

RAZVOJ HIDRAVLIČNE POGONSKE TEHNIKE SKOZI ČAS – 2. DEL: PRVA HIDRAVLIČNA STISKALNICA

Darko Lovrec

Prve izvedbe črpalk, ki sta jih zasnovala Kepler in Ramelli, so omogočile »pridobivanje« oz. rabo energije tekočine, neodvisno od naravnih virov. A same po sebi še niso predstavljale prodora in širše rabe principa hidravličnega prenosa sil in gibanj. Šele matematični zapis osnovnega zakona hidrostatične in pa prve naprave, ki so potrjevale uporabnost le-tega, so predstavljale temelj nadaljnjega razvoja hidrostatičnega principa prenosa energije.

V tem prispevku bomo podrobneje osvetlili izhodišča, ki so pripeljala do zapisa znanega in široko uporabljenega osnovnega zakona hidrostatične, ki ga je okoli leta 1650 zapisal Blaise Pascal. Njegov zapis in razumevanje, ter praktični dokaz uporabnosti Pascalovega zakona, je predstavljal temelj za gradnjo prve hidravlične stiskalnice, ki jo je šele stoletje in pol kasneje patentiral Joseph Bramah. Navkljub svojemu pomanjkljivemu delovanju, ki je izhajalo predvsem iz stanja tehnologije v tistem obdobju, so prav hidravlične stiskalnice predstavljale zametek in generator kasnejšega razvoja številnih ostalih področij tehnike.

1 Hidrostatika in prva spoznanja

Hidravlične črpalke, ki sta jih zasnovala Kepler in Ramelli, so bile rotacijsko delujoče črpalke, kakršne danes uporabljamo v hidravličnih napravah, kjer jih poganjamo z elektromotorjem ali z motorjem z notranjim zgorevanjem. V prvih primerih uporabe hidrostatičnega prenosa moči in gibanja so bile uporabljene translatorno delujoče enobatne črpalke. Te delujejo na principu sesanja in iztiskanja tekočine in na translatorsnem gibanju bata. Takšna je bila npr. Ktesibiosova potopna batna črpalka, znana iz grških časov. [1] Za Ramellijevo večbatno črpalko pa bi lahko rekli, da predstavlja nadgradnjo enobatne izvedbe. Translatorsno gibanje batov, enega v vlogi črpalke in drugega v vlogi aktuatorja, je bilo tudi osnova za razumevanje in kasnejši matematični zapis hidrostatičnega prenosa sil in gibanja, kot ga danes poznamo kot Pascalov zakon.

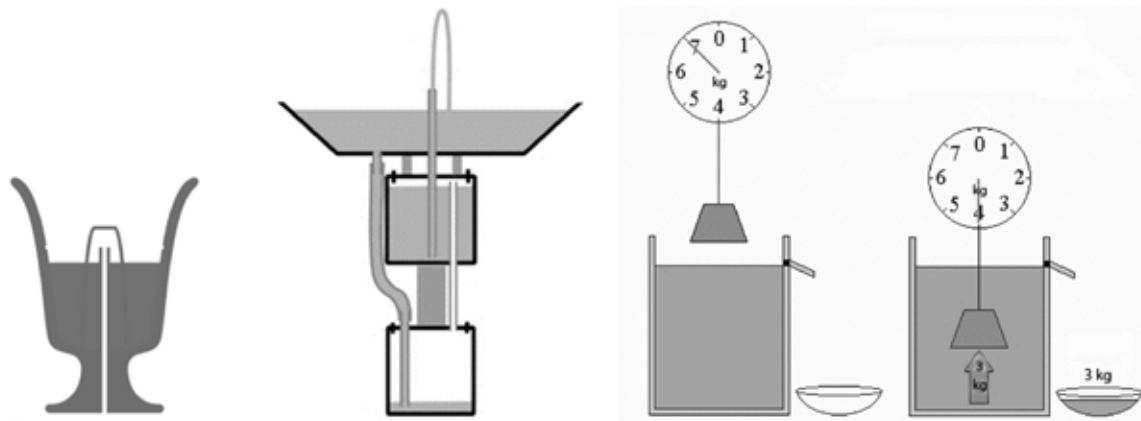
Red. prof. dr. Darko Lovrec, univ. dipl. inž.,
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

Pascalov zakon se dejansko ni pojavil čez noč z zapisom znane enačbe $p = F/A$, temveč so se zametki in interpretacije dogajanja, vezanega na premikanje tekočine in na prenos sil, ki se pri tem pojavljajo, pojavila že veliko prej.

Tako so že Grki poznali vpliv težnosti na tekočino in pojav curka, torej pojav tlaka zaradi težnosti in višine stolpca tekočine. V zvezi s tem bi lahko omenili Pitagorovo čašo (570–495 pr. n. š.) in pa Heronovo fontano (10–70 n. š.); *slika 1*. Vpliv težnosti na tekočino so tako poznali in ga znali tudi praktično prikazati, a podrobneje pojava niso raziskali. Prav tako moramo omeniti tudi Arhimeda (287–212 pr. n. š.), ki mu pripisujemo odkritje Arhimedovega načela, ki povezuje silo vzgona s predmetom, ki je potopljen v tekočino, do teže tekočine, ki jo je predmet premaknil. Rimski inženir Vitruvius (cca. 70–15 pr. n. š.) pa je npr. omenil, da vodne cevi razpadejo pod (pre)visokim hidrostatičnim tlakom. Veliko podrobneje je pojav hidrostatičnega tlaka veliko kasneje podrobno razložil Simon Stevin.

Prav tako je znano, da je bil Leonardo da Vinci (1452–1519) neke vrste pionir pri opazovanju dogajanja pri pretakanju vode; *slika 2*. Pred več kot 500 leti je vizualiziral dogajanje pri toku tekočine ob oviri in zapisal: »Opazujte gibanje površine vode, ki je podobno gibanju las. Ta ima dve dimenziji – eno gibanje se pojavlja v prevladujoči, glavni smeri, ki je posledica teže las, druga smer pa je podobna naključnemu vrtilnemu gibanju vode, kar nekako odgovarja kodrom las.« Tako je Leonardo morda že 400 let pred začetkom analize pretakanja tekočine Osborna Reynoldsa spoznal pojav vrtilčastega gibanja in pomen vrtincev, ki se pojavljajo za oviro, ki se nahaja v toku tekočine.

