

RAZVOJ HIDRAVLIČNE POGONSKE TEHNIKE SKOZI ČAS – 1. DEL:

ZGODNJI ZAČETKI IN PRVE ČRPALKE

Darko Lovrec

Najpomembnejši mejniki razvoja hidravličnega oz. hidrostatičnega prenosa sil in gibanja, njihov pomen za razvoj posameznih vej tehnike ter uvajanje te tehnologije na druga področja tehnike, bodo podrobneje predstavljeni v kronološko sledečih si prispevkih – od prvih zametkov pa vse do današnjega dne. V tem prvem prispevku se bomo posvetili prvim spoznanjem in poskusom uporabe energije vode ter prvim hidravličnim črpalkam, ki so omogočile neodvisnost te tehnike od naravnih virov energije.

Hidravlična pogonska tehnika je zelo stara znanost. Že pred več kot 3000 leti pr. N. št. so Babilonci in Egipčani gradili kanale za namakanje polj in za obrambne namene ter pri tem za transport vode uporabljali preproste naprave. V tistih časih še ni bilo nobenih poskusov razumeti princip delovanja in zakonitosti gibanja tekočine. Prvi opaznejši poskusi razumevanja splošnega dogajanja in vzorcev soodvisnosti med tlakom in tokom tekočine so se pojavili šele v času starih Grkov.

Stari Grki so že spoznali nekatere osnovne zakonitosti hidrostatike ter učinek vzgona in jih tudi že dokumentirali. Misleci in »inženirji« tega obdobja so tudi že izdelali prvo hidravlično opremo v današnjem smislu izvedbe in uporabe. Sem lahko štejemo npr. batno in vijačno črpalko, vodno uro... Rimljani so se, tako kot Egipčani, bolj zanimali za praktične in konstrukcijske vidike hidravlike kot za poznavanje teoretičnega ozadja delovanja. Tako se je razvoj te tehnike zelo počasi nadaljeval do obdobja renesanse, ko so misleci, kot npr. Leonardo Da Vinci, začeli »na znanstveni način« beležiti in poročati o izsledkih svojih opazovanj. Na to obdobje se nanašajo prva spoznanja, vezana na masni tok tekočine (kontinuiteta toka), upore pri pretakanju zaradi trenja, širjenje hitrosti valovanja na površini tekočine..., ki so še vedno v uporabi, čeprav v bolj izpopolnjeni obliki.

Vsa opazovanja in prve naprave tega obdobja so pogojevale uporabo naravnih virov tekočine. Ločitev od naravnih virov energije, in s tem osamosvojitve te vrste tehnike, se je pojavila v 16. stoletju s prvimi rotacijskimi hidravličnimi črpalkami. Prve izvedbe črpalk so napovedale hidrostatični prin-

cip delovanja hidravličnih oz. hidrostatičnih naprav. Matematični zapis hidrostatičnega prenosa sil in gibanja, in vsega kar je na podlagi tega možno doseči, pa je okoli 1650 podal Blaise Pascal v svojem znamenem in široko uporabnem Pascalovem zakonu.

A do prve praktične, bolje rečeno industrijske rabe hidrostatičnega prenosa sil in gibanja ter korišćenja prednosti tega koncepta, je minilo nadaljnjih 150 let. Šele Joseph Bramah in njegova zgrajena ter tudi patentirana hidrostatična stiskalnica predstavlja praktični mejnik uporabe hidrostatičnih naprav v današnjem smislu. Od tega prelomnega trenutka se je pričel »zmagoviti« pohod hidrostatičnih naprav na skoraj vseh področjih tehnike. Vse do začetka 20. stoletja (kar je manj kot pred sto leti!) je hidravlika predstavljala edino in nepogrešljivo tehnologijo za prenos sil in gibanja številnih (skoraj vseh) naprav. Hidrostatični prenos sil in gibanja je še danes nepogrešljiv, predvsem v strojih in napravah, kjer je potrebno premagovati velika bremena in zagotavljati visoko dinamiko. Osnovni koncept je tako ostal ohranjen od prvih začetkov uporabe te tehnologije, le da je danes dopolnjen in nadgrajen s sodobno električno krmilno in senzorsko tehniko ter podprt z informatiko.

