

SZENNYEZŐANYAG TERJEDÉS MODELLEZÉSE TALAJBAN

Dr. Bakucz Péter egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa

HM ZMNE VSZTK Műszaki tanszék

BEVEZETÉS

Vizsgálatomban a felszín alatti víztérben két anyag elkeveredési jelenségének mechanikai és statisztikus megfontolások alapján vezérelt hidrodinamikai értelmezésével foglalkozok. A szennyezőanyagot egy levezethető, egyszerű absztrakció segítségével a részecskesokaság mechanikai és statisztikai tulajdonságainak elemzésével írom le. Előbb azonban szükségem van a konkrét fizikai folyamat jellegzetességének ismeretére.

Általánosságban, a porózus közegben az áramlás zeg-zugos, váltakozó méretű pórusokban történik. Ha az áramlás lamináris, a pórusokban Poiseuille-típusú áramlás jön létre, vagyis a szemcsék felületén a sebesség zérus, közöttük pedig parabolikus sebességprofil áll elő. Eközben a nagyobb átmérőjű pórusokban az átlagsebesség nagyobb, mint a kisebbekben. A talajszemcsék jelenléte miatt az áramló folyadék sebességének iránya ugyanekkor állandóan változik, azaz eltér az áramlás főirányától. E hatások a folyadék sebességének nagyságában és irányában nagymértékű inhomogenitást okoznak és a folyadék által szállított jelzőanyag részecskéire értelmezett diszperziójához (szétszóródásához) vezetnek.

Dinamikailag a diszperziót két alapvető mechanizmus eredményezi a makroszkópiusan homogén, mikroszkópiusan rendezetlen felszín alatti közegben. Az első mechanizmus geometriai jellegű: A szemcsés porózus közegben az áramcsövek elágaznak, majd újra egyesülnek végtelen sorozatban, s az áramlás főirányával megegyezően haladva a részecske útja ismét keresztezheti

a fő áramvonalat (ez jelenti a folyamat véletlen természetű változékonyságát). A második mechanizmus kinematikai: A részecske haladási sebessége függ az áramcső hidraulikus érdességétől, irányától és a helyi nyomástól is - amely elsősorban a makroszkópikus értelmű nyomásgradienstől való eltérés következtében létrejött mozgásban nyilvánul meg (Saffman, 1959, Sahimi et al., 1983, Kovács, 1984).

Az elemi diszperzió (a gyakorlatban elterjedt kifejezés szerint a hidrodinamikai diszperzió) állandó társa a molekuláris diffúzió, amely a fent nevezett két alapvető mechanizmust módosítja (Matheron, DeMarsily, 1980).

A tisztán mechanikai jellegű hatásokból felépített mechanikai diszperzió jelensége és a szállított anyag kémiai potenciáljában (vagy azzal arányos koncentrációjában) fennálló inhomogenitás következtében ható molekuláris diffúzió jelensége egymástól független, az eredő D_a diszperziós tényezőt a következő formában lehet felírni: $D_a = D_0 + D_m$, ahol D_0 a molekuláris diffúziós tényező, D_m a mechanikai diszperziós tényező (nagyobb áramlási sebességek esetén $D_m \gg D_0$) (Pongrácz, 1981; Poreh, 1965; Ujfaludi, 1986). D_a diszperziós tényező általános esetben tenzor jellegű mennyiség és 9-tagú mátrix-szal jellemezhető az áramlási tér minden pontjában (Bear, 1961). Ez igen bonyolultá teszi a feladat leírását, vannak azonban olyan tényezők, amelyek nagyfokú egyszerűsítést tesznek lehetővé.

Statisztikai megfontolások szerint a porózus közegben kialakuló lamináris áramlásban a fiktív részecskesokaság utazási ideje (átvonulási idő), két tetszőleges térbeli pont között elsősorban azon véletlenjellegű áramvonalaktól függ, amelyeket a jelzőanyag-részecskék a pórusok között követnek. Az egyes részecskék eltérő útvonalakon érkeznek a kiválasztott végponthoz, azaz az odaérkezés idejének statisztikai eloszlása egy, a folyamatra jellemző paraméter

(Bredehoeft, Pinder, 1973; Gelhar, 1978; DeGennes, 1983; Kovács, 1984; Dullien, 1991);).

