

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 17	str. 15-18	Zagreb, 2005.
----------------------------------	---------	------------	---------------

UDK 532.5:53.082

Pregledni rad
Review

Jezik/Language: Hrvatski/Croatian

UZ 150. OBLJETNICU DARCYJEVA ZAKONA ON THE OCCASION OF THE 150TH ANNIVERSARY OF DARCY'S LAW

KOSTA URUMOVIĆ

*Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, Pierottijeva 6
kurumo@rgn.hr*

Ključne riječi: Darcyjev zakon, eksperiment, pojam mjerila, hidraulička vodljivost, faktor trenja, sličnosti strujanja, odlaganje gline, stabilnost pijeska, infiltracija padalina, radijalni tok

Key words: Darcy's law, experiment, scale concept, hydraulic conductivity, Darcy-Weisbach friction factor, stream similarity, deposit of clay particle, sand stability, infiltration, radial flow

Sažetak

Koncem ove godine napunit će se 150 godina od prvih pokusa, a slijedeće godine i od tiskanja znamenite monografije: «Les fontaines publiques de la ville de Dijon», u kojemu Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858) u tekstu pod naslovom *Determination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable* prikazuje osnovni zakon strujanja tekućine u poroznome mediju odnosom u kojemu je ostvareno dvostruko osrednjenje brzine gibanja tekućine, a istovremeno je teorijski egzaktno uveden energijski pristup u predočavanju strujanja podzemnih voda. Ovaj zakon nesumljivo je krunski domet ovog izuzetnog znanstvenika, serioznog teoretičara i vrlo učinkovitog praktičara. Njegov ukupni opus pokriva vrlo široko područje vodnog gospodarstva i izgradnje prometnica, a posebice hidrotehnike. Razotkrivanje širine i dubine značenja Darcyjeva zakona ostalo je aktualna tema sve do današnjih dana. Ta dalekovidnost Darcyjeve spoznaje proizlazi iz jednostavne činjenice: brižljivo provedenog i oštoumno interpretiranoga eksperimenta. Rezultat je teorijska jasnoća Darcyjeva zakona koja omogućuje njegova poopćenja i proširenja za raznovrsne uvjete toka u odnosu na vrstu energije koja upravlja gibanjem, tekućinu koja se giba i sredinu kroz koje se to odvija, te mjerilo u kojemu se ono proučava. Ovdje je pozornost prvenstveno posvećena rezultatima pokusa i njegovim originalnim tumačenjima strujanja kroz porozni medij.

Abstract

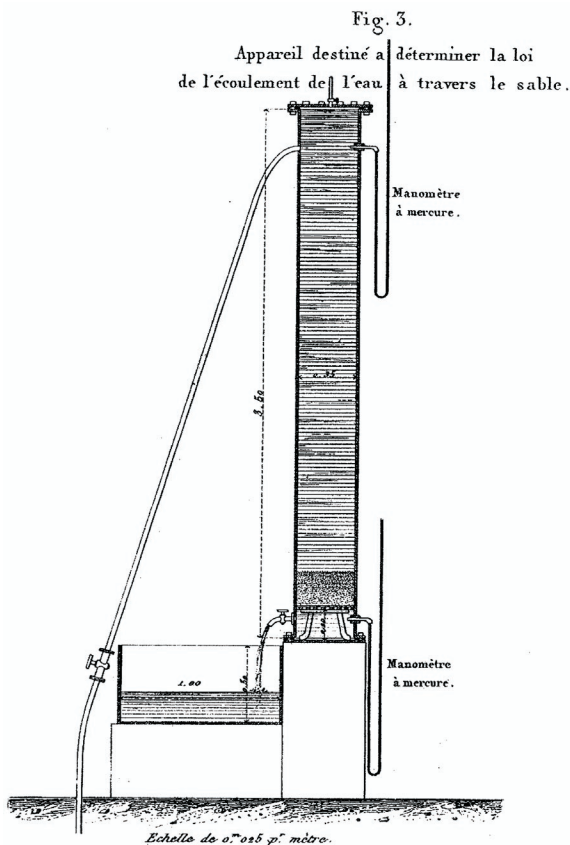
In the end of this year it will be a 150 years since Henry Philibert Gaspard Darcy (1803-1858) has performed first experiments which were a year after followed by publication of the famous monograph «Les fontaines publiques de la ville de Dijon» containing text *Determination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable*. This work is fundamental because the basic law describing flow of liquid through the porous media is given therein. It describes the relation in which the double averaging of the flow velocity is introduced, and at the same time the theoretically correct energy approach to illustration of the groundwater flow is introduced. This law is without doubt the most important and the furthest reaching achievement of such exceptional scientist, who was both serious theoretician and also highly effective in practice. His scientific works are in a quite wide range – from water works to road building, and especially significant in hydrotechnics. Describing the wide scope and deep meaning of Darcy's law has remained an interesting subject even today. The “far sight” of Darcy's comprehension results from a simple fact – carefully performed and sharp-wittedly interpreted experiment. This gave the Darcy's law a theoretical clearness which allows its generalisation and extensions for various flow conditions in respect to the type of energy that controls the movement, type of liquid that flows and of the medium wherein the process takes place, also on the scale at which the process is studied. In this text, emphasis is primarily given to the results of original experiments and to the Darcy's original explanations of flow through the porous medium.

