lehetőség nyílik a mesterséges intelligencián alapuló eljárások kalibrálására eltérő térbeli struktúrájú adatokkal. Az alternatív térszerkezetek alkalmazásának azonban csak akkor van értelme, ha a térbeli kapcsolatok természete (térbeli folytonosság, heterogenitás, szövet) az előállított mesterséges és mért idősorok között fennmarad.

Az interpolációs eljárások – beleértve a krigelési becsléseket – nem képesek a becsült csomópontok közötti szövet leképezésére (Journel 1992). Ez végső soron a sztochasztikus szimulációk alkalmazását vetíti előre. A dolgozatban alkalmazott szekvenciális gaussi szimuláció maradéktalanul megtartja vagy a talajvíz térbeli, vagy az időbeli heterogenitását, továbbá statisztikai jellemzőit (Kyriakidis 1999, 2001, Ekstrom et al 2007). Ugyanakkor, az adatpont-párokra alapuló variográfia 3 dimenziós felhasználása konvencionális akadályokba ütközik. Ennek oka, hogy a klasszikus megközelítés nem alkalmas a tér- és időbeli kapcsolatok együttes leképezésére (Füst 2007, Gneiting et al 2007, Ma 2008, De Iaco

2010). Az elmúlt évtizedekben a modellek bizonytalanságának meghatározása (a bányászati műveletek támogatását célzó profitorientált igényeknek köszönhetően) a földtudományok nélkülözhetetlen eszközévé vált. A sztochasztikus modellek célja egyes hipotézisek tesztelése, illetve bizonyos földtudományi folyamatok alternatív eseteinek szimulációja, a döntési kockázatok minimalizálása érdekében (Caers 2011).

Az együttes tér- és időbeli sztochasztikus geostatisztikai kutatásokra, eljárások alkalmazására a hazai szakirodalomban kevés példát találunk (Füst 2007, 2011, 2012, Füst és Geiger 2010, Geiger 2015). Ugyanakkor földrajzi szempontból egyre nagyobb igény mutatkozik például a klímaváltozás újszerű környezeti kihívásainak vizsgálatára. Így egyfelől a múltbeli folyamatok alapján egyfajta jövőbelátásra van igény (aktualizmus elve), másrészt szükség lenne a valós idejű állapotok minél pontosabb ismeretére, ami a gyors, legkisebb kockázattal járó döntések meghozatalának feltétele. A két típusú adatigény kielégítése két eltérő algoritmust igényel, melyeket a klasszikus geostatisztika nem képes biztosítani. Dolgozatomban a talajvíz szintjének együttes térbeli és időbeli becslésével foglalkozom. A felmerült gyakorlati igények figyelembevételével főbb célkitűzéseim a következők:

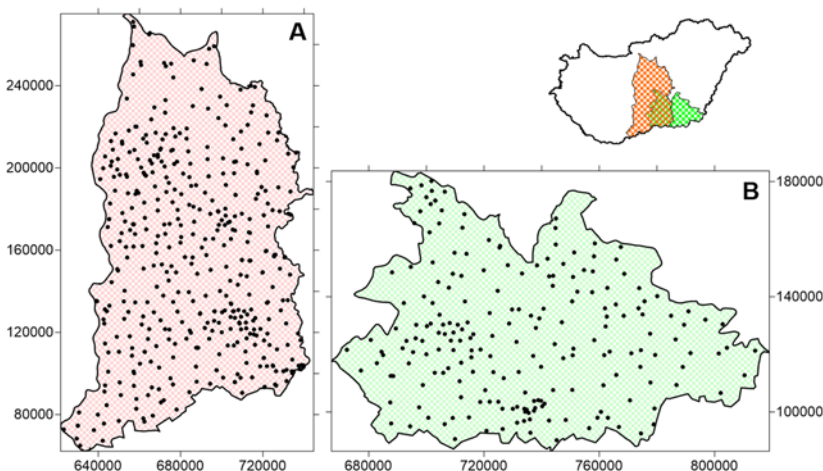
- A talajvíz szintjének valószínűségi alapú, pontosabb meghatározását lehetővé tevő *módszertani kutatásokat* kívánok végezni. Ennek érdekében megvizsgálom az adathiányokkal történő, széles körben elterjedt és összetettebb geostatisztikai becslési eljárások pontosságát. A levont tapasztalatok alapján egyfelől egy gyorsan futtatható, valós idejű sztochasztikus becslési algoritmust készítek, mely az azonnali döntéshozatali folyamatban felhasználható talajvíz-fedvényeket szolgáltat. A másik oldalról egy olyan algoritmust is elő kívánok állítani, mely az idősorok karakterisztikája alapján, hatásidőt meghaladó, hosszabb adathiányok esetén képes pontosítani a talajvíz-becsléseket.
- A kidolgozott algoritmusokat felhasználva vízkészlet-becsléseket végzek a talajvízsüllyedés által szignifikánsan sújtott Duna–Tisza közére, valamint a Dél-Tiszántúl területére. Ezek az eredmények alkotják a dolgozat *földtudományi jellegű eredményeit*.