A részecskék sokasága az állapottér mentén hossz-értelemben terjed szét. A front emellett szétterül a folyamat irányítottságára merőlegesen is. A **részecskék által követett utak** statisztikai eloszlása, avagy szemléletesen hálózatmodellre vonatkoztatva, a kilépési pontok eloszlása a transzverzális diszperzióra utal (Harleman, Rumer, 1963).

A véletlen természetű pórushálózat legelterjedtebb absztrakciója transzportfolyamatok modellezése esetén a póruster hálózatkénti értelmezése, amelyben az ágakban véletlenjellegű áramlás, a csomópontokban pedig teljes átkeveredés játszódik le (DeJosseling DeJong, 1958; Bear, 1972; Kovács, 1984).

AZ ALAPEGYENLET BEMUTATÁSA

A hidrodinamikai diszperzió modellezése porózus közegben a makroszkópikus advektív-diffúzió egyenlettel történik.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \Delta(D \Delta C - uC) \quad (1)$$

ahol „u” a makroszkópikus közép, avagy Darcy-féle sebesség és „C” a makroszkópikus közép, avagy Darcy szintű koncentráció, „D_a” a diszperziós tényező (általánosságban tenzorjellegű mennyiség), „t” az idő (Saffman, 1959).

Akkor nevezik a diszperziós folyamatot makroszkópikusan diffúzivnak, amennyiben az (1) érvényes. A középkoncentráció anizotróp jellegű diffúziós szétterjedése a longitudinális (D_L) és a transzverzális (D_T) diszperziós koefficiensekkel vehető figyelembe. Eme megközelítés fenomenológikus és nem enged mélyebb bepillantást a D_L és a D_T koefficiensek porózus-morfológia függőségébe.

Egydimenziós áramlás esetén a pórusebességnek csak egyetlen 0-tól különböző komponense van, jelöljük ez u -val. X irányú áramlást feltételezve az advektív-diffuzív egyenlet a következőképpen írható fel:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

ahol D_L az áramlás irányába eső (longitudinális), D_T az áramlásra merőleges (transzverzális) diszperzió ($D_T = (0.1-0.3) D_L$) tényezője. A (2) egyenlet értelmezése, hogy a szennyezőanyag terjedése anizotróp, másképpen történik az áramlás főirányában mint arra merőlegesen (Ujfaludi, 1986). Ezen egyenletben az általános bemutatás miatt feltüntettem az y , s a z koordinátákat is, noha jelen dolgozatban egydimenziós áramlásról lesz szó.

Ha a határfeltételek további egyszerűsítésével a transzverzális diszperziót is kizárjuk, a (2) egyenlet is egyszerűsödik:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

ha pedig kizárólag a transzverzális diszperziót tesszük lehetővé, ezt is egy irányra korlátozzuk:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (4)$$

A (3) és a (4) egyenletek alapján végezték el a különböző laboratóriumokban (a speciális határfeltételeket biztosító kísérleti berendezések segítségével) egy sor különböző porózus közeg D_L és D_T értékeinek empirikus meghatározását.

A FELSZÍN ALATTI TÉRBEN ÉRTELMEZETT HIDRODINAMIKAI DISZPERZIÓ MEGHATÁROZÁSÁRA SZOLGÁLÓ ELJÁRÁSOK SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉSE

A hidrodinamikai diszperzió paraméter meghatározására vonatkozó irodalom igen tekintélyes. Ennek oka egyrészt az, hogy a témakör igen sokféle (környezetvédelmi és bizonyos technológiai) folyamat során fordul elő, s az, hogy határtudományról van szó. Ez alatt azt értem, hogy nagyon sokféle tudományterületet érintő kutatás foglalkozik vele. Általános áttekintés során csoportosítottam az áttekintésemben előfordult dolgozatokat. Ezek szerint meg lehet különböztetni az:

a. elméleti jellegű műveket,

amelyekben a diszperziós folyamatok matematikai modellezése numerikusan közelített transzportegyenletek által történik, illetve a

b. laboratóriumi kísérletek, valamint

c. közvetlen gyakorlati alkalmazások leírását,

amelyekben egy ismert numerikus megoldást interpretálva, az azokban szereplő paraméterek hatását mutatják be.