Bolj podrobno, kot je zgolj opisal in narisal pojav vrtincev pri toku tekočine, je Leonardo prišel izjemno



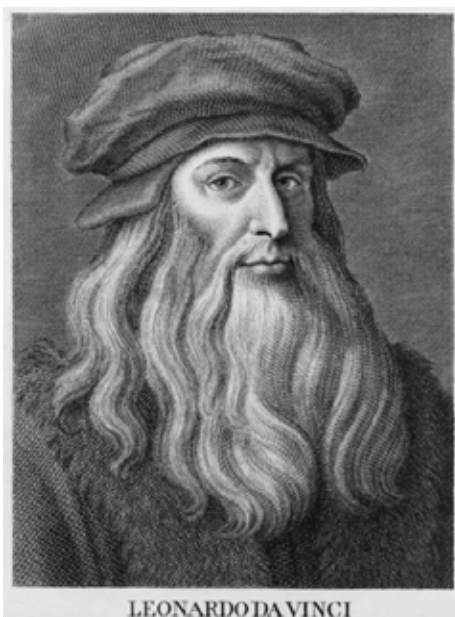
Slika 1 : Prve naprave, delujoče na silo težnosti – Pitagorova čaša (levo), Heronova fontana (sredina), Arhimedovo načelo (desno)

blizu današnjega razumevanja prenosa sil in gibanja s pomočjo bata, delujočega na tekočino, ki je zaprta v nekem valju. Izhajajoč iz delovanja injekcijske brizge je zapisal sledeče opažanje oz. razmišljanje: »Poglejte brizgo. Naj bo del šobe, skozi katerega izteka voda, stokrat manjši od glavnega dela črpalke; voda teče v šobo stokrat hitreje kot znaša hitrost gibanja bata naprej. Recimo, da drugi bat, ki je stokrat manjši od prvega, nasprotuje temu stokrat hitrejšemu gibanju. Zagotovo mu bo uspelo nasprotovati, pod pogojem, če je sila, ki ga potiska, vsaj enaka stotemu delu tiste, ki potiska veliki bat. In če sila preseže stoti del drugega, bo mali bat tisti, ki se bo pomaknil naprej, in velik tisti, ki se bo umaknil.«

Ogromna količina konceptov, zamisli in izumov, ki jih je Leonardo predstavil v svojem življenju, je imela za posledico, da je bilo mogoče do praktične uporabe razviti le majhen delček teh zamisli in idej. Vendar pa se zdi, da je že Leonardo predvidel po-

jav, ki ga je Blaise Pascal podrobneje opisal 150 let kasneje. Ne samo v besedni obliki, temveč z enačbo in na njeni osnovi tudi ostale ugotovitve, vezane na dogajanje pri dveh vzporedno in zaporedno povezanih dveh valjih.

Če bi Leonardo dalje zasledoval svoja razmišljanja in koncept še podrobneje razdelal, bi bila verjetno danes uporabljena SI enota za tlak »leonardo« in ne »pascal«. Morda je z jezikovnega vidika celo dobro, da ni dalje razvil svojih idej o hidrostatiiki, ker bi namesto, o »kilopascalu« na primer govorili o »kiloleonardu«, kar gre »težje z jezika«. [3] Če že ostanemo pri enoti in razen njene izgovorjave pomislimo še na številsko vrednost enote za tlak, potem je povsem jasno, zakaj v praktični rabi uporabljamo enoto »bar«. Izvor besede »bar« izhaja iz grške besede »baros«, ki nekako pomeni težo. Iz tega smiselno izhaja navezava za tlak zaradi učinka težnosti tekočine, kar je tudi poznal Pascal, ko je govoril o hidrostatičnem tlaku.



Slika 2 : Leonardo da Vinci – študija pretakanja tekočine

2 Simon Stevin in umetnost ravnotežja

Po Leonardu je naslednji pomemben mož, ki je ogromno prispeval na področju tehnike, tudi k razvoju hidrostatike, Nizozemec Simon Stevin (1548–1620). Stevin, po narodnosti Flamec, rojen v Belgijskem mestu Brugge, je bil vplivni matematik in inženir s širokim razponom interesov in znanj. Raziskovalno je deloval na številnih področjih tehnike. Tako se njegova spoznanja in odkritja nanašajo na razvoj decimalnih števil, na zakonitosti naklonov oz. klančin in vpliv gravitacije, na optične naprave in zrcala, na številne tehtalne naprave in pripomočke, na problematiko ohranjanja ravnotežja, na navigacijo ter tozadevne naprave ... Razen z »umetnostjo tehtanja« in ohranjanja ravnotežja se je ukvarjal tudi z utrjevanjem vodnih nasipov, načrtovanjem vodnih poti in gradnjo vodnih zapornic ... ter s tem povezanim področjem hidrostatike. Ukvarjal se je tudi s strokovnim izrazoslovjem – za angleške strokovne izraze je iskal primerne flamske strokovne izraze. Njegov široki opus raznolikih raziskav, odkritij in zapisov ter objav je sistematično urejen v številni literaturi novejšega časa in originalov iz njegovega obdobja. [4] do [8]

Z našega gledišča so zlasti pomembna njegova dela, vezana na tekočine, predvsem na vpliv mirujoče tekočine na določene ploskve. Ker je veliko svojega časa preživel na Nizozemskem, se je poklicno ukvarjal z načrtovanjem vodnih kanalov in zapornic. V zvezi s tem je podal osnove razumevanja pojava hidrostatičnega tlaka in njegove velikosti: velikost tlaka v mirujoči tekočini in na določeni globini je odvisna zgolj od globine in gostote tekočine in je neodvisna od razsežnosti, velikosti volumna tekočine – t. i. Stevinov zakon. Prav tako je v zvezi s tem pojasnil pojem povezanih posod in volumnov. Tako je Stevin postavil temelje razumevanja geosta-

tičnega tlaka, neodvisnega od oblike posode – t. i. hidrostatični paradoks: tlak na dnu posod različnih prostornin in različnih oblik je v vseh primerih enak. Tako je bil brez dvoma med prvimi, ki je poglobljeje poznal vpliv hidrostatičnega tlaka in ga tudi zadovoljivo matematično opisal [9], pa čeprav ga v številnih virih omenjajo kot Pascalov paradoks, kajti kasneje ga je Pascal podrobneje opisal in znanstveno dokazal. [10]

Stevin je bil eden prvih mislecev oz. inženirjev nove vrste – matematično dobro podkovanih in usposobljenih inženirjev, ki so prispevali k izgradnji znanja izven univerzitetnega konteksta. Aktivno je sodeloval pri obnovljenem zanimanju za matematiko, ki jo je podpirala večja razpoložljivost antičnih virov, zlasti Arhimedovega dela, in se aktivno vključil v reševanje praktičnih problemov hitro spreminjajoče se družbe.