- Céлом továbbá a talajvízszint-bebecslések javítása érdekében a talajvíz szintjét mérő kúthálózat optimalizációja. A jelenlegi hálózat kialakítása az 1950-es évek szakmai elvárásaihoz illeszkedik, az újszerű geostatistikai eljárások azonban teljesen más jellegű térbeli megfigyelési struktúrákat igényelnek.

2. Anyag és módszer

2.1. A mintaterület

Kutatásom kiemelt területe a Duna–Tisza köze, illetve az ATIVIZIG működési területe volt (2. ábra).



2. ábra. A Duna-Tisza köze (A) és az ATIVIZIG (B) mintaterület az elemzés során felhasznált kutakkal

Az előbbi kiválasztását az indokolta, hogy ez a hazai talajvízszint-csökkenés legjellegzetesebb tájegysége, az utóbbit pedig az, hogy két eltérő hidrogeológiai adottságú egységből áll. Ez utóbbi a modellek alkalmazhatóságának területi kiterjesztése szempontjából volt fontos. Egyéb kutatási együttműködésekben a vízkészlet-bebecsléseket Magyarország további területein (Nyírség, Észak-Alföld) is elvégeztük, így az eltérő földrajzi adottságú tájak klímaváltozással kapcsolatos érzékenységének összehasonlítását is elvégezhetjük.

2.2. Felhasznált adatok

Az adatok forrása a legrészletesebb hivatalos magyar vízügyi adatbázis (MAHAB) 1950–2017 közötti adatai. A korábban a VITUKI által kialakított adatbázisból minden igazgatóságra három adattípust kaptam: (1) a kutak koordinátáit, (2) a kutak perem- és terepmagasságára, valamint a kútmélységre vonatkozó adatokat, valamint (3) a kutakban mért vízszinteket. A strukturálatlan adatokat egységes adatbázisba szerveztem, melynek segítségével lehetővé tettem az abszolút és relatív talajvízszintek számítását, valamint a földrajzi koordináták alapján a kutak interaktív, területi alapú leválogatását. Előzetes tapasztalatok alapján a rendszerezett adatokon hibaszűréseket végeztem.

A talajvíz idősorokban néhol szokatlan ugrások mutatkoztak. Ezek oka az adatok digitalizálása, a különféle adatbázisok közötti import-export műveletekben bekövetkező adatkonverziós hibák, valamint az ömlesztetten kapott nyers adatsorok rendszerezése során bekövetkező adatkeveredés volt. A problémás adatsorokat vízügyi megfontolások alapján külső szakértő segítségével értelmeztem. Ezt követően csak a megbízhatónak tekinthető adatsorokat használtam fel az értékelésekhez. Összesen a Duna–Tisza közti homokhátságról 533 darab, az ATIVIZIG területéről 207 darab, az Alföldről pedig 1196 darab kút összesen mintegy 2 millió észlelése került feldolgozásra.

2.3. Geostatistikai háttér

2.3.1. Irodalmi összegzés

A geostatistika térben és/vagy időben változó jelenségeket (pl. a talajvíz) egy speciális, helyfüggő valószínűségi változó, az ún. regionalizált változó alapján, statisztikus és determinisztikus eszközökkel vizsgálja (Matheron 1967, Geiger 2006a). A regionalizált változó lokálisan valószínűségi változóként viselkedik, továbbá az egyes megfigyelések között térbeli és időbeli szabályszerűséget feltételez (Cressie 1985, Pannatier 1996).

Az ismert térbeli szerkezet (pl. félvariogram modell) alapján a mintázatlan koordinátákra becslés végezhető, melyre a geostatistika a krigelés interpolátor különféle típusait nyújtja (Goovaerts 2000).