O životu i djelu Henryja Darcyja imali smo zadnjih godina prigodu u uglednim časopisima pročitati osvrtne poznatih znanstvenika (Freez, 1994, Philip, 1995, Brown i dr. 2000; Brown, 2001, 2002, Simmons, 2003). Bili su potaknuti obljetnicom njegova rođenja, a uz odavanje počasti H. P. Darcyju redom su okrenuti pitanjima budućnosti. Da su obljetnice u tom smislu prikladne vjerojatno je najbolje pokazao M. King Hubbert (1956) prigodom 100. obljetnice objavljivanja Darcyjeva zakona u članku koji je pripremljen za Darcy Centennial

Symposium of the International Association of Hydrology održan u Dijonu rujna 1956. godine, a objavljen je u AIME Petroleum Transactions. U članku, koji sažima njegova dugogodišnja proučavanja pojava povezanih s Darcyjevim zakonom, Hubbert prvo vjerno prikazuje Darcyjev pokus i njegova izvorna tumačenja, prevodeći pritom teorijski najvažniji dio Darcyjeva teksta s francuskoga na engleski, a zatim iznosi detaljnu teorijsku raspravu u kojoj predstavlja teorijski izvod Darcyjeva zakona iz osnovnih Navier-Stokesovih jednadžbi. Pritom

demonstrira pojam mjerila Darcyjeva zakona, te prikazuje njegovu valjanost za strujanje višekomponentnog i heterogenog uida kroz porozni medij. Njegov zaključni, pomalo ironični komentar¹ osporavateljima ostao je i danas aktualan. Naravno, time se ne osporava potreba razradbe i prilagodbe Darcyjeva zakona klasi i mjerilu proučavanih pojava.

U originalnoj prezentaciji Darcyjeva zakona sve ima svoj smisao: vrijeme i način provedbe eksperimenta, korištene formulacije u prikazu odnosa i položaj sadržaja u knjizi. Same eksperimente Darcy je, uz pomoć inženjera Charlesa Rittera, proveo u laboratorijima bolnice grada Dijona. Promatrao je uvjete strujanja vode kroz uzorke pijeska iz aluvijalnoga nanosa rijeke Saône. Pri dnu vertikalne čelične cijevi promjera 35 cm (sl. 1) ugrađeno je sito na koje je pri svakom pokusu nasut različiti granulati do različite visine. U razdoblju od 29. listopada do 2. studenoga 1855. god. proveo je četiri pokusa strujanja kroz vertikalni stupac položenoga pijeska. Mjerena je količina protoka pri promjeni razine vode (sl. 2) na vrhu vertikalne kolone koja je bila priključena na



Slika 1. Darcyjev aparat (Darcy, 1856 planche 24, fig.3)

Figure 1 Darcy's apparatus

¹ So far as we have seen no error of any kind with respect to the flow of fluids through porous solids can be attributed to Henry Darcy; and the errors which have been alleged by various authors during recent years appear on closer inspection to have been those committed by the authors themselves (Hubbert, 1956, p. 238).

lokalnu vodoopskrbnu mrežu. Na donjem kraju, ispod sita na kojemu leži kolona pijeska, ugrađen je slobodni izljev izložen atmosferskome tlaku. Pri kontrolnom petom pokusu, koje je izvršio inženjer Ritter 17. i 18. veljače 1856. god, mijenjana je razina vode na oba kraja stupca granuliranih aluvijalnih tvorevina, no pravi razlog je vjerojatno bio dopuna dokumentacije s većim brojem mjerenja i bolja kontrola pokusa.

