

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Hazai ivóvízkészletek sérülékenysége az éghajlatváltozás következtében

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Dohány Rita

Meteorológus mesterszak,
Éghajlatkutató szakirány

Témavezetők:

Dr. habil. Bogárdi István

Dr. Pongrácz Rita

ELTE Meteorológiai Tanszék

Simonffy Zoltán

Ács Tamás

BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

Budapest, 2014.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Vízkészletek sérülékenysége	6
2.1 A sérülékenység definíciója.....	6
2.2 A sérülékenység becslése	8
3. Módszertan.....	11
3.1 Alapelvek.....	11
3.2 Sérülékenységi modell	14
3.3 Kompozit programozás	15
4. Vizsgálat	20
4.1 Indikátorszerkezetek.....	20
4.1.1 Porózus vízáadó réteg vízkészlete.....	21
4.1.2 Karsztos vízkészlet	23
4.1.3 Felszíni vízkészlet	25
4.1.4 Parti szűrésű vízkészlet.....	27
4.2 Mintaterületek	29
4.3 Adatbázisok	30
5. Eredmények	39
6. Összefoglalás	49
Köszönetnyilvánítás	50
Irodalomjegyzék	51

1. Bevezetés

A víz az az elsődleges közeg, melyen keresztül a klímaváltozás befolyásolja a Föld ökoszisztémáit, ennek következtében az emberek megélhetését és jólétét (UN-Water, 2012). Az éghajlat, a demográfiai trendek, a gazdasági fejlődés és az ehhez kapcsolódó földhasznosítás változásai direkt módon hatnak az emberiség növekvő édesvíz-igényére. Ezen negatív hatások, valamint a vízigény növekedése együttesen igen erősen befolyásolják általánosságban a vízkészletek, és különösképpen a dolgozatomban vizsgált ivóvízkészletek sérülékenységét.

Az édesvízi rendszerek a globális ökoszisztéma részei, melyek az élet és az összes társadalmi és gazdasági folyamat fenntartói. Tehát a földi ökoszisztéma biztosítja az édesvíz ellátást, melynek bolygatása veszélyezteti magát az ökológiai rendszert és folyamatain keresztül az azzal bonyolult kölcsönhatásban álló emberi jólétet (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Az Éghajlat-változási Kormányközi Testület¹ szakemberei szerint az üvegházhatású gázok koncentrációinak növekedése közvetlen hatással van a globális vízkörforgásra, mely elsődlegesen meghatározza a vízkészletek hozzáférhetőségét és ennek következtében az emberek vízigényét (Bates et al., 2008). Ezen változások további, közvetett negatív hatásokat generálnak (Chalecki és Gleick, 1999), melyet az 1. ábra mutat be.



1. ábra: A klímaváltozás hatásrendszere a vízkészletekre.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

A vizek hozzáférhetőségének és az édesvízi ökoszisztémák minőségének romlása várható globális szinten a Föld minden térségében (Kundzewicz et al., 2007), amit negatív következmények áradata követhet, mely hatással lesz a társadalmi és ökológiai rendszerekre, valamint azok folyamataira.

A változásoknak az éghajlaton kívül más befolyásoló tényezői is vannak, például a növekvő ütemű gazdasági fejlődés, az urbanizáció, valamint a népességnövekedés. A változások ezen meghatározó tényezői szoros összefüggésben állnak egymással, és súlyos problémákat vetnek fel a földterületek és vízkészletek kezelése terén egyaránt. A népesség növekedésével és városokba özönlésével az emberek édesvíz igénye mind térben, mind időben folyamatosan változik. A dinamikusan növekvő népességű területeken a vízigény, valamint a vízkészletek mennyiségi és minőségi változásai növelhetik a vízkészletek sérülékenységet, mely jelentős nehézségeket generálhat a jövőben az emberek és az ökoszisztéma számára nélkülözhetetlen vízmennyiség biztosítása és az ezzel összefüggő problémák kezelése terén. A klímaváltozás hozzájárul ezen súlyosbodó problémákhoz, különösen a távolabbi jövőre vonatkozó hatásokkal összefüggésben. Hatásos intézkedések és alkalmazkodási stratégiák kidolgozása nélkülözhetetlen a jövőbeli fenntartható vízfelhasználáshoz, ehhez pedig szükséges a vízkészletek sérülékenységének minél pontosabb becslése.

A földhasznosítás és az éghajlat változásaiból eredően a vízkészletek egyre növekvő nyomás alatt állnak. A délkelet-európai régióra – például a 2009 és 2012 között zajló CC-WaterS² projekt keretében is – végzett, az éghajlatváltozás mértékét és hatásait vizsgáló tanulmányok melegedést és csökkenő csapadékmennyiséget jeleztek előre (Pongrácz et al., 2011).

A délkelet-európai régió ivóvíz igényét különböző készletekből biztosítják, legnagyobb mértékben felszín alatti készletekből (porózus rétegekből és karsztos vízadókból). Ez Ausztriára, Szlovéniára, Horvátországra, Szerbiára, Romániára, Görögországra és Magyarországra egyaránt jellemző. Parti szűrésű vizet – mely szoros kapcsolatban van a felszíni vízkészletekkel – szivattyúznak Magyarországon, Szerbiában, Romániában és Bulgáriában. Felszíni vízkészleteket Szerbiában, Romániában, Bulgáriában és Görögországban használnak számottevő mértékben. Ezen vízkészletek minősége erőteljesen függ a területhasználattól és az ökoszisztéma működésétől.

² Climate Change and Impacts on Water Supply (<http://www.ccwaters.eu/>)

Néhány befejeződött projekthez kapcsolódóan (CC-WaterS², SHARP³) az éghajlat és a földhasználat változásainak délkelet-európai régióra gyakorolt hatásairól informálódhatunk, de mindmáig nem áll rendelkezésre az egész térségre egységesen alkalmazható és az ivóvízkészletek sérülékenységének osztályozására alkalmas módszer.

A résztvevő délkelet-európai országok ivóvízkészletei sérülékenységének csökkentése érdekében egy minden résztvevő ország által elfogadott szemléletre van szükség, mely elősegíti a közös kivitelezési stratégiákon alapuló nemzeti intézkedéseket. Kivitelezésük során eleget kell, hogy tegyenek az Európai Unió bizonyos rendeleteinek és stratégiáinak, például: Európa 2020⁴, az EU Víz Keretirányelv⁵, az Európai Unió stratégiája a dunai régióra⁶ és hivatalos kormánykiadványa az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodásról⁷.

A 2012 januárjában 10 ország részvételével indult CC-WARE⁸ projekt elsődleges célja integrált nemzetközi stratégiák kidolgozása az ivóvizek védelme, valamint az ivóvízkészletek sérülékenységének csökkentése érdekében, melyek alapját képezhetik majd a nemzeti és regionális szintű intézkedéseknek. A hazai mintaterületek – projektben is hatékonyan alkalmazható módszertan alapján történő – vizsgálatával kapcsolódtam be a kutatásba.

Diplomadolgozatomban először áttekintem a sérülékenység fogalmának definícióit, becslésének lehetőségeit és eddigi alkalmazási területeit. A 3. fejezetben a munka alapját képező módszertannal foglalkozom, ezt követően az általunk végzett vizsgálatot a 4. fejezetben részletezem. Végül az 5. és 6. fejezetben bemutatom és összegzem a kapott eredményeket, következtetéseket vonok le és áttekintem a távlati lehetőségeket.

³ Stratospheric Change and its Role for Climate Prediction (<http://www.geo.fu-berlin.de/en/met/sharp/index.html>)

⁴ Europe 2020 Strategy (http://ec.europa.eu/europe2020/index_en.htm)

⁵ EU Water Framework Directive (<http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/>)

⁶ EU Strategy for the Danube Region (EUSDR), (<http://www.danube-region.eu/>)

⁷ White Paper on Adaptation to Climate Change (<http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/>)

⁸ Mitigating Vulnerability of Water Resources under Climate Change (<http://www.ccware.eu/>)

2. Vízkészletek sérülékenysége

2.1 A sérülékenység definíciója

A sérülékenység szakkifejezés tudományos definíciójának gyökerei a természeti kockázatok kutatásával kapcsolatosak, de számos kutatás keretén belül vizsgálják egyéb összefüggéseiben, például az ökológia, a közegészségügy, szegénység és fejlődés, élelmiszerbiztonság és megélhetés, fenntarthatóság, a földhasználat változásai, a klímaváltozás hatásai és az ahhoz való alkalmazkodás területén. Minden egyes tudományterület másképp definiálja a sérülékenységet. Birkman (2006) áttekintést ad a sérülékenység különböző területekkel bővülő koncepciójának fejlődéséről, a leglényegesebb rizikófaktoroktól kezdve a tágabb értelmezésekig, felölelve a fizikai, társadalmi, gazdasági, környezeti és intézményi tulajdonságait egyaránt. Ezen tág értelmezések következtében különböző megközelítések, és a speciális érdeklődési területek szerint kutatói csoportok, közösségek alakultak ki. Néhány példa: az éghajlatváltozás hatásaihoz való alkalmazkodás⁹ (Füssel és Klein, 2006; Füssel, 2007; Adger, 2006; Gallopín, 2006), katasztrófák kockázatainak csökkentése¹⁰ (Wisner et al., 2004; Bogárdi és Birkman, 2004; Cardona, 2001), globális környezeti változások¹¹, fenntarthatóság¹² (Turner et al., 2003; Bohle, 2001). Ezen eltérő, sérülékenység fogalmával kapcsolatos szemléletek vezethettek a különböző irányvonalak és stratégiák kialakulásához.

A DRR közösség az 1970-es években alakult, és a katasztrófáknak társadalmi-gazdasági, valamint politikai eredetű tulajdonított (Torry et al., 1979; Torry, 1978). Később már a veszélyek tágabb szociális, politikai, környezeti és gazdasági vonatkozásait is tekintették (Mercer, 2010). A DRR stratégiái magukban foglalják a kockázatra, sérülékenységre és alkalmazkodási képességre vonatkozó becsléseket, valamint a társadalom képességét az öt potenciálisan fenyegető veszélyek csökkentésére (Wisner et al., 2004). A CCA vezetése tárgyalásokba kezdett a klímaváltozás által a sérülékenységre gyakorolt várható hatások csökkentése érdekében. Habár a DRR és a CCA közösség egyaránt foglalkozik a társadalmi-gazdasági sérülékenység csökkentésével, különböző definíciói vannak egyazon terminológiában (Mercer, 2010; Thomalla et al., 2006; Renaud és Perez, 2010).

⁹ Climate Change Adaptation Community (CCA)

¹⁰ Disaster Risk Reduction Community (DRR)

¹¹ Global Environmental Change Community (GEC)

¹² Sustainability Science Community

Az Egyesült Nemzetek Szervezetének Nemzetközi Katasztrófavédelmi Csökkenési Stratégiai Programja¹³ a sérülékenységet olyan fizikai, társadalmi, gazdasági és környezeti tényezők vagy folyamatok által meghatározott feltételekként definiálja, melyek növelik egy közösség érzékenységét a kockázatokkal szemben (UN/ISDR, 2004). Az IPCC szerint a sérülékenység annak a mértékét fejezi ki, hogy egy rendszer mennyire érzékeny az éghajlatváltozás káros hatásaira, és mennyire nem képes megbirkózni ezekkel. Az éghajlatváltozás alatt a klíma változékonyságát, illetve az extrém eseményeket egyaránt értjük. A sérülékenység függ a klímaváltozás jellegétől, nagyságától, a változás gyorsaságától, illetve attól is, hogy mekkora az éghajlati változékonyság. Emellett természetesen a rendszer érzékenysége és alkalmazkodóképessége is egyértelműen meghatározó tényező (IPCC, McCarthy et al., 2001). Hinkel (2011) bírálja az IPCC definícióját, szerinte túl homályos, ezáltal nehezíti a gyakorlati alkalmazhatóságát. Mindazonáltal az IPCC definíciója egyike a legáltalánosabban rendelkezésre álló fogalom magyarázatok közül, így ez tekinthető a további finomítások kiinduló alapjának. Így történt ez a GEC és a fenntarthatósági közösségek esetében is, akik bevezették a csatolt társadalmi-ökológiai rendszer fogalmát, utalva az ember-környezet kapcsolatrendszer kitüntetett szerepére a sérülékenység értelmezésével kapcsolatosan (Turner et al., 2003). A terminológiai problémák ellenére nyilvánvaló, hogy sürgősen szükség van az említett csatolt rendszer sérülékenységének minél pontosabb becslésére az éghajlatváltozás előrelátható negatív következményeihez való alkalmazkodás elősegítése érdekében (Renaud és Perez, 2010). Füssel (2007) szerint az éghajlatváltozással összefüggő sérülékenység becslése során több kikötésnek is eleget kell tenni, de a vizsgálatnak legalább négy alapvető dimenziót egyesítenie kell: a vizsgált rendszert, az aggodalom tárgyát vagy tárgyait, a jellemző kockázatot és az idődimenziót. A vizsgált rendszer lehet tipikusan egy csatolt társadalmi-ökológiai rendszer, egy népességcsoport, egy gazdasági szektor, egy földrajzi régió, vagy természetes rendszer. Az aggodalom tárgyára példa lehet az emberi egészség, egzisztencia, jövedelem, egy közösség kulturális identitása, a biodiverzitás, vagy egy erdei ökoszisztéma faanyag-termelékenysége. A kockázatok éghajlati változókhoz és azok változásai által kiváltott hatásokkal állhatnak kapcsolatban, mint az extrém esőzések és az ezt követő áradások veszélye. Ami az időbeliséget illeti, a CCA inkább távolabbi jövőt vizsgál, elég távolit ahhoz, hogy az éghajlati változók hatásait vagy a várt változásokat becsülni lehessen.

¹³ United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UN/ISDR)

Ezen négy dimenzió figyelembevételével vizsgálataim során az éghajlatváltozás által befolyásolt vízkészletek sérülékenységeinek becslését végzem el hazai mintaterületekre, a 2021-2050-es időszakra.

2.2 A sérülékenység becslése

A sérülékenység fogalma igen összetett, ezt bizonyítja, hogy becslésére nincs általánosan elfogadott módszer. Thywissen (2006) 35 különböző definíciót írt össze. A meghatározások sokasága miatt igen eltérő becslési módszerek alakultak ki a témakörben (Cutter, 1996; Jones, 2001; Turner et al., 2003; Brooks et al., 2005; Luers, 2005; Füssel és Klein, 2006; Füssel, 2007). Néhány szakember azon elvet vallja, hogy a sérülékenységet nem lehet mérni, mivel nem produkál megfigyelhető jelenségeket (Moss et al., 2001; Patt et al., 2008). Mások szerint (Hinkel, 2011) adott a lehetőség, hogy az elméleti koncepciót gyakorlatban alkalmazhatóvá tegyék. A két szemlélet között egy középutat jelenthet – a sérülékenység becslésére különösen jól alkalmazható – indikátorok definiálása. A vizsgálataim során alkalmazott módszer szintén indikátorok használatán alapul, melyet a 3. fejezetben fejtünk ki részletesen.

A vízkészletek bonyolult rendszert alkotnak a természetben, melyek Simonovic (2012) szerint négy, egymással összekapcsolt alrendszerből állnak: egyének, szervezetek, a társadalom és a környezet. Ennek következtében a vízgazdálkodással kapcsolatos kérdésekben számos szempont alapján kell dönteni, és több lehetséges alternatívát figyelembe venni, melyek általában nagy bizonytalansággal és bonyolult kölcsönhatásokkal jellemezhetőek (Hyde et al., 2004). A megfelelő kezelési és intézkedési lépésekkel kapcsolatos döntések meghozatalát az érintett ágazatok résztvevőinek különböző érdekei is bonyolítják.

Magának a sérülékenység becslésének komplexitása, valamint a vízkészletek kezelésével kapcsolatos problémák és szükséges intézkedések összetettsége az oka annak, hogy mindmáig nem sok tanulmány született a témakörben. A döntéshozók figyelmét a nemzetközi szinten kezelendő vízgazdálkodás fontosságára először az 1992-ben megrendezett dublini konferencián hívták fel (Tessendorff, 1992). Az 1. dublini Alapelv kimondja, hogy az édesvíz véges és sebezhető természeti erőforrás, amely elengedhetetlen az élet fenntartása, a fejlődés és a környezet védelme szempontjából. Ezt követően mind több tanulmány foglalkozott a vízkészletek sérülékenységének becslésével különböző térbeli skálákon: globális skálán (Vörösmarty et al., 2000), nagy skálájú, több országot érintő vízgyűjtőterületen (Babel és Wahid, 2009; Hamouda et al., 2009), regionális skálán

(Hurd et al., 1999; Sullivan, 2011), illetve kisebb vízgyűjtő területeken (Pandey et al., 2009; Gober és Kirkwood, 2010; Pandey et al., 2010; Pandey et al., 2011). Néhány tanulmány – pl. Balica et al. (2009) – figyelembe veszi a sérülékenység változását a különböző térbeli skálákon, a nagy kiterjedésű vízgyűjtőktől a kisebb városi területekig. Ezen tanulmányok közül néhány (Vörösmarty et al., 2000; Hurd et al., 1999; Gober és Kirkwood, 2010) a sérülékenységet a vízkészlet kizárólag fizikai összetevőjének tekinti, így főként a vízkészletek hozzáférhetőségére fókuszál, kevésbé veszi figyelembe a társadalom, illetve az ökoszisztéma szerepét. A globális és nagyskálájú folyamatokat vizsgáló tanulmányok általában nem biztosítják azon kellő részletességű információt, ami a megfelelő alkalmazkodáshoz és menedzsmenthez szükségeltetik. Más tanulmányok (Hamouda et al., 2009; Pandey et al., 2009; Pandey et al., 2010; Pandey et al., 2011) a becslés során a sérülékenység egyes fontos komponenseit – például a kitettség, az érzékenység, az alkalmazkodási képesség – egyesítik, de a kevés résztvevő közreműködése szubjektív elfogultságot és csökkent hitelességet vonz magával. Tipikus kettőség van jelen a megközelítések terén: a mérnöki szemléletek jelentősen eltérnek az inkább emberi tényezőkre fókuszálóktól, holott az első nem veszi figyelembe az összes szükséges szempontot, így nem kielégítő a második nélkül, melyet a 2. dublini Alapelv is megfogalmaz: a vízkészlet-gazdálkodásnak és –fejlesztésnek a különböző szintű vízhasználók, tervezők és politikai irányítók részvételén kell alapulnia (Tessendorff, 1992). Hasonlóképpen a társadalom sem képes fejlődni az új tudományos és technikai ismeretek hiányában.