A kokrigelés során a becslés segédadat bevonásával szignifikánsan javítható (Kohán 2014), azonban a variogram modellezése sokkal összetettebbé válik (Isaaks–Srivastava 1992, Deutsch–Journal 1998, Fehér–Rakonczai 2012). A kollokált kokrigelés előnye, hogy kiküszöböli a segédváltozó túlsúlyozottságát, ha arról nagyságren-dileg több adattal rendelkezünk (Xu et al 1992, Almeida 1993, Almeida–Journal 1994). A kollokált kokrigelés két Markov típusú modelljével a félvariogram modellezése egyszerűsíthető (Journal 1999, Shmaryan–Journal 1999, Xianlin–Journal 1999).

A talajvíz szintjét elsősorban nagyléptékű hatások (csapadék, tengerszint feletti magasság) befolyásolják. A lokális befolyásoló tényezők (pl. permeabilitás, területhasználat, vízrajz) zavaró hatásának köszönhetően ugyanakkor szignifikáns, kis léptékű, véletlenszerűnek tűnő heterogenitások mutatkoznak (Marton 2009).

A kisléptékű heterogenitások reprodukálásának lehetséges eszközei a sztochasztikus szimulációk (Carr–Myers 1985, Journal 1989, 1993, Deutsch–Journal 1998, Boisvert–Deutsch 2011). Az eljárások célja nagy számú, alternatív, azonos valószínűségű becslés előállítása a mintázatlan koordinátákra. A szekvenciális gaussi szimulációt talajvízbecslésre hazánkban a 2000-es évek elejétől használják (Mucsi et al. 2004, 2013, Geiger–Mucsi 2005, Fehér–Rakonczai 2012).

A talajvíz időben is egyfajta strukturális kapcsolatot mutat. A hidrográfok időszori jellemzői jól kimutathatók dinamikus faktoranalízissel, illetve periodogram-elemzéssel (Kovács J. et al 2004a, b, 2011a, b). A talajvíz idősorok kapcsolata a csapadékkal szintén definiálható (Kovács F.–Turai 2004, Kovács F. 2014a, b).

Geostatistikai szempontból ugyanakkor problémát okoz, az együttes térbeli és időbeli struktúra modelljének előállítása (Kyriakidis – Journal 1999). Ennek oka, hogy a 3D félvariogram (Füst 2007) helyett olyan leíró függvényre vagy időpontok logikai összekapcsolására van szükség, amely képes definiálni a lokálisan változó tér-idő kapcsolatrendszer (Kyriakidis 1998, 1999, Kyriakidis –Journal 1999, 2001a, b, Gneiting et al. 2007, Ma 2008, Geiger 2015).

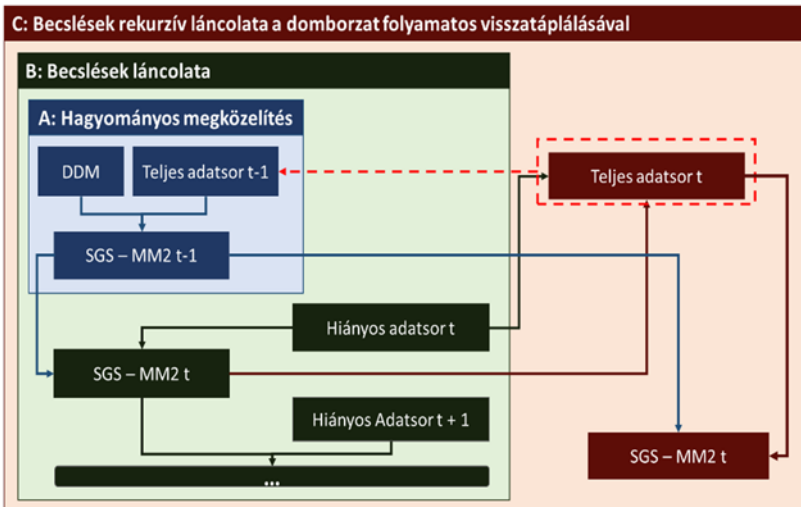
Összegzésképpen feladatom a csapadék időbeli és a domborzat térbeli mintázatának bevonásával a talajvíz térbeli és időbeli együttes sztochasztikus szimulációja.

2.3.2. A talajvíz tengerszint-feletti magasságának valós idejű, rekurzív szekvenciális szimulációja, a DDM felhasználásával

Gyakorlatban ritkán rendelkezünk egyszerre adatokkal minden kútról. A kifejlesztett eljárás egy korábbi időpontra előállított referencia mintázat alapján úgy határozza meg a talajvízszint pillanatnyi helyzetét, hogy az adathiány a vízkészlet-változások becslésére ne legyen hatással.