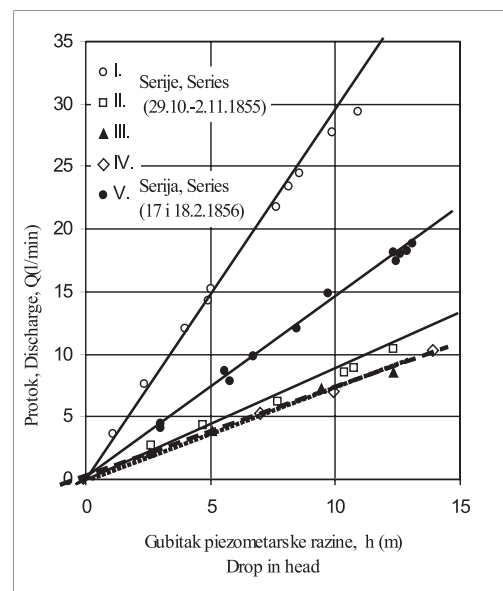
U osnovnoj jednadžbi Darcy prikazuje količinu protoka Q , no u sljedećoj izražava opći smisao zakona definirajući brzinu v odnosom:

$$\frac{Q}{A} = v = K \frac{\Delta h}{l} \quad (1)$$

gdje je A površina presjeka toka, l dužina uzorka, dakle i toka na kojemu je ostvaren pad razine Δh , dok je K koeficijent proporcionalnosti koji se danas obično naziva hidraulička vodljivost (u originalnom tekstu su samo oznake drugačije). Ovime Darcy uvodi pojam brzine u smislu specifičnoga protoka, a i hidrauličke veličine egzaktno osrednjuje po površini i dužini toka, te time otvara mogućnost primjene teorije kontinuuma na strujanje tekućine u poroznom mediju. Ovu jednadžbu Darcy koristi pri razmatranju slučaja nestacionarnoga toka, konkretno pitanja opadanja razine vode iznad stupca poroznoga medija ako je njegovo dno izloženo atmosferskome tlaku:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K}{l} h \quad (2)$$

dakle rješenjem kakvo se i danas koristi pri primjeni permeametera s opadajućom razinom.



Slika 2. Dijagram konstruiran iz podataka Darcyjevih pokusa. Crte pokazuju linearni slijed

Figure 2 Graphs drawn after Darcy's tabular data. Lines show best linear fit

Valja istaknuti da se u svim Darcyjevim atribucijama koeficijenta proporcionalnosti u gornjim odnosima redovito ističe da on ovisi o propusnosti sloja: *un coefficient dépendant de la perméabilité de la couche*, no ne poistovjećuje ga s propusnošću. Organizacija i provedba pokusa povezana je s Darcyjevim iskustvima stečenim promatranjem procjeđivanja podzemne vode pri izgradnji tunela i naročito njegovim istraživanjima otpora pri strujanju u cijevima različitih promjera. Ova je istraživanja Darcy započeo petnaestak godina ranije, tijekom projektiranja vodoopskrbne mreže grada Dijona, a opisao ih je u raspravi o otporima pri toku u cijevima koja je zbog značajnih teorijskih novosti predana Francuskoj akademiji znanosti 1854. god, a tiskana je 3 godine kasnije (Darcy, 1857). Upravo iz ovih istraživanja proizlazi formulacija Darcy-Weisbachova faktora trenja, no posebice je zanimljivo njegovo eksplicitno zapažanje sličnosti njegovih i Poiseuilleovih (1840) izraza strujanja u cijevima unatoč različitim eksperimentalnih okolnosti, te uočavanje pojave turbulentnog toka.