Annak érdekében, hogy a sérülékenységet mennyiségileg becsülhessük, a vízkészletek esetében néhány indikátor használata feltétlen javasolt. Igen sok sérülékenységi becslés a vízkészletekre vonatkozóan csak fizikai komponenseket egyesít, például a vízhiány számításához a vízhiány index használata történik, mely a szükséges és rendelkezésre álló vízmennyiség aránya. Ezen indexet számos – globális skálán végzett – tanulmány (Vörösmarty et al., 2000; Oki et al., 2001; Oki et al., 2003; Alcamo et al., 2003; Oki és Kanae, 2006; Islam et al., 2007) használta fel vizsgálataikhoz. A vízhiány éves szinten való becslése azonban figyelmen kívül hagyja az éven belüli szezonális tényét.

A rendszereket tágabb értelemben vizsgáló tanulmányok (Babel és Wahid, 2009; Hamouda et al., 2009; Pandey et al., 2009; Pandey et al., 2010; Balica et al., 2009) másfajta, tömör indexek használatát javasolják. Pandey et al. (2009) munkájukban kísérletet tesznek egy gyakorlatban is alkalmazható sérülékenységre vonatkozó definíció

megadására a vízhiány index¹⁴ és az alkalmazkodási képességet mérő index¹⁵ arányának segítségével, valamint a Bagmati folyó három vízgyűjtő területére kapott eredményeit hasonlítják össze. Ezen vizsgálatban a vízhiány index négy stressz-paraméter együtteséből tevődik össze (hidrológiai változékonyság, vízhiány, vízhasznosítás és vízszennyezettség), az alkalmazkodási képességet jellemző index pedig a természetes, fizikai, emberi erőforrás és gazdasági kapacitásból. Társadalmi, gazdasági, környezeti és fizikai komponensek alapján Balica mtsaival (2009) egy árvíz sérülékenységi indexet vezetett be, melynek segítségével három különböző térszála – egy nagyobb vízgyűjtő terület, egy al-vízgyűjtő és egy városi terület – sérülékenységét hasonlította össze.

A vízkészlet-sérülékenységi becslések során tehát a statikus indexek – például a csak fizikai komponenseket egyesítő vízhiány index – helyett összetettebb indexeket kell figyelembe venni a csatolt társadalmi-ökológiai rendszer szemlélete alapján, továbbá a vizsgálatokat az érintett ágazatok érdekképviselőinek bevonásával kell kivitelezni.

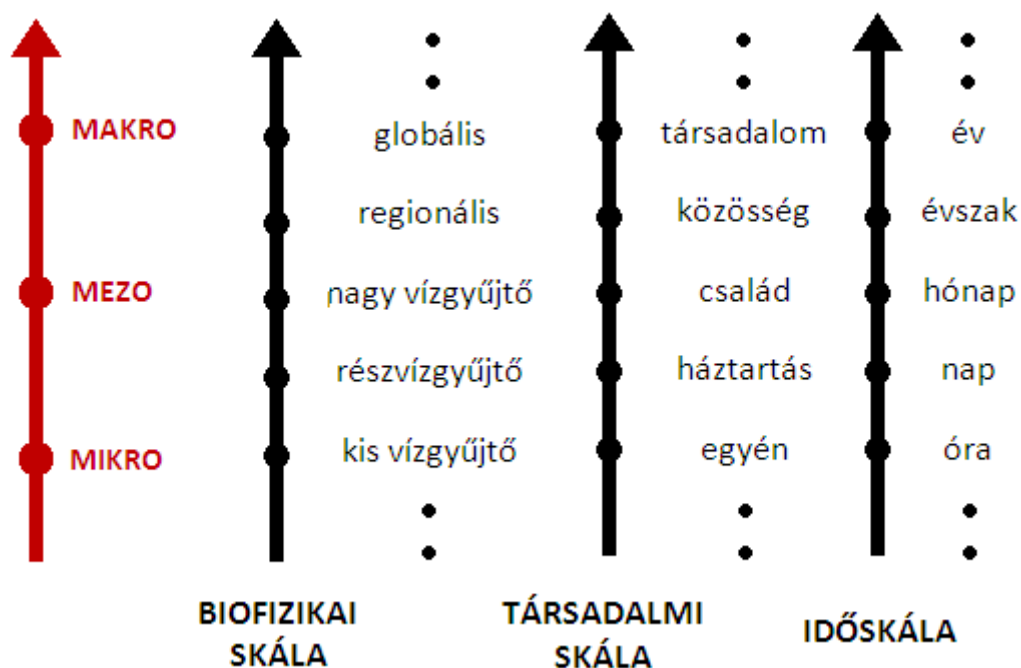
¹⁴ water stress index (WSI)

¹⁵ adaptive capacity index (ACI)

3. Módszertan

3.1 Alapelvek

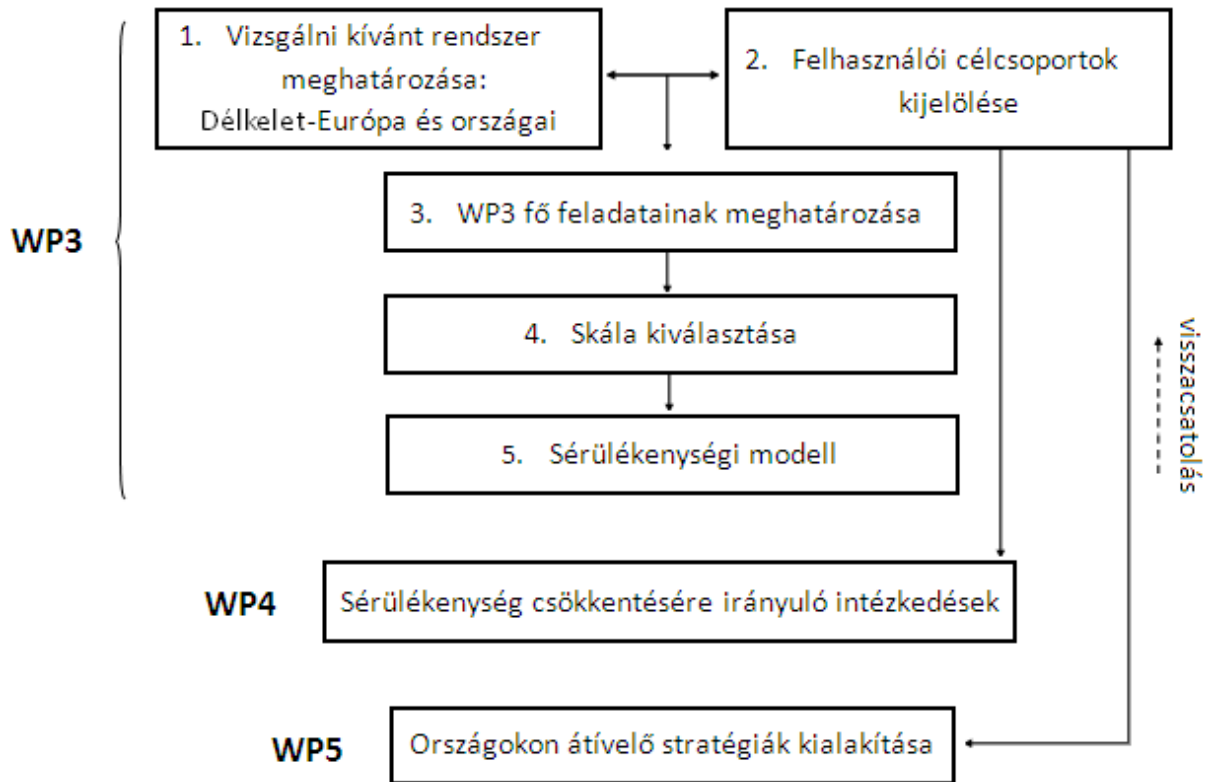
A sérülékenységi vizsgálat első iteratív lépése a résztvevők meghatározása és közreműködésükkel azon vízkészletek kijelölése, melyek sérülékenységét becsülni kívánjuk. Ezt követi a probléma felvázolása a rendszerrel kapcsolatos aggodalmak és ellentmondások felderítése végett. A rendszer térbeli és időbeli kiterjedésének meghatározása a résztvevő felek közreműködésével kell, hogy történjen (Animesh et al., 2012). A vízkészletek sérülékenységét különböző skálákon kell tekinteni: a fizikai víz-alrendszereket, valamint a társadalmi alrendszereket reprezentáló skálán, és ha szükséges, egy további – az időbeli és igazgatási szempontokat is figyelembe vevő – skálán (Balica et al., 2009). A 2. ábra (Cash et al., 2006; Damm, 2010 alapján) bemutatja az egymástól elkülönülő skálákat a vízkészletek szempontjából releváns megfelelő szintekkel.



2. ábra: A különböző skálák és szintjeik (Cash et al., 2006; Damm, 2010 alapján).

A biofizikai térskála a különálló vízgyűjtőterülettől a globális hidrológiai rendszerig terjed. Az említett skálák közül legalább a térbeli és időbeli skálának meg kell felelnie a sérülékenység-bebecslési vizsgálat céljának. A vízi erőforrásokkal kapcsolatos döntéshozatal szempontjaitól függően kerülhet meghatározásra a vizsgálandó vízgyűjtő-terület térbeli skálája.

Dolgozatom lépései a CC-WARE projektből a harmadik munkarész¹⁶ folyamatait érintik (3. ábra). Ennek keretén belül az egyes országoknak az ivóvíz-sérülékenység feltérképezését és a készletek jellemzését kell végrehajtania.



3. ábra: CC-WARE projekt három munkarésze.

Ezzel kapcsolatosan Dr. Bogárdi István (2013) tíz alapelvet fogalmazott meg:

1. A klímaváltozás befolyásolta ivóvíz-sérülékenység nagyobb, ha a három fő direkt indikátor az alábbiak szerint változik:
 - i) a vízmennyiség kevesebb,
 - ii) a víz minősége rosszabb,
 - iii) a társadalmi-gazdasági körülmények, illetve adottságok kevésbé kedvezőek.
2. A sérülékenység mennyiségi jellemzéséhez egy index használata javasolt, mely integráltan tartalmazza a fentebb említett három fő indikátort.
3. Ezen index¹⁷ alapján a vizsgált délkelet-európai régió projektben résztvevő országai egynemű területeire vonatkozó ivóvízkészlet-sérülékenységnek összehasonlíthatónak

¹⁶ Work Package 3 (harmadik munkarész): Characterization and mapping of vulnerability

¹⁷ vulnerability index (VI)

és bizonyos osztályokba sorolhatónak kell lennie, hogy a további munkák során (WP4¹⁸, WP5¹⁹) konkretizálni lehessen a szükséges intézkedéseket.

4. A sérülékenységek kifejezésének három lehetséges útja van:
 - (1) a három fő direkt indikátor használata,
 - (2) indirekt indikátorok bevezetése, melyek tükrözik a direkt indikátorok fontos, sérülékenységet befolyásoló tényezőit,
 - (3) a direkt és indirekt indikátorok kombinálása.
5. A klímaváltozással kapcsolatosan a direkt indikátorok használata javasolt, amennyiben ezek rendelkezésre állnak, például klímamodellezések eredményeként.
6. Az esetek többségében azonban ilyen direkt indikátorok nem állnak rendelkezésre, emiatt a sérülékenység jellemzéséhez indirekt indikátorok szükségeltetnek.
7. A résztvevők mindkét lehetőséggel élhetnek, de az összehasonlíthatóság miatt a sérülékenységi index térképezését egységesen indirekt, vagy kombinált indikátorok alapján javasolt végrehajtani.
8. A sérülékenységi index módszertanának mindhárom jellemzési lehetőség esetén azonosnak kell lennie (4. ábra).
9. A direkt vagy indirekt indikátorok különböző súllyal számítanak bele a sérülékenységet integrált módon kifejező indexbe, ezeket a feladat során meg kell állapítani, és a vizsgálatok során figyelembe kell venni. Az összehasonlíthatóság miatt ugyancsak egységesíteni kell ezen súlyokat minden homogén területre. A súlyok megállapítását a CC-WARE szakértői csoportjára kell bízni.
10. Néhány indikátor hatása egymással ellentétes lehet, így az integrált indexben egymás hatását kiegyensúlyozhatják. Például kisebb ivóvíz-készlet egy gazdagabb régióban, vagy rossz vízminőség egy ritkán lakott régióban. Más esetekben pedig ez nem jellemző, például elegendő vízmennyiség, de rossz vízminőség. A sérülékenységi index módszertanának meghatározásakor ezt figyelembe kell venni, és az integrált indexnek az indikátorok ezen jellegzetességeit is ki kell tudnia fejeznie.

¹⁸ Work Package 4 (negyedik munkarész): Management options for mitigating vulnerability

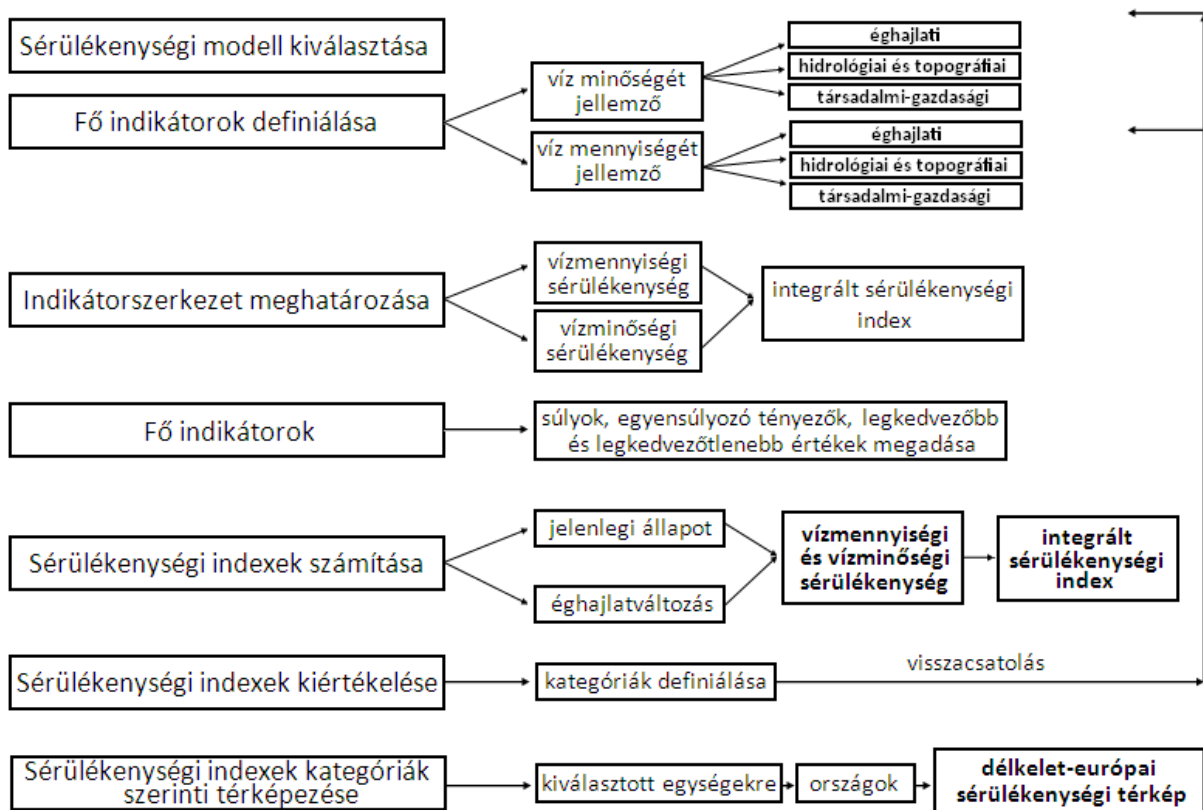
¹⁹ Work Package 5 (ötödik munkarész): Development of transnational strategy for national/regional action plans

3.2 Sérülékenységi modell

A rendszer térbeli és időbeli skálájának meghatározása után a következő lépés az elemzés céljától függően az alkalmazandó sérülékenységi modell kiválasztása. A vízkészletek sérülékenységét becslő különböző modellek felépítéséről és használatáról bőséges háttérinformáció áll rendelkezésre (Bleed et al., 1990; Kulshreshtha, 1993; Gain et al., 2012). A használt modellnek dolgozatom célkitűzései szempontjából a következő kritériumoknak kell megfelelnie:

- kezelje a különböző, gyakran egymással ellentétes hatású, sérülékenységet befolyásoló indikátorokat,
- kezelje a mennyiséget (pl. felszíni lefolyás) és minőséget (pl. műtrágya) befolyásoló indikátorok különböző mértékegységeit,
- kezelje az indikátorok segítségével történő becslés bizonytalanságait (pl. csapadékmennyiség változása az éghajlatváltozás következtében),
- könnyen alkalmazható legyen az egész vizsgált rendszerre,
- gyakorlatban jól használható legyen, tudja becsülni és osztályozni a különböző – WP4-ben tárgyalt – vízgazdálkodási lehetőségeket, és segítse nemzetközi stratégiák kialakítását a nemzeti és regionális szintű hatékony intézkedések érdekében (WP5),
- tükrözze a legkorszerűbb tudományos ismereteket.