A vizsgálat során három becslési sémát (hagyományos koszimuláció (Shmaryan–Journel 1999), becslések láncolata (Kyriakidis 1999, Geiger 2015), rekurzív séma a DDM visszatáplálásával (Fehér–Rakonczai 2019) hasonlítottam össze (3. ábra). Az alkalmazott szekvenciális gaussi koszimuláció interpolátora az egyszerű kollokált kokrigelés, melyhez a Markov 2 típusú variogram struktúrát alkalmaztam.

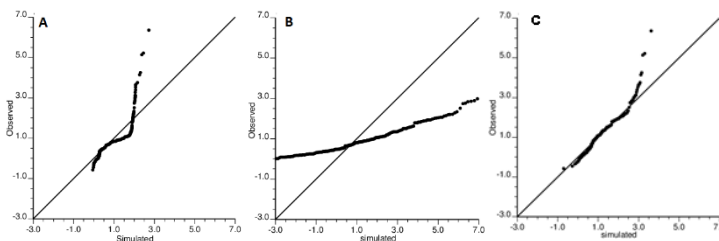
A fejlesztés során a Duna–Tisza köze 213 kútjának teljes idősorát használtam fel. Az 1976–2003 közötti időszakra futtatott modellek teljesítményét a 2003 évre kapott eredménytérképek, valamint az 1976 és 2003 között bekövetkezett vízszintváltozás térképek, továbbá vízkészlet-idősorok alapján elemeztem.



3. ábra. A három vizsgált koszimulációs séma összehasonlítása

A megalkotott „rekurzív séma a DDM visszatáplálásával” eljárás mind a vízkészlet változás térbeli mintázatát, mind pedig a megfelelő kiindulási statisztikai eloszlásokat megfelelően reprodukálja.

A „becslések láncolata” esetében a térbeli mintázat fokozatosan elhomályosul, ezért készletbecslésekre nem alkalmas. A „hagyományos ko-szimuláció” során az egymást követő fedvények között nincs időbeli kapcsolat, a domborzat kontúrjai azonban túl nagy súlyt kapnak a vízkészlet-változások kitérképezése során (4. ábra).



4. ábra. A tapasztalt és szimulált talajvízváltozás értékek kvantiliseinek kereszt-validációja kizárólag a DDM-re hagyatkozva (A), becslések láncolataként (B) és a DDM visszatáplálásával, rekurzív módon (C)

A kidolgozott eljárást a Duna–Tisza köze 1950–2017 közötti havi talajvíz-készletek becslésére használtam fel. Az előálló gridponti értékek egymáshoz viszonyított relatív értéke alapján következtettem a vízkészletek területi és időbeli alakulására, és a vízsztintváltozás ütemére.

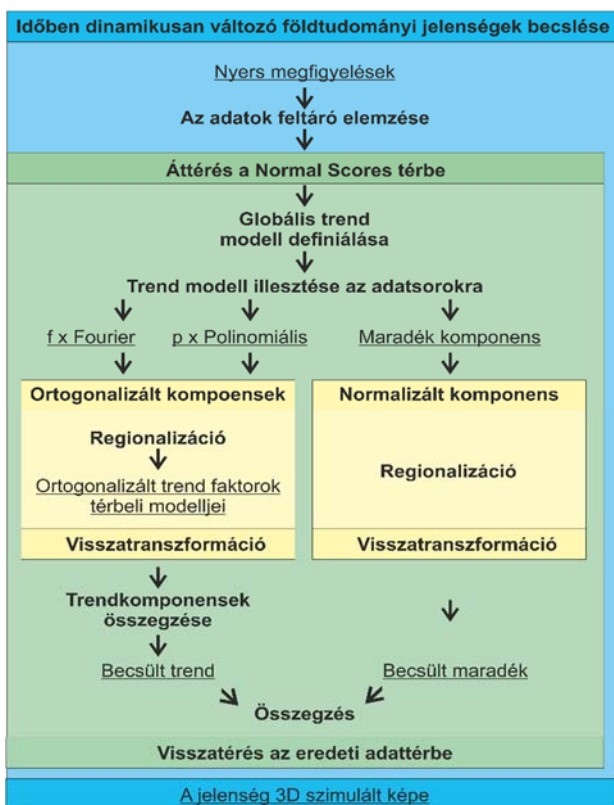
2.3.3. Térben korreláló idősorok módszere

A talajvíz idősorok többsége nem fedi le a teljes szimulált időszakot. A rekurzív eljárások csak a szomszédos időpont területi mintázatát veszik figyelembe. Hosszabb adathiány esetén azonban az érintett térrészre adott becslés torzul. A térben korreláló idősorok módszertana az idősori alakzatot trendként értelmezi és matematikai függvényekkel közelíti (Dimitrakopoulos–Luo 1994, 1997, Kyriakidis 2001a, b, Ekstrom et al 2007).