1 Zgodnji zametki – korišćenje energije vode in vodna kolesa

Začetki hidravlike so tesno povezani z vodo kot medijem za prenos sil in gibanja. Po njej ima ta veja tehnike tudi ime. Ime izhaja iz grške besede *hydraulikos*, pri čemer *hydor* pomeni vodo in *aulos* cev. Poenostavljeno, voda je v cevi napeljana na določeno mesto, kjer opravlja svoje delo. Medtem ko dandanes skoraj vsak pri besedi hidravlika pomisli na oljno hidravliko in uporabo hidravličnega olja, je

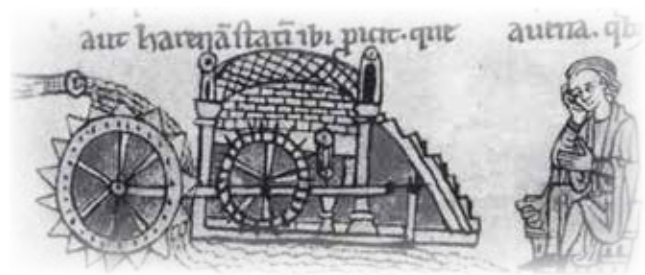
Izr. prof. dr. Darko Lovrec, univ. dipl. inž.,
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

bilo v začetku razvoja te tehnike ravno obratno. Vse je temeljilo na uporabi vode, principi delovanja in naprave pa se niso nanašali samo na hidrostatični, temveč tudi na hidrodinamični način delovanja. Začetki so obema konceptoma, ki ju danes običajno obravnavamo ločeno (npr. delovanje vodnih turbin in hidrostatičnih črpalk) po eni strani bolj ali manj skupni, po drugi strani pa sta oba koncepta v večji ali manjši meri (tudi hkrati) prisotna v današnjih hidravličnih črpalkah in motorjih, ki jih uporabljamo za pretvorbo energije.

Prve mehanske naprave, ki so omogočale opravljanje nekega dela na podlagi izkoriščanja energije tekoče vode, so bila vodna kolesa. Vodno kolo je starodavna naprava, ki uporablja tekočo ali padajočo vodo za generiranje moči. Vodno kolo je sestavljeno iz kolesa (običajno je bilo leseno) in večjega števila lopatic ali korcev (vedrom podobnih posod), nameščenih po obodu kolesa. Sila vode, ki deluje na lopatice ali korce, posledično povzroča vrtenje kolesa, ki se preko gredi prenaša dalje. Vodna kolesa so bila v uporabi za različne namene vse do 20. stoletja. Rečemo lahko, da so vodna kolesa skupno izhodišče kasnejših vodnih turbin, ki so se razvijala v svojo smer, in pa hidravličnih pretvornikov energije, ki predstavljajo osnovo kasnejšim hidravličnim motorjem in hidravličnim prenosnikom. Glede na princip delovanja in pretvorbo energije predstavljajo vodna kolesa tako princip delovanja hidravličnih rotacijskih motorjev – hidromotorjev, različni načini črpanja in transporta vode na drugi nivo pa princip delovanja črpalk. Pri motorjih se je energija dotekajočega medija pretvarjala v mehansko energijo, ki so jo uporabljali za opravljanje določenega dela (npr. za vrtenje mlinskega kamna). Pri črpalkah, ki jih je bilo potrebno najprej na nek način poganjati, pa za transport tekočine, za kasnejše opravljanje določenega dela ali za doseganje določenega namena (npr. za namakanje polj).

Prve omembe vodnih koles segajo v obdobje okoli 4000 do 3500 let pr. n. št., v čas Sumercev, in se nanašajo na ozemlje starodavne Mezopotamije. Uporaba vodnih koles je omenjena v kasnejših babilonskih zapisih, vendar brez podrobnosti o konstrukciji vodnega kolesa. Transport vode s pomočjo koles je bil uporabljan le za namene namakanja polj in rastlinskih nasadov.

Prvotna preprosta vodna kolesa je poganjal tok tekoče vode, pri čemer iz zapisov ni znano, kako so bila ta kolesa obrnjena glede na tok reke. Manj znana je tudi podrobnejša izvedba vodnih koles, ki so jih uporabljali mlini v Indiji. V starodavnih indijskih besedilih iz 4. stoletja pr. n. št. je moč zaslediti izraz cakkavattaka (obračalno kolo), ki ga strokovnjaki pojasnjujejo kot arahatta-ghati-yanta (stroj z nameščenimi lonci na kolesu). Zgodovinarji si glede zapišanega niso enotni ali res gre za vodno gnano kolo ali za kaj drugega oz. drugo napravo. Prve tovrstne naprave, ki so se uporabljale v Indiji in jih je poga-



Slika 1 : Dokumentirani primer zgodnje izvedbe vodnega kolesa [1]

njala tekoča voda, so opisane v arabskih in perzijskih delih. Skozi čas so različne izvedbe vodnih koles tudi različno imenovali, npr. noria (beseda je špansko-arabskega izvora), je izraz za izvedbo vodnega kolesa s korci, uporabljanega za namakanje.

Najzgodnejši podrobnejši opis izvedbe in uporabe vodnega kolesa prihaja iz antične Grčije in Male Azije. Najdemo ga v pismenem delu Apolonija Pergeja iz obdobja 240 pr. n. št. Zapis se je ohranil samo v arabskem prevodu. Mitradates VI Eupator iz Pontusa bi naj že imel vodni mlin v svoji palači v Cabiri v letu 71 pr. n. št. V 1. stoletju pr. n. št. se je grški epigramatist Solunski, prvi skliceval na vodno kolo in ga omenjal kot zelo koristno napravo pri mletju žita in zmanjšanju človeškega fizičnega napora pri tem. Zgodnja raba in prisotnost vodnih koles v različnih delih grškega in rimskega sveta je bila verjetno bolj razširjena, kot to priznavajo zgodovinarji oz. imajo za to dokaze. Kasneje, še posebej v obdobju Rimljanov, so bila vodna kolesa vse pogostejše omenjana in tudi uporabljana. Primer dokumentirane zgodnje izvedbe vodnega kolesa prikazuje *slika 1*.