A munkánk során alkalmazott sérülékenységi modell felépítését és az elvégzendő feladatok sorrendiségét a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra: Az alkalmazott sérülékenységi modell felépítése.

3.3 Kompozit programozás

Számos több kritériumos módszer áll rendelkezésre kompozit indexek előállítására összetett indikátorok segítségével, például csoportosító eljárások, több célú módszerek (Goicoechea et al., 1982), a kompromisszum-programozás²⁰ (Zeleny, 1982), és kompozit programozás²¹ (Bogárdi és Bardossy, 1983). A kompozit programozás szilárd elméleti alapokon nyugszik, és számos nemzetközi tanulmányban alkalmazták a sérülékenység becslésére, többek között a szennyvízkezelés (Stansbury et al., 1999), infrastruktúra (Highway, 2002), hulladéktelepek (Remediation, 2002), vízgyűjtők (Watershed, 2002), tavak (EPA Final Report, 2006), és természetes élőhelyek helyreállítása tervezésének (Stansbury et al., 2013) témakörében.

A CC-WARE projekt és dolgozatom célkitűzései, valamint a végzett vizsgálat szempontjából a teljesen eltérő indikátorok – például fizikai és társadalmi-gazdasági – együttes kezelésére alkalmas kompozit programozás javasolt, mely egy középutat jelenthet a bonyolult matematikai módszerek és a kényelmes használat között.

²⁰ Compromise Programming

²¹ Composite Programming (CP)

A kompozit programozás egy távolságon alapuló technika. A távolság alapú eljárásokhoz szükségeltetik egy referencia koordinátarendszer, melyben két pont közti távolság azonban nem fejezhető ki valós metrikus távolságként. A koordinátarendszer origó pontja és sarokpontja közül az egyik a legkedvezőbb, míg a másik a legkedvezőtlenebb esetet reprezentálja. A kompozit programozás egy világos becslési eljárást nyújt, és az indikátorokat hierarchikus szerkezetben kezeli, valamint lehetővé teszi viszonylag nagyszámú kritérium együttes kezelését és különböző mértékegységek használatát. Az indikátorokat funkciójuk szerint csoportokba soroljuk (pl. vízmennyiséget jellemző, vízminőséget jellemző), és belőlük egy integrált sérülékenységi indexet képezünk.

Egy homogén terület sérülékenységét összetett indikátorokból képzett integrált index értéke alapján becsülhetjük. Minden egyes indikátornak megadunk egy súlyt (w), mely a relatív fontosságát tükrözi, valamint egy normalizált értéket (c), mely a mért indikátor értékét (pl. talajvízszint) egy 0 és 1 közötti skálán helyezi el, kifejezve ezzel a $c=0,0$ legkedvezőbb, valamint a $c=1,0$ legkedvezőtlenebb értékektől való távolságot. A legkedvezőbb és legkedvezőtlenebb értékek definiálják minden indikátor konkrét értékének lehetséges határait. Ezen határok dolgozatomban az adott indikátor országos lehetséges minimum és maximum értékei (7-10. táblázat), melyeket különböző adatbázisok, illetve szakértői becslések alapján adunk meg.

A kompozit programozás az egyes indikátorok (i) normalizált értékét az (1) egyenlet szerint számítja:

$$c_i = \frac{(\text{tényleges} - \text{legkedvezőtlenebb})}{(\text{legkedvezőbb} - \text{legkedvezőtlenebb})} \quad (1)$$

A normalizált indikátorokat egyre általánosabb kategóriák szerinti csoportokba rendezzük, ahogy azt a 4. fejezetben található 1-4. táblázatokban is láthatjuk.

Az indikátorokat minden egyes csoportban együttesen a (2) egyenlet szerint vesszük figyelembe,

$$c_T = \left[\sum_{i=1}^n (w_i \cdot c_i^p) \right]^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

ahol

c_T = egy indikátor csoport együttes értéke

w_i = az i -edik indikátor súlya ($i = 1, \dots, n$), $\sum_1^n w = 1$

c_i = az i -edik indikátor **(1)** egyenlet alapján számolt normalizált értéke

p = az egyensúlyozó tényező²².

A **(2)** egyenlet szerinti számítást mindaddig kell ismételni minden egyes indikátor csoportra, amíg egyetlen értéket nem kapunk a sérülékenységre.

A kompozit programozás egy problémát a következő szerkezet szerint kezel:

1. a homogén területek kiválasztása
2. az alapvető indikátorok definiálása
3. a fő indikátorok egyre kevesebb és egyre általánosabb csoportokba rendezése

Dolgozatomban indirekt indikátorok sokaságával jellemezzük az adott ivóvízkészlet mennyiségi és minőségi változását az éghajlatváltozás következtében, és ezek segítségével kapjuk meg az integrált sérülékenységi indexet az egyes mintaterületekre, melyeket az 5. fejezetben hasonlítunk össze.

4. Az indikátorok súlyainak és egyensúlyi tényezőinek meghatározása

A folyamat során minden indikátorhoz meg kell adnunk egy súlyt, mely a relatív fontosságát tükrözi az adott csoportban lévő többi indikátorhoz képest. Az egyensúlyozó tényezők egyes indikátorok kimagasló értékeinek fontosságát hivatottak hangsúlyozni. A $p=1$ tényező használata az indikátorok szimpla átlagolását eredményezi (Lee et al., 1991).

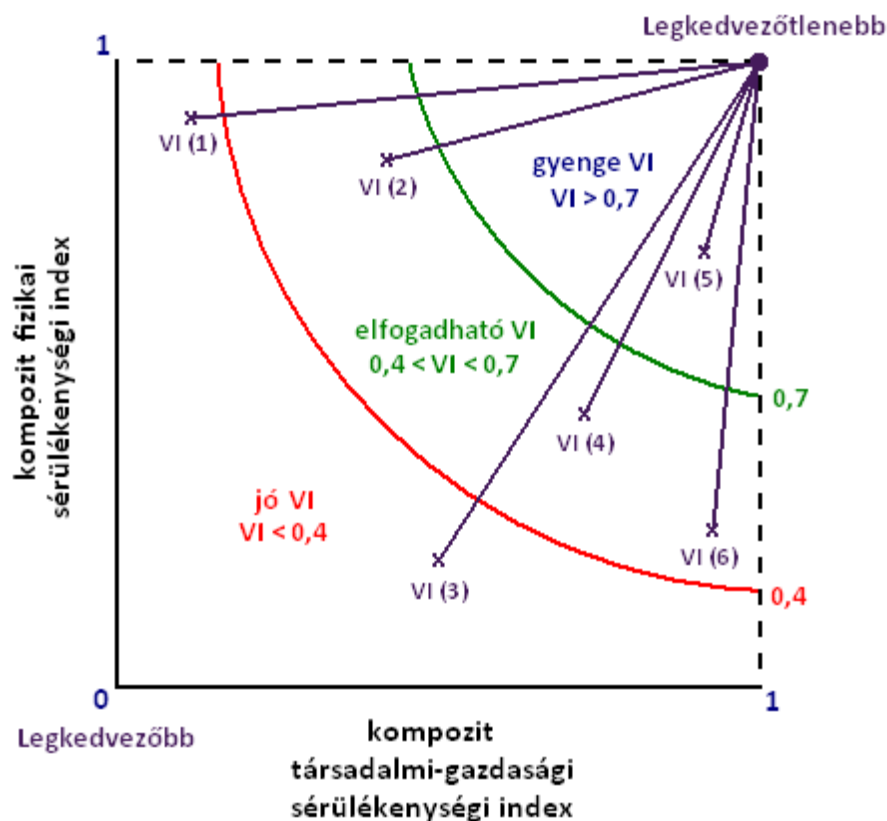
5. A sérülékenységi indexek kiértékelése és rangsorolása

A módszertan egyik legfontosabb sajátossága, hogy a kompozit programozással, vagyis a **(2)** egyenlet alkalmazásával egy terület vízkészletének sérülékenységét egy többdimenziós távolságként értelmezzük a legkedvezőtlenebb helyzetben (sérülékenység=1) és a legkedvezőbb helyzetben (0 sérülékenység) lévő területek vízkészlete között (5. ábra). A 0 és 1 közötti sérülékenységi index értékeit sérülékenység-vizsgálattól függően kategóriákra lehet osztani, például az alábbi módon (5. ábra):

- 0 és 0,4 közötti (jó) integrált VI: kis sérülékenység
- 0,4 és 0,7 közötti (elfogadható) integrált VI: közepes sérülékenység
- 0,7-nél magasabb (gyenge) integrált VI: nagy sérülékenység

A kategóriák számában és határainak konkrét értékeiben a résztvevők közös döntéssel állapodnak meg.

²² balancing factor



5. ábra: Az integrált sérülékenységi index, mint többdimenziós távolság hat homogénnek tekintett területre.

A direkt és indirekt indikátorok, valamint a sérülékenységi index kezelésének egyik lehetséges, dolgozatomban használt eszköze a Bogárdi és mtsai által kifejlesztett Decimaker²³ szoftver, mely a kompozit indikátorokból képzett integrált sérülékenységi index értéke alapján osztályozza és sorolja be a mintaterületeket bizonyos sérülékenységi kategóriákba. Az alkalmazás Visual Basic programozási nyelven íródott. A program szükséges inputjai a vizsgált mintaterületek indikátorai, valamint azok számszerű értékei.

Az integrált sérülékenységi indexet a Decimaker program minden ivóvízkészlet-típus esetén fizikai, illetve társadalmi-gazdasági kompozit indexek segítségével számítja. Míg az egyes típusok esetén a társadalmi-gazdasági sérülékenységet befolyásoló indikátorok – az egy főre jutó bruttó hazai termék²⁴, a foglalkoztatottság és a népsűrűség – megegyeznek, addig a fizikai sérülékenységet jellemző indikátorok eltérőek. A használt módszertani eljárás szerint a fizikai sérülékenység minden vizsgált vízkészlet-típus esetén azonosan víz mennyiséget és víz minőséget jellemző indikátorok sokaságából áll elő,

²³ Döntés Támogató Rendszer: Decision Support System (DSS)

²⁴ gross domestic product (GDP)

ahogy ezt a 4. ábrán láthattuk. Mivel azt szeretnénk vizsgálni, hogy az éghajlatváltozás milyen mértékben módosítja az ivóvízkészletek sérülékenységét, a fizikai sérülékenység összetevőinek súlyszámait alapvetően az adott vízkészletre vonatkozó fizikai összefüggések határozzák meg, ezekben szerepel a csapadék és a hőmérséklet is.

Dolgozatomban az éghajlatváltozás vízkészletekre gyakorolt hatását közvetve nem vizsgáljuk: azaz a nem éghajlatváltozást jellemző indikátorokra magának az éghajlatváltozásnak a hatását nem vizsgáljuk. Tehát az éghajlati indikátorokat kombináljuk az egyéb indikátoroknak a jelenlegi állapotot jellemző normált értékeivel, ahogy az **(1)** egyenletben láthatjuk, vagyis csak azt értékeljük, hogy valamely jellemző jelenlegi értéke erősíti vagy mérsékli-e az éghajlatváltozásból adódó sérülékenységet. Például egy nagy vízigénnyel rendelkező terület érzékenyebben reagál a készletek csökkenésére, mint az a terület, ahol jelentősek a szabad készletek. Lényegében a csapadékban és a hőmérsékletben bekövetkező változásra vonatkozó sérülékenységet korrigáljuk aszerint, hogy az egyéb paramétercsoportok ezt milyen mértékben erősítik vagy tompítják. Felerősítésről akkor beszélünk, ha az adott paraméter az országos szintű területi változékonyságán belül kedvezőtlenebb relatív helyzetben van, mint a meteorológiai tényezők, és fordítva, tompításról akkor van szó, ha a relatív helyzete kedvezőbb. A hatás mértékét a meteorológiai paraméterek, illetve az adott paraméter súlyszáma közötti különbség határozza meg.

4. Vizsgálat

4.1 Indikátorszerkezetek

Munkánk során forrásuk szerint az ivóvizek négy kategóriáját különböztettük meg, ezek rendre

1. felszín alatti, porózus vízadó rétegből nyert,
2. karsztosodott kőzetekből származó,
3. felszíni vizekből, tározókból biztosított,
4. parti szűrésű vizek.

A munkánk gerincét képező, egyes ivóvízkészlet-típusok indikátorszerkezetének meghatározása igen alapos átgondolást igénylő feladat. A szakértőkkel sorra vettük mind a négy vízkészlet-típus esetén mind a víz mennyiségét, mind minőségét befolyásoló tényezőket, becsültük súlyaikat, illetve vizsgáltuk esetleges kiegyenlítő hatásukat. Erre példa lehet egy fizikailag nagyon sérülékeny, ám gazdag régió, mely jobb társadalmi-gazdasági adottságainak köszönhetően több lehetőséggel rendelkezik az éghajlatváltozás okozta negatív hatások kivédésére, mérséklésére. Míg a különböző vízkészlet típusok esetén a már említett társadalmi-gazdasági indikátorok – így a foglalkoztatottság, egy főre jutó bruttó hazai termék, valamint népsűrűség – megegyeznek, addig a fizikai sérülékenység jelentősen eltérő indikátorokból tevődik össze, az adott vízkészletet befolyásoló tényezőktől és azok fizikai folyamataitól függően. A társadalmi-gazdasági adottságokat jellemző három indikátor egymáshoz viszonyított súlya azonosan egyharmad. A fizikai sérülékenység integrált sérülékenységen belüli súlyát a társadalmi-gazdasággal szemben vizsgálataink során kétszeresnek tekintettük. A továbbiakban az egyes vízkészlet-típusok fizikai sérülékenységét meghatározó indikátorokkal és súlyaikkal foglalkozom részletesebben. A vízkészletek mennyisége a híguláson keresztül befolyásolja azok minőségét, ezért a mennyiséget meghatározó indikátorokat a klímaindikátorok kivételével a minőségben belül minden vízkészlet-típus esetén megismételjük. Elsőként a két felszín alatti (porózus rétegből származó, illetve karsztos), majd a felszíni, végül a parti szűrésű vízkészlet-típus indikátorszerkezetét mutatom be.

4.1.1 Porózus vízadó réteg vízkészlete

A felszín alatti vízkészleteket a vízgyűjtő területén beszivárgott víz tölti fel. A rendelkezésre álló vízkészlet tehát a víztest területe és a beszivárgott víz mennyiségének szorzata. Porózus vízadó rétegben tárolt vízkészletek esetén a beszivárgott víz mennyiségét a téli félév csapadéka, illetve a potenciális evapotranszspiráción keresztül a téli félév átlaghőmérséklete befolyásolja (1. táblázat). A beszivárgott víz mennyiségét az említett klímaindikátorokon kívül a felszíni lefolyás, a vízgyűjtő terület nagysága, és a telítetlen zóna tulajdonságai határozzák meg. Munkánk során a felszíni lefolyást az ún. CN-értékkel (Curve Number)²⁵ írtuk le, mely a felszínen lefolyó, illetve talajrétegekbe szivárgó víz arányát jellemzi. Számszerű értéke függ többek közt a felszínborítottságtól, a talaj fizikai féleségétől és a térségre jellemző művelési ágtól. A telítetlen zóna által felvett vízmennyiség a talajvízmélység és a visszatartó képesség függvénye. Porózus rétegben tárolt vízkészlet minőségét a rá ható terhelés, valamint a beszivárgás mértéke határozza meg. A felszín alatti vízkészletekre ható vízminőségi terhelés a mezőgazdasági és városi területekről, illetve csatornázatlan lakosságtól származó szennyezésből tevődik össze. A település eredetű szennyezésnek két összetevője van: az utakról, kertekből származó szennyezés, valamint a csatornázatlan lakosság szikkasztott szennyvize. A mezőgazdasági területekről származó szennyezés a nitrogén-mérleg, a felszín alatti víztest-csoport kiterjedése, a mezőgazdasági terület aránya és a fedőrétegben lezajló denitrifikáció mértékének függvénye, mely utóbbi a szivárgási tényezővel jellemzett fedőréteg jellegétől és a talajvízmélységtől függ. Felszín alatti vizek esetén a mezőgazdasági terhelések víztest szinten általában háromszor, négyszer nagyobbak, mint a település eredetűek. A csapadék súlyát minden vízkészlet-típus esetén 1-nek rögzítettük. Ez után meghatároztuk a többi indikátor csapadékhhoz, valamint a csoportokon belül lévő többi paraméterhez viszonyított súlyát. Ezek alapján a porózus vízadó rétegből származó vízkészlet indikátorainak súlyait a szakértők segítségével az 1. táblázatban feltüntetettek szerint határoztuk meg.