Rámutattam, hogy a trend harmad akkora illesztési hibát eredményez, ha időben részletesebb segédadat áll rendelkezésre (Fehér 2015b). A dolgozatban ez a segédadat egy olyan idősor,

melynek pillanatnyi értékeit a hidrogáfok standard-normál transzformációját követően a pillanatnyi értékek mediánjaiként határoztam meg. (A jövőben talán a műholdas gravimetria lesz alkalmas hasonló idősorok előállítására.)

Az illesztési paramétereket térben strukturált, regionalizált változókként kezeltem, ezért a trendfüggvény összetettsége korlátozott. Az időszori paramétereket főkomponens-elemzéssel ortogonalizáltam, majd szekvenciális gaussi szimulációval becsültem meg. Az eljárás második lépése a rezidum idősorok sztochasztikus szimulációja a lokálisan változó hatásidők figyelembevételével. Végül a visszatranszformált trend és a rezidum tagok összege adja a becsült vízszint értékeket (5. ábra).



5. ábra. A térben korreláló idősorok algoritmus

A kidolgozott eljárást az ATIVIZIG működési területének napi felbontású relatív talajvízszintjének becslésére használtam. A kapott eredmények alapján értékeltem a vízkészletek 2005–2015 közötti területi és időbeli alakulását.

Az eljárás hátránya a nagy számítási igény, amelyet a realizációk előállításának párhuzamosításával gyorsítottam fel.

3. Az eredmények bemutatása

3.1. A legfontosabb módszertani és geostatistikai eredményeim

1. Megállapítottam, hogy az 500-1000 méteres vizsgálati léptékben a talajvíz regionalizált változóként viselkedik. Az abszolút talajvízszintek esetén rámutattam, hogy a domborzati hatás kitarolja a vízkészlet-változások térbeli folytonosságra és statisztikai eloszlásra gyakorolt hatását. A trendmentesnek vélt relatív talajvízszintek variogram-paraméterei és a hidrometeorológiai tényezők között kapcsolatot mutattam ki.

2. Rámutattam, hogy a mérőhálózat egyenetlen térbeli struktúrája, valamint az adathiányok nem megfelelő kezelése az eredmények hibás matematikai-statisztikai értelmezéséhez vezethet, ami gyakorlati szempontból a vízkészlet-változás hibás térbeli és időbeli becslését eredményezi. Ezen felül az egyes területek vízszint-értékei *eltérő mértékben jelennek meg* a statisztikai mintában, ami hatással van a geostatistikai eljárások paraméterezésére. A különféle széles körben elterjedt és kevésbé ismert interpolátorok adathiány érzékenysége alapján rámutattam, hogy bár a regionális regresszió alapuló *SKlm* eljárás szolgáltatja a legkisebb adatponti hibát, a Duna–Tisza köze hátsági területeinek alacsonyabb reprezentáltsága miatt erre nem érdemes támaszkodni. Az egyszerű kokrigelés a talajvíz térbeli heterogenitását fő és segédváltozó együttes lokális kovariancia viszonyai alapján képes kezelni. A kollokált kokrigelés alkalmazása egyfelől leegyszerűsíti a variogram modellezést, másfelől a segédadat túlsúlyozottságát megfelelően képes kezelni. A fenti megfontolások, illetve a kereszt-validációs hibák alapján a kokrigelés *Markov 2 modellje* mutatkozik leginkább alkalmasnak a *talajvíz tengerszint feletti magasságának interpolációjára*.