A felszín alatti vizek transzport modellezése esetén a szakirodalom szerint diszperziós folyamatok elemzésekor elsősorban három tényező hatását vizsgálják meg. Ezek a molekuláris diffúzió, a turbulens diffúzió és a hidrodinamikai diszperzió.

Ezeken kívül történeti fejlődést is érzékeltetni lehet. Általános áttekintésben nemzetközi szinten elsők között Schlichter fogalmazta meg az alapproblémát. Századunk felénél Taylor statisztikailag írta le a diszperziós mechanizmust (1953), amit Saffman két híres dolgozatában igen magas szintre munkált ki (1959, 1960). Scheidegger (1954) szintén statisztikai eszközökkel kezelte a diszperziós problémát (1954). Aris mutatta ki, hogy a diszperziós folyamatok fontos tényezője a szemcsés közeg talajmechanikai tulajdonsága, s egy csőmodellt ajánlott a diszperziós tényező meghatározására. Laboratóriumi kísérleteket 1960-ban Bear mutatott be elsőként, ahol az egy és a kétdimenziós

szemcsés közegbeli diszperziót egydimenzióban (Bear-torony), s kétdimenzióban (Christiansen-szűrő) vizsgálta, s a kísérleti eredményeinek kiértékelésére statisztikai mennyiségeket használt (1961). A folytatásban Blackwell (1962); Dagan (1967) mutatott be kísérleti eredményeket.

Jacob Bear munkássága meghatározó volt a 60-70-es években, amikor tudományos beszámolóin túlmenően könyveket is írt a felszín alatti vízmozgások jellegzetességeiről, modellezési lehetőségeiről (1964, 1972, 1979). Jó összefoglalást adott az 1978-es év előtti diszperziós kutatásokról Bertsch, aki a longitudinális és transzverzális diszperzivitás meghatározását tekintette (1978).

Hazai irodalmak közül kiemelkedik Kovács György munkássága, aki a 1970-es évek elejétől (1972) kezdődően foglalkozott irodalmilag a hidrodinamikai diszperzió kérdésével. Első átfogó műve e témában, s amely a magyar nyelven megjelent első dolgozat is, az 1981-ben megjelent közleménye volt. Ebben kiemelten foglalkozik a hálózatmodell különféle realizálási lehetőségeivel. A továbbiakban megteremtette a diszperzió statisztikai szemléletének honi alapjait (1984). Elméletének kiteljesedését korai halála akadályozta meg.

A HIDRODINAMIKAI DISZPERZIÓ ELMÉLETI ÉRTELMEZÉSE

Dolgozatomban a hidrodinamikai diszperzió értelmezését a számítógéptudományi alkalmazásokhoz közeli állapotterben valósítom meg. Ez a pórusok véletlen eloszlására jellemző hálózatmodell és az un. fraktál mintázatok felvétele és elemzése.

Az elsőben, a műszaki gyakorlatban már elterjedt nézet szerint a porózus talajszerkezet helyettesíthető szabályos vagy szabálytalan térbeli eloszlású csőhálózattal (Kovács, 1984). A második, a vízgazdálkodási gyakorlatban újszerű megközelítés szerint a laboratóriumban végrehajtott modellezésszintű

diszperziós folyamat eredményül kapott térbeli mintázat statisztikai elemzésén keresztül hajtható végre a modellezés.

A talajszerkezet statisztikus szemlélete

A felszín alatti hidrodinamikai és transzportmodellezés esetén a vízrészecskék geometriai és fizikai felvételével és a viszkózus folyadék fogalmának bevezetésével rögzíthető egy fiktív anyagi pont mozgása kinematikai egyenlet formájában, amiáltal rögzíthető az energia megmaradásának elve is. A kontinuitási egyenlet, amely az anyag megmaradását rögzíti, s a kinematikai egyenlet összevetéséből egy olyan differenciálegyenlet hozható létre, amelynek a határfeltételek figyelembevételével való megoldása a transzportfolyamatokat igen hatékonyan jellemzi. Ugyanakkor a nagymértékű közelítés elsősorban a talajszerkezetet alkotó pórushalmaz (általánosságban pórusmátrix) inhomogenitása miatt alakul ki.