²⁵ www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/16/stelprdb1044212.doc

PORÓZUS vízáadó rétegből származó vízkészlet		Relatív súly	Egyensúlyozó tényező
FIZIKAI sérülékenység		2/3	2
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére	1/2	3
	téli félév átlaghőmérséklete	1	1
	téli félév csapadéka	0,3	1
	visszatartás a telítetlen zónában	1	1
	talajvízmélység	0,25	1
	visszatartó képesség	1	1
	felszíni lefolyás	2	1
	víztest területe	0,15	1
		0,25	1
		1/2	3
víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére	1	1
	téli félév átlaghőmérséklete	0,3	1
	téli félév csapadéka	1	1
	terhelés	1	1
	mezőgazdasági területekről származó szennyezés	10	1
	talajvízmélység	1	1
	N műtrágya	1	1
	vízvezető képesség	2	1
	mezőgazdasági földterületek aránya	1	1
	városi területekről származó szennyezés	2	1
	lakott területek aránya	1	1
	csatornázatlan lakosságtól származó szennyezés	1	1
	népsűrűség	1	1
	csatornázatlan lakosság aránya	1	1
	víz mennyiség	1	1
	felszíni lefolyás	0,15	1
	víztest területe	0,25	1
visszatartás a telítetlen zónában	0,25	1	
talajvízmélység	1	1	
visszatartó képesség	2	1	
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység		1/3	2
	foglalkoztatottság	1/3	1
	egy főre jutó GDP	1/3	1
	népsűrűség	1/3	1

1. táblázat: A porózus vízáadó rétegben tárolt vízkészlet indikátorszerkezete.

4.1.2 Karsztos vízkészlet

A karsztvíz a karsztosodott kőzetek (mészkö és dolomit) üregeiben, járataiban, hasadékaiban elhelyezkedő, ásványi anyagokban rendkívül gazdag víz²⁶. A karsztos területeken beszivárgott víz döntően a (vizsgálataink során októbertől márciusig tekintett) téli félév csapadékából származik, de szerepe van a jelentős intenzitású és/vagy mennyiségű nyári félévi (áprilistól szeptemberig tartó időszak alatti) csapadéknak is. Egyszerűsítésként feltételezhetjük, hogy a beszivárgás nyílt karsztos területen történik, a fedett részen ehhez képest elhanyagolható. A karsztvíz-készlet minősége szintén a terheléstől és a beszivárgástól függ, a szennyezés jelentős része a nyílt karsztos területeken jut be a rendszerbe. A beszivárgásnál elhanyagoltuk a fedett területen való beszivárgást, de a szennyezések esetében ez nem indokolt: ha a fedőréteg nem elég vastag, akkor ezeken a területeken is juthat be szennyezés, ezért a paraméterek között szerepel a fedőréteg vastagsága is. A karsztos területeken a mezőgazdasági területek aránya és jelentősége kisebb, a komolyabb szennyezési veszélyt a települések jelentik. A karszt területeken a csatornázás nagyobb arányban történt meg, mint máshol, ezért a két települési szennyezőforrást (városi és csatornázatlan lakosságtól származó szennyezés) azonosnak tekinthetjük. A fentiek alapján az indikátorok súlyait a 2. táblázatban feltüntetettek szerint határoztuk meg.

²⁶ www.edv.hu/hu/portlet/downloads/download?id=5

KARSZTOS vízkészlet		Relatív súly	Egyensúlyozó tényező
FIZIKAI sérülékenység		2/3	2
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére	1/2	3
	hőmérséklet	1	1
	éves átlaghőmérséklet	0,3	1
	csapadék	1	1
	téli félév csapadéka	1	1
	nyári félév csapadéka	2	2
	beszivárgás	1	2
	víztest területe	1	1
	nyílt karszt arány	0,6	1
	CN érték	0,6	1
víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére	0,1	1
	hőmérséklet	1/2	3
	éves átlaghőmérséklet	1	1
	csapadék	0,3	1
	téli félév csapadéka	1	1
	nyári félév csapadéka	1	1
	terhelés	2	2
	mezőgazdasági területekről származó szennyezés	1	1
	mezőgazdasági földterületek aránya	1	1
	N műtrágya	1	1
	fedőréteg vastagsága	0,4	1
	nyílt karszt arány	1	1
	városi területekről származó szennyezés	1	2
	lakott területek aránya	1	1
	csatornázatlan lakosságtól származó szennyezés	1	2
	népsűrűség	1	1
	csatornázatlan lakosság aránya	1	1
	víz mennyiség	1	1
	víztest területe	0,6	1
	nyílt karszt arány	0,6	1
CN érték	0,1	1	
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység		1/3	2
foglalkoztatottság		1/3	1
egy főre jutó GDP		1/3	1
népsűrűség		1/3	1

2. táblázat: A karsztos vízkészlet indikátorszerkezete.

4.1.3 Felszíni vízkészlet

Felszíni vízkészlettel rendelkező területek esetén a vízmennyiség a lefolyással jellemezhető, mely egy részvízgyűjtő (Bódva) esetén a vízgyűjtőről és az azon kívülről származó összetevőből áll. A mederbeli lefolyás a közvetlen felszíni lefolyásból és a felszín alóli táplálásból, az ún. alaphozamból áll. Az éves átlagos csapadékösszeg 1-es értékéhez viszonyítva az éves átlaghőmérséklet súlya legfeljebb 0,3 lehet, mert az ún. határcsapadék (ennél kisebb csapadékmennyiség esetén a lefolyás elhanyagolható) – mely a párolgáson keresztül a hőmérséklettől és a vízfolyássűrűségtől is függ – körülbelül az éves csapadékmennyiség 70%-a, ennek legfeljebb felét teszi ki a párolgás, ami a hőmérséklettel nem lineárisan növekszik. A vízhálózat sűrűségének közvetett hatásai vannak a határcsapadékban és az alaphozam arányában, ezért kisebb súlyt kapott. A külső hozam és a felszíni lefolyás súlyszáma azonos (3. táblázat). A határon túlról érkező vízmennyiséget a külső hozam indikátor bevonásával vettük figyelembe. Értékét egy 0-tól 5-ig terjedő skálán adtuk meg aszerint, hogy a beérkező hozam hányszorosa az országban keletkezőnek. A felszíni vízminőséget a hozam aránya és terhelés befolyásolja. Ez utóbbit pontszerű, mezőgazdasági területekről származó nem pontszerű (diffúz), valamint külső eredetű vízminőségi terhelésre bonthatjuk. A pontszerű terhelést gyakorlatilag a csatornázatlan lakosságtól származó szennyezés jelenti. A diffúz terhelés a mezőgazdasági területek arányától, a használt műtrágyától, az erózióérzékenységtől és a foszfor visszatartási mértékétől függ, melyet az ún. hordalék aránnyal (SDR²⁷) jellemezhetünk. A dolgozatban vizsgált Bódva és Tarna felszíni vízkészletű vízgyűjtőjére értékének számítását a rendelkezésre álló lehetőségek közül²⁸ Maner (1958) képlete alapján végeztük el, amelyben szerepel egy vízgyűjtő domborzatát jellemző érték (a vízgyűjtő lejtésirány felőli határán mért, valamint a folyó torkolatánál mért tengerszint feletti magasságkülönbség), valamint a vízgyűjtő maximális hossza. A pontszerű és nem pontszerű terhelés arányát azonosnak feltételezve a népsűrűség, a csatornázott lakosság, a mezőgazdasági területek aránya, a műtrágya, a hordalék arány, és az erózióérzékenység azonosan 1-es súlyt kaptak (3. táblázat). A vizsgált folyókba országhatáron kívülről érkező víz minőségét a külső vízminőségi terhelés indikátorán keresztül, szintén egy 0-tól 5-ig terjedő skálán meghatározott értékkel vettük figyelembe. Értéke azt jellemzi, hogy az adott folyó vize mennyire szennyezett a hozamához képest.

²⁷ Sediment Delivery Ratio

²⁸ <http://www.iwr.msu.edu/rusle/sdr/sag-sdr.htm>

FELSZÍNI vízkészlet		Relatív súly	Egyensúlyozó tényező	
FIZIKAI sérülékenység		2/3	2	
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére	1/2	3	
	éves átlaghőmérséklet	1	1	
	éves csapadék	0,3	1	
	felszíni lefolyás	1	1	
	CN érték	1	1	
	vízhalózat sűrűsége	0,1	1	
	vízgyűjtő terület	1	1	
	külső hozam	1	1	
	víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére	1/2	3
		éves átlaghőmérséklet	1	1
éves csapadék		0,3	1	
terhelés		1	1	
pontszerű szennyezés		1	1	
csatornázott lakosság aránya		1	1	
népsűrűség		1	1	
nem pontszerű szennyezés		1	1	
N műtrágya		1	1	
erózióérzékenység		1	1	
hordalék arány		1	1	
vízgyűjtő terület		1	1	
mezőgazdasági földterületek aránya		1	1	
külső vízminőségi terhelés		1	1	
víz mennyiség		1	1	
CN érték		1	1	
vízhalózat sűrűsége		0,1	1	
vízgyűjtő terület		1	1	
külső hozam		1	1	
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység		1/3	2	
foglalkoztatottság		1/3	1	
egy főre jutó GDP		1/3	1	
népsűrűség		1/3	1	

3. táblázat: A felszíni vízkészlet-típus indikátorszerkezete.

4.1.4 Parti szűrésű vízkészlet

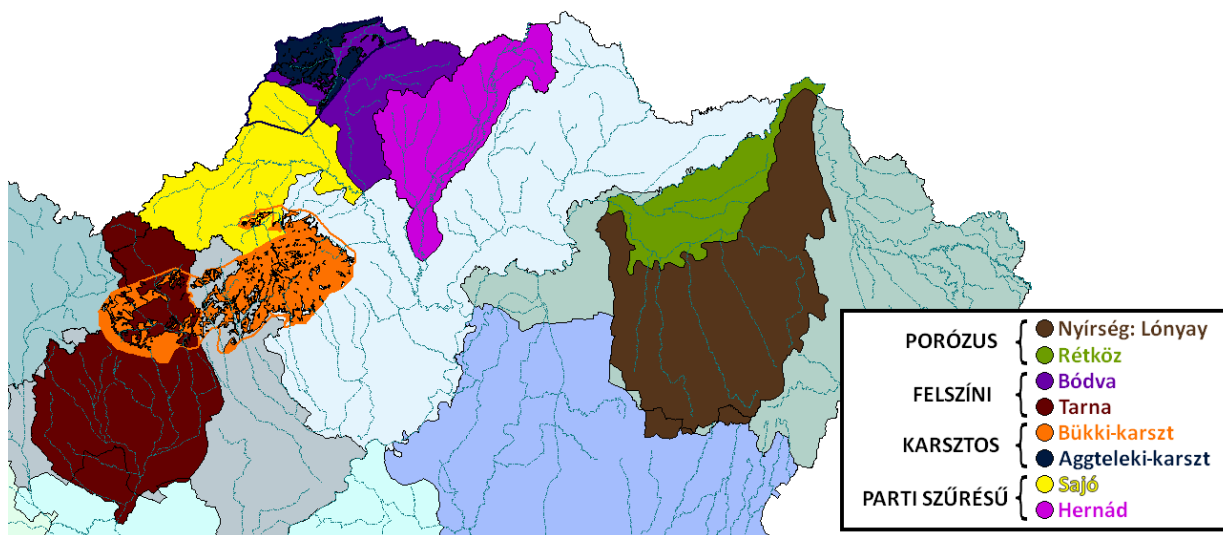
A parti szűrésű folyók vize a folyómeder partoldalán a kavics-, homok- és agyagrétegen átszivároghatva, megtisztulva jut el a vízkivételt szolgáló kutakba. A kitermelhető vízmennyiség döntően a folyók hozamából és az ún. háttérhozamból származik. Ezen okból kifolyólag mind a mennyiség, mind pedig a minőség csoportján belül a klímaindikátorokon kívül egy az egyben megjelennek a felszíni vízkészletet jellemző indikátorok. A vízmennyiség függ továbbá a meder aktív felületétől és a meder átszivárgási tényezőtől, előbbit a kavicssterasz hosszmenti kiterjedésével, utóbbit pedig vízáradó képességével jellemezzük. A kavicssterasz vízáradó képességét szintén egy 0-tól 5-ig terjedő relatív skálán meghatározott értékkel jellemeztük. Értéke a kavicsréteg meder alatti vastagságától és durvaságától függ. A vízmennyiséget befolyásoló tényezők súlya azonosan 1 (4. táblázat). Parti szűrésű vízkészlet minőségét a felszíni és a felszín alatti víz minősége és aránya határozza meg. A felszín alatti víz minőségét befolyásoló szennyezéseket ezúttal nem bontottuk fel különböző forrásokra, hanem egy összevont paraméterként (háttérszennyezés), értékét 0-tól (legkedvezőbb) 5-ig (legkedvezőtlenebb) terjedő skálán meghatározva adtuk meg.

PARTI SZŰRÉSŰ vízkészlet		Relatív súly	Egyensúlyozó tényező
FIZIKAI sérülékenység		2/3	2
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére	1/2	3
	éves átlaghőmérséklet	1	1
	éves csapadék	0,3	1
	felszíni vízszint	1	1
	felszíni lefolyás	1	1
	CN érték	1	1
	vízhalózat sűrűsége	0,1	1
	vízgyűjtő terület	1	1
	külső hozam	1	1
	kavicsterasz jellemzői	1	1
	kavicsterasz hosszmenti kiterjedése	1	1
kavicsterasz vízáadó képessége	1	1	
víz minőség		1/2	3
víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére	1	1
	éves átlaghőmérséklet	0,3	1
	éves csapadék	1	1
	felszíni vízminőség	1	1
	terhelés	1	1
	pontszerű szennyezés	1	1
	csatornázott lakosság aránya	1	1
	népsűrűség	1	1
	nem pontszerű szennyezés	1	1
	N műtrágya	1	1
	erózióérzékenység	1	1
	hordalék arány	1	1
	mezőgazdasági földterületek aránya	1	1
	külső vízminőségi terhelés	1	1
	víz mennyiség	1	1
	CN érték	1	1
	vízhalózat sűrűsége	0,1	1
	vízgyűjtő terület	1	1
	külső hozam	1	1
	háttér vízminőség	1	1
háttérszennyezettség	1	1	
háttérvízhozam arány	1	1	
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység		1/3	2
foglalkoztatottság	1/3	1	
egy főre jutó GDP	1/3	1	
népsűrűség	1/3	1	

4. táblázat: A parti szűrésű vízkészlet-típus indikátorszerkezete.

4.2 Mintaterületek

A vizsgált mintaterületek kijelölése Simonffy Zoltán és Dr. Bogárdi István szakemberek segítségével történt meg aszerint, hogy a fentebb felsorolt vízkészlet-típusok mindegyikét reprezentáló két-két hazai mintaterületet válasszunk. Így a négy különböző készletű mintaterület sérülékenysége, valamint az azonos készlet-típusúak sérülékenysége egymással is összehasonlítható, mintaként szolgálva egy országos elemzéshez. A 3. fejezetben részletezett módszer alapján tetszőleges területre elvégezhető lesz a vizsgálat, amennyiben a szükséges adatok és klímamodell-futtatások eredményei rendelkezésre állnak. Az egyes területekre kapott integrált indexek a Decimaker program segítségével egy diagramon egyidejűleg ábrázolhatók (12. ábra), így a kapott sérülékenységek összehasonlíthatók egymással.



6. ábra: Az ivóvízkészlet-típus alapján kijelölt mintaterületek.

A 6. ábrán látható a nyolc vizsgált É-ÉK magyarországi mintaterület kiterjedése. A hazai területek nagy hányadára jellemző porózus felszín alatti vízadó rétegben tárolódó vízkészlet típust reprezentáló két mintaterület a Nyírség térségén belüli Lónyay-főcsatorna vízgyűjtője, valamint a Rétköz tájegysége, melyeket eltérő hidrológiai-, és talajviszonyai miatt vizsgálhatunk külön és hasonlíthatjuk össze sérülékenységüket. A döntően felszíni vízkészlettel gazdálkodó hazai térségek esetén a jelentős határon túli vízgyűjtő területtel rendelkező Bódva folyó hazai vízgyűjtőjének sérülékenységét hasonlítottuk össze a kizárólag országon belül keletkező vízkészletű Tarna folyó vízgyűjtőjével. A vizsgált két

karsztvidék a Bükki-, valamint az Aggteleki-karszt. Vastag kontúrral a fedett és nyílt karszt együttes kiterjedésének határát jelöltük, míg a színezett területek a nyílt karsztot reprezentálják. A döntően felszíni vízkészlettel jellemezhető mintaterületekkel – így a Tarna, illetve Bódva hazai vízgyűjtőjével – való átfedés nem okoz ellentmondást, mert a karsztos terület vízkészlete – ha lokálisan nem hasznosítják – hozzájárul a felszíni vízkészlethez. Sérülékenység szempontjából a karszt külön is tekinthető, az adott régió teljes vízkészletének jellemzése esetén azonban az átfedést kezelni kell, de ilyen vizsgálatot a dolgozat keretében nem végeztünk. A parti szűrésű vízkészletet a folyók mentén fűrt kutak segítségével nyerik ki. Ezen vízkészlet típust reprezentáló két mintaterület a Sajó, valamint a Hernád folyó vízgyűjtőjének egy része. A parti szűrésű partszakaszok mindössze néhány száz méter/néhány kilométer hosszan húzódnak, a vizsgálni kívánt területek kiterjedése azonban ennél jóval nagyobb, mivel kijelölésük annak figyelembevételével történt, hogy a parti szűrésű vízkészletekre a felszíni készletet befolyásoló tényezők egyaránt hatással vannak (4.1.4 alfejezet). A Hernád folyón a Csúcsvízmű kútjaiig tartó részvízgyűjtőket jelöltük ki, ugyanígy tettünk a Sajó esetében is, annyi különbséggel, hogy a mára már bezárt kazincbarcikai telepig tekintettük a vízgyűjtőt.

