

**Hidrogeológiai modellek megbízhatóságának
növelése geostatisztikai módszerek fejlesztésével**

**Az OTKA T48329 sz. kutatási projekt szakmai munkájának
beszámolója**

Témavezető: Dr. Szűcs Péter

Miskolc - Egyetemváros, 2008

I. Szakmai kihívások, tudományos célkitűzések

A szakmai munkánk során egyre inkább világossá vált, hogy a földi vízkészletek véges mennyisége és egyre romló minőségi állapota a fokozatosan növekvő vízigények mellett egyre komolyabb és bonyolultabb szakmai feladatokat és kihívásokat fogalmaz meg a hidrogeológus szakemberek számára is. Ebben a munkában a megbízható és megfelelően pontos hidrogeológiai modellezésnek óriási szerepe van, hiszen a felszín alatti vizek mennyiségi és minőségi állapotával kapcsolatos kérdések megválaszolásban alapvető és sokszor semmivel nem pótolható információkat ad a döntéshozók számára. A hidrogeológiai modellezés eredményeit használhatjuk vízháztartási, vízgazdálkodási, vízellátási, vízbányászati, környezetvédelmi, természetvédelmi, mezőgazdasági, bányászati, geotechnikai, kármentesítési és kárelhárítási problémák megoldásában. Az EU Víz-keretirányelv is számos olyan feladatot határoz meg például a vízgyűjtő-gazdálkodási vizsgálatokban, amelyek megoldásában a hidrogeológia modellezésnek is szerepet kell kapnia. A felszín alatti vizek egyre nagyobb szerepet kapnak az ivóvíz ellátásban és egyéb vízigények kielégítésében a világon mindenütt. Következésképpen még inkább nő a szerepe a vízbányászati célú modellezési eljárások és egyéb víztermelési módszerek fejlesztésének annak érdekében, hogy megfelelő mennyiségű és minőségű felszín alatti vizet lehessen szolgáltatni a különböző éghajlat változási tendenciákat és népesség növekedést prognosztizáló jövőben is.

Kutatási és gyakorlati munkánk során sokszor tapasztaltuk azt is, hogy igen gyakran nem rendelkezünk elegendő számú mérési adattal a felszín alatti igen bonyolult heterogén és anizotrop földtani környezetben található vízkészleteinkről. Ráadásul sokszor rontja a helyzetet az is, hogy a meglévő adatainkból nem nyerjük ki az összes információt, mert nem megfelelő adatfeldolgozási módszereket alkalmazunk. Ez jelentős mértékben gyengítheti vagy bizonytalanná teheti a felszín alatti vízkészletekkel kapcsolatos döntési pozíciókat.

Mindezek tükrében a hidrogeológia területén végzett elméleti kutatásaink és gyakorlati munkáink során körvonalazódtak azok az alábbiakban felsorolt kutatási célkitűzések, amelyek megoldását nagyon fontosnak tartottuk a jelenben és a jövőben:

- Növelni kell a nagyon sok természeti és egyéb tényezőtől függő hidrogeológiai és vízbányászati modellek megbízhatóságát. Minőségellenőrzött modell paramétereket és modell szimulációkat szabad csak a felszín alatti vizekkel kapcsolatos szakmai döntések esetében felhasználni.
- Fejlesztetni kell és a gyakorló szakemberek számára jobban elérhetővé kell tenni az automatikus modell kalibrációs eljárásokat a hidrogeológiában.
- Be kell vezetni a mérnöki tudományokban egyre szélesebb körben használt globális optimalizációs módszereket a hidrogeológiai automatikus modell kalibrációs eljárásokban és egyéb optimalizációs feladatokban.
- Minél szélesebb körben kell használni az igen robusztus és rezisztens tulajdonságokkal rendelkező leggyakoribb értékek elvét a különböző típusú hidrogeológiai és hidrológiai adatok feldolgozásában.
- Új típusú regressziós eljárások kidolgozására van szükség a hidrogeológiában, illetve a földtudományokban az igen gyakran alkalmazott empirikus modell kapcsolatok pontosabbá való tételéhez.