Pri vseh omembah vodnih koles je šlo za horizontalno ali vertikalno nameščena vodna kolesa, ki jih je poganjala tekoča voda reke ali potoka. Voda je na kolo dotekala s spodnje strani ali pa je bila preko kanala ali po cevi speljana na kolo tako, da je padala na lopatice kolesa z zgornje strani. V primeru horizontalne namestitve je voda dotekala po cevi ali po kanalu in delovala na lopatice s strani. Horizontalno nameščeno kolo z vertikalno osjo je bil zelo preprost sistem, ki je neposredno, brez dodatnih gradnikov in prestav služil kot vreteno za neposredni pogon mlinskega kamna. V nekem smislu je predhodnik sodobne vodne turbine. Vertikalno nameščena kolesa so bila cenejša in enostavnejša za izdelavo, vendar manj učinkovita kot horizontalna. Zaradi svoje preprostosti so se uporabljala tam, kjer je bil pretok vodnega vira dovolj velik za zagotavljanje navora.

Dolga stoletja so ljudstva vodna kolesa uporabljala za pogon mlinskih kamnov, žag, različnih vrst kladiv in kovaških mehov, drobilnikov kamenja in rude, za odstranjevanje vode iz rudnikov in tudi za oskrbo naselij s pitno vodo. Dva izmed številnih primerov uporabe vodnega kolesa v rudarstvu, za pogon



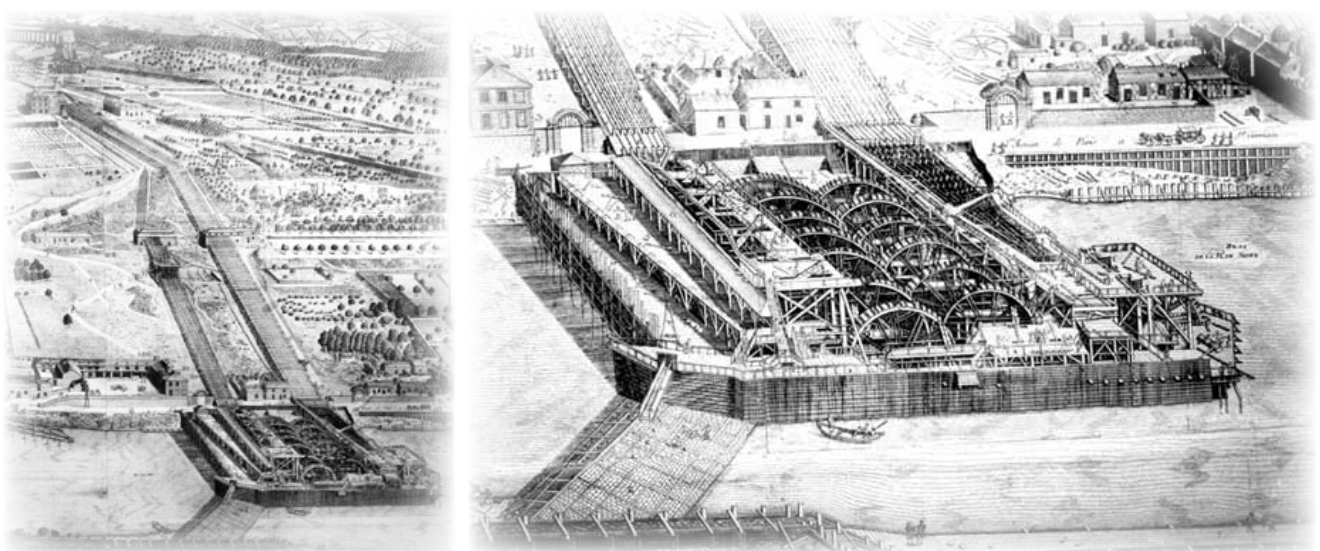
Slika 2 : Uporaba vodnega kolesa za pogon verige z vedri in za pogon drobilnika v srednjem veku; Georgius Agricola's *De Re Metallica* (1556); [2], [3]

verige z lesenimi vedri za namene odstranjevanja vode iz rudniškega jaška in za pogon drobilnika kamena oz. rude, prikazuje *slika 2*.