4.3 Adatbázisok

Munkánk során a rendelkezésünkre álló adatbázisok kezeléséhez és megjelenítéséhez az Arc View GIS 3.2 térinformatikai szoftvert használtuk. Az egyes ivóvízkészlet-típusok sérülékenységét befolyásoló tényezőket jellemző indikátorokra a rendelkezésünkre álló adatbázisokból a vizsgált nyolc mintaterületre a tényleges, azaz a jelenlegi állapotokat tükröző értékeket kellett meghatározni. Ezen kívül az adott indikátor lehetséges országos minimum, illetve maximum értékeket kellett megadni, melyeket vizsgálataink során a sérülékenység szempontjából legkedvezőbbként, vagy legkedvezőtlenebbként kezeltünk.

A fizikai sérülékenységet meghatározó indikátorok egyes mintaterületekre vonatkozó tényleges, valamint az országos minimális és maximális értékek megállapításához a lehetőségek szerinti legfrissebb adatbázisokat használtunk fel. Így a társadalmi-gazdasági indikátorok értékeinek meghatározásához a Központi Statisztikai Hivatal interneten hozzáférhető lehető legfrissebb adatbázisából²⁹ dolgoztunk. Egy kisebb

²⁹ egy főre jutó GDP: http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_qpt014.html
foglalkoztatottság: http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_qlf026.html
népsűrűség: http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_wdsd005.html

térség gazdasági fejlettségének jellemzésére a dolgozatomban az indikátor-szerkezetbe bevont három mutató jól használható³⁰.

Az általunk használt további adatbázisok egyike a Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetében készült talajtani térképsorozat – az AGROTOPO Adatbázis³¹ – többek közt a vizsgálatainkhoz szükséges talajhidrológiai jellemzőket, valamint a hazai talajok vízgazdálkodási tulajdonságait is magában foglalja. A porózus vízáadó rétegből származó vízkészletek esetében a telítetlen zóna tulajdonságait meghatározó visszatartó képességet az adatbázis 5. kódja, a talaj vízgazdálkodási tulajdonságai alapján, míg a vízvezető képességet a talaj fizikai félesége alapján jellemeztük. Az egyes mintaterületekre a területhasznosítás által befolyásolt felszíni lefolyást jellemző CN-értéket²⁵, a mezőgazdasági földterületek, valamint lakott területek arányát a CORINE³² Európai Környezeti Információs Rendszer részét képező Corine Land Cover (CLC) Felszínborítási Adatbázis³³ alapján határoztuk meg. A csatornázatlan lakosság arányát a Települési Szennyvízelvezetési Információs Rendszer (TESZIR) legfrissebb adatbázisa³⁴ alapján számítottuk. A vízminőséget meghatározó nitrogén műtrágya hatóanyag felhasználásának mennyiségére megyei bontású adatok³⁵ álltak rendelkezésemre.

A kiválasztott mintaterületek esetén az éghajlat várható változását az 1981-től 2010-ig tartó harminc éves referencia időszakhoz viszonyítva az ENSEMBLES projekt³⁶ keretében a trieszti ICTP³⁷ intézet által futtatott RegCM regionális klímamoddellel (Giorgi et al., 1993a, 1993b), az SRES A1B kibocsátási forgatókönyv alapján becsültük a 2021-2050-es időszakra. A közepesnek tekinthető A1B globális emisszió szcenárió feltételezi, hogy a század közepére a Föld teljes népessége a 9 milliárdot is meghaladja, majd ezt követően a század végére fokozatosan 7 milliárdra csökken (Nakicenovic és Swart, 2000). Az A1B szcenárió gyors gazdasági és technológiai fejlődést prognosztizál, valamint a légköri szén-dioxid-koncentráció valamelyest lassuló ütemű emelkedését, mely 2050-re az 532 ppm-et elérő becsült szintet meghaladva 2100-ra 715 ppm-re nő. A modell 0,22°-os (25 km-nek megfelelő) horizontális rácsfelbontása alapján a vizsgált mintaterületeket 2-5

³⁰ <http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/terstat/2008/terstat0803.pdf>

http://geogr.elte.hu/ref/PDF/01szabopal_gazdfejl_pdf.pdf

³¹ <http://mta-taki.hu/hu/osztalyok/kornyezetiinformatikai-osztaly/agrotopo>

³² Coordination of Information on the Environment

³³ <http://www.fomi.hu/corine/>

³⁴ vizeink.hu/files/2/2_2_melleklet_TESZIR.xls

³⁵ vizeink.hu/files/2/2_10_melleklet_diffuz_n_p_terheles.xls

³⁶ <http://www.ensembles-eu.org/>

³⁷ International Centre for Theoretical Physics (ICTP) (<http://www.ictp.it/>)

cella reprezentálta, melyekre a területi átlagolásokat ennek megfelelően végeztük (5. táblázat).

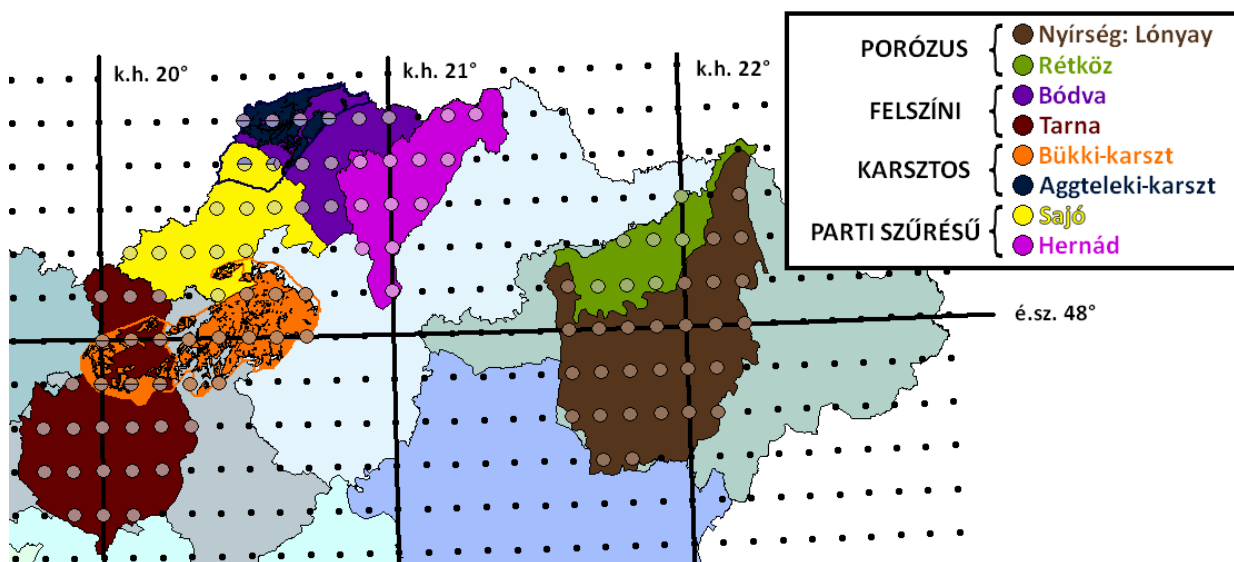
Ivóvízkészlet típusa	Mintaterület [km ²]		RegCM (felbontás: 0,22°)	CARPATCLIM (felbontás: 0,1°)
			cellák száma [db]	
PORÓZUS	NYÍRSÉG: LÓNYAY	2264	4	28
	RÉTKÖZ	666	2	7
FELSZÍNI	BÓDVA	868	2	11
	TARNA	1955	5	24
KARSZTOS	BÜKK	1115	5	16
	AGGTELEK	493	2	6
PARTI SZŰRÉSŰ	SAJÓ	1030	4	11
	HERNÁD	940	2	12

5. táblázat: A RegCM modell, valamint a referencia-adatbázis felbontásának megfelelően figyelembe vett rácsponti cellák száma az egyes mintaterületek esetén.

A Decimaker program inputként a referencia időszak és a 2021-2050-es periódus közti, modellel becsült várható átlagos csapadék-, illetve hőmérséklet-változás mértékének megadását követeli meg. A RegCM regionális klímamoddellel a végzett futtatás referencia időszakra és 2021-2050-es időszakra kapott értékeket hasonlítottuk össze, a jövőre várható számszerűsített átlagos csapadékmennyiség- és hőmérséklet-változást ezek különbségéből kaptuk. A klímamodell bemenő adatai a rácspontok alapján számított területi, havi átlagok. Az Eötvös Loránd Tudományegyetemen Pongrácz és mtsai által 2011-ben végzett, 11 regionális klímamodell eredményeit figyelembe vevő vizsgálat alapján a RegCM modellről elmondható, hogy a csapadéokra vonatkozóan – a nyár kivételével (alulbecslés) mindhárom évszakban, így éves szinten is – jelentős felülbecslés jellemzi. Ezért a nemrégiben lezárult CARPATCLIM projekt³⁸ mérések alapján interpolált, nyilvánosan hozzáférhető adatbázisából a vizsgált területekre leválasztott rácsponti adatok alapján számolt területi átlagokat felhasználva havi kvantilisillesztéssel (Formayer és Haas, 2010) hibakorrekciót végeztünk. A korrekció után a referencia időszakra kapott korrigált szimulációs adatok

³⁸ Climate of the Carpathian Region (CARPATCLIM) (<http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>)

megfelelően leírják a kiválasztott mintaterületek (vízgyűjtők) éghajlatát. A CARPATCLIM adatbázis 0,1°-os felbontása a mintaterületek 6-28 cellával való lefedését tette lehetővé (5. táblázat).



7. ábra: A 0,1°-os felbontású CARPATCLIM adatbázis alapján figyelembe vett cellák középpontjai.

A sérülékenység számításához szükséges egyes klímaindikátorok országos szélsőértékeinek meghatározásához szintén a RegCM modell szimulációinak korrigált eredményeit használtuk fel, igazodva a korábbi CC-WaterS², valamint a jelenleg is folyamatban lévő – munkánk motivációját adó – CC-WARE⁸ projekt célkitűzéseivel. A regionális modell eredményeinek korrigálása után a vizsgált két időszakra (1981-2010 és 2021-2050), az egyes klímaindikátorokra vonatkozó országos minimum és maximum értékeket a 6. táblázatban mutatom be.

RegCM		1981-2010		2021-2050	
		MIN	MAX	MIN	MAX
ÉVES	[mm]	451,3	656,5	532,2	899,4
TÉLI FÉLÉV		182,4	299,0	183,0	372,1
NYÁRI FÉLÉV		261,1	403	341,1	548,7

6. táblázat: A RegCM modellel becsült korrigált átlagos csapadékösszegek szélsőértékei Magyarország területén.

Ezen értékek a mintaterületekre becsült konkrét értékekkel egyidejűleg – azaz meghatározva azok relatív területi besorolását – az egyes vízkészletek indikátorszerkezeteinek táblázataiban is megjelenítésre kerülnek (7-10. táblázat). Hangsúlyozandó, hogy az országos szélsőértékeknek igen fontos jelentősége van a mintaterületek kompozit sérülékenységi indexei, azokon keresztül pedig az integrált sérülékenységi indexek értékeinek alakulása szempontjából. Jelentőségüket az adja, hogy – mint azt már korábban írtuk – az indikátorok országban lehetséges maximális és minimális értékeit a sérülékenység szempontjából legkedvezőbb és legkedvezőtlenebb értéknek feleltetjük meg. Ezen módszertani sajátosság alapján a kiválasztott vízgyűjtők éghajlatváltozással kapcsolatosan vizsgált sérülékenységének interpretációjaként azok relatív területi besorolását adjuk meg. Az egyes mintaterületekre vonatkozó eredmények sokkal inkább egymáshoz viszonyítva vizsgálandók, mint önmagukban, ezt fontos szem előtt tartani a következtetések levonásakor.

PORÓZUS vízadó rétegből származó vízkészlet		Legkedvezőtlenebb		Tényleges érték				Legkedvezőbb		
				NYÍRSÉG: LÓNYAY		RÉTKÖZ				
FIZIKAI sérülékenység										
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére		1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	téli félév átlaghőmérséklete		4,90	5,75	3,14	4,12	3,05	4,07	2,06	2,99
	téli félév csapadéka		182,4	183,0	227,42	227,03	227,44	227,34	299,0	372,1
	felszíni lefolyás									
	CN érték		94		70		86		65	
	víztest területe		500		2264		666		7340	
	visszatartás a telítetlen zónában									
	talajvízmélység		10		3		2		0,1	
visszatartó képesség		6		2		3		1		
víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére		1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	téli félév átlaghőmérséklete		4,90	5,75	3,14	4,12	3,05	4,07	2,06	2,99
	téli félév csapadéka		182,4	183,0	227,42	227,03	227,44	227,34	299,0	372,1
	terhelés									
	mezőgazdasági területekről származó szennyezés									
	N műtrágya		92,1		45,8		45,7		26,7	
	mezőgazdasági földterületek aránya		0,85		0,68		0,81		0,05	
	talajvízmélység		0,1		3		2		10	
	vízvezető képesség		1		2		3		7	
	városi területekről származó szennyezés									
	lakott területek aránya		0,10		0,08		0,08		0,01	
	csatornázatlan lakosságtól származó szennyezés									
	népsűrűség		191		127		95		52	
	csatornázatlan lakosság aránya		0,45		0,29		0,28		0,1	
	vízmennyiség									
	felszíni lefolyás									
CN érték		94		70		86		65		
víztest területe		500		2264		666		7340		
visszatartás a telítetlen zónában										
talajvízmélység		10		3		2		0,1		
visszatartó képesség		6		2		3		1		
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység										
foglalkoztatottság		42		46,37		46,40		56		
egy főre jutó GDP		1250		1539		1521		2879		
népsűrűség		191		127		95		52		

7. táblázat: A porózus vízadó rétegű vízkészlet szerkezete, az indikátorok legkedvezőbb, legkedvezőtlenebb, és tényleges értékei a vizsgált mintaterületekre.

KARSZTOS vízkészlet		Legkedvezőtlenebb		Tényleges érték				Legkedvezőbb		
				BÜKK		AGGTELEK				
FIZIKAI sérülékenység										
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére		1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	hőmérséklet									
	éves átlaghőmérséklet		11,43	12,36	9,51	10,49	9,05	10,04	8,76	9,72
	csapadék									
	téli félév csapadéka		182,4	183,0	222,8	232,6	204,1	209,9	299,0	372,1
	nyári félév csapadéka		261,1	341,1	390,3	444,5	408,7	440,9	409,0	548,7
	beszivárgás									
	víztest területe		96		1115		493		2063	
	nyílt karszt arány		0		0,64		0,41		1	
	CN érték		44		70		65		83	
víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére		1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	hőmérséklet									
	éves átlaghőmérséklet		11,43	12,36	9,51	10,49	9,05	10,04	8,76	9,72
	csapadék									
	téli félév csapadéka		182,4	183,0	222,8	232,6	204,1	209,9	299,0	372,1
	nyári félév csapadéka		261,1	341,1	390,3	444,5	408,7	440,9	409,0	548,7
	terhelés									
	mezőgazdasági területekről származó szennyezés									
	mezőgazdasági földterületek aránya		0,85		0,23		0,36		0,05	
	N műtrágya		92,1		35,8		46,7		26,7	
	fedőréteg vastagsága		0		50		50		100	
	nyílt karszt arány		1		0,64		0,41		0	
	városi területekről származó szennyezés									
	lakott területek aránya		0,1		0,05		0,03		0,01	
	csatornázatlan lakosságtól származó szennyezés									
	népsűrűség		300		272		94		52	
	csatornázatlan lakosság aránya		0,45		0,10		0,39		0,1	
vízmennyiség										
víztest területe		96		1115		493		2063		
nyílt karszt arány		0		0,64		0,41		1		
CN érték		44		70,3		65,4		83		
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység										
foglalkoztatottság		42		44,5		42,5		56		
egy főre jutó GDP		1250		1839		1725		2879		
népsűrűség		300		272		94		52		

8. táblázat: A karsztos vízkészlet-típus szerkezete, az indikátorok legkedvezőbb, legkedvezőtlenebb, és tényleges értékei a vizsgált mintaterületekre.

FELSZÍNI vízkészlet		Legkedvezőtlenebb		Tényleges érték				Legkedvezőbb	
				BÓDVA		TARNA			
FIZIKAI sérülékenység									
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	éves átlaghőmérséklet	11,43	12,36	9,33	10,32	9,92	10,91	8,76	9,72
	éves csapadék	451,3	532,2	592,3	628,9	592,4	632,6	656,5	899,4
	felszíni lefolyás								
	CN érték	65		72,0		86,8		94	
	vízhálózat sűrűsége	0,15		0,18		0,21		0,5	
	vízgyűjtő terület	624,2		867,5		1954,5		5814,8	
külső hozam	0		1		0		5		
víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	éves átlaghőmérséklet	11,43	12,36	9,33	10,32	9,92	10,91	8,76	9,72
	éves csapadék	451,3	532,2	592,3	628,9	592,4	632,6	656,5	899,4
	terhelés								
	pontszerű szennyezés								
	csatornázott lakosság aránya	0,55		0,76		0,63		0,9	
	népsűrűség	191		94,0		82,6		52	
	nem pontszerű szennyezés								
	N műtrágya	92,1		46,7		30,3		26,7	
	erózióérzékenység	2		1,073		1,075		1	
	hordalék arány	30		19,45		5,89		2	
	mezőgazdasági földterületek aránya	0,85		0,48		0,61		0,05	
	külső vízminőségi terhelés	5		3		0		0	
	víz mennyiség								
	CN érték	65		72,0		86,8		94	
vízhálózat sűrűsége	0,15		0,18		0,21		0,5		
vízgyűjtő terület	624,2		867,5		1954,5		5814,8		
külső hozam	0		1		0		5		
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység									
foglalkoztatottság	42		42,5		45,8		56		
egy főre jutó GDP	1250		1725		1886		2879		
népsűrűség	191		94,0		82,6		52		

9. táblázat: A felszíni vízkészlet-típus szerkezete, az indikátorok legkedvezőbb, legkedvezőtlenebb, és tényleges értékei a vizsgált mintaterületekre.