Kmalu po maturi na Univerzi v Leidenu leta 1583 je že objavljala izvirna dela o aritmetiki in geometriji, medtem ko je praktično delal kot inženir. Po letu 1580 so mu bili podeljeni patenti za različne naprave, številni so bili povezani z drenažo in poglobljanjem dna rečnih strug in zajetij vode. Pri tem delu se je vzpostavilo poslovno partnerstvo s prijateljem Johnom Cornetsom de Grootom, saj je le tako lahko svoje izume uporabil tudi v praksi.

Po letu 1590 je vstopil v službo princa Maurica iz Nassauja, ki mu je bil mentor in tudi svetovalec pri različnih praktičnih zadevah. Večina Stevinovih publikacij v okviru sodelovanja s princem Mauriceom je bila napisana v obliki učbenikov za podajanje znanja na relaciji učitelj-študent. Iz tega obdobja sta pomembni dve Stevinovi knjigi *Umetnost tehtanja in Elementi hidrostatike*. Knjigi sta bili spisani v obliki kot matematična dela v slogu Evklida in Arhi-

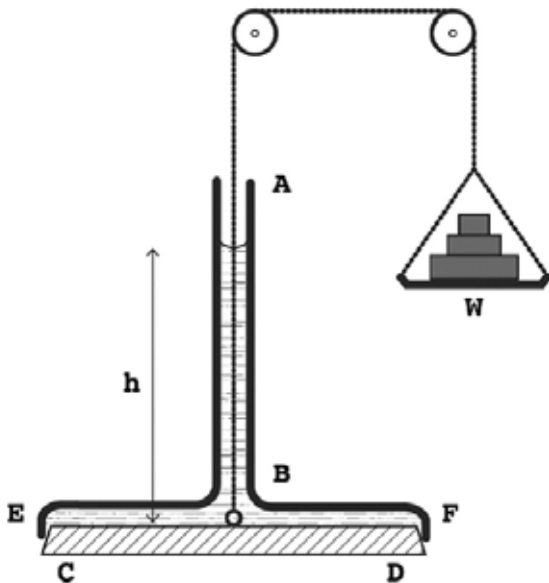


Slika 3 : Simon Stevin – Umetnost tehtanja in učinek tekočine na ploskev zaradi

meda. Objavljeni sta bili leta 1586, to je več kot pol desetletja pred začetkom Stevinovega poklicnega povezovanja s princem Mauriceom. [11]

Stevinovo razumevanje in opis hidrostatičnega tlaka bi lahko povzeli na način, kot ga je sam podal: »Običajno na kateri koli element trdne površine, ki jo omejuje tekočina, ne glede na njegovo orientacijo, deluje sila, ki je enaka teži stebra tekočine s presekom, ki je enak preseku tega površinskega elementa in višine, ki je enaka globini tega površinskega elementa pod površino tekočine.« Ta trditev, ki jo pogosto imenujejo Stevinov zakon, je blizu današnjemu vidiku obravnave hidrostatike, vsebuje »veliko količino pojmovanja hidrostatike«, a ima v razumevanju tudi določene pomanjkljivosti, ki jih v tistih času niso opazili.

Stevinov dokaz njegovega izreka temelji le na t. i. miselnem preizkusu oz. pristopu, kjer je omenjeno, da se določena prostornina tekočine nadomesti z enako prostornino trdne snovi, katere gostota je enaka gostoti tekočine. Primer »tehtalne« naprave, ki jo je uporabljal za izvajanje preizkusov, na podlagi katerih je podal svoje sklepe, prikazuje *slika 4*.



Slika 4 : Stevinova naprava za dokazovanje hidrostatičnega paradoksa [11]

Čeprav ima Stevinovo razumevanje hidrostatike, obravnavano na podlagi teže, določene napačne predpostavke, npr: »Kako je mogoče, da potrebujemo težo več kilogramov za podporo unče vode?« ali »Kako lahko vodno telo pritiska vodoravno glede na to, da je horizontalna komponenta teže enaka nič?«, pa ima njegovo delo vseeno določen praktični pomen. V študiji *Practice of Hydrostatics* Stevin opisuje številne praktične situacije, za katere se lahko uporablja njegova teorija hidrostatike. Tak pri-

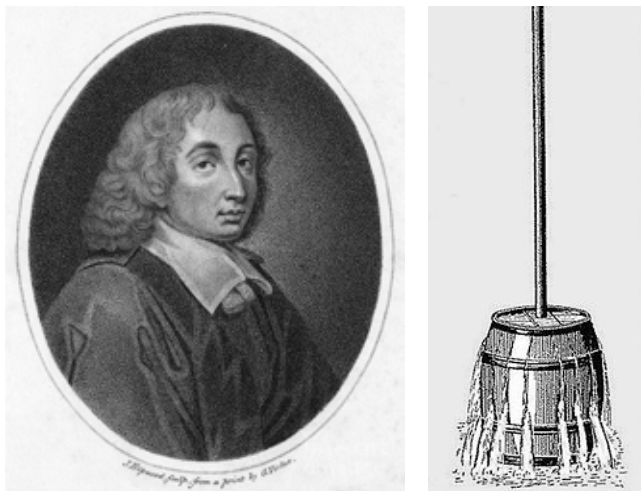
stop, da jih razlaga kot eksperimente, ki dokazujejo teorijo, je povsem razumljiv modernemu bralcu, pa čeprav dejansko gre bolj za opis stanja kot za njegovo dokazovanje. Po mnenju današnjih raziskav tedanjih Stevinovih zapisov spoznanj, je lahko Stevin prišel do ključnih izrekov o svoji hidrostati ki le na podlagi uporabe praktičnega znanja in izkušenj, s katerimi se je seznanil in jih pridobil že kot inženir začetnik, ko je gradil zapornice na različnih jezovih in kanalih – delovanje vodoravne sile, delujoče na ploskev zapornice. [11]