- Ki kell dolgozni olyan értelmezési eljárásokat, amelyek képesek kezelni a legkülönbözőbb típusú hidrogeológiai adat, illetve hibaeloszlásokat. Mérési és egyéb adataink súlyozása hatékonyan segítheti a szakmai interpretációt.
- Többdimenziós mérési adatainkban is fel kell ismerni az ún. „outlier” vagy kieső adatokat. Ha ún. kieső adataink vannak, akkor szakmai választ kell találni arra, hogy mi az oka a trendtől eltérő jellegnek.
- Jelentősen növelni kell a geostatistikai eljárások alkalmazását a hidrogeológiai modellezésben, hiszen a vízföldtani paraméterek rendkívüli térbeli változékonyságot mutatnak a felszín alatti kőzetekben.
- Olyan matematikai és statisztikai módszereket kell alkalmazni a hidrogeológiai értelmezésben, hogy minél inkább kinyerjük és felhasználjuk a jelentős költségekkel szerzett terepi vagy laboratóriumi mérési adatainkban rejlő információkat.

II. Az alkalmazott vizsgálati módszerek

A hidrogeológia és a vízbányászati modellezés során koncepcionális leírását, illetve közelítését adjuk meg felszín alatti vizekkel kapcsolatos természeti jelenségeknek szakmai tudásunk és tapasztalatunk alapján. A modelljeink, amelyek képesek leírni a felszín alatti áramlási jelenségeket és az anyag-, illetve hő- transzport folyamatokat matematikai egyenleteket alkalmaznak a vizsgált felszín alatti közegre vonatkozó feltételezésekkel. Az alkalmazott modellek használhatósága és megbízhatósága attól függ, hogy a figyelembe vett matematikai egyenleteink a hozzájuk tartozó közelítésekkel és feltételekkel mennyire közelítik a valóságos természeti folyamatokat.

A hidrogeológia egyik legfontosabb matematikai egyenletének tekinthető az 1856-ban publikált Darcy-egyenlet, amely a felszín alatti lamináris szivárgást jellemzi. Már a Darcy-egyenlet alkalmazása során is bizonyos elhanyagolásokat teszünk. Ha a felszín alatti komplex áramlásoknál figyelembe kívánjuk venni az áramlás térbeli irányultságát, időbeliségét és a kőzet inhomogenitásait, akkor a pontosabb hidrodinamikai számítások érdekében az általánosított Darcy-egyenletet, vagyis az általános szivárgási egyenletet kell használnunk. A modellezés során alkalmazott matematikai egyenletek megoldása történhet analitikus eljárással vagy numerikus módszerekkel. A gyakorlatban leginkább elterjedt számítógépes hidrodinamikai modellezés esetében az általánosított szivárgási egyenlet numerikus megoldása történik akár egy véges differenciás, akár egy véges elemes modellezési környezetben a kiindulási és peremfeltételek figyelembe vételével. A kutatási téma keretében a felszín alatti vizek hidrodinamikai viselkedésével kapcsolatos modellezések a véges differenciás elven alapuló MODFLOW eljárással történtek. Az USA Geológiai Szolgálatánál (USGS) kifejlesztett, és szabadon elérhető kódú MODFLOW eljárás a világon szinte mindenütt elfogadott és alkalmazott számítógépes program 3 dimenziós felszín alatti hidrodinamikai vizsgálatokra. A hidrogeológiai és környezetvédelmi célú szimulációkban gyakran alkalmazott transzport modellezés során a vizsgált szennyező anyag koncentrációjának térbeli és időbeli változását leíró differenciál egyenletet oldjuk meg numerikus-közelítéssel az alkalmazott modellrács minden cellájára.

A kutatási tevékenység során széleskörű matematikai és statisztikai eszköztárat alkalmaztunk annak érdekében, hogy növelni lehessen a hidrogeológiai és vízbányászati modellek segítségével készített szimulációk elméleti és gyakorlati használhatóságát és

megbízhatóságát. Emellett a kutatói team mindig is nyitott volt a hidrogeológia tudományában és gyakorlatában a hazai és nemzetközi szinten is megjelenő új és korszerű eljárások megismerésére és adaptációjára.