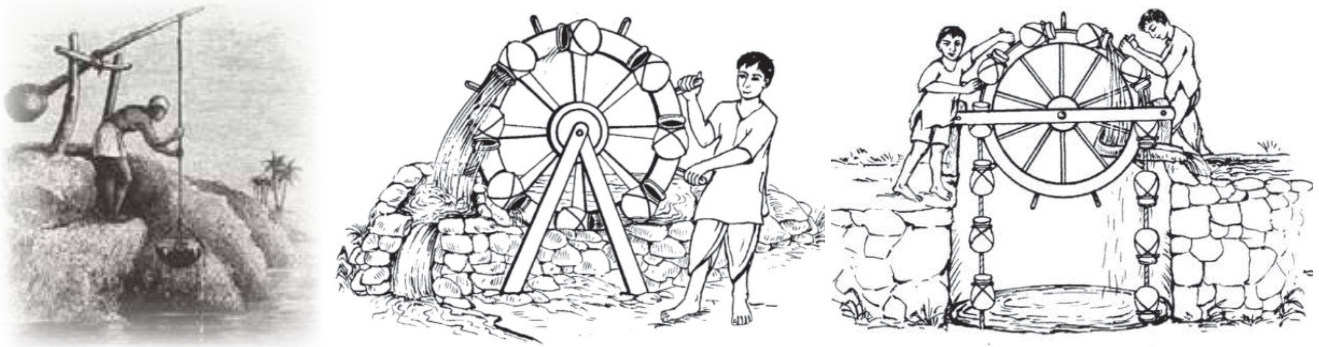
Zaradi zelo široke uporabe vodnih koles so ta upodobljena na številnih bolj ali manj natančnih risbah. Večina slikovne dokumentacije izhaja iz kasnejših obdobij, zato ne odlikavajo dejanske izvedbe in uporabe. Vsak avtor ilustracije je dodal svoje razumevanje delovanja ter svojo presojo o zgradbi in videzu naprave. V primerjavi s sliko 1 in sliko 2, ki prikazujeta zgodnje izvedbe in uporabo vodnih

koles, je na *sliki 3* dokaj podrobno prikazan sistem vodnih koles, uporabljen za namakalni sistem. Tudi v takšnih primerih podrobnosti izvedbe v smislu tehniške risbe niso znane.

Ločnica med uporabo vodnega kolesa za pogon neke naprave – torej kot hidromotorja, ali za posredno ali neposredno dviganje in transport vode – uporaba kot črpalka, je zelo tanka. Za transport oz. za pretakanje vode iz enega zajetja ali vira na drugo mesto so bile v rabi preproste naprave, ki so v današnjem smislu delovale oz. so jih uporabljali kot črpalke.



Slika 3 : Vodna kolesa, ki jih poganja tok rečne vode, uporabljena za namakalni sistem; *La machine de Marly*; Celotni namakalni sistem (levo) in sklop 14 vodnih koles (desno); [4]



Slika 4 : Ročno gnane dvizne naprave za zajemanje vode; egipčanski shaduf (levo) in dve izvedbi ročno gnanih koles z vedri, noria (sredina) in sakija (desno) [7]

2 Naprave za dviganje in transport vode

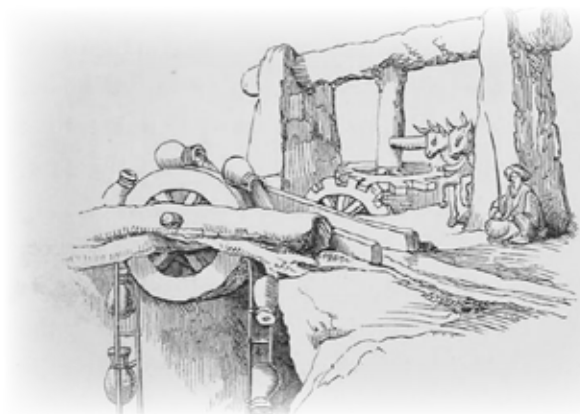
Predhodniki črpalk so bile najrazličnejše naprave za dviganje in transport vode. Tudi v tem primeru segajo prve omembe teh naprav daleč nazaj v preteklost. Omembe se navezujejo na današnja področja Indije, Pakistana, Egipta, pri čemer gre za naprave, gnane s pomočjo moči, tekoče vode, človeka ali živali. Vse izvedbe se skoraj brez izjeme nanašajo na zajemanje vode za namene namakanja polj. Značilne primere teh dviznih naprav, kakršne se ponekod uporabljajo še dandanes, prikazujeta *sliki 4 in slika 5*.