A talajszerkezet mikroszintű figyelembevétele a makroszkópikus modellezés támogatására szolgálhat. Ennek következményei, hogy az energia megmaradását leíró mozgásegyenletet olyan módon kell átalakítani, hogy az a vizet vezető tényleges csatornában létrejövő energiaveszteség helyett az áramlási tér teljes metszetében kialakuló ellenállást juttassa kifejezésre, valamint, hogy a Darcy törvény érvényét veszti. A makroszkópikus szemlélet a folytonos mező elvének alkalmazásához vezet, amelyben a reprezentatív elemi egységből (REV) értelmezik az átlagos jellemzőket (Bear, 1972). Szemléletesen úgy lehet elképzelni, hogy adott a makroszkópikus modellezés folyamatának fő vonala, ebből egy adott ponton elágazunk, egy hurkot írunk le, csak azért, hogy pontosabb paraméter értékével térjünk ugyanazon pontra vissza. Amennyiben azonban a mikroszintű modellezést tekintjük, a folytonos mező elvei megsérülnek, a transzportfolyamat diszperziós paraméterének meghatározásakor

(Kovács, 1981). A folytonos mező elvéből az következik, hogy a szivárgási törvények csak akkor alkalmazhatók, amennyiben az áramlási térnek a vízszállítást befolyásoló tulajdonsága a REV-nél nagyobb mintából meghatározott átlagos jellemzővel írható le. Ekkor a következő akadályozó körülmények lehetnek (Kovács, 1984):

- az áramlási tér mérete nem haladja meg a REV néhányszorosát,
- a szerkezeti változékonyság miatt az egyes áramlási csövekben kialakuló transzport jellege eltérő és ezért a szerkezet átlagos paramétere nem jellemezheti a tényleges folyamatot.
- a vizsgált jelenséget elsősorban a szilárd váz mikrojellege határozza meg,
ezért a makroszkópikus leírás nem adhatja meg annak kielégítő jellemzését.

Ezen hatások miatt a szivárgási törvények sérülnek, s az egyedi járatok tényleges méretének ismeretére van szükség.

A talajszerkezet mikroszintű modellezése kezdetben is a diszperzió jelenségéhez kapcsolódott. Taylor (1953) egyenes tengelyű csőreaktorban lezajló diszperziót vizsgált, feltételezte a cső keresztmetszetének a lamináris sebességtartományra jellemző parabolikus sebességeloszlását. Klinkenburg (1957) továbbfejlesztette a Taylor-féle modellt olyan párhuzamos csőhalmazokra, amelyek egymással nem kapcsolódtak össze. Modelljében az egyed csövek átmérője különbözött. A diszperziót definiáló csőátmérő eloszlás nem egyezett a kísérletek során megkapott póruseloszlással. Marle és Defrene (1960) szerint ez a tény a csőhálózat párhuzamosságának a következménye volt. Modelljükben két párhuzamos csövet tételtek fel amelyek szabályos távolságban egymással össze vannak kötve. Ez a modell az ún. teljesen átkeveredett tartályreaktor tipikus esete. Marle és Defrene azonban nem vette

figyelembe a porózus közeg homogenitási és izortopitási követelményét, azaz a modell transzverzális diszperzió meghatározására nem volt alkalmas. Saffman (1959) elsőként modellezett hálózatban álló csövekkel, s kimutatta, hogy a hosszirányú diszperzió mindig nagyobb mint a keresztirányú. Saffmann modelljében a hálózatot alkotó csövek egyenes tengelyűek, hengeresek és egyenlő hosszúságúak. A véletlen síkbeli csőhálózatokban kialakuló áramlások problematikájának vizsgálatára Rothenburg és Matyas (1987) egy olyan modellt alkotott, amelyben a hálózat egyenes tengelyű csövekből áll, a csövek hosszúsága s iránya véletlen halmaz eleme. A hálózatmodell kialakításakor Rothenburg olyan irány és hosszúságeloszlásokat alkalmaz, amelyek az izotrópia és a homogenitás feltételeinek megfelelnek. Kovács (1984) a geometriai struktúra kialakítása során két jelenség vizsgálatát javasolta. Bebizonyította, hogy a diszperzió jelenségét alapvetően a pórusrendszer geometriája determinálja, s így természetesen adódott a követelmény, hogy a pórus geometriából több, elsősorban mérési információra van szükség. A szemcsés talajokból metszeteket készített és vizsgálta a pórusok valószínűségi eloszlását. Azt találta, hogy az jó közelítéssel kétparaméteres gamma eloszlást követ. Ezután a geometriai modellt olyformán alakította ki, hogy az elemi csövek azonos oldalhosszú térbeli rombuszhálót alkotnak. A csőátmérő készletét az empirikus eloszlásfüggvényből való véletlen válogatással építette fel. Bakucz (1994) a talajmetszetről nyert információt maximális mértékben kívánta hasznosítani, s egy változó oldalhosszúságú háromszöghálózatot épített fel. A talajmetszetről készített feldolgozás eredményeképpen meghatározott pórusszélességeloszlás, részecsquesugár-eloszlás segítségével véletlenszerűen válogatva építette fel a hálózatot. A hálózatelemekeken értelmezett egy olyan relációt egyenlet formájában, amelyet felírva, majd megoldva sztochasztikus sebességeloszlásokat nyert. Ezen sebességeloszlásból való véletlen válogatással ezután a diszperziót, mint az