3. Rámutattam, hogy a talajvizet térben extrém folytonos lefutás jellemzi, áramlásának állandó tényezője a gravitáció és a földtani környezet. A csapadék és a talajvíz lokálisan kapcsolata nagy térbeli és időbeli léptékben vizsgálva nem változik szignifikánsan. Lokálisan azonban kis léptékű, térben heterogén természeti és antropogén hatások befolyásolják a talajvízszintet. Ezen tényezők összességét figyelembe véve a *szekvenciális gaussi szimulációt alkalmaztam. A választott eljárás lehetővé tette a kisleptékű heterogenitások beépítését a modellbe. A szimuláció továbbá a valószínűségi típusú döntéshozatali feladatok szempontjából, azonos valószínűségű, alternatív becsléseket szolgáltat.* Az alternatív becslések csomóponti értékei reprodukálják mind a megfigyelések hisztogramját, mind pedig a felhasznált félvariogram modellt.

4. A szekvenciális gaussi szimuláció gridponti statisztikai eloszlásából kapott konfidencia-intervallum-változásának vizsgálata alapján megállapítottam, hogy 125 realizáció előállítása elegendő mindkét vizsgálati területen a konfidencia intervallum 95%-os szignifikancia szint melletti meghatározására.

5. A több szimulációs struktúra eredményeinek összehasonlítása alapján az abszolút talajvízszinteket a legeredményesebben rekurzív koszimulációval tudtam előállítani, a domborzatmodell visszatáplálása mellett. Ekkor a pillanatnyi vízszintre, és a vízkészletváltozásra kapott eredményekről egyaránt elmondható, hogy a szimuláció térbeli eredményei megfelelőek, mind pedig a matematikai alapon számított alapponti és gridponti értékek reprodukálja a megfelelő statisztikai eloszlásokat. Elméleti alapon rámutattam, hogy adathiányok kezelésében a rekurzív koszimulációk: a *relatív talajvízszintek* időben változó variográfiájához a *Markov 1 modell*, míg az *abszolút talajvízszintek* és a domborzat együttes szimulációja esetén a *Markov 2 modell* használható hatékonyan.

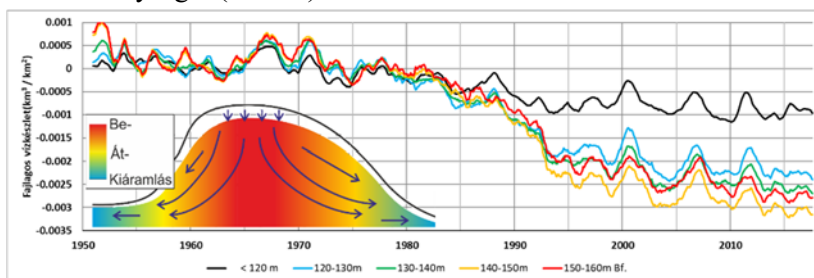
6. Kidolgoztam a relatív talajvíz-idősorok szekvenciális gaussi szimulációját, melyben az idősorok alakját kifejező paramétereket tekintettem regionalizált változóknak. Az idősorok függvényekkel való közelítése során rámutattam, hogy van egy olyan közös elméleti idősor alakzat, melynek felhasználásával az idősorokra jobb függvényillesztés érhető el, mint amit pusztán matematikai függvényekkel elérhetünk. A fent említett elméleti idősor alakzatot kismértékben közelíti a NASA GRACE

küldetése által szolgáltatott műholdas gravimetriai adatsor, ám ennek alkalmazása a kis területi és időbeli felbontás és gyakori adathiányok miatt a gyakorlatban egyelőre problémás.

7. A térben korreláló idősorok módszertanát felhasználva elkészítettem a Dél-Alföld napi felbontású relatív talajvízkészleteinek térbeli és időbeli adatbázisát. Ezt követően a terület *kúthálózatát területileg optimalizáltam*. Az optimalizációhoz az adatbázisból egy-egy térbeli koordinátára kinyerhető szintetikus idősorokat használtam fel. Az eredményeim alapján 9 jól megválasztott új kút segítségével a terület 95%-án 150 cm-es becslési bizonytalanság érhető el.

3.2. A talajvízváltozások földtudományi következményei

8. A havi medián abszolút talajvízszintek alapján a kidolgozott rekurzív sztochasztikus eljárással elkészítettem a Duna–Tisza közti talajvízkészletek területi és időbeli becslült értékeinek adatbázisát az 1950–2017-es időszakra. Az adatbázis várható érték típusú adatait felhasználva elemeztem a vízkészlet időbeli és térbeli alakulását, a vízszintcsökkenés ütemét. Továbbá meghatároztam a vízszint átlagos éven belüli és magassági szintek alapján mutatózó területi változékonyságát (6. ábra).