Glede na izvedbo in geografsko področje uporabe so bila tudi poimenovanja različna. Prva »vodna črpalka« sega v obdobje od 3000 do 2000 pr. N. št. in je bila imenovana shaduf. Naprava je znana pod različnimi imeni, kot so shaduf (shadoof) v Egiptu, zirigum v Sumerju, dhenkli v Indiji, kilonion ali ke-lonion v Grčiji in daliya v Iraku. Predvsem je znan egipčanski shaduf, ki so ga uporabljali posamično, ali pa so jih namestili na različnih geodetskih nivojih in s pretakanjem od nivoja do nivoja vodo transportirali na višje ležeče predele. Naprava je bila zelo preprosta. Sestavljena je bila iz lesenega vzvoda ter postavljena ob reki ali ob zajetju vode. Vzvod je bil nameščen na dveh navpičnih stebrih in obrnjen proti vodnemu viru. Na enem koncu vzvoda ali ročice je bila obešena posoda, na nasprotni strani pa je bila pritrjena protiutež. Uporabnik je potisnil ročico navzdol, napolnil vedro z vodo in teža je dvignila vedro. Šaduf je bil priljubljen po vsem Bližnjem vzhodu in je bil edina oblika »vodne črpalke«, ki se je v regiji uporabljala še naslednjih 2000 let. Šaduf se danes še vedno uporablja v Indiji in Egiptu kot preprosta naprava za namakanje zemljišč. [4], [5], [6], [7]

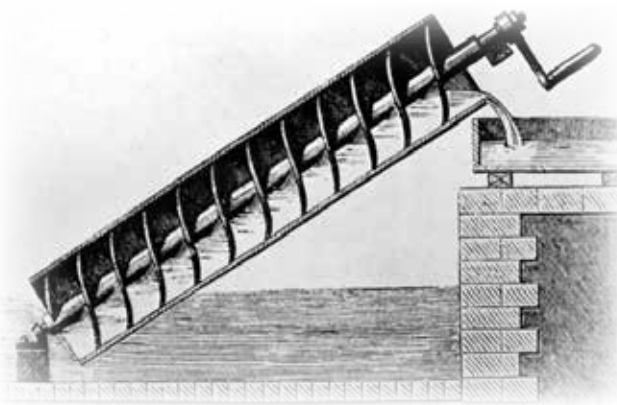
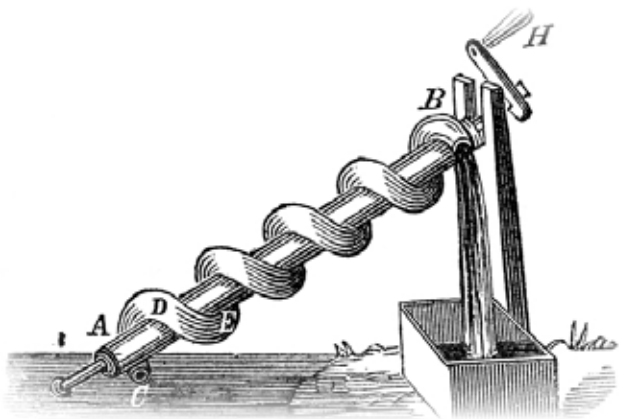
Noria ali egipčansko vodno kolo, je sestavljeno iz veder ali glinenih posod, nameščenih po obodu kolesa, ki ga je poganjal vodni tok, izhaja iz leta 700 do 600 pr. n. št. Ko so bila vedra potopljena in napolnjena z vodo, jih je gravitacija potisnila na vrh kolesa, kjer so se samodejno izpraznila v korito, kolo

pa je samodejno nadaljevalo kroženje. Po navedbah Muzeja za namakanje je bila noria prva rotacijska, samodejno delujoča naprava za dviganje vode, ki je ni poganjal človek. Kolo z vedri se je pojavljalo v različnih izvedbah. Razen gnanega z rečnim tokom, je lahko kolo z vedri vrtel tudi človek ali pa živali. Pri tem so bila vedra neposredno pritrjena na kolo ali pa na vrv, kar je omogočalo premagovanje večjih višin – t. i. shaduf in sakija. Primer shadufa ter dve izvedbi ročno gnanih vodnih koles, norie in sakije, prikazuje slika 4.

Sakija, imenovana tudi perzijsko vodno kolo ali timpanum, je po izvedbi sicer podobna noriji, razlikuje pa se po načinu poganjanja kolesa – namesto rečnega toka kolo poganjajo živali npr. voli, kamele, konji... (lahko pa tudi človek). Sakijo, z vedri, pritrjenimi na vrv in napeljano okoli pokončnega kolesa, še vedno uporabljajo v Egiptu, le da so sedaj vedra izdelana iz pocinkane jeklene pločevine, kolo pa gnano na mehanski način. Glede na področje uporabe te izvedbe kot egiptovska, perzijska, nubijska sakija so le-te lahko različnih izvedb (brez daljše vrvi z lonci, način zajemanja vode z drugače oblikovanimi posodami ...). Ena od izvedb sakije je prikazana na sliki 5.