Kutatómunka eredményeként a hidrogeológiai alkalmazásokba is bevezetett leggyakoribb érték módszerét (angolul „Most Frequent Value”, MFV eljárás) a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén dolgozták ki. Dr. Steiner Ferenc professzor úr által vezetett kutatócsoport dolgozta ki az elméleti hátterét ennek az igen robusztus és hatékony geostatistikai eljárásnak mintegy 30 éve. Ma már az eljárást hazánkban széles körben sikerrel alkalmazzák különböző földtudományi problémák megoldására. A leggyakoribb érték módszer elve az információ veszteség (I-divergencia) minimalizálásából ered. Az MFV módszernek jelentős előnyei vannak a „maximum likelihood” elvből kiinduló klasszikus statisztikai módszerekkel szemben. Az MFV algoritmus és a globális optimalizáció együttes alkalmazása egy hatékony új eszköz lehet a hidrogeológia, illetve a vízföldtani modellezés inverz feladatainak megoldásában. A javasolt új eljárás alkalmazhatósága és előnyei számos szintetikus és valós adatrendszer felhasználásán keresztül lett bemutatva.

A különböző típusú vízföldtani modellezés egyik fő célja egy olyan jól működő modell felállítása, ami a hidrogeológiai és egyéb típusú megfigyeléseket kellő mértékben visszaadja. Matematikai megközelítésből optimalizációt végzünk, hogy megtaláljuk a megoldást. Ez alapján a hidrogeológiai modell paramétereinek az optimális értékét határozzuk meg az inverz vagy automatikus kalibrációs módszerrel. Az inverz folyamat során egy speciális hiba függvényt, vagy más néven egy célfüggvényt minimalizálunk, ami a különbséget vagy az eltérést jellemzi a mért és a modellparaméterekkel számított adatok között. Földtudományi alkalmazásokban a célfüggvénynek általában számos minimuma és maximuma van a többdimenziós paramétertérben. A klasszikus, ún. lokális minimumhely kereső algoritmusok sokszor elakadnak valamelyik lokális minimumban, ahelyett hogy megtalálnák a globális minimumot. A globális optimalizációs módszerek alkalmazása éppen ezért lehetne széleskörű a különböző hidrogeológiai problémák megoldásában. A hazai előzményeket illetően meg kell említeni, hogy felszíni vizeket érintő vízgazdálkodási problémák kezelésére Pintér és Szabó (1986) mutatatta be a globális optimalizálás alkalmazásának különböző lehetőségeit.

Legtöbb esetben a globális optimalizációs módszerek Monte Carlo becslésen alapulnak. A genetikus algoritmus mellett (GA), a Simulated Annealing (SA) globális optimalizáció az egyik legelterjedtebben alkalmazott minimalizálási eljárás a földtudományi és a mérnöki gyakorlatban. Bár hosszabb számítógépes futási időkre kell számítanunk, az SA algoritmus könnyen programozható, és ma már még az ismeretlen paraméterek nagy száma esetén is kellően gyors.

A modell paramétereknek bizonyos értékeket adva a számított vagy teoretikusan mért adatokat származtatjuk. Ez képezi a direkt problémát. A direkt feladat megoldása szolgáltatja a matematikai kapcsolatot a modell paraméterek és a számított vagy szimulált adatok között. A természeti jelenségeket jól közelítő, pontos direkt feladat megoldás alapvető fontosságú egy hatékony inverz, illetve kalibrációs algoritmushoz. A numerikus módszerek alkalmazása nagy szerepet kap a kívánt pontosságú hidrogeológiai vagy vízbányászati direkt feladat számításában

A direkt és inverz feladatok mellett, az alkalmazott statisztikai vagy geostatistikai elv szintén kulcstényező a sikeres modellezésben, mivel az optimalizálandó célfüggvény különböző statisztikai normákon alapul. Sajnos a régi dogma még mindig erősen tarja magát még a gyakorló szakemberek között is, miszerint a mérési hibák közelítőleg normál (Gauss) eloszlásúak. Ennek köszönhető, hogy a maximum likelihood becslésen alapuló legkisebb négyzetek elvének alkalmazása a földtudományokban is igen széleskörűen elterjedt. Ezeknek a klasszikus algoritmusoknak a hatékonysága azonban kérdéses, amikor a vizsgált felszín alatti rendszerben a hiba nem Gauss eloszlású.