U monografiji o vodoopskrbnom sustavu grada Dijona Darcy prikazuje istraživanje i stanje vodoopskrbe Dijona popraćeno opširnim metodološkim pojašnjenjima. Sastoji se od četiri dijela i sedam dodataka s ukupno 647 stranica teksta i 28 tabli sa slikama (slika pokusa je jedna od 7 na 24. tabli). U prvom dijelu prvo prikazuje stare zdenice povjesnoga značaja, zatim detaljno iznosi ranija istraživanja i zdenačke zahvate, izvore te pregled projekata vodoopskrbnih rješenja. Sadržaj je prožet osobnim i tuđim iskustvima povezanim s arteškim zdenicima, te opisom tadašnjih tumačenja pojavljivanja podzemnih voda i njihovih izvora. Tu se susreće s djelom opata Paramellea koji se u to doba isticao umijećem otkrivanja izvora podzemnih voda. Drugi i treći dio obrađuju akvadukte, cijevnu mrežu i vodospremnike, a u četvrtom dijelu su administrativna i pravna pitanja.

Sažetak bogatoga istraživačkog iskustva i polučene spoznaje, a i brojni konkretni podaci, razvidni su u dodacima monografije. Od ukupno 7 dodataka najznačajniji je dodatak D s naslovom *Filtrage* (pp. 559 – 603) koji donosi široku osnovicu razvitka suvremene hidrogeologije i to ne samo zbog toga jer je u njemu glasovito potpoglavlje *Determination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable* (pp. 590 – 594) nego što raspravlja i o pitanjima strujanja vode koja imaju opće teorijsko i praktično značenje, a važna su za osnovni sadržaj monografije. Već u uvodnoj najavi sadržaja pojedinih dodataka Darcy naglašava da su u ovome dodatku sadržana iskustva povezana sa zakonom tečenja vode kroz pijesak i sumirajuća iskustva. Pri analizi rezultata filtracije vode kroz pješčane filtre brojnih uređaja u Francuskoj, Engleskoj i Belgiji provjerava i valjanost zakona filtracije. Pritom, u fusnoti², eksplicite izražava zapažanje da se

² *J'avais déjà entrevu ce curieux résultat dans mes recherches sur l'écoulement de l'eau dans les tuyaux de conduite de très-faible diamètres, lorsque la vitesse de l'eau ne dépasse pas 10 à 11 centimètres par seconde (Darcy, 1856, p. 570).*

pri velikom brzinama linearnost odnosa između brzine i hidrauličkoga gradijenta gubi. Tom opaskom Darcy je iznio prvo poznato zapažanje o sličnosti strujanja kroz porozni mediji sa strujanjem u cjevčicama, a to je istovremeno i prvo upozorenje na granicu kada odnos brzine i hidrauličkoga gradijenta prestaje biti linearan. U tom su smislu zanimljiva i iskustva o brzinama pri kojim se čestice gline počinju odlagati u poroznom mediju³ i do kojih se održava stabilnost pijeska.⁴

Darcy je podzemne vode počeo proučavati još kao mladi inženjer prateći rezultate izvedbe arteških zdenaca, a kasnije i procjeđivanje u vodoopskrbne galerije kopane u riječnim aluvijima. Takve tokove naziva prirodnom filtracijom za razliku od umjetne filtracije u uređaju za preradu vode. Arteški zdeni su uglavnom bili vezani za krške vodonosnike i vjerojatno je to razlog da je pojava podzemnih voda smatrana isključivo diskontinuiranom. U analizi izvora Darcy se uglavnom oslanjao na iskustva glavoga inženjera Eugènea Belgranda (1846), a za tumačenja opata Paramellea konzultirao se s tada uglednim geologom Prandierom. Stjecanjem okolnosti opat Paramelle je upravo 1856. godine izdao knjigu o umijeću otkrivanja izvora (Paramelle, 1856) koja je do 1896. godine doživjela 4 izdanja. Darcy se sa simpatijama osvrće na tu knjigu u dodatku D i zapaža izvrsnu geološku naobrazbu g. Paramellea. Ipak, upozorava da su neke postavke ostvarive samo u posebnim slučajevima kao što je tvrdnja da se podzemne vode gibaju na jednak način kao i površinske. Navodi i njegovu shemu vodne bilance prema kojoj oko dvanaestine padalina obnavlja podzemne vode i ističe neizvjesnost te procjene, no zaključuje da to može biti dobra polazna osnova za ozbiljna razmatranja.