Slika 5 : Vodno kolo, sakija, ki ga poganjajo živali, področje Zgornjega Nila [5]



Slika 6 : Egipčanska (levo) in grška izvedba Arhimedovega vijaka (desno)

Sodobnejšo izvedbo naprave za transport oz. dviganje in pretakanje vode, pa čeprav še vedno s pogonom, ki uporablja moč človeka, predstavlja vodni vijak. Izvedba je danes bolj znana pod imenom vijačna črpalka. Iznajdbo vijačne črpalke običajno sicer pripisujemo Arhimedu, (rojen v Siracusi na Siciliji, 287 do 212 pr. n. št.) grškemu matematiku, fiziku, inženirju, inovatorju in astronomu, a so zgodovinarji mnenja, da je vijačno črpalko videl ob svojem obisku Egipta. Takšno sklepanje temelji na dejstvu, da je bila tovrstna naprava Grkom pred helenističnimi časi neznana. Slike grških in rimskih vijačnih črpalk kažejo, da je imela valjasto kovinsko ohišje, v katerega je bil vstavljen vijak, ki ga je vrtel človek ali pa ga je vrtela vetrnica s pomočjo sile vetra. Dve izvedbi Arhimedovega vijaka prikazuje *slika 6*.

Drugi raziskovalci zopet menijo, da je bila takšna naprava še starejšega izvora in da so jo že uporabljali za namakanje visečih vrtov Babilona, enega od sedmih čudes starega sveta. Tako Stefani Dalley omenja klinasti napis asirskega kralja Sennacheriba (704 do 681 pr. n. št.), ki opisuje uporabo bronastih vijakov za transport vode, uporabljanih 350 let pred omembo Arhimeda.

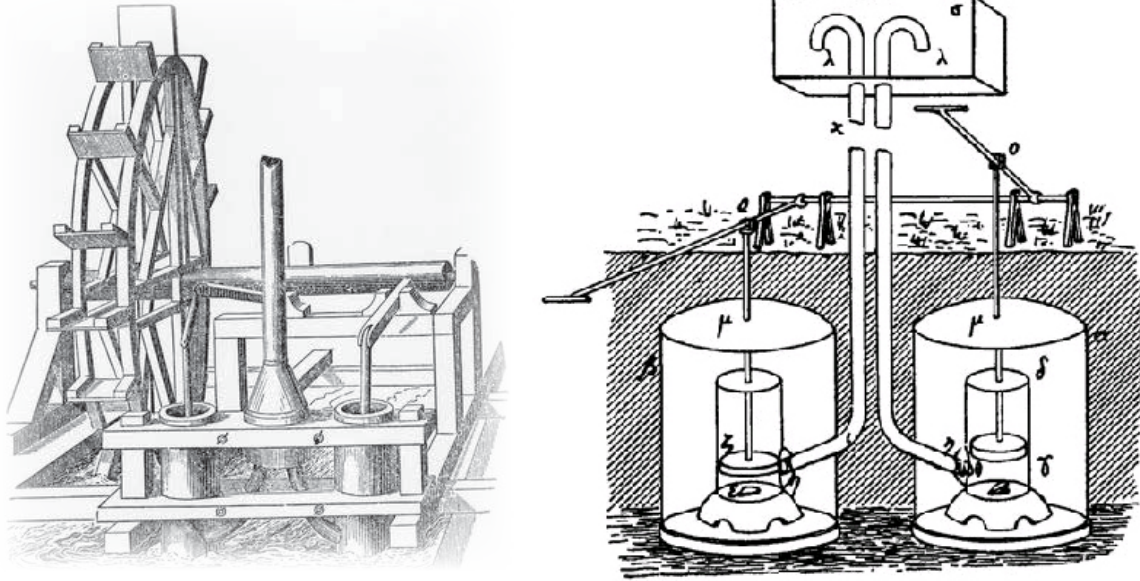
Vijačna črpalka je skozi zgodovinski razvoj doživela več večjih ali manjših sprememb in izboljšav, bila je npr. dopolnjena s zobniško prestavo, vleženjem vijaka, različno izvedbo vijaka, a je princip kot takšen v uporabi še danes, za različne namene. Leta 1830 je Revillion izumil sodobno vijačno črpalko, kakršno uporabljamo v današnjih hidravličnih napravah. Ta črpalka je bila sestavljena iz desnega in levega vijaka, ki sta se ubirala in vrtela v nasprotnih si smereh. [8]

Iz tega obdobja je v smislu delovanja črpalke potrebno omeniti še dve napravi, vodne orgle in pa batno črpalko, ki ju je zasnoval Grk Ktesibius (rojen v Aleksandriji, Egipt, 285 do 222 pr. n. št.) predstavnik t. i. Aleksandrijske šole. Ime Ktesibius pogosto povezujemo z izrazom hidravlika, hidravlično črpalko

in hidravličnimi oz. vodnimi orglami ter z vodno uro klepsidro, zračno gnanim katapultom, če omenimo njegove le najbolj znane naprave. V vseh primerih gre za izvirne rešitve, pri katerih je izkoriščal energijo vode in zraka ter ju kombiniral z mehaniko. V navezavi na hidravlično pogonsko tehniko je mogoče najbolj znana njegova dvobatna črpalka, ki so jo uporabljali za gašenje požarov. Ktesibius je imel rad tudi glasbo, zato je svoje ideje in znane »tipske« rešitve uporabljal tudi pri snovanju glasbenih instrumentov. Tako je zasnoval prvi »armonion«, ki je deloval na principu črpanja zraka skozi cevi. [9]