A hidrogeológia vizsgálatokban, illetve a modellezési feladatok előkészítésében rendkívül nagy a szerepe a regressziós vagy kiegyenlítő eljárásoknak. Vízföldtani problémák esetében nagyon sokszor alkalmazunk regressziós számításokon alapuló empirikus vagy félempirikus összefüggéseket. A többváltozós lineáris és nem lineáris kiegyenlítési eljárások matematikai háttere sok tekintetben hasonlít a hidrogeológiai modellezés során alkalmazott automatikus kalibrációs eljárások elméleti alapjaihoz. Matematikai szempontból sok esetben nagyon hasonló mátrix műveleteket kell végrehajtanunk az adott szélsőérték feladat során. A különböző típusú vizsgálatok során viszont az is világossá vált, hogy a regressziós eljárások esetében szükség van új módszerek kidolgozására is, ahol a vizsgált földtani és vízföldtani változók közötti természeti kapcsolatok kvantitatív leírása nem találgatáson, illetve szubjektív szakmai megérzésen alapul.

Nem hanyagolható el a geostatistikai eljárások jelentősége sem a hidrogeológiai és vízbányászati modellezési eljárások fejlesztésében. A hidrogeológiai paraméterek rendkívüli térbeli változékonyságot mutatnak a felszín alatt, legyen akár szó a szivárgási tényezőről, vagy a mechanikai diszperziós tényezőről. A vizsgált paraméterek térbeli változékonyságának kezelése érdekében mindenféleképpen szükség van a geostatistikai eljárások széleskörű alkalmazására. Csak így van lehetőség arra, hogy feltárjuk a vizsgált paraméterek változékonyságának földtani és egyéb típusú okait.

III. A tudományos eredmények összefoglalása és gyakorlati alkalmazása

A hidrogeológiai és vízbányászati modellezés igen összetett és számtalan bizonytalansági tényezőt magában foglaló tevékenység. A felszín alatti kőzetekben lejátszódó hidrogeológiai folyamatokat csak a valóság jelentős egyszerűsítésével vagyunk képesek szimulálni. A modellezés folyamata során számtalan hiba lehetőség állhat elő, mint például a rosszul megfogalmazott koncepcionális modell, a mérési és egyéb hibák a terepi adatokban, nem megfelelő határ és kezdeti feltételek, túl sok modellparaméter, nem megfelelő térbeli és időbeli modell diszkretizáció, szimultán kalibrációja a vízhozamoknak és a szivárgási tényező értékeknek (ekvivalencia hatás), az érzékenységi vizsgálatok hiánya, nem megfelelő adat és modellértékelési eljárások, numerikus hibák, stb. A kutatómunka során a modellezéssel kapcsolatos minden bizonytalansági aspektust természetesen idő és egyéb tényezők hiányában nem vizsgálhattunk. Elsősorban azokra a fejlesztési területekre koncentráltunk, ahol szakmai és gyakorlati tudásunk alapján új eljárásokat és eddig nem használt algoritmusokat dolgozhattunk ki a felszín alatti vizekkel foglalkozó szakemberek számára.

Az OTKA kutatás keretében elvégzett elméleti és gyakorlati vizsgálatok alapján a következő megállapítások tehetők a hidrogeológiai és vízbányászati modellek megbízhatóságának növelésével kapcsolatban.

1. Globális optimalizáció alkalmazása a hidrogeológiai és vízbányászati modellezési eljárások automatikus kalibrációs eljárásaiban.

A hidrogeológiai és vízbányászati modellparaméterek pontosabb és megbízhatóbb meghatározása céljából saját fejlesztésű globális optimalizációs algoritmusokat kapcsoltunk össze a MODFLOW, illetve az MT3DMS áramlási és transzport modulokkal a Groundwater Modeling System (GMS) programcsomag segítségével. Így sikerült megvalósítanunk azt, hogy a gyakorlatban jól ismert PEST, UCODE és MODFLOW-2000 PES lokális minimumhely becslésen alapuló inverz kalibrációs algoritmusok mellett a „Simulating Annealing” (SA, illetve VFSA) eljárásra épülő konvergencia, és a tényleges hibafüggvény minimumot produkáló eljárással is értékelhessük a különböző célú modelljeinket. A mai számítástechnika fejlettsége mellett kb. 200 meghatározni kívánt modellparaméterig a javasolt Monte Carlo szimuláción alapuló eljárás nem jelent jelentős futtatási időtöbbletet. A javasolt eljárás hatékonyságát és megbízhatóságát mind lokális, mind regionális léptékű vízbázisvédelmi, vízkészlet-gazdálkodási és transzport modellek sorozatán keresztül bizonyítottuk. Az automatikus kalibrációs eljárások ilyen irányú fejlesztése lehetővé teszi, hogy a szakemberek sokkal több időt és energiát fordíthassanak a modellezési eljárás koncepcionális kérdéseire. A javasolt eljárás további előnye, hogy nem kívánja meg a modell paraméterek kezdeti értékének a tényleges értékekhez közel eső becslését. A megbízhatóbb modellezési eredmények még inkább segítik a felszín alatti vizekkel kapcsolatos kérdések megoldását a szakmai döntéshozók munkájában.

2. A leggyakoribb érték (MFV) módszerének bevezetése és alkalmazása hidrogeológiai adatrendszerek feldolgozásában.

A legkülönbözőbb típusú hidrogeológiai adatok feldolgozásában saját fejlesztésű programok és szubrutinok írásával bevezettük a leggyakoribb érték módszerét. Ennek az igen robusztus és rezisztens statisztikai eljárásnak az alkalmazásával jelentősen növelhető, illetve maximalizálható a hidrogeológiai mérési adatokból kinyerhető információ mennyisége. Ez különösen azokban a gyakorlati esetekben fontos, amikor egy adott vizsgált területről igen limitált a rendelkezésre álló adataink száma. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén működő geostatistikai team (amelynek az OTKA téma vezetője, Szűcs Péter is tagja volt) által kidolgozott, a leggyakoribb érték módszerére épülő eljárásokat eddig elsősorban geofizikai jellegű problémák megoldásában használták. A leggyakoribb érték elvére épült, korábban mélyfúrési adatok kezelésére kidolgozott eljárásaimat módosítottuk és továbbfejlesztettük, hogy figyelembe lehessen venni a hidrogeológiai adatrendszerek specialitásait. További előnyként említhető, hogy az automatikusan számított MFV súly értékek alapján a rendelkezésre álló különböző típusú adatok minőségellenőrzése igen könnyen elvégezhető.

3. A leggyakoribb érték (MFV) módszerén alapuló P-norma célfüggvényként való használata hidrogeológiai és vízbányászati modellek megbízhatóságának jellemzésére.

Bevezettük a hidrogeológiai és vízbányászati modellek megbízhatóságának jellemzésére a leggyakoribb érték módszerén alapuló P-norma használatát. Bebizonyítottuk, hogy a nagy statisztikai hatásfokkal rendelkező P-norma alkalmazása sokkal inkább javasolható

a jelenleg elterjedt modellezési hibajellemzőként használt átlagos hiba (ME), az abszolút hiba (MAE) és az RMSE hiba definíciók mellett a vizsgált modell megbízhatóságának jellemzésére. Az automatikus súlyképzés eredményeként a modell kalibráció során felhasznált különböző mért adatok minőségellenőrzése is megtörténik. A súly értékek alapján könnyen eldönthető, hogy a különböző típusú adatok közül, elsősorban melyek játsszák a döntő szerepet az egyes modellparaméterek meghatározásában. Ez az információ a szokásos érzékenység vizsgálat mellett igen fontos szerepet játszik az aktuális modell általános értékelésében.

4. Hidrogeológiai és vízbányászati modellek illesztési hibáinak széleskörű típus vizsgálatával vissza lehet szorítani a még napjainkban is erőteljesen uralkodó nézetet, miszerint a modellezési hibák Gauss-eloszlással közelíthetőek.

A modellezési gyakorlatban a klasszikus statisztika vezető szerepe még napjainkban is magyarázható annak a régi dogmának az elfogadásával, hogy "a hibák eloszlása mindig normális". Hidrogeológiai modellezési hibák széleskörű típus-meghatározásával megmutattuk, hogy milyen félrevezető lehet a szakemberek részére, ha olyan statisztikai próbákat használnak, mint például a χ^2 -próba. A Monte Carlo szimulációk és valós adatrendszer segítségével bebizonyítottuk, hogy a χ^2 -teszt nem ajánlható a gyakorlatban a hidrogeológiai és vízbányászati modellezési tevékenység során várható eloszlások normalitás vizsgálatára. Még ha a vizsgált minták eléggé különböznek is a Gauss eloszlástól, a χ^2 -teszt elfogadja azokat, mint normális eloszlásút a gyakorlatban leginkább alkalmazott magas szignifikancia szinteken. Ennek eredményeként, amikor χ^2 -tesztet alkalmazunk, a Gauss anyaeloszlás látszólag domináns jelenléte hozzájárulhat a hagyományos (nem robusztus és rezisztens) statisztikai algoritmusok túléléséhez.

5. A gyakorló szakemberek körében leginkább elterjedt „trial-and-error” modell kalibráció eredményeinek javításában az MFV súlyokból képzett hisztogram használata.

Megmutattuk, hogy a vízszint és az egyéb típusú hidrogeológiai adatok (pl. hozam) modellbeli eltéréseinek leggyakoribb érték szerinti súlyozása könnyen használható információt szolgáltat a modellezési eredmények javítására a hagyományos „trial- and-error” kalibrációs folyamat során. Így például a területhasználati korlátozást jelentő vízbázisvédelmi célú védőterületek kijelölése, vagy a kitermelhető vízkészletek meghatározása nagyobb pontossággal és megbízhatósággal történhet. A „trial-and-error” kalibráció minden egyes lépésében, az egyszerűen előállítható MFV súlyok nagyon látványos és hasznos információt nyújtanak minden megfigyelőpontra az aktuális áramlási modell állapotról az illeszkedés jóságának vonatkozásában. A modellezés eredményeként előálló súlyok egyenkénti értékelése mellett, az MFV súlyok hisztogramja szintén hasznos információt ad a kalibráció állapotáról. Ily módon, az eltérésekből származtatott MFV súlyok könnyen gyorsíthatják a „trial-and-error” kalibráció folyamatát és minősítését a gyakorlati szakemberek számára.

6. Terepi próbaszivattyúzási adatok minőségellenőrzött értékelése többlethiba hozzáadással, illetve globális optimalizáció és P-norma alkalmazásával.

A hidrogeológiai vizsgálatokban gyakran alkalmazott terepi próbaszivattyúzási adatok értékelésére újszerű eljárást dolgoztunk ki. A szokásos megoldási módszerek helyett a globális optimalizáció és a P-norma alkalmazásával a vízföldtani paraméterek értékeit pontosabban tudjuk meghatározni. A javasolt inverziós számítás további előnye, hogy egyetlen mért terepi adathalmaz használatával a számított vízföldtani modellparaméterek bizonytalanságát vagy megbízhatóságát is meg lehet adni az MFV

módszer és egy Monte Carlo szimuláció segítségével. Az eredeti mért adatrendszer inverziója során előállt reziduálok értéke alapján becsülni lehet a terepi adatok hibájának a skálaparaméterét. Ennek felhasználásával szuperponálhatunk többlet hibákat az eredeti mérési anyagunkra abból a célból, hogy az értékelési számítást többször elvégezve előállítsuk a hidrogeológiai modellparaméterek bizonytalansági jellemzőit. A javasolt algoritmus jól helyt áll stabilitás, konvergencia és robusztusság szempontjából.

7. Az ACE nem-paraméteres regressziós eljárás adaptációja és széleskörű alkalmazása hidrogeológiai problémák megoldásában.

Végrehajtottuk a Stanford University intézményben Breiman és Friedman (1985) által kidolgozott ACE nem paraméteres algoritmus adaptációját hidrogeológiai többváltozós regressziós vizsgálatokhoz, ahol a vizsgált változók közötti kapcsolat a priori nem ismert. A javasolt nem-paraméteres, teljesen automatizált eljárás kiszámítja a vizsgált változók optimális transzformáltjait többváltozós kiegyenlítési vizsgálatok során. Az algoritmus maximális korrelációt biztosít a vizsgált függő és a független változók transzformáltjai között. Az ACE algoritmus egyik nagy előnye, hogy a legkülönbözőbb típusú és nagyságú adatok együtt kezelhetőek. Az ACE által szolgáltatott transzformáltak részletes vizsgálata új következtetésekre vezethet a vizsgált függő és független változók közötti kapcsolatok feltárásában (pl. ekvivalencia hatás, érzékenység vizsgálat, stb.). Természetesen az ACE algoritmusnak is megvannak a maga korlátai számtalan előnye mellett. Bizonyos esetekben az eljárás különböző eredményekre vezethet, ha megcseréljük a független változó sorrendjét. Másrészt az ACE algoritmus extrém kieső adatokra nagyon érzékenyen reagál. Természetesen itt is ki kell hangsúlyozni, hogy az ACE algoritmus csak akkor lehet tényleg hatékony, modern statisztikai eljárás, ha a vizsgált változók között létezik tényleges fizikai, vagy egyéb természettudományos kapcsolat, és a mérési adataink minőségellenőrzöttek. A bemutatott esettanulmányok (karszthidrogeológiai monitoring adatok vizsgálata, hévíztároló termelési adatok analízise) megmutatták, hogy az ACE algoritmus előnyösen alkalmazható a legkülönbözőbb típusú földtudományi problémák regressziós vizsgálatainál. Természetesen olyan esetekben, ahol a változók közötti kapcsolat laboratóriumi, terepi vagy egyéb vizsgálatok alapján jól definiált, a hagyományos sokváltozós lineáris vagy egyéb típusú kiegyenlítési eljárások is igen hatékonyan alkalmazhatók. Például a Miskolci Egyetem Alkalmazott Kémiai Kutatóintézetének munkatársaival egy olyan széles körben alkalmazható eljárást dolgoztunk ki, amelynek segítségével relatív permeabilitás görbéket lehet meghatározni laboratóriumi kiszorítási adatok segítségével. A mért adatok felhasználásával a javasolt új, relatív permeabilitás viszonyok meghatározását végző eljárás alapösszefüggéseinek meghatározásánál igen széleskörű hagyományos, paraméteres regressziós vizsgálatot végeztem mind az L_2 -norma, mind pedig a P-norma felhasználásával.

8. Másodlagos porozitású vízadó kőzetekben kiképzett termelő és besajtoló kutak közötti hidraulikus vezetőképességi viszonyok meghatározása üzemi termelési adatok alapján az ACE nem-paraméteres regressziós eljárás segítségével.

Az ACE nem-paraméteres regressziós algoritmus igen hatékonyan alkalmazható másodlagos porozitású kőzetekben kiképzett kutak közötti vezetőképességi vizsgálatokra is. Egy fülöp-szigeteki geotermikus mező termelési adatainak és nyomkövetési vizsgálatainak felhasználásával bizonyítottuk a javasolt módszer alkalmazhatóságát és megbízhatóságát. Az új eljárás a felhasználtakon kívül egyéb típusú termelési adatok (pl. nyomás, entalpia és különböző geokémiai alkotók, stb.)

felhasználását is lehetővé teszi, hogy pontosabban megismerhessük a vizsgált felszín alatti rezervoár hidraulikai viszonyait és egyéb tulajdonságait. A hidraulikai viszonyok pontosabb ismerete pedig elengedhetetlen a megfelelő és hatékony visszasajtolási stratégiai kialakításához a geotermikus mezők esetében. A bemutatott eredmények meggyőző módon bizonyítják, hogy az ACE algoritmussal számított vezetőképességi indexeknek tényleges fizikai tartalma van a fluidum áramlással kapcsolatban. A nyomkövetési eljárásokkal szemben a javasolt eljárásnak nagy előnye lehet, hogy rutinszerűen mért termelési adatokat használ fel, s nem szükséges megszakítani a normál üzemenetet.