PARTI SZŰRÉSŰ vízkészlet		Legkedvezőtlenebb		Tényleges érték				Legkedvezőbb	
				SAJÓ		HERNÁD			
FIZIKAI sérülékenység									
víz mennyiség	éghajlatváltozás hatása a víz mennyiségére	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	éves átlaghőmérséklet	11,43	12,36	8,90	9,89	10,10	11,09	8,76	9,72
	éves csapadék	451,3	532,2	599,9	641,0	586,6	619,5	656,5	899,4
	felszíni vízszint								
	felszíni lefolyás								
	CN érték	65		85,0		87,8		94	
	vízhalózat sűrűsége	0,15		0,217		0,311		0,5	
	vízgyűjtő terület	624,2		1030		940		5814,8	
	külső hozam	0		1,5		1,5		5	
	kavicsterasz jellemzői								
kavicsterasz hosszmenti kiterjedése	1		10		15		100		
kavicsterasz vízáadó képessége	0		2		3		5		
víz minőség	éghajlatváltozás hatása a víz minőségére	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
	éves átlaghőmérséklet	11,43	12,36	8,90	9,89	10,10	11,09	8,76	9,72
	éves csapadék	451,3	532,2	599,9	641,0	586,6	619,5	656,5	899,4
	felszíni vízminőség								
	terhelés								
	pontszerű szennyezés								
	csatornázott lakosság aránya	0,55		0,65		0,69		0,9	
	népsűrűség	191		93,4		94,0		52	
	nem pontszerű szennyezés								
	N műtrágya	92,1		45,6		46,7		26,7	
	erózióérzékenység	2		1,157		1,183		1	
	hordalék arány	30		2,432		2,438		2	
	mezőgazdasági földterületek aránya	0,85		0,41		0,71		0,05	
	külső vízminőségi terhelés	5		3		0		0	
	víz mennyiség								
	CN érték	65		85,0		87,8		94	
	vízhalózat sűrűsége	0,15		0,217		0,311		0,5	
	vízgyűjtő terület	624,2		1030		940		5814,8	
	külső hozam	0		1,5		1,5		5	
háttér vízminőség									
háttérszennyezettség	5		4		2		0		
háttérvízhozam arány	50		20		10		5		
TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység									
foglalkoztatottság	42		42,7		42,5		56		
egy főre jutó GDP	1250		1738		1725		2879		
népsűrűség	191		93,4		94,0		52		

10. táblázat: A parti szűrésű vízkészlet-típus szerkezete, az indikátorok legkedvezőbb, legkedvezőtlenebb, és tényleges értékei a vizsgált mintaterületekre.

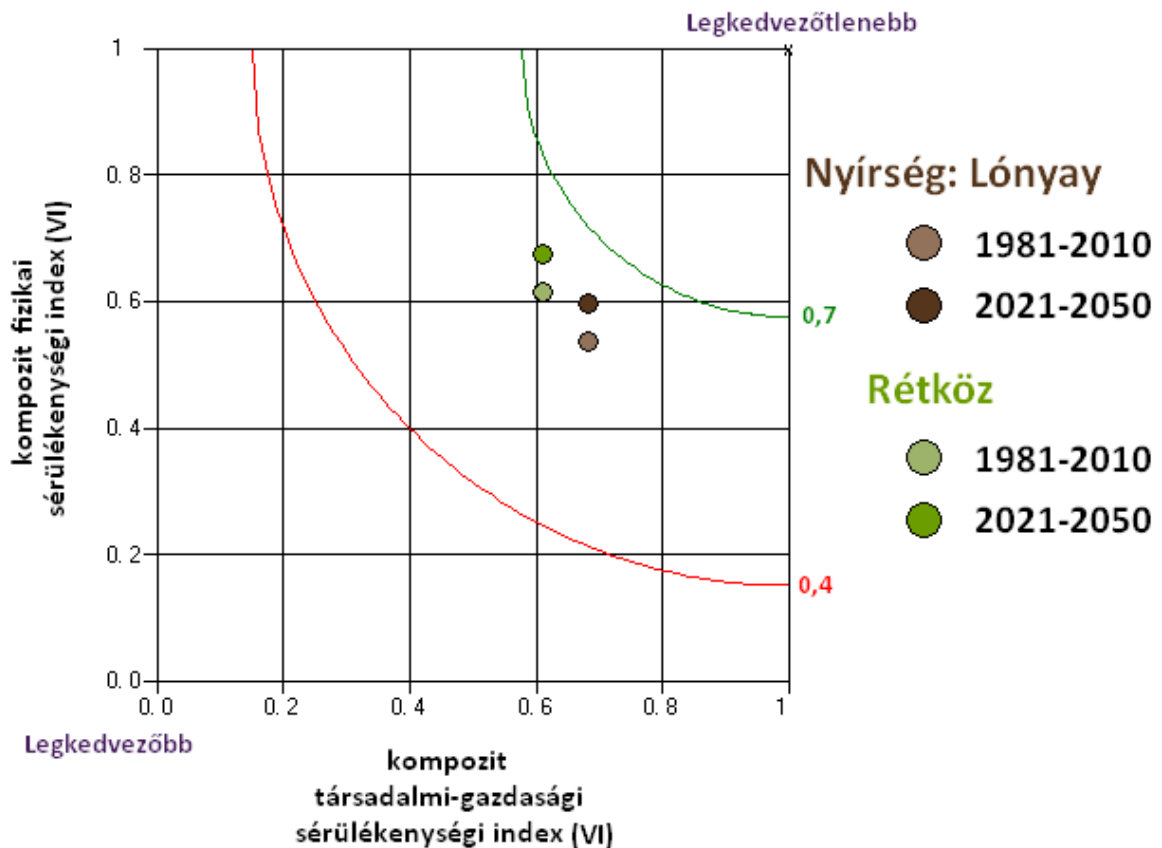
5. Eredmények

Az adatok bevitele után azonos vízkészlet-típusú két-két mintaterületenként a Decimaker programmal mind a két időszakra – 1981-2010-es referencia és 2021-2050-es jövőre vonatkozó időszakra – elvégeztünk a sérülékenység-számítást a kompozit és az integrált sérülékenységi indexek értékeinek meghatározásához. A programmal kirajzoltattuk a kontrollidőszakra és a század közepére kapott értékeket. Az eredmények értékelése során először vízkészletenként a két-két mintaterület, majd együttesen a nyolc kijelölt vízgyűjtő egymáshoz viszonyított helyzetét mutatom be. A fejezet végén pedig egy részben módosított módszer alapján történő – a klímaindikátorok két jövőre vonatkozó időszakának szélsőértékeit együttesen kezelő – számítást is bemutatok a két felszíni vízkészlettel jellemezhető vízgyűjtőre.

A módszertani fejezetben említett sérülékenységi kategorizálás szerint mind a nyolc vizsgált mintaterület az elfogadható tartományba ($0,4 \leq VI \leq 0,7$) esett az integrált sérülékenységi index értékének alapján, azaz közepesen sérülékeny térségekről beszélhetünk (12. ábra). Egy térség társadalmi-gazdasági adottságait jellemző három említett indikátorra az éghajlatváltozás hatását nem vizsgáltuk, így a Decimaker program által a három paraméterből számított kompozit társadalmi-gazdasági index értékei a jövőre vonatkozóan nem változnak. Ezért a bemutatott diagramokon az egyes mintaterületek sérülékenységét reprezentáló pontok – a két vizsgált időszak között a klímaindikátorok értékeiben történő változások következtében – csak a társadalmi-gazdasági tengelyre merőlegesen, a kompozit fizikai sérülékenységi index változását mutatva „mozognak”. A kompozit fizikai és társadalmi-gazdasági indexek, valamint az integrált sérülékenységi index mintaterületekre vonatkozó konkrét értékeit az eredmények értékelése során a 11. táblázat alapján követhetjük nyomon.

A porózus vízáradó rétegű két mintaterület közül a Rétköz bizonyult sérülékenyebbnek. Vízmennyiségi szempontból kötöttebb talaja miatt vízkészlet-utánpótlódás szempontjából a Rétköz rosszabb helyzetben van a Nyírségnél (az elemzés során, a módszerből adódóan nem vettük figyelembe a Nyírség felől a Rétköz felé áramló vízkészletet), amelyet nem kompenzál a kedvezőbb vízminőségi sérülékenységi összetevő. A népsűrűség indikátor mintaterületekre vonatkozó értékeinek megadásánál figyelembe kell venni azon környező nagyvárosok hatását, melyek a kijelölt térség határaiba nem, vagy esetlegesen nem teljesen esnek bele, de vízellátásuk az adott területről történik. Ennek megfelelően a megyei bontásban rendelkezésre álló területi átlagokat a nagyvárosok

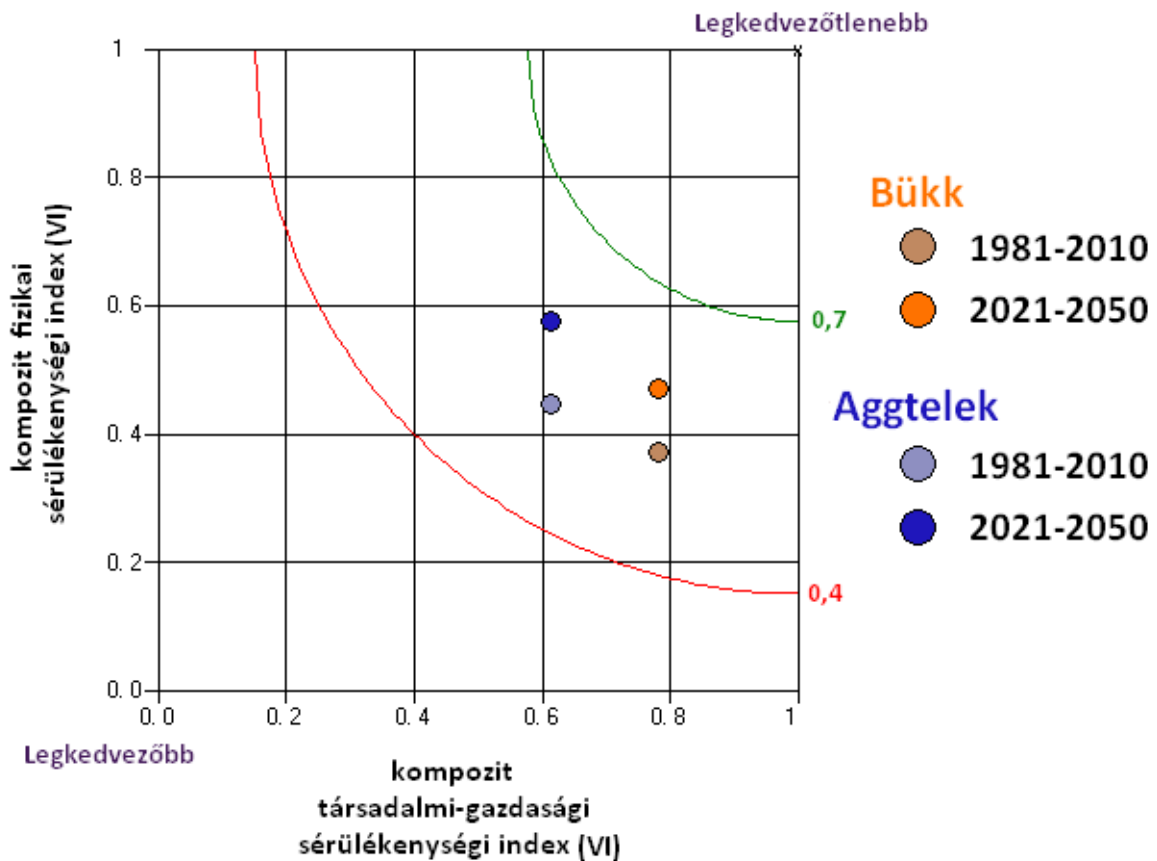
lakosságával súlyozzuk. A porózus vízadó rétegű Lónyay-főcsatorna vízgyűjtő területének vízminőségét jelentősen befolyásolja Nyíregyháza lakosságától származó szennyezés, így a mintaterület népsűrűségét reprezentáló indikátor értéke a szomszédos Rétköz térségénél jóval nagyobb (7. táblázat). Ez jelenik meg a kompozit társadalmi-gazdasági index értékében is, amit a 8. ábrán és a 11. táblázatban is láthatunk.



8. ábra: A Decimaker programmal ábrázolt porózus vízadó rétegből származó vízkészlettel jellemezhető két mintaterület sérülékenysége.

A szintén felszín alatti, karsztos vízkészletű mintaterületekről elmondható, hogy a referencia időszakra végzett számítások alapján integrált sérülékenységi indexük hasonló értékű, ám a Bükki-karszt társadalmi-gazdasági adottságai szempontjából, míg az Aggteleki-karszt fizikai tényezői alapján sérülékenyebb a másiknál (11. táblázat). Az Aggteleki-karszt nagyobb kompozit fizikai sérülékenységi index értéke abból adódik, hogy kiterjedése és a nyílt karsztos területeinek aránya kisebb, mely jellemzők a sérülékenység szempontjából kedvezőtlenek. A nagyobb kiterjedésű Bükki-karszt kompozit társadalmi-gazdasági sérülékenységi indexének – a nyolc mintaterület közül legmagasabb – 0,8-at megközelítő értéke a népsűrűség Miskolc és Eger városok lakosságával való súlyozása

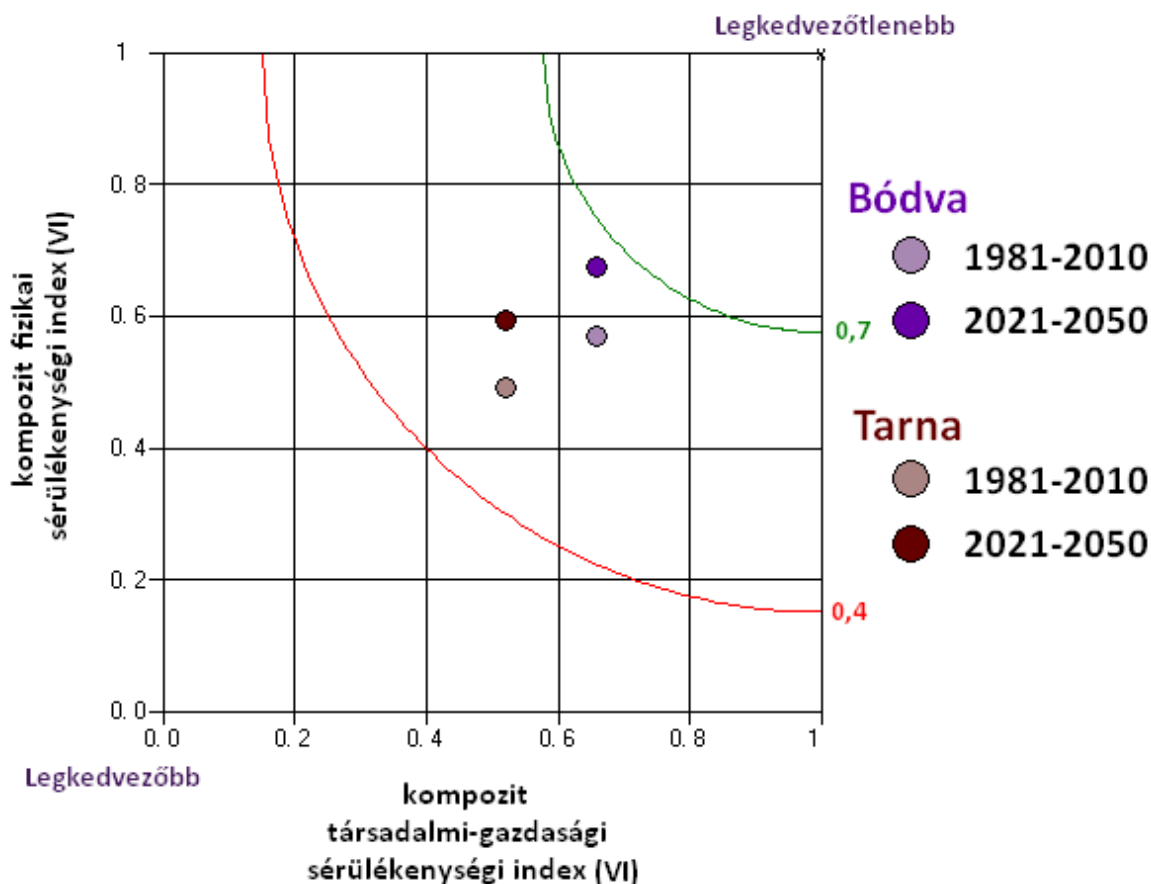
következtében adódott, mivel a Bükk karsztvíz-készlete alapvető jelentőségű a két nagyváros ivóvízellátásában (8. táblázat).



9. ábra: A Decimaker programmal ábrázolt karsztos vízkészletű két mintaterület sérülékenysége.