átvonuló részecskék eloszlásfüggvényéből ismert módszerrel nyerhető paramétert határozta meg.

A talajszerkezet statisztikus modellezése újabban számos, a természettudományokban újszerű elmélet alkalmazásában ölt testet. Így pl. az 1950-es évek végén megalkotott un. perkolációelmélet, (Broadbent, Hammersley, 1957) amit a szerzők a porózus közegen való átszivárgással jellemezhető jelenségek leírására hoztak létre. Fontossága azonban az utóbbi időkben domborodott ki az elméleti fizikában, s a fázisátalakulások elméletének hatékony jellemzésére módszerként használták. Lényege röviden az, hogy tekintve egy négyszöghálózatot, a csomópontokat tekinthetjük betöltöttnek vagy nem. Amennyiben a betöltött csomópontok (a pórusok) aránya egy küszöbszámot elér, ekkor a négyszög két oldala között kialakult egy pórusjárat, létrejött az áttörés, a perkoláció. Ezen a jelenséget, bizonyos statisztikai függvényekkel leírva (betöltött pórusok száma, a legnagyobb összefüggő klaszter (pórushalmaz) száma, stb.) megteremthető a kapcsolat statisztikus termodinamika alapvető paramétereivel, s ezáltal a bonyolult elméleteket egyszerű statisztikai modellel lehet reprezentálni (Brosa, Stauffer, 1991).

Másik újszerű elmélet, az un. fraktálgeometria alkalmazása. Felhasználva az ön hasonlóság (definícióját ld. később) fogalmát a szemcsés talajszerkezetre, aminek eredményeképpen hipotetikus szinten mint fraktálszerkezetű objektum tekinthető (Mandelbrot, 1982; Bakucz, 1994d).

A vízügyi szakirodalomban a fraktálgeometria az 1980-as évek közepén jelent meg, s a heterogén földtani szelvényekben értelmezett transzportfolyamatok esetére (Adler, 1985; Wheatcraft, Tyler, 1988). Belátható, hogy adott talajtípusra meghatározható fraktáldimenzió, s így egy olyan determinisztikus, rekurzív algoritmus, amellyel a talajszerkezet véletlen hatásai nagy szignifikancia szinten modellezhetők. Alkalmazva a fraktálok

alapdefinícióját Wheatcraft és Tyler kimutatták, hogy az ilyen víztartókban a diszperzió skála-függő jelenség, azaz az ún. nagytérségi (a heterogén szelvényben értelmezett) longitudinális diszperzivitás növekszik az észlelés skálájának (vagy más kifejezéssel, a részecske befutott útjának) függvényében. Modelljükben, a talaj szerkezetét egy determinisztikus és egy sztochasztikus fraktállal generálták, s a transzportot ezeken, mint részecskepályákon szimulálták.

Harmadik elmélet, a káoszelmélet alkalmazásában a talajszerkezet modellezése nem a geometrián keresztül, hanem a dinamikán keresztül történik. Aref, (1984); Jones et al., (1989); vizsgálataiban a diszperzió kaotikusságát vizsgálták, egy erre a célra megalkotott csavart csőhálózaton. A longitudinális diszperzióra a részecskék $s_{\zeta}(t)$ a t^n kifejezését vizsgálták, ahol az n kitevő 1 és 2 között veendő fel a póruseloszlás függvényében.