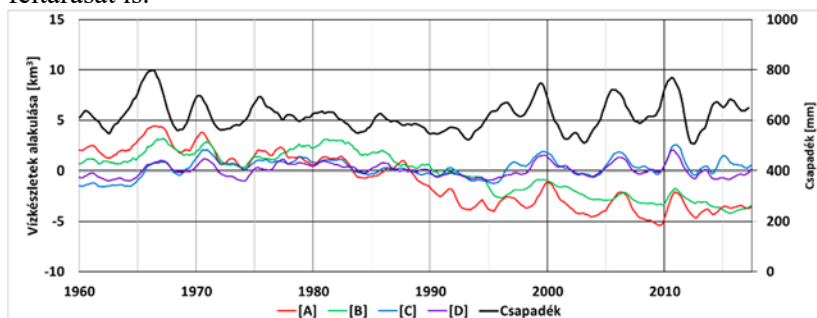


6. ábra. A Duna–Tisza közti hátság fajlagos vízkészletének időbeli változása a magassági szintek szerint (1950–2017)

9. Napi felbontású adatok alapján, a térben korreláló idősorok módszerével a dél-alföldi mintaterületre előállítottam a relatív talajvízkészletek területi és időbeli becslését tartalmazó adatbázist. Az adatbázist felhasználva valószínűségi alapú becslést adtam a vízkészlet-változás időbeli alakulására és éves ütemére, a 2005–2015-ös időszakra. Becslést adtam arra, hogy a mintaterületen belül

mekkora valószínűséggel állt be vízszintcsökkenés a vizsgált időszakban.

10. A talajvízkészletek magassági szintenkénti meghatározása alapján kimutattam a felszín alatti lefolyás szerepét. A tartósan aszályos évek során, a magasabb területeken a talajvíz mennyisége jobban csökken. Kimutattam az is, hogy azokon a területeken, ahol külső területek felől lehetőség van felszín alatti vízpótlásra (pl. a Maros hordalékkúpja), ott a klímaváltozás kedvezőtlen hatása kevésbé érvényesül mindaddig, amíg az aszályos évek mellett vannak szélsőségesen csapadékos időszakok is. Ezen túlmenően az Alföld három további területére is elkészítettem a vízkészletek időbeli változásának alakulását (7. ábra. Így az általam kidolgozott értékelési módszer lehetővé tette a különböző földrajzi adottságú területeken a talajvízkészletek klímaváltozással kapcsolatos érzékenységének feltárását is.



7. ábra A talajvízkészletek alakulása 1960–2017 között, az Alföld négy tájegységén: Duna–Tisza köze (A), Nyírség (B), Tiszántúl déli része (C), Északi-középhegység előtere (D)

Disszertációban felhasznált közleményeim

- Fehér, Zs.–Rakonczai, J. 2012: Reliability enhancement of groundwater estimations. In: Malvic T. (ed.): *Conference book "Geomathematics as Geoscience": 4th Croatian–Hungarian and 15th Hungarian Geomathematical Congress*, Croatian Geological Society, Opatija. pp. 3–40.
- Rakonczai J.–Deák J.–Ladányi Zs.–Fehér Zs. 2012: A klímaváltozás és tájváltozás kapcsolata alföldi mintaterületeken. In: Rakonczai, J.–Ladányi Zs.–Pál-Molnár E. (szerk.): *Sokarcú klímaváltozás*. GeoLitera, pp. 37–62.

- Rakonczi J.–Deák J.–Ladányi Zs.–Fehér Zs. 2012: Indicators of the climate change in the landscape:: Investigation on the soil - groundwater - vegetation connection system in the Great Hungarian Plain. In: Rakonczi J.–Ladányi Zs. (szerk.) Review of climate change research program at the University of Szeged (2010-2012): A klímaváltozás kutatás válogatott eredményei a Szegedi Tudományegyetemen (2010-2012). pp. 41-58
- Rakonczi J.–Fehér Zs. 2014: A talajvízváltozások új szempontú értékelése az Alföldön. In: Kóródi T.–Sansumné Molnár J.–Siskáné Szilasi B.–Dobos E. (szerk.): *A VII. Magyar Földrajzi Konferencia kiadványa*, pp. 491–501.
- Fehér Zs. 2015a: Talajvízkészletek változásának geostatistikai alapú elemzése. A rendelkezésre álló információk természete és feldolgozása. *Hidrológiai Közöny*. 85 (2): 15–31.
- Fehér Zs. 2015b: A Spatiotemporal Stochastic Framework Of Groundwater Fluctuation Analysis On The South-Eastern Part Of The Great Hungarian Plain. *J. Environ. Geography* 8: (3–4): pp. 41–52.
- Rakonczi J.–Fehér Zs. 2015: A klímaváltozás szerepe az Alföld talajvíz-készleteinek időbeli változásaiban. *Hidrológiai Közöny*. 95 (1): pp. 1–15.
- Fehér, Zs.–Rakonczi, J. 2019: Analysing the sensitivity of Hungarian landscapes based on shallow groundwater fluctuation affected by climate change. *Hungarian Geographical Bulletin*. (Megjelenés alatt).