3 Blaise Pascal – nastanek tlaka zaradi zunanje sile in linearno gibanje

Stevin je poskušal svojo teorijo izpeljati iz neproblematičnih postulatov oz. izhodišč, ki so temeljila na »zdravi pameti«, razmišljanju blizu praksi in zaključkov na podlagi opažanj. Pri takšni obravnavi je vključeval predpostavke, ki so bile vezane na njegove inženirske izkušnje, ki so temeljile predvsem na tehtanju, ravnotežnih stanjih in na ohranjanju oz. vzpostavljanju ravnotežja. Pascal je uvedel nov pristop, ki je na prvi pogled presegal zdrav razum – uvedel je nov koncept oz. pojem, tj. tlak.

Tudi Blaise Pascal (1623–1662) je bil, podobno kot Stevin, vsestranski učenjak in je danes tudi veliko bolj znano ime. Pascal je bil francoski matematik, fizik, izumitelj, pisatelj in katoliški teolog. Bil je dejansko čudežni otrok, ki ga je izobraževal kar njegov oče, davčni uradnik v Rouenu. Pascalovo najzgodnejše delo je bilo v naravoslovnih in uporabnih znanostih, kjer je pomembno prispeval k študiju tekočin in pojasnil koncepte tlaka in vakuumu s posploševanjem dela Evangelista Torricellija. Leta 1642, ko je bil še najstnik, je začel s pionirskim delom na računskih strojih. Po treh letih naporov in 50 prototipih je v naslednjih 10 letih zgradil 20 dokončnih strojev (imenovanih Pascalovi kalkulatorji oz. kasneje Pascalines). S tem ga uvrščamo med prve izumitelje mehanskega kalkulatorja za izvajanje seštevanja in odštevanja. S področja matematike je znan po Pascalovem trikotniku, vzorcu števil, razporejenih v obliki trikotnika, znan je po delih s področja opisne geometrije in ravninske projekcije, po eksperimentih z barometrom in vakuumom ... ter tudi po svoji religiozni usmerjenosti in etiki.

Pascal se je tudi zavzemal za uporabo znanstvenih metod in znanstvenega pristopa pri obravnavi določene problematike. To je predstavljalo nov koncept obravnave, eksperiment pa je bil pomemben dokaz za teorijo, ki jo je uporabil. Novo eksperimentalno razmišljanje je bilo kvalitativno drugačno od Stevinovega evklidskega razmišljanja. Tako npr. za nas pomembna Pascalova teorija hidrostati ke temelji na jasnem prikazu, kako tekočina kot takšna prenaša sile, ki delujejo nanjo, in s tem pojasnjujejo hidrostatične pojave.



Slika 5 : Blaise Pascal in njegov hidrostatični poskus s sodom (1646)

V prvem poglavju svoje razprave, vezane na ravnotežna stanja tekočin, z naslovom *Treatise on the equilibrium of liquids*, Pascal opisuje različne primere kot uvod v svoje teorije. Prvih pet primerov (označenih od I. do V.), prikazanih v zgornji vrstici na *sliki 6*, ki predstavlja del reprodukcije t. i. Pascalove plošče št. 1, prikazuje posode različnih oblik in prostornin, na spodnji strani zaprte z enako velikimi čepi, pri čemer so posode napolnjene z isto vrsto tekočine, do enake višine.

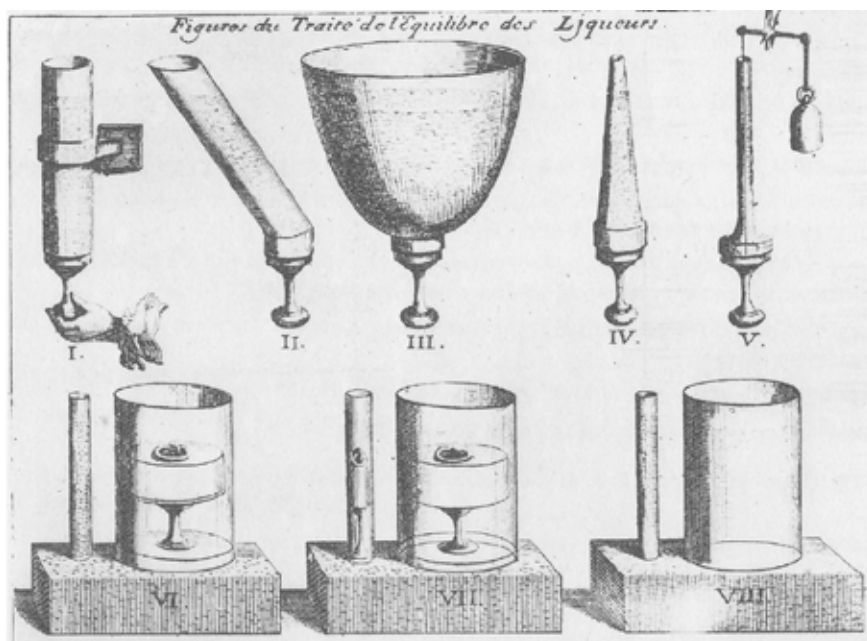
Pascal trdi, da eksperiment kaže, »da je za ohranjanje položaja čepov potrebna enako velika sila, čeprav je v različno oblikovanih in velikih posodah zelo različna količina vode«. Razprava je razširjena tako, da v šestem (VI.) primeru prikazuje situacijo, v kateri vodni stolpec v vertikalni cevki na levi strani podpira veliko večjo težo tekočine, ki je v veliko ve-

čji cevi na desni strani povezanega sistema. Pascal pravi, da »ti primeri kažejo, da lahko droben steber tekočine uravnovesi veliko večjo težo«. Na podlagi tega si je Pascal zastavil nalogo, da poišče in dokaže vzrok takega »množenja sile« t. i. multiplikacija sile.