Vodne orgle, pogosto imenovane tudi hidraulis, so neke vrste predhodnik sodobne črpalke, delujoče na mehanski način. Vodne orgle, ki naj bi jih zasnoval Ktesibius iz Aleksandrije v Egiptu, okoli 200 pr. n. št., so po enih navedbah zračna črpalka, ki je imela v valju na spodnjem koncu nameščene ventile, vstavljen bat oz. valjasto telo pa je bil v plunžer izvedbi (=bat in batnica enakega premera). Bat je ob premikanju povzročil podtlak, ta pa je vodo posejal skozi ventil. V tem smislu je delovanje te naprave resda podobno delovanju črpalk. Črpalka je bila običajno izdelana iz bron, ventili in bati, kot elementi črpalke, pa so se pričeli uporabljati tudi pri drugih vrstah strojev, predvsem kot gradniki v vojaški opremljeni.

Hidravlične orgle ali hidraulis pa so glasbeni instrument, podoben današnjim cevnim orglam, delujočim na zrak. Zrak za igranje orgel – povzročanje tona oz. vir energije, ki potiska zrak v orgle, izvira iz naravnega vodnega vira (npr. energije padajoče vode slapa) ali pa ga zagotavlja ročna črpalka ali ročno gnani meh. Po drugem opisu vodnih orgel pa gre za instrument, pri katerem sta voda in zrak hkrati dotekala v t. i. zračno komoro. Tukaj sta se zaradi različni mas zrak in voda ločila, stisnjen zrak pa je potoval dalje do orgelske oz. zvočne cevi. Dve luknjani »pršilni plošči« ali »diafragmi« sta preprečevali pršenje vode in njen vdor v orgelske cevi. Kakršnakoli je že bila dejanska izvedba, so bile vodne orgle prvi instrument na svetu s klaviaturo.



Slika 7 : Ktesibiosove črpalke; vodno gnana črpalka (levo) in ročna gasilska črpalka (desno); [9], [10]

Podobna konstrukcija je omenjena tudi v povezavi s Heronom iz Aleksandrije, kjer je orgle poganjala vetrnica. Mnogo stoletij kasneje se je hidraulika razvil v današnje sodobne orgle.

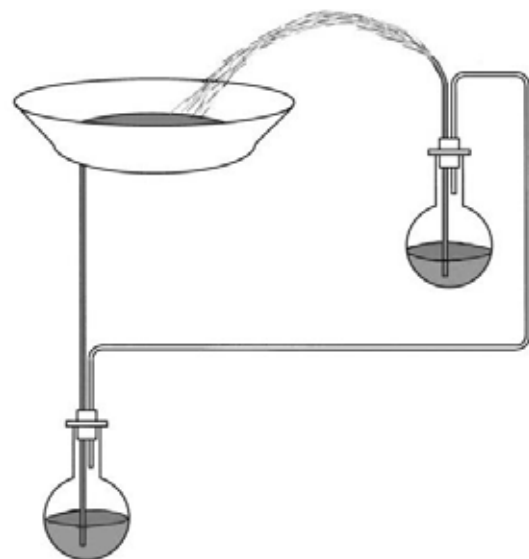
Druga pomembna iznajdba, povezana s Ktesibiustom, je že omenjena dvobatna črpalka, katere delovanje je kasneje opisal Philo iz Bizantina (2. stoletje pr. n. št.), kajti Ktesibiosova knjiga z originalnim opisom delovanja bi se naj izgubila.

Ktesibiosove črpalke so bile različnih izvedb, gnane z vodnim kolesom ali pa ročno, med delovanjem pa so morale biti potopljene v vodo. Primer ene je prikazan na *sliki 7*. Prikazana izvedba črpalke bi se naj uporabljala tudi kot črpalka za gašenje požarov. [9], [10] Prednost te izvedbe črpalke je bila v tem, da je dvignila vodo na določeno višino, določeno z dimenzijami črpalke in pogojem, da bo dovodna cev sposobna vzdržati hidrostatični tlak. Je pa imela ta izvedba črpalke tudi določene pomanjkljivosti. Črpalni mehanizem je moral biti v celoti potopljen v vodi in če je nivo vode upadel, se valj črpalke ni napolnil. Rešitev teh težav je bila v uporabi sesalne cevi na vstopu v črpalko, kakršno imajo današnje črpalke. Ne samo, da sesalna cev omogoča, da lahko črpalko namestimo nad gladino vode, z njo se lahko prilagajamo tudi nihanju gladine vodnega vira. Glede na izvedbo te črpalke je lahko sesalna višina znašala približno 10 metrov, višina curka pa slabih 8 metrov.