A felszíni vízkészlet-típust reprezentáló mintaterületekről elmondhatjuk, hogy az északabbra fekvő Bódva vízgyűjtő területe a Tarnához képest elmaradottabb, mely a társadalmi-gazdasági sérülékenység magasabb értékében meg is mutatkozik. A Bódva folyó hazai vízgyűjtője a víz mennyiségét és minőségét befolyásoló paramétereket egyesítő kompozit fizikai sérülékenységi indexe alapján is sérülékenyebbnek bizonyult a kizárólag országon belül keletkező vízkészlettel jellemezhető Tarna vízgyűjtőjénél (11. táblázat). Ennek oka abban keresendő – azon felül, hogy a Tarna folyó vízkészletét nem befolyásolják külső (országhatáron kívülről érkező víz mennyiségében és minőségében megnyilvánuló) hatások –, hogy a fizikai sérülékenységet befolyásoló indikátorok Tarna vízgyűjtőjére megállapított értékei a sérülékenység szempontjából kedvezőbbek (9. táblázat). Így a lefolyást jellemző CN-érték, a vízgyűjtő terület mérete, a (vízminőségen belüli) népsűrűség számszerű értéke, a hordalék arány, vagy a vízhálózat-sűrűség. A Bódva

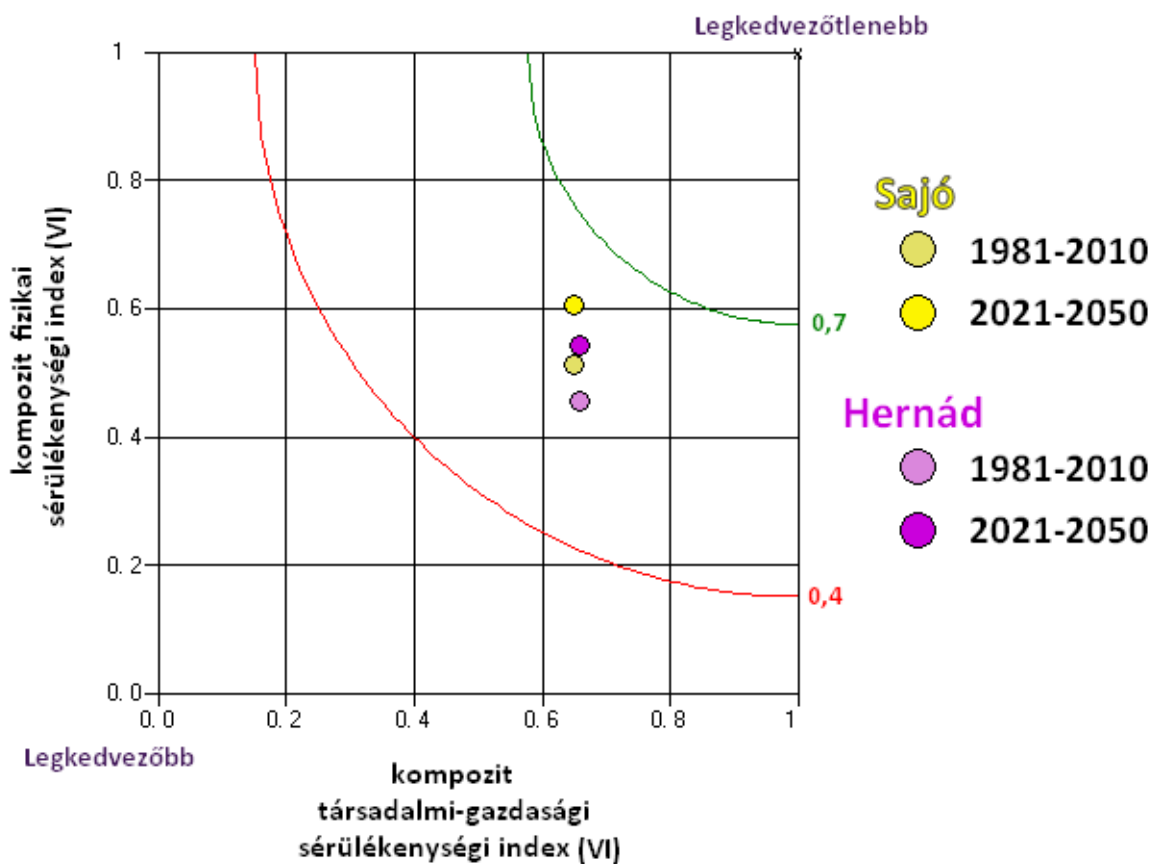
mintaterület 2021-2050-es időszakra adódó sérülékenysége a nyolc vizsgált vízgyűjtő közül a legmagasabb, integrált sérülékenységi index értéke megközelíti az „elfogadható” sérülékenységi kategória 0,7-es határát (10. ábra).



10. ábra: A Decimaker programmal ábrázolt felszíni vízkészletű két mintaterület sérülékenysége.

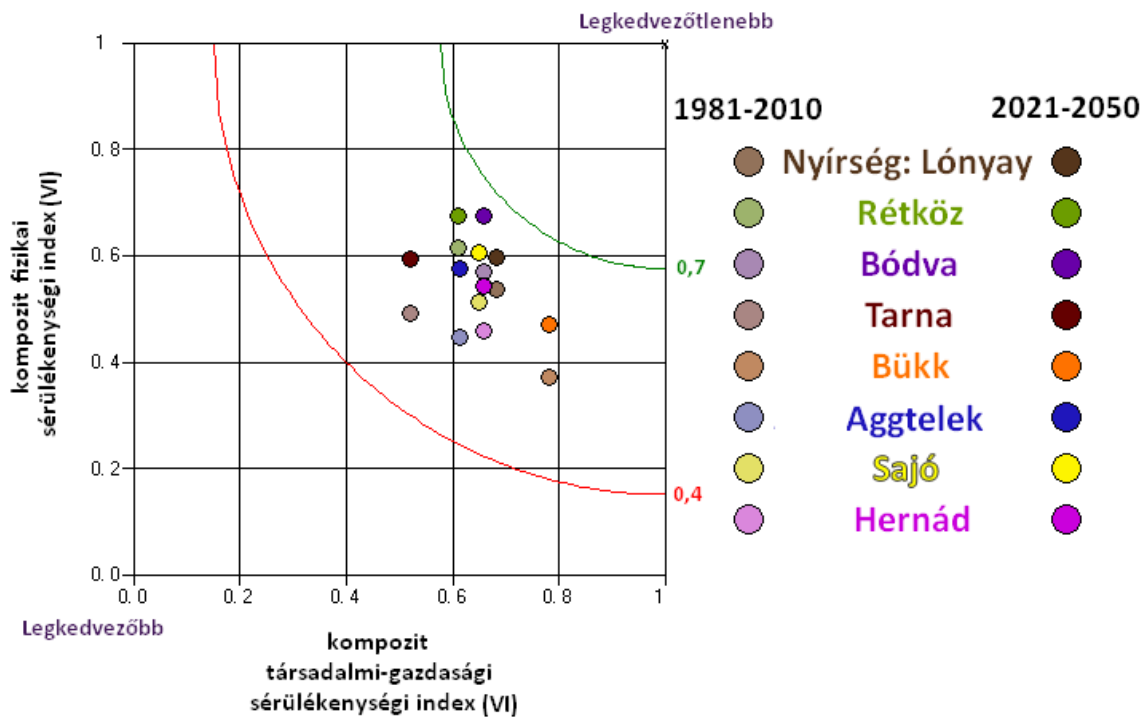
A parti szűrésű vízkészletet reprezentáló Sajó és Hernád kijelölt részvízgyűjtőinek társadalmi-gazdasági adottságai, ennek következtében az ezeket reprezentáló társadalmi-gazdasági sérülékenységi indexei azon egyszerű okból kifolyólag nagyon hasonlóak, hogy a két térség egymáshoz közel, egy megyén belül helyezkedik el. A vizsgálat során a társadalmi-gazdasági indikátorokra megyei bontású adatbázis állt rendelkezésemre, és mivel a Hernád teljes egészében, a Sajó mintaterülete pedig döntően Borsod-Abaúj-Zemplén megyéhez tartozik, a társadalmi-gazdasági paraméterek értékeiben nincsenek jelentős különbségek. Mindez az 10. táblázatból is leolvasható. A számítások eredményeként a Sajó mintaterület fizikai sérülékenysége nagyobbak adódott a Hernádénál. Ennek oka az indikátorok Hernád mintaterületet jellemző, sérülékenység

szempontjából kedvezőbb értékeiben keresendő, így többek közt a lefolyást jellemző CN-érték, vízhálózat-sűrűség, kavicssterasz jellemzői, csatornázott lakosság aránya, vagy a háttér vízminőséget jellemző értékekben (10. táblázat). Kezdeti feltételezésünk szerint a Sajó – mára már bezárt kazinbarcikai telepig kijelölt – részvízgyűjtőinek fizikai sérülékenysége a – napjainkban is üzemelő Csúcsvízmű kútjaiig tartó – Hernád folyó vízgyűjtőjének sérülékenységénél nagyobbak kellene, hogy adódjon, amellyel – a fizikai folyamatokon keresztül, részben legalábbis – magyarázni lehetne a telep múltbeli bezárásának jogosságát. A kompozit fizikai sérülékenységi index értékei alapján a Sajó mintaterülete valóban sérülékenyebbnek bizonyult a Hernádnál (11. táblázat).



11. ábra: A Decimaker programmal ábrázolt parti szűrésű vízkészlettel jellemezhető két mintaterület sérülékenysége.

A négy vízkészlet-típust reprezentáló mintaterületek sérülékenységeinek páronkénti vizsgálata után a nyolc vizsgált vízgyűjtő sérülékenységét egymáshoz viszonyítva egy közös diagramon ábrázoltam (12. ábra). A program tárolja a mintaterületeket reprezentáló pontok koordinátáit, azaz a kompozit fizikai és a társadalmi-gazdasági indexeket, valamint az integrált sérülékenységi index értékeit is. A mintaterületekre adódott sérülékenységi indexeket számszerűen mindkét vizsgált időszakra – az eredmények értékelése során több alkalommal meghivatkozott – 11. táblázatban jelenítettük meg.



12. ábra: A Decimaker programmal ábrázolt nyolc mintaterület sérülékenysége.

A mintaterületekre kapott integrált sérülékenységi index értékeinek kategorizálása alapján a vizsgált térségek kivétel nélkül az elfogadható tartományba estek mindkét vizsgált időszakra végzett számítás eredményeként, a kategórián belüli értékeikben azonban adódtak számszerűsíthető különbségek. A diagram és a táblázat alapján megállapítható, hogy az integrált sérülékenységi index értéke alapján a jelent reprezentáló referencia időszakra a porózus vízadó rétegű Rétköz térsége adódott a legsérülékenyebbnek (0,612). 0,6 közeli értékével a rangsorolás szerinti második helyet a felszíni vízkészletű Bódva hazai vízgyűjtő területe foglalja el, harmadikat a Nyírség tájegységén belüli Lónyay-főcsatorna vízgyűjtője (0,580), negyedik helyen pedig a felszíni vízkészletű Tarna (0,502) áll. A referencia időszakra a kompozit indexeket egyesítő integrált index értékei alapján

ivóvízkészleteikre vonatkozóan legkevésbé sérülékenynek a karsztvidékek, valamivel sérülékenyebbnek pedig a parti szűrésű Sajó (0,554) és a Hernád (0,514) részvízgyűjtői adódtak. Összességében elmondható, hogy a számítások alapján jelenleg leginkább a porózus vízáadó rétegű készlettel jellemezhető területek sérülékenyek, valamivel kevésbé a felszíni és parti szűrésű vízkészletek, legkevésbé pedig a karsztvíz-készletű térségek (11. táblázat).

Az ivóvízkészletek éghajlatváltozás által befolyásolt sérülékenységeinek számszerűsített értékeit grafikusán (12. ábra) és táblázatos formában (11. táblázat) is megjelenítettem. 2021-2050-re a referencia időszakhoz képest a vizsgált vízgyűjtők relatív területi besorolása változott. Az éghajlatváltozás – az általunk választott módszer alapján a klímaindikátorokkal történő jellemzésével – átlagosan 0,065-tel növelte a mintaterületek integrált sérülékenységi indexét. A század közepére az integrált sérülékenységi index értékében a legkisebb pozitív változás (0,039) a Rétköz mintaterületet, míg a legnagyobb (0,065) az Aggteleki-karsztot jellemezte. Az integrált sérülékenységi index értéke alapján a felszíni Bódva hazai vízgyűjtője bizonyult a legsérülékenyebbnek, értékek szerint csökkenő sorrendben ezt követi a két porózus vízáadó rétegű mintaterület – Rétköz: 0,651 és a Lónyay-főcsatorna vízgyűjtője: 0,624 –, majd a parti szűrésű vízkészlettel jellemezhető területek, a Sajó (0,619) és a Hernád (0,578) részvízgyűjtői. A század közepére a vizsgált mintaterületek közül – hasonlóan a referencia időszakra végzett számítás eredményeihez – a legkevésbé sérülékeny mintaterület a Bükki-karszt, második a felszíni Tarna, harmadik az Aggteleki-karszt.

Ivóvízkészlet típusa	Mintaterület	INTEGRÁLT sérülékenységi index		FIZIKAI sérülékenység		TÁRSADALMI-GAZDASÁGI sérülékenység	
		1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050	1981-2010	2021-2050
PORÓZUS	NYÍRSÉG: LÓNYAY	0,580	↑ 0,624	0,537	0,598	0,683	
	RÉTKÖZ	0,612	↑ 0,651	0,614	0,674	0,610	
FELSZÍNI	BÓDVA	0,596	↑ 0,669	0,569	0,675	0,658	
	TARNA	0,502	↑ 0,568	0,493	0,595	0,519	
KARSZTOS	BÜKK	0,473	↑ 0,550	0,373	0,470	0,782	
	AGGTELEK	0,497	↑ 0,588	0,447	0,575	0,614	
PARTI SZŰRÉSŰ	SAJÓ	0,554	↑ 0,619	0,513	0,605	0,649	
	HERNÁD	0,514	↑ 0,578	0,456	0,543	0,658	

11. táblázat: A nyolc mintaterületre vonatkozó kompozit sérülékenységi indexek értékei.

A 4. fejezetben említettük a Pongrácz és mtsai által, 11 kiválasztott regionális klímamoddellel a Kárpát-medence térségére végzett vizsgálatot. Ezen futtatások eredményei alapján a század közepére és végére a csapadékmennyiség-változásra vonatkozó becslések jelentősen eltérőek lehetnek. Például a zürich-i ETHZ intézet³⁹ által a brit Hadley Centre⁴⁰ globális klímamodelljének meghajtásával futtatott CLM⁴¹ regionális modell mind a század közepére, mind a végére éves átlagos csapadékmennyiség csökkenést becsül. Összehasonlításként az említett vizsgálathoz kiválasztott 11 regionális klímamoddellel, az 1981-2010-es referencia időszakkal a 2021-2050-es időszakra végzett futtatások alapján becsült éves átlagos csapadékmennyiség-változás Magyarország területére várható átlagértékei a 13. táblázatban láthatók. A trieszti ICTP³⁷ intézet által az ECHAM globális klímamodell meghajtással futtatott RegCM modellel végzett, Magyarországra vonatkozó futtatás eredményét piros színnel emeltük ki a táblázatban.

Intézet rövidítése (meghajtó GCM)	Átlagos éves csapadékmennyiség- változás [%]
	CTL: 1981-2010 jövő: 2021-2050
UKHC (HadCM)	-1,49
SMHI (HadCM)	9,59
SMHI (ECHAM)	2,23
MPIM (ECHAM)	-1,28
KNMI (ECHAM)	-1,72
ICTP (ECHAM)	5,10
ETHZ (HadCM)	-5,24
DMI (ECHAM)	1,48
DMI (ARPEGE)	0,88
CNRM (ARPEGE)	-4,58
C4IR (HadCM)	5,64

12. táblázat: 11 regionális klímamodell által a 2021-2050-es időszakra becsült átlagos évi csapadékmennyiség-változás [%] értékei az ország területére.