V ta namen je Pascal na vsak steber tekočine položil ustrezen plavajoči čep (bat) in ga obremenil z ustrežno utežjo – risba VII na *sliki 6*. Omenjeno zasnovo lahko povsem dokazljivo obravnavamo kot hidravlično stiskalnico. Pascal je učinek vode v levi posodi (v njegovem prikazanem primeru valjaste oblike), na vodo, ki je pod to posodo in je povezana z desno posodo, prav tako valjaste oblike, zapisal sledeče: »Torej, če ima posoda, ki je napolnjena z vodo, na svojem dnu odprtino velikosti npr. enega palca in je na njej nameščen bat, obtežen s težo enega funta, ta teža zaradi kontinuitete in pretakanja vode učinkuje na vsak del posode.«

Nadalje pravi: »Da bi ugotovili, koliko teže nosi vsak del, velja naslednje pravilo« (v približnem prevodu): *Vsak presek, ki je po velikosti enak velikosti odprtine, to je en kvadratni palec, je obremenjen enako, kot da nanj neposredno deluje teža enega funta. Teža vode se tu ne upošteva, ker se obravnava samo teža bata oz. bremena. Teža enega funta pritiska na odprtino, vsak del posode pa je bolj ali manj obremenjen v sorazmerju glede na velikost njegove ploskve, ne glede na to, ali je ta del nasproti odprtine ali na njeni nasprotni strani, ne glede na to, ali je daleč od nje ali pa blizu. Zaradi kontinuitete in pretočnosti vode so te okoliščine povsod enake in neodvisne«.*

Samo ta odlomek zapisa ponazarja tri ključne značilnosti Pascalove hidrostatike. Prvič, imamo kvantitativno izjavo o tem, kako se sila iz enega volu-



Slika 6 : Del Pascalove plošče št. 1 iz njegove razprave *Treatise on the equilibrium of liquids*

Skica VII: prvi prikaz principa multiplikacije sile - osnova delovanja preproste hidravlične stiskalnice

mna prenaša na druge dele posode oz. volumne. Prenese se kot sila na enoto površine, v tem primeru en funt na kvadratni palec. Drugič, imamo jasno navedbo izotropnega značaja tako prenesene sile, saj voda pritiska enako na katerikoli površini določene ploskve ne glede na to, kje je. Tretjič, Pascal pojasnjuje, da gre za lastnost vode kot take (in jo deli z drugimi tekočinami), ki leži izza izotropnega prenosa sil. Pojavijo se kot posledica »kontinuitete in pretočnosti« vode.

Te temeljne zamisli so zapisane v Pascalovi kratki tezi: »*Ko sta prisotni dve uteži, kot pri hidravlični stiskalnici, se doseže ravnovesje, ko so uteži sorazmerne s površinami, preko katerih delujejo na tekočino. Pri ravnovesju se voda enakomerno stisne pod obema batoma; kajti čeprav je eden od teh stokrat težji od drugega, je po drugi strani v stiku s površino, ki je stokrat večja. Kvantitativno merjenje stiskanja vode je kot sila na enoto površine.*«

S tem je Pascal podal pojasnilo nastanka tlaka kot posledico delovanja bremena oz. sile preko bata določene ploščine na tekočino, zaprto v nekem volumnu, pri čemer je pojasnjeno tudi razmerje med velikostjo ploščin batov in sil. To spoznanje je danes vsesplošno znano in predstavljeno kot Pascalov zakon, ki predstavlja osnovo uporabe koncepta prenosa sil in gibanja preko tekočine. Zato se SI enota za napetost v tekočini oz. njeno napetostno stanje, tj. tlak, imenuje pascal.

Pascalovi poskusi s tekočinami so privedli do zapisa Pascalovega zakona (ki navaja, da se v mirovanju tekočine tlak enako prenaša v vse smeri) in dokonča teorijo hidrostatične. Razprave o njegovih poskusih so bile objavljene posmrtno (1663) v njegovih dveh že omenjenih razpravah *Treatise on the Equilibrium of Liquids* in *Treatise on the Weight of the Mass of the Air*.

S tem je bila podana osnova za uporabo tega principa ne samo v obliki eksperimentalnega modela, temveč v obliki večje, veliko bolj praktično uporab-

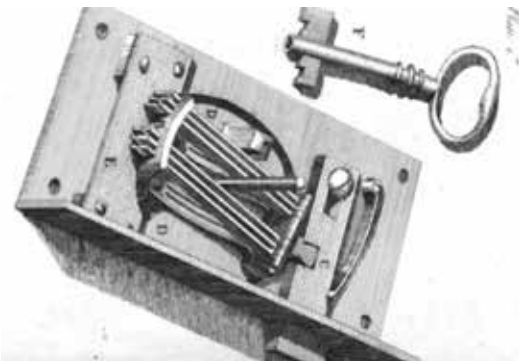
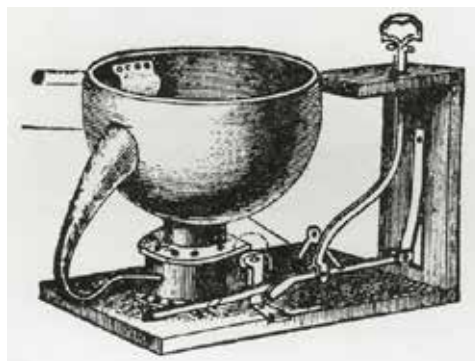
ne naprave – hidravlične oz. hidrostatične stiskalnice. Ta se je pojavila šele približno 150 let kasneje in je povezana z imenom Joseph Bramah.

4 Prva hidrostatična stiskalnica – Joseph Bramah

Joseph Bramah (1748–1814), rojen v Stainborough Lane Farmu, Stainborough, Barnsley Yorkshire, v Angliji, je bil vsesplošni inovator, izumitelj in ključavničar. S stališča naše obravnave in tudi na širšem področju tehnike ter gradnje strojev in naprav pa je najbolj znan po tem, da je izumil hidravlično stiskalnico. Natančneje rečeno: Bramah je Pascalov princip multiplikacije sile, ki je osnova delovanja hidravlične stiskalnice, uresničil v obliki uporabnega stroja – stiskalnice, zasnovane in izdelane v današnji obliki.