Osobno shvaćanje značenja iznešenoga sadržaja monografije Darcy ističe uvodno. U proslavu od nepune 3 stranice jedna je posvećena dodatku D. Naročito ističe posebnost u povezivanju pojedinih aspekata strujanja vode i naglašava apsolutnu originalnost «eksperimentalne demonstracije zakona tečenja kroz pijesak». U uvodu spominje da postoji više teorijskih knjiga o razmatranju tematici i tom prigodom navodi prvo izdanje znamenite rasprave svojega školskog kolege Arsen Jules Emile Juvenal Dupuita (Dupuit, 1854) koji je u drugom izdanju ove rasprave (Dupuit, 1863) uključio Darcyjev zakon i predstavio prvo rješenje radijalnoga toka koje se do današnjih dana uspješno primjenjuje, iako još uvijek ponekad s fizikalno neispravnim tumačenjem. Tako je Dupuit izražavajući radijalni tok Darcyjevim zakonom prvi primijenio teoriju kontinuuma na strujanje podzemnih voda.

³ *...que l'argile ... ne commence à résister à l'action d'un courant que lorsque la vitesse descend à 3 pouces, ou 8 ou 10 centimètres par seconde (Darcy, 1856, p. 581).*

⁴ *.. puisque la sable fin a pour de régime 6 pouces, ou 15 centimètres environ par seconde, et qu'il ne faut pas bouleverser la surface du filtre. (Darcy, 1856, p. 581).*

Monografija «Les fontaines publiques de la ville de Dijon» u svojoj cjelini ilustrira širinu Darcyjeva opusa potvrđujući da se radi o vrhunskom inženjeru svojega vremena, a njegova postiguća u istraživanju cijevnih otpora i otkriće zakona strujanja kroz porozni medij su pak djelo znanstvenika budućnosti. Za prvo je bio nagrađen prijamom u Francusku akademiju znanosti u kojoj je preuzeo mjesto glasovitog matematičara Augustin Luis Cauchyja, a najdublji trag u suvremenoj znanosti ostavio je upravo ovim drugim.

Teorijska jasnoća Darcyjeva zakona omogućuje njegovo poopćenje i proširenja za raznovrsne uvjete toka u odnosu na vrstu energije koja upravlja gibanjem, tekućinu koja se giba i sredinu kroz koje se to odvija, te mjerilo u kojemu se ono proučava. U tome suvremena tehnologija otvara sve šire mogućnosti, pogotovo na planu regionalizacije i analize skupnih procesa, pa danas terenska mjerenja analiziranih varijabli postaju nezamjenjiv način eksperimentalne potvrde provedenih simulacija.

Received: 25.09.2005.

Accepted: 20.10.2005.

Literatura

- BELGRAND, E. (1846): Étude hydrologique de la partie supérieure du bassin de la Seine
- BROWN, G. O. (2001): Darcy and Pitot tube in International Engineering History and Heritage, Proseedings of the Third National Congress on Civil Eginieering History and Heritage, ed Rogers & Fredrich, Am Soc. Civ. Eng., 360-366, New York
- BROWN, G. O. (2002): Henry Darcy and making of low.Water Resours Res.38(7), doi: 10.1029/2001 WR000727
- BROWN, G. O., Rogers, J. & GEABRECH, J. (2000): Darcy Memorial Symposium on History of Hydraulics, J. Hydraul. Eng. 126 (11), 799-801
- DARCY, H. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris
- DARCY, H. (1857): Recherches Experimentales Relatives au Muuvement de l'Eau dans les Tuyaux, Mallet-Bachelier, Paris
- DUPUIT, J. (1854): Études théoriques et pratiques sur la conduite et de la distribution des eaux, 1^{re} ed., Carilian Goeury et Vor Dalmont, Paris
- DUPUIT, J. (1863): Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables, 2^{ème} ed. Dunod, Paris
- FREEZ, R.A. (1994): Henry Darcy and the fountains of Dijon. Ground Water 32, 23-30.
- HUBBERT, M.K. (1956): Darcy's law and the field equations of the ow of underground uids, AIME Petr. Transact., 207, 222-239
- PARAMELLE A. (1856): L'art de découvrir les sources, Paris
- PHILIP, J., R. (1995): Desperately seeking Darcy in Dijon, Soil. Sci. Soc. Am J. 59, 319-324
- POISEUILLE, J. L. M. (1840): Recherches experimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres petits diametres. Acad. Sci., Comptes Rendes, 961-967, 1041-1048, Paris
- SIMMONS C. T. (2003): Happy 200th birthday Mr Darcy and thanks for your law! Hydrogeology Journal, V.11, No 6, 611-614