V tistem obdobju so že dokaj dobro poznali tudi učinek gravitacijskega tlaka ter ga tudi znali izkoriščati za namene pretakanja tekočine. To so bile prve naprave za pretakanje, ki niso uporabljale gibajoče se mehanske dele in zunanji pogon. Ena tovrstnih »črpal« je Heronova črpalka (*slika 8*),

delujoča na podtlak, znana tudi kot Heronova fontana (Heron, Aleksandrija, 10 do 70 n. št.).

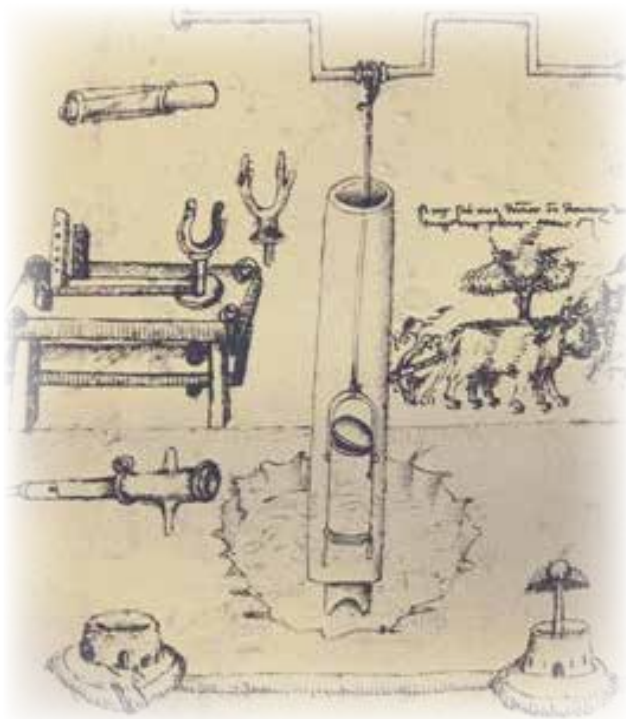
Delovanje Heronovega vodnjaka ali Heronove fontane zgolj na principu težnosti in zračnega tlaka, »brez zunanje energije«, se je ljudem v 1. stoletju našega veka zdelo čudežno. Sedaj vemo, da je delovanje naprave le lep prikaz Pascalovih in Bernoullijevih načel, ki so jih podrobneje spoznali in zapisali veliko kasneje. Vsi omenjeni principi in načini delovanja so prisotni v večini današnjih izvedb črpal: vsebujejo vse omenjene gradnike in delujejo po principu najprej sesanja in nato iztiskanja tekočine, tudi pod visokim tlakom – hidrostatične črpalke.



Slika 8 : Heronova podtlačna črpalka - Heronov vodnjak

3 Hidrostatične črpalke

Prvo omembo »Evropske« batne črpalke, ki je že imela vgrajeno sesalno cev, srečamo šele v petnajstem stoletju, v zapisih Taccole (okoli leta 1450) in Martinija (okoli leta 1475). Grobi prikaz zgradbe črpalke je prikazan na *sliki 9*. Valj črpalke in bat sta bila bolj ali manj natančno izdelana iz lesa, ki ne vzdrži visokega tlaka, pa tudi odvodne oz. tlačne



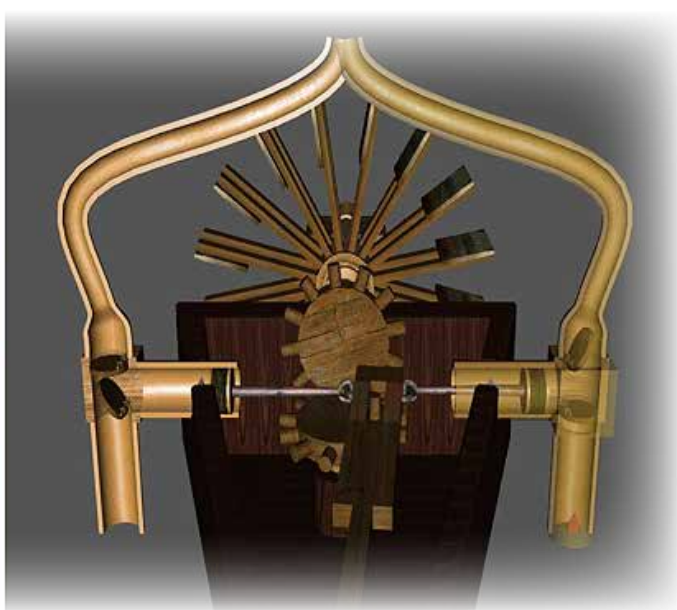
Slika 9 : Prva »Evropska« batna črpalka [11]

cevi ni imela. [11] Tekočina je kar prosto iztekala na zgornji strani. Prav tako ni imela nobene batnice ali podobne »palice« za premikanje bata – v ta namen je na sliki prikazana kar vrh. Zato je delovanje takšne zasnove vprašljivo. [12] Prav tako ni trdnih dokazov o evropski »tradiciji batnih črpal«, zasnovanih in uporabljenih v srednjem veku.