Med njegove pomembnejše inovacije, izboljšave in izume štejemo npr. izboljšanje delovanja straniščne školjke z vodnim izpiranjem (1778), zasnovo avtomata za točenje piva (1797), stroja za skobljanje (1802), stroja za izdelavo papirja (1805), stroja za samodejno tiskanje bankovcev z zaporednimi serijskimi številkami (1806), nalivnega peresa (1809) in še kaj; *slika 7*. Na začetku svoje kariere pa je postal znan po svojih protivlomnih ključavnicah (1784), ki jih je izdeloval v svojem podjetju Bramah Locks Company, kasneje pa seveda po hidravlični stiskalnici. V povezavi s slednjo ga pogosto imenujemo očeta sodobnih hidravličnih naprav.

Tudi zaradi zahtev po natančnosti izdelave in brezhibnega delovanja njegovih ključavnic je Bramah veliko časa posvetil razvoju in izboljšavam strojnih orodij za pomoč pri proizvodnih procesih. Zelo se je zanašal na strokovno znanje Henryja Maudslaya, ki ga je Bramah zaposlil v svoji delavnici. Na podlagi tega sodelovanja so nastale številne inovacije, vezane na obdelovalne stroje, ki so omogočili učinkovitejšo proizvodnjo ne samo Bramahovih ključavnic, temveč tudi drugih proizvodov.

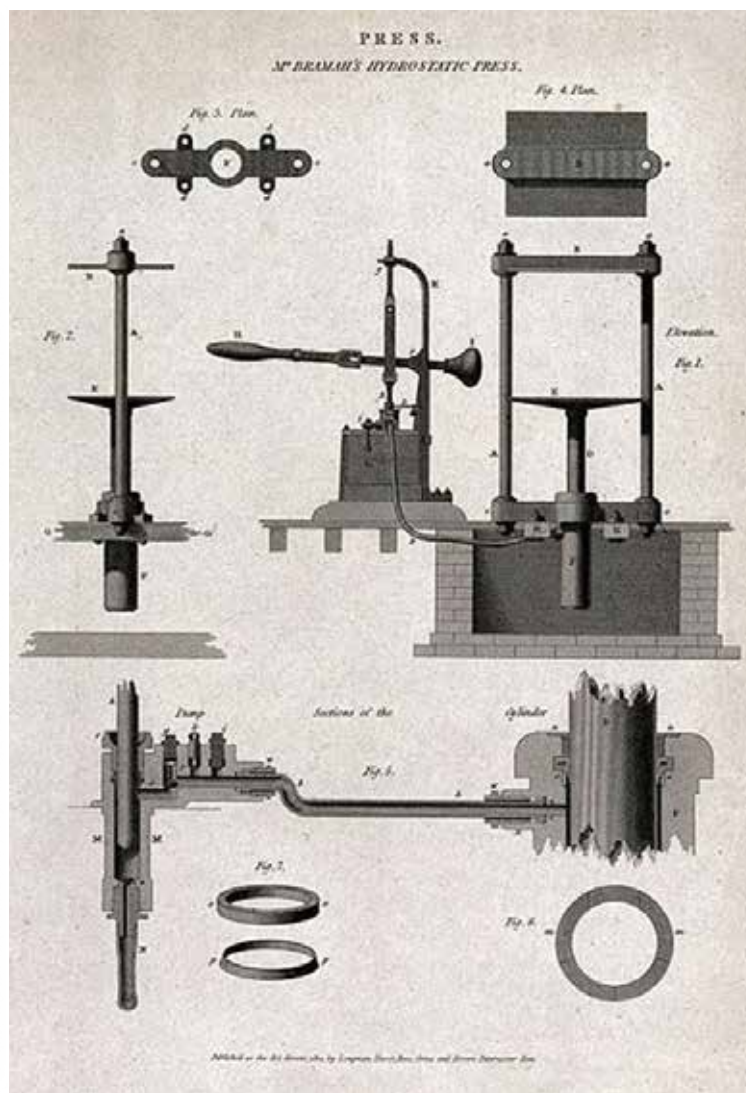
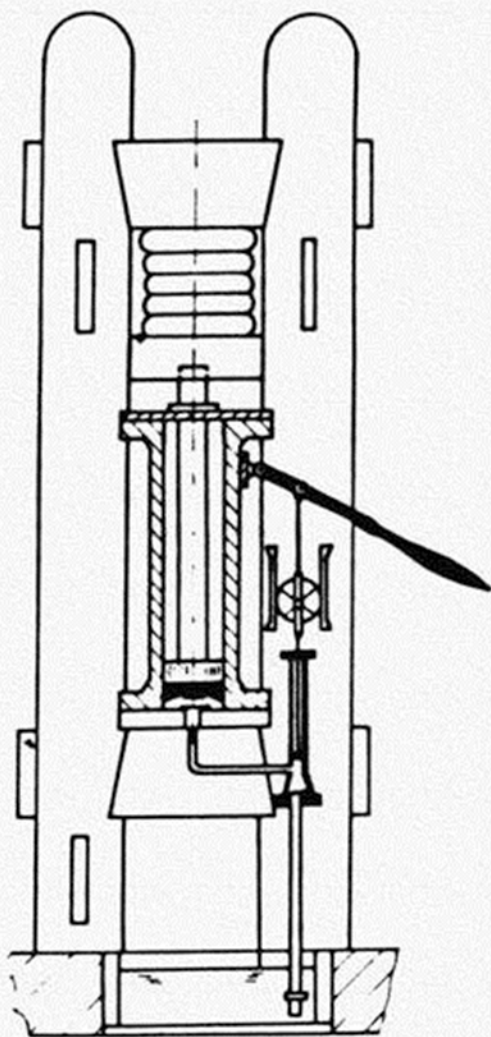


Slika 7 : Joseph Bramah in njegovi pomembnejši izumi z različnih področij delovanja