³⁹ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich – Svájci Szövetségi Műszaki Intézet (<https://www.ethz.ch/de.html>)

⁴⁰ <http://www.metoffice.gov.uk/climate-guide/science/science-behind-climate-change/hadley>

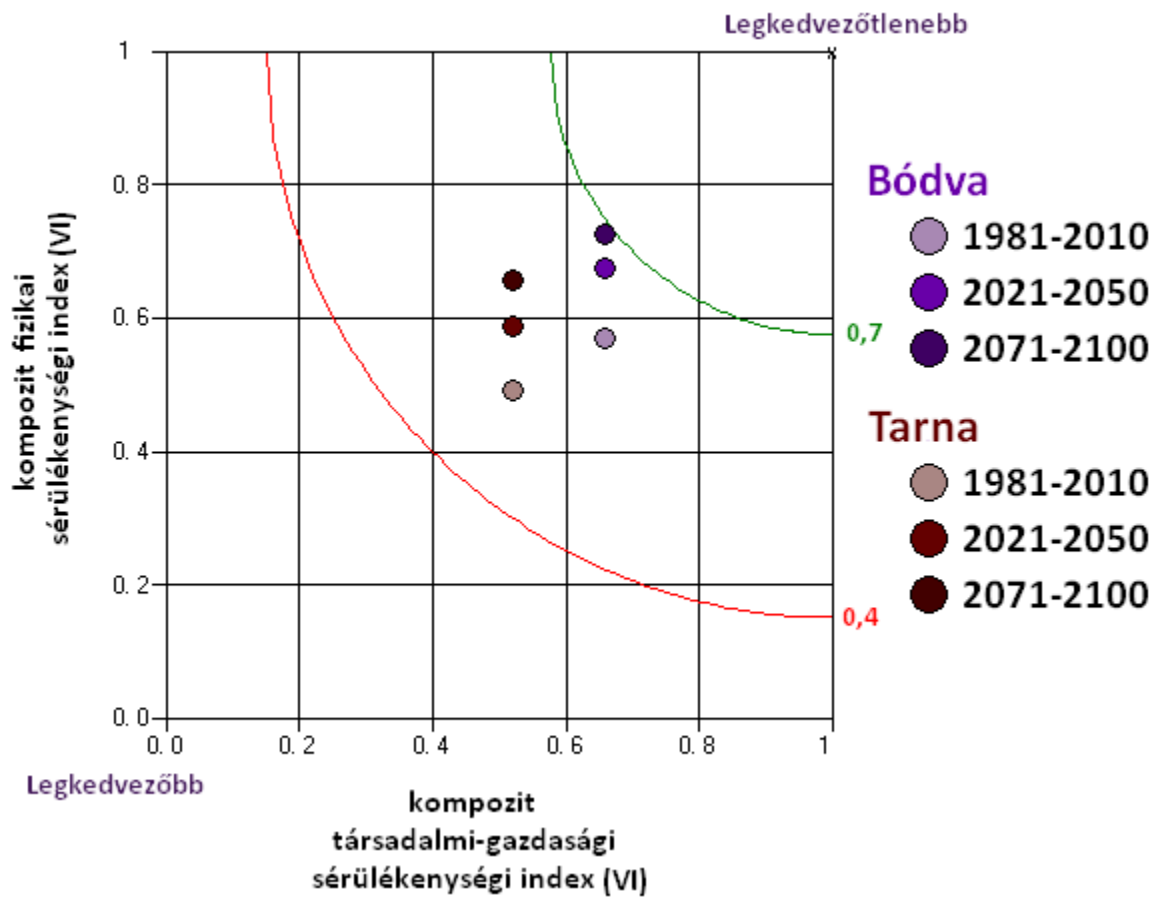
⁴¹ <http://www.clm-community.eu>

Hasonló változó becslés adódott a 2070-2100 közötti időszakra is. Megvizsgáltam, hogy a sérülékenység mennyire érzékeny a becsült csapadékmennyiség-változásra. Példaképpen a felszíni vízkészletű Bódva és a Tarna vízgyűjtőjére vonatkozó átlagos éves csapadékmennyiséget rendre 5%-kal, illetve 10%-kal csökkentettem a 2071-2100-as időszakra a 2021-2050-es időszakhoz képest. Ezt azzal indoklom, hogy vizsgálataink során a CC-WARE projekt célkitűzéseire igazodva kizárólag a RegCM regionális klímamoddellel végzett futtatások eredményeit vettük figyelembe. Habár a kapott adatsorokat – a korábban már említett, modellt jellemző jelentős felülbecslés mértékének csökkentése érdekében – korrigáltuk, a RegCM modell országosan éves és féléves szinten is csapadékmennyiség-növekedést prognosztizál.

FELSZÍNI vízkészlet	Legkedvezőtlenebb		Tényleges érték						Legkedvezőbb	
	1981-2010	2021-2100	BÓDVA			TARNA			1981-2010	2021-2100
			1981-2010	2021-2050	2071-2100	1981-2010	2021-2050	2071-2100		
éves átlaghőmérséklet	11,43	14,37	9,33	10,32	12,39	9,92	10,91	13,08	8,76	9,72
éves csapadék	451,3	532,2	592,3	628,9	597,5	592,4	632,6	569,3	656,5	942,5

13. táblázat: A klímaindikátorok módosított számításához szükséges értékei.

A módosítások programba való bevitele, valamint a két szükséges számítás elvégzése után a két felszíni mintaterület (Bódva és Tarna vízgyűjtője) század közepére és század végére vonatkozó sérülékenységét a referencia időszak eredményeivel egyidejűleg grafikusán ábrázoltam (13. ábra). A vízkészletek klímaváltozás hatására változó sérülékenysége vizsgálatának kiemelkedő jelentőségét (azon egyszerűsítés mellett, hogy egyéb indikátorokra az éghajlatváltozás hatását nem vizsgáltuk) alátámasztja az érzékenység-vizsgálat alapján kapott eredmény, miszerint ha a vízgyűjtők éves csapadékmennyisége – a század végére a század közepéhez képest 5%-kal, illetve 10%-kal – csökken, az ivóvízkészletek fizikai sérülékenysége nagymértékben növekszik.



13. ábra: A két felszíni vízkészletű mintaterület három időszakra vonatkozó grafikusán ábrázolt sérülékenysége az érzékenység-vizsgálat alapján.

6. Összefoglalás

Dolgozatomban az éghajlatváltozás befolyásolta ivóvízkészletek sérülékenységevel foglalkoztam. A délkelet-európai régió 10 országának részvételével zajló CC-WARE projekt célkitűzéseivel összhangban vizsgálatainkhoz a négy különböző vízkészlet-típust reprezentáló nyolc észak-, illetve északkelet-magyarországi mintaterületet jelöltünk ki. A négy vízkészlet-típusra elvégeztük a sérülékenység-vizsgálat alapját képező indikátorszerkezetek megállapítását az adott készletet befolyásoló tényezők és folyamataik alapján. Az egyes indikátorok súlyainak és kiegyenlítő hatásainak becslése után a rendelkezésünkre álló adatbázisok alapján meghatároztuk az indikátorok számításokhoz szükséges – mintaterületekre és az országos változékonyságra jellemző – értékeit. A nyolc, vízkészletenként két-két mintaterületre a kompozit programozás elvén alapuló módszerrel a CC-WARE projekt által preferált 2021-2050-es időszakra (1981-2010-es referencia időszakkal) sérülékenység-vizsgálatot végeztünk. A klímaindikátorok, így a csapadékmennyiség és a hőmérséklet várható változásainak mértékét a RegCM regionális klímamoddellel az A1B közepes kibocsátási forgatókönyv figyelembevételével becsültük. Az eredmények alapján azt a következtetést vontuk le, hogy az éghajlatváltozás – melyet vizsgálataink során a klímaindikátorok értékeiben történő becsült változásokon keresztül vettük figyelembe – a vízkészletek sérülékenységét várhatóan növelni fogja.

A sikeresen adaptált módszerrel tetszőleges mintaterületre elvégezhető a vizsgálat, amennyiben a szükséges adatbázisok rendelkezésre állnak. A klímaváltozás hatására változik a területhasznosítás, ezen keresztül a talaj hidrológiai tulajdonságai, a felszíni lefolyás, és sok más paraméter. Az eredmények ezért – az éghajlatváltozás egyéb indikátorokra gyakorolt hatásának figyelembevételével – további vizsgálatok tárgyát képezhetik. A klímaváltozásból adódó bizonytalanság figyelembevétele több regionális éghajlati modell eredményének együttes vizsgálatával valósulhat meg. Az éghajlatváltozás bizonytalanságát szem előtt tartva a sérülékenység feltérképezését hasznos lehet a távolabbi jövőre – a 2071-2100-as, század végi időszakon keresztül – is elvégezni. Elsősorban vízminőségi szempontból érdemes lehet egy további, éghajlati szélsőségeket jellemző indikátor bevonása a szerkezetekbe. Szükséges továbbá a súlyszámok és az egyensúlyozó tényezők pontosítása a tapasztalatok alapján, összevetve más módszerekkel kapott sérülékenységi adatokkal.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CC-WARE projekt (SEE/D/0143/2.1/X).

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. habil. Bogárdi Istvánnak, valamint Simonffy Zoltánnak, hogy a kezdetektől fogva türelemmel és irigylésre méltó szakmai tudásuk átadásának maximális igyekezetével kísérték végig közös munkánk során, valamint Dr. Pongrácz Ritának, aki azon felül, hogy hasznos szakmai tanácsokkal látott el, időt és energiát nem spórolva készséges segítségével támogatása felől mindannyiszor biztosított.

Köszönettel tartozom továbbá Ács Tamásnak, aki szintén segítségemre volt az ArcView GIS szoftver munkánkhoz szükséges szintű ismereteinek elsajátításában, valamint a program használata során rapszodikusan felmerülő problémák gyors és hatékony megoldásában.

Végezetül, de nem utolsó sorban köszönettel tartozom családomnak és barátaimnak, akik tapasztalataikkal, biztatásukkal és megértésükkel nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy ez a dolgozat elkészülhessen.

Irodalomjegyzék

- Adger, W.N., 2006: Vulnerability. *Global Environ. Change*, 16, 268–281.
- Animesh, K. G.; Carlo G.; Fabrice G. R., 2012: Climate Change Adaptation and Vulnerability Assessment of Water Resources Systems in Developing Countries: A Generalized Framework and a Feasibility Study in Bangladesh. Interneten elérhető: <http://www.mdpi.com/journal/water>
- Babel, M.S.; Wahid, S.M., 2009: *Freshwater Under Threat: South Asia—Vulnerability Assessment of Freshwater Resources to Environmental Change*; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya.
- Balica, S.F.; Douben, N.; Wright, N.G., 2009: Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Sci. Technol.*, 60, 2571–2580.
- Bates, B.C.; Kundzewicz, Z.W.; Wu, S.; Palutikof, J.P., 2008: *Climate Change and Water*; Technical Paper for Intergovernmental Panel on Climate Change: Geneva, Switzerland.
- Birkmann, J., 2006: Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions. In *Measuring Vulnerability to Natural Hazards—Towards Disaster Resilient Societies*; Birkmann, J., Ed.; United Nations University Press: Tokyo, Japan; pp. 9–54.
- Bogardi, I.; Bardossy, A., 1983: "Application of MCDM to Geological Exploration," In *Essays and Surveys on Multiple Criterion Decision Making*, ed. by P. Hansen, Springer-Verlag.
- Bogardi, J.; Birkmann, J., 2004: Vulnerability assessment: The first step towards sustainable risk reduction. In *Disaster and Society—From Hazard Assessment to Risk Reduction*; Malzahn, D., Plapp, T., Eds.; Logos Verlag Berlin: Berlin, Germany; pp. 75–82.
- Bohle, H.G., 2001: Vulnerability and criticality: Perspective from social geography. In *IHDP Update 2/2001*; Dyck, E., Ed.; International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change: Bonn, Germany; pp. 3–5.
- Brooks, N.; Adger, W.N.; Kelly, P.M., 2005: The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environ. Change*, 15, 151–163.
- Cardona, O.D., 2001: Estimación Holística del Riesgo Sísmico Utilizando Sistemas Dinámicos Complejos; Ph.D. Dissertation. Technical University of Catalonia, Barcelona, Spain, September.
- Cash, D.W.; Adger, W.N.; Berkes, F.; Garden, P.; Lebel, L.; Olsson, P.; Pritchard, L.; Young, O., 2006: Scale and cross-scale dynamics: Governance and information in a multilevel world. *Ecol. Soc.*, 11, article 8. Interneten elérhető: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art8/> (accessed on 29 Mar 2012).
- Chalecki, E.L.; Gleick, P.H., 1999: A framework of ordered climate effects on water resources: A comprehensive bibliography. *J. Am. Water Resour. As.*, 35, 1657–1665.
- Cutter, S.L., 1996: Vulnerability to environmental hazards. *Prog. Hum. Geog.*, 20, 529–539.
- Damm, M., 2010: *Mapping Social-ecological Vulnerability to Flooding—A Sub-national Approach for Germany*; Graduate Research Series Volume 3; United Nations University-Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS): Bonn, Germany.
- Formayer, H., Haas, P., 2010: Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters. Deliverable D3.2 RCM output localization methods (BOKU-contribution of the FP 6 CECILIA project). <http://www.cecilia-eu.org/>
- Füssel, H.M., 2007: Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environ. Change*, 17, 155–167.
- Füssel, H.M.; Klein, R.J.T., 2006: Climate change vulnerability assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75, 301–329.

- Gallopín, G.C., 2006: Linking between vulnerability, resilience and adaptive capacity. *Global Environ. Change*, 16, 293–303.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci, and G. T. Bates, 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., M. R. Marinucci, and G. T. Bates, and G. De Canio, 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.
- Gober, P.; Kirkwood, C.W., 2010: Vulnerability assessment of climate-induced water shortage in Phoenix. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107, 21295–21299.
- Goicoechea, A.; Don Hansen, R.; Duckstein, L., 1982: Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. 519.
- Hamouda, M.A.; Nour El-Din, M.M.; Moursy, F.I., 2009: Vulnerability assessment of water resources system in the Eastern Nile Basin. *Water Resour. Manag.*, 23, 2697–2725.
- Hinkel, J., 2011: Indicators of vulnerability and adaptive capacity—Towards a clarification of the science policy interface. *Global Environ. Change*, 21, 198–208.
- Hurd, B.; Leary, N.; Jones, R.; Smith, J., 1999: Relative regional vulnerability of water resources to climate change. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 35, 1399–1409.
- Hyde, K.M.; Maier, H.R.; Colby, C.B., 2004: Reliability-based approach to multicriteria decision analysis for water resources. *J. Water Res. Pl-ASCE*, 130, 429–438.
- IPCC. Annex B, 2001: Glossary of terms. In *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*; McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; p. 995.
- Jones, R.N., 2001: An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments. *Nat. Hazards*, 23, 197–230.
- Kundzewicz, Z.W.; Mata, L.J.; Arnell, N.W.; Döll, P.; Kabat, P.; Jiménez, B.; Miller, K.A.; Oki, T.; Sen, Z.; Shiklomanov, I.A., 2007: Freshwater resources and their management. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; pp. 173–210.
- Luers, A.L., 2005: The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change. *Global Environ. Change*, 15, 214–223.
- Mercer, J., 2010: Disaster risk reduction or climate change adaptation: Are we reinventing the wheel? *J. Int. Dev.*, 22, 247–264.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005: *Ecosystem and Human Wellbeing: Current State and Trends*; Island Press: Washington, DC, USA.
- Moss, R.H.; Brenkert, A.L.; Malone, E.L., 2001: *Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach*; Technical Report PNNL-SA-33642; Pacific Northwest National Laboratory: Richland, WA, USA.
- Pandey, V.P.; Babel, M.S.; Kazama, F., 2009: Analysis of a Nepalese water resources system: Stress, adaptive capacity and vulnerability. *Water Sci. Technol.*, 9, 213–222.
- Pandey, V.P.; Babel, M.S.; Shrestha, S.; Kazama, F., 2011: A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins. *Ecol. Indic.*, 11, 480–488.

- Pandey, V.P.; Babel, M.S.; Shrestha, S.; Kazama, F., 2010: Vulnerability of freshwater resources in large and medium Nepalese river basins to environmental change. *Water Sci. Technol.*, 61, 1525–1534.
- Patt, A.G.; Schroter, D.; de la Vega-Leinert, A.C.; Klein, R.J.T. , 2008: Vulnerability research and assessment to support adaptation and mitigation: Common themes from the diversity of approaches. In *Environmental Vulnerability Assessment*, Patt, A.G., Schroter, D., de la Vega-Leinert, A.C., Klein, R.J.T., Eds.; Earthscan: London, UK.
- Pongracz R., Bartholy J., Kis A., 2013: Analysis of precipitation-related climate indices projected for Central/Eastern Europe using bias-corrected ENSEMBLES simulations. 93rd Annual Meeting of the American Meteorological Society.
(<https://ams.confex.com/ams/93Annual/webprogram/Manuscript/Paper215734/PR-et-al-AMS-2013-Paper100.pdf>; Austin, TX. Paper 100, 8p.)
- Pongrácz R., Bartholy J., Miklós E., 2011: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research*, 9, pp. 387-398.
- Renaud, F.; Perez, R., 2010: Climate change vulnerability and adaptation assessments. *Sustain. Sci.*, 5, 155–157.
- Simonovic, S.P., 2012: Water Resources Management: A System View. Interneten elérhető: http://www.siwi.org/documents/Resources/Water_Front_Articles/2009/WRMASystemsView.pdf
- Sullivan, C.A., 2011: Quantifying water vulnerability: A multi-dimensional approach. *Stoch. Env. Res. Risk Assess.*, 25, 627–640.
- Tessendorff, H., 1992: The Dublin statement on water and sustainable development. Presented at *International Conference on Water and Environment*, Dublin, Ireland, 29–31 December 1992.
- Thomalla, F.; Downing, T.; Siegfried, E.S.; Han, G.; Rockström, J., 2006: Reducing hazard vulnerability: Towards a common approach between disaster risk reduction and climate adaptation. *Disasters*, 30, 39–48.
- Thywissen, K., 2006: *Components of Risk: A Comparative Glossary*; Studies of the University: Research, Counsel, Education (SOURCE) Publication Series No 2; United Nations University-Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS): Bonn, Germany.
- Torry, W.I., 1978: Bureaucracy, community, and natural disasters. *Hum. Organ.*, 37, 302–308.
- Torry, W.I.; Anderson, W.A.; Bain, D.; Otway, H.J.; Souza, F.D.; Keefe, P.O. , 1979: Anthropological studies in hazardous environments: Past trends and new horizons. *Curr. Anthropol.*, 20, 515–540.
- Turner, B.L.; Kasperson, R.E.; Matsone, P.A.; McCarthy, J.J.; Corell, R.W.; Christensen, L.; Eckley, L.; Kasperson, J.X.; Luerse, A; Martello, M.L.; *et al.*, 2003: A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100, 8074–8079.
- UN-Water., 2012: *Key Messages on Climate Change and Water Prepared for COP-15*; UN-Water: New York, NY, USA.
Interneten elérhető: http://www.unwater.org/downloads/UNWclimatechange_EN.pdf
- UN-Water., 2008: *Status Report on Integrated Water Resources Management and Water Efficiency Plans for the 16th session of the Commission on Sustainable Development*; UN-Water: New York, NY, USA.
- Vörösmarty, C.J.; Green, P.; Salisbury, J.; Lammers, R.B., 2000: Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289, 284–288.
- Wisner, B.; Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I., 2004: *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*, 2nd ed.; Routledge: London, UK.