Egyéb publikációk

- Barton G.–Tobak Z.–Fehér Zs.–van Leeuwen, B.–Kovács F.–Mészáros M.–Dolinaj, D.–Sztalmári J. 2013: Téradat infrastruktúra építése és webes térképi publikációs felület készítése a belvíz monitoring tevékenység támogatásához. In: Lóki J. (szerk.): *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában*. Debrecen, pp. 89–96.
- Farsang A.–Barta K.–van Leeuwen, B.–Fehér Z. 2017: Az öntözés talajtani feltételei, lehetőségei és körülményei az ATIVIZIG működési területén. *Tanulmány*. K&K Mérnöki Iroda, Szeged. 30p.
- Kiss A.–Sümeghy Z.–Fehér Zs. 2008: A Maros 18. századi áradásai és egy jellemző téli árvízének területi hatásai. In: Füleky Gy. (szerk.) A táj változásai a Kárpát-medencében. Az erdélyi táj változásai.: A Sapientia Magyar Tudományegyetemen, Marosvásárhelyen 2008. július 2-4. között tartott XII. tájtörténeti tudományos konferencia kiadványa. SZIE, Gödöllő, pp. 94 – 100.

- Mezősi G.–Sipos Gy.–Rakonczai J.–Fehér Zs.–Szatmári J. 2017: Vízrajzi hálózatfejlesztés – Felszinközeli (talaj)vizek – monitoringjának optimalizálása. *Kutatási jelentés*, 87 p.
- Rakonczai J.–Fehér Zs. 2014: A vízhiány hatása a talajvízszintre. In: Blanka V.–Ladányi Zs. (szerk.) *Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban* SZTE TTIK. pp. 110-117.
- Szatmári J.–Barta K.–Csépe Z.–Fehér Zs.–Miodrag B.–Obradovic D. – Dudarin Z.–Radonic V. 2014: A talajvíz megfigyelésének lehetőségei. In: Blanka V.–Ladányi Zs. (szerk.): *Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban*. SZTE – TFGT, Szeged. pp. 289-299.

Konferenciák, absztraktok

- Fehér Zs. 2007: Analysis on fluctuation of ground water level in the case of Danube – Tisza interflow. 14th Hungarian Geomathematical Congress. Mórahalom, Hungary.
- Fehér Zs. 2008: Spatial Uncertainty of groundwater-level estimations on the Danube-Tisza interflow. 1st Croatian–Hungarian and 15th Hungarian Geomathematical Congress. Mórahalom, Hungary.
- Fehér Zs. 2012: Nagy léptékű talajvízmodellek megbízhatóságának vizsgálata. In: Blanka V. (szerk.) *Kockázat – Konfliktus – Kihívás: A VI. Magyar Földrajzi Konferencia, a MERIEXWA nyitókonferencia és a Geográfus Doktoranduszok Országos Konferenciájának absztrakt kötete*, SZTE TTIK TFGT. 51. p.
- Szatmári J.–Barta K.–Csépe Z.–Fehér Zs. 2012: Belvízi monitoringrendszer kiépítése határmenti együttműködésben. In: Blanka V. (szerk.) *Kockázat – Konfliktus – Kihívás : A VI. Magyar Földrajzi Konferencia, a MERIEXWA nyitókonferencia és a Geográfus Doktoranduszok Országos Konferenciájának absztrakt kötete*, Szeged, SZTE TTIK TFGT 207. p.
- Rakonczai J.–Fehér Zs. 2014: A talajvízváltozások új szempontú értékelése az Alföldön. *A VII. Magyar Földrajzi Konferencia*. http://www.unimiskolc.hu/~foldrajz/Foldrajzikonferencia/Absztrakt/rakonczai_janos-feher_zsolt.pdf