Kot že omenjeno, je Bramahov najpomembnejši izum njegova hidravlična stiskalnica, delujoča po Pascalovem načelu širjenja tlaka in ojačenja sile. Dоследno je upošteval Pascalovo načelo: če na manjši bat deluje določena sila, se ta pretvori v veliko večjo silo na večjem batu. Razmerje velikosti obeh sil je sorazmerno razmerju velikosti ploskev obeh batov. Ta znani koncept manjšega črpalnega bata in večjega delovnega bata je Bramah s pridom uporabil v obliki vsestransko uporabne stiskalnice. V bistvu valja z batoma delujeta na podoben način, kot se uporablja mehanski vzvod za povečanje sile – zato lahko v tem primeru govorimo o tekočinskem vzvodu, pri čemer je razmerje dolžine ročic ekvivalentno oz. analogno razmerju velikosti ploskev batov. Za stiskalnico je bil Bramahu 30. novembra 1795 podeljen patent, ki nekako pomeni rojstvo hidravlične pogonske tehnike. Del patentne dokumentacije prikazuje *slika 8*. Njegova »iznajdba« stiskalnice velja ob iznajdbi oz. funkcionalni nadgradnji parnega stroja Jamesa Watta kot ena pomembnejših tistega časa.

Stiskalnica je imela dva valja in bata različnih ploščin, pri čemer je bilo razmerje ploskev okoli 2300. Bata sta bila tesnjena z usnjenimi manšetami (znano že iz časov Ktesisove črpalke), kot hidravlična tekočina pa se je uporabljala voda. Ogrodje prve stiskalnice je bilo še leseno, kvaliteta izdelave glavnega stiskalnega valja pa na nivoju tehnologije tistega časa, z vsemi svojimi pomanjkljivostmi.

V času, ko je Bramah uresničeval svoje koncepte, je bilo področje hidravličnega inženirstva skoraj neznan znanost. Po svojem odkritelju stiskalnico še vedno imenujemo njemu v čast – Bramahova stiskalnica. Bramahova hidrostatična stiskalnica oz. princip dveh valjev je bil uporabljen na številnih različnih področjih uporabe in tako je še danes. Zaradi široke in raznolike uporabnosti tega principa so hidravlične stiskalnice povzročile potrebo po novih znanjih in razvoju novih področij strojegradnje.



Slika 8 : Bramahova stiskalnica – ilustracija iz patentne dokumentacije leta 1795 (levo) in del dokumentacije njegove kasnejše izvedbe stiskalnice

5 Drugi mejniki in spoznanja iz obdobja med Pascalom in Bramahom

V povezavi z razvojem hidrostatične in v zvezi z razumevanjem pojava tlaka bi lahko omenili tudi dela in spoznanja drugih pomembnih znanstvenikov. Tako so npr. spoznanja, vezana na hidrostatično, bolj ali manj podrobno obravnavali tudi Galileo, Descartes, Boyle, Newton in še kdo, ki so obstoječa spoznanja razširili in jih nadgradili. Za pomen hidravlične pogonske tehnike pa so pomembna spoznanja Blaisea Pascala, ki je zagotovo omenjena spoznanja predhodnikov imel, a jih je nadgradil do neposredne praktične uporabe. Zaradi tega ga obče imenujemo oz. imamo za odkritelja hidrostatične. Po njem imenovan zapis, Pascalov zakon, pa kot osnovni zakon hidrostatičnega principa prenosa sil in gibanja s pomočjo fluidov, tekočin in plinov.

V obdobju med Pascalom in Bramahom so se pojavila tudi druga pomembna spoznanja in odkritja, pomembna za razvoj hidravlične pogonske tehnike. Nekatera od teh so v svoje izdelke, ki so se pojavili kasneje, kasnejši pionirji hidravlike tudi vključili. Ta spoznanja bi lahko razdelili na dve skupini: na nova spoznanja glede opreme in tehnike ter podjetij, ki so se ukvarjala s tem, ter na spoznanja s področja fizike tekočin in delovanja hidravličnih naprav.

Vežano na razvoj hidravlične tehnike lahko tako omenimo *Sir Samuela Morlanda*, ki je leta 1674 patentiral črpalko s plunžerjem, ki je že imela uporabljena tesnila iz usnja. Nemški znanstvenik *Jacob Leupold* je leta 1712 objavil prvega od devetih zvezkov oz. študij, imenovanih *Theatrum Machinarium*, ki je predstavljal prvo enciklopedijo strojnega inženirstva. V drugem in tretjem zvezku so prikazani številni primeri različnih hidravličnih strojev – od preprostih vodnih koles, pa do takrat znane izvedbe črpalk, tudi s pappenheimsko črpalko.

Francoski inženir *Bernard Forest de Belidor* je leta 1739 objavil delo *Architecture Hydraulique*, v katerem je prikazal zgradbo hidravlične črpalne naprave, ki je imela vgrajen zračni akumulator, 4-potni krmilni ventil in ojačevalnik tlaka. Namen tega sestava je bil, da lahko z uporabo relativno velike količine vode pod nizkim tlakom črpamo manjši volumen tekočine z višjim tlakom. Danes je ta koncept znan in uporabljan pod imenom hidravlični oven.

Francoski raziskovalec *Charles-Marie de la Condamine* je okoli leta 1745 preučeval kulturo južnoameriških Indijancev in pri tem spoznal lateks, naravno gumo, ki so jo nato dolga leta in stoletja uporabljali za tesnjenje hidravličnih valjev v hidravličnih napravah.

Leonhard Euler je leta 1757 izpeljal enačbo za določanje največje dovoljene osne sile delujoče na batnico dolgih valjih, ko se ta nahaja v svojem zunanem položaju. Preverjanje te uklonske obreme-

nitve še danes uporabljamo pri dimenzioniranju hidravličnih valjev.

Glede novih spoznanj, vezanih na fizikalno obnašanje tekočin, pa je po Pascalu najprej potrebno omeniti švicarskega znanstvenika Daniela Bernoullija, ki je leta 1738 v svoji knjigi *Hydrodynamica* objavil teorem o konstantni energiji (kasnejši Zakon o ohranitvi energije). Bernoulli je zapisal spoznanje, da se bo v primeru, če se hitrost fluida poveča (npr. v primeru zmanjšanja premera cevi, skozi katero teče ta tekočina), temu primerno zmanjšal tlak. Učinek skupne energije mora ostati enak, zato se mora v primeru povečanja kinetične energije (višja hitrost) potencialna energija zmanjšati (nižji tlak). Čeprav Bernoulli takrat še ni popolnoma razumel teh soodvisnosti, je Bernoullijev princip obveljal za temeljni kamen dinamike fluidov.