Használva ezt a modellt Jones et al. kimutatta, hogy a egymással nem keveredő fiktív részecskék esetében a longitudinális diszperzió varianciája lassabban növekszik, mint a diffúz részecskéé : $s_{\zeta}(t) = t \ln t$ alakban.

IRODALOM

1. Aref, H. [1984]: Stirring by chaotic advection. J.Fluid Mech.143.
2. Bakucz, P. [1994a]: Mintázatvizsgálat a hidrodinamikai diszperzió meghatározására. ELTE Stat.Fiz.Napok.
3. Bakucz, P. [1994]: A térbeli információs rendszerek alkalmazása a hidrodinamikai diszperzió vizsgálatában. MTA Kandidátusi értekezés. VI. Műszaki Tudományok Osztálya.
4. Bear, J. [1961]: On the tensor form of dispersion in porous media. J.Geophys.Res.66.
5. Bear, J. [1972]: Dynamics of fluids in porous media. Dover, New York.

6. Bertsch, W. [1978]: Die Koeffizienten der longitudinalen und transversalen hydrodynamicshen Dispersion. DGM. 22.
7. Blackwell, R. [1962]: Laboratory studies of microscopic dispersion. Soc.Petrol.Eng.2.
8. Bredehoeft, J. -Pinder, G. [1973]: Mass transport in flowing groundwater. Water Res.9.
9. Broadbent, S. -Hammersley, J. [1957]: Percolation processes.I. Proc.Cambr.Phil.Soc.53.
10. Brosa, U. -Stauffer, D. [1991]: Simulation of flow trough a 2D random porous medium. J.Stat.Phys.63.
11. Dagan, G. [1967]: Hydrodynamic dispersion in a nonhomogeneous porous column. J.Geophys.Res.72.
12. deGennes, P. [1983]: Hydrodynamic dispersion in unsaturated porous media. J.Fluid Mech.136.
13. Dullien, F. [1991]: Fluid transport and pore structure. Academic Press, London.
14. Gelhar, L. [1978]: Stochastic analysis of macro-dispersion in a stratified aquifer. Preprint, Caracas.
15. Harleman, D. -Rumer, R. [1963]: Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium. J.Fluid Mech.16.
16. Jones et al. [1989]: Chaotic advection by laminar flow in twisted pipe. J.Fluid Mech.209.
17. Kovács, Gy. [1972]: A szivárgás hidraulikája. Akadémiai, Budapest.
18. Kovács, Gy. [1981]: A mechanikai diszperzió szerepe a felszín alatti szennyeződés terjedésében. Hidrológiai Közlöny. 81/1.
19. Kovács, Gy. [1984]: A szivárgáshidraulika sztochasztikus értelmezése. VITUKI Közlemények.39.

20. Mandelbrot, B. [1982]: The fractal geometry of the nature. Freeman, San Fransisco.
21. Marle, C. -Defrene, P. [1960]: La description mathématique du déplacement de fluides dans un milieu poreux. Rapp.Inst.Fr.Petr.5433.
22. Matheron, G. -de Marsily, G. [1980]: Is transport in porous media always diffusive? Water Res.Res.16.
23. Poreh, M. [1965]: The dispersivity tensor in isotropic and axisymmetric mediums. J.Geophys.Res.70.
24. Pongrácz, A. [1981]: A szennyezőanyagok terjedése talajvízben. Vízügyi Közlemények. 1981/4.
25. Rothenburg, L. -Matyas, L. [1987]: Statistical aspects of flow in a random network of channels. Stoch.Hydr.1.
26. Saffman, P. [1959]: A theory of dispersion in porous medium. J.Fluid Mech.6.
27. Saffman, P. [1959b]: Dispersion due to molecular diffusion and macroscopic mixing in flow trough a network of capparities. J.Fluid Mech.7.
28. Sahimi et al. [1983]: Dispersion in disordered media. Chem.Eng.Commun.23.
29. Scheidegger, A. [1954]: The physics of flow trough porous media. Univ.of Toronto.
30. Taylor, G. [1953]: Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. Proc.Roy.Soc.Ser.219.
31. Ujfaludi, L. [1986]: Longitudinal dispersion tests in non-uniform porous media. Hydrol.Sci.J.31.
32. Wheatcraft, S. -Tyler, S. [1988]: An expolation of scale dependent dispersivities of heterogen aquifers. Water Res.Res. 24.