Anglež *John Canton* je okoli leta 1762 izvajal eksperimente, vezane na stisljivost medija in dokazal, da voda ni nestisljiva in da enako velja tudi za druge tekočine oz. medije.

Vežano na podjetja, ki so se ukvarjala s hidravličnimi napravami, pa ne moremo mimo Geoga Perrya, ki je leta 1758 v Liverpoolu ustanovil podjetje Coalbrookdale Foundry, ki je bilo kasneje poznano kot Phoenix Foundry. Podjetje je izdelovalo stroje in naprave za plovila. Kasneje je bilo bolj znano pod imenom Fawcett's in kot proizvajalec hidravličnih komponent obstaja še danes kot del koncerna Parker.

Podobno velja za Nemca *Geoga Ludwiga Rexrotha*, ki je leta 1795 ustanovil družinsko podjetje. Za podjetjem Fawcett's je ime oz. blagovna znamka Rexroth verjetno drugo najstarejše podjetje, ki je zelo aktivno na področju fluidne tehnike, danes znano pod imenom Bosch-Rexroth.

6 Zaključek

Mejnikov, ki predstavljajo novo fizikalno spoznanje, nov konstrukcijski koncept ali zasnovo gradnika in uvedbo novega materiala, stroja ali koncepta ... ter znanstvenikov, inovatorjev, inženirjev, tehničnih filozofov, entuziastov in mislecev, ki so se ukvarjali s koncepti delovanja in z novimi spoznanji, vezanimi na tekočine ... je zagotovo veliko več, kot smo jih tu le bežno omenili.

Vsako od spoznanj predstavlja zelo pomemben kamenček v mozaiku skoraj 150 let trajajočega razvoja hidrostatičnega prenosa sil in gibanja, od Pascalovih prvih pravih spoznanj glede prenosa sil in gibanja s pomočjo tekočin (1646), pa do Bramahove uresnitve tega koncepta v obliki uporabne naprave – hidrostatične stiskalnice (1795). Od tega trenutka dalje se je pričel razcvet hidravlične pogonske tehnike, ki je za seboj potegnil razvoj številnih drugih področij strojegradnje.

Viri

- [1] Lovrec, D.: Razvoj hidravlične pogonske tehnike skozi čas: zgodnji začetki in prve črpalke. Ventil – revija za fluidno tehniko in avtomatizacijo, ISSN 1318-7279, feb. 2019, letnik 25, št. 1, str. 60–69.
- [2] Lugli, E.: Watery Manes; Reversing the Stream of Thought about Quattrocento Italian Heads, Internet Archaeology 42, 2016, <http://dx.doi.org/10.11141/ia.42.6.11>.
- [3] Skinner, S.: Hydraulic Fluid Power; A Historical Timeline, 2014, Steve Skinner Presentations, 126 str., ISBN: 978-1-291-67689-1.
- [4] <https://adcs.home.xs4all.nl/stevin/stercten/nm.html> (Simon Stevin, Brugge, 1548 - 1620, The Hague, Wonder, not Miracle).
- [5] Devreese, J. T.: Guido van den Berghe, 'Magic is No Magic': The Wonderful World of Simon Stevin (WIT Press, 2007), 310 str.
- [6] Dijksterhuis, E. J.: Simon Stevin – Science in the Netherlands around 1600 (The Hague 1970).
- [7] Struik, D. J.: The Land of Stevin and Huygens; D. Reidel Publishing Company, 1981, 162 str., ISBN: 90-277-1237-9.
- [8] Dijksterhuis, F. J.: Stevin, Huygens and the Dutch republic, in Nieuw Archief voor Wetenskap, juni 2008.
- [9] Bryant, F.: The Origins of Hydrostatics, Physics Bulletin, Volume 11, Number 2, 1960, <https://doi.org/10.1088/0031-9112/11/2/002>.
- [10] Alpha E. W.: The hydrostatic paradox; The Physics Teacher; Volume 33, Issue 8, str. 538 (1995); <https://doi.org/10.1119/1.2344288>.
- [11] Chalmers, A. F.: Qualitative novelty in seventeenth-century science: Hydrostatics from Stevin to Pascal; Studies in History and Philosophy of Science Part A, Volume 51, June 2015, Pages 1-10; <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2015.01.001>.
- [12] Chalmers A. F.: One Hundred Years of Pressure – Hydrostatics from Stevin to Newton, ISBN-13 9783319859385, 2017, str. 197.

MOTOMAN HC10

6-osni-kolaborativni robot

Motoman HC10 je 6-osni kolaborativni robot z nosilnostjo 10kg in polmer dosega R=1200mm.

HC10 predstavlja novo generacijo robotov, ki so zmogljivi, cenovno dostopni, vsestransko uporabni, preprosti za uporabo in izdelani za integracijo v industrijske procese. Roboti so namenjeni uporabnikom, ki iščejo preprosto in hitro avtomatizacijo nalog, ki jih industrijski roboti opravljajo v bližini ljudi v sodelujočem načinu delovanja.

Varno sobivanje z uporabniki

Varnostni krmilnik FSU: Functional Safety Unit

Tehnologija PFL Power and Force Limiting

Aplikacija EasyTeach – natančno ročno vodeno učenje in programiranje robota

Brez varnostne ograje

- Vgrajena funkcija kontrole sile ob dotiku na vseh šestih robotskih oseh
- Gibljivi deli robota so oblikovani tako, da preprečujejo možnost poškodb
- Varnostni standard – aplikacija za industrijske robote: ISO 10218–1 (5.10.5 Power and Force limiting)
- Varnostne funkcije za krmilnike industrijskih robotov: ISO 13849–1, PLd, CAT3
- Tehnična specifikacija za delovanje kolaborativnih robotov: TS15066

Enostavno programiranje

- Neposredno premikanje robotske roke s pomočjo ročnega vodenja
- Pametni vmesnik (Smart HUB) za programiranje po principu »enostavnega učenja«

YASKAWA



Boniteta odličnosti
2017

A Blisnode Solution

Krmiljen z
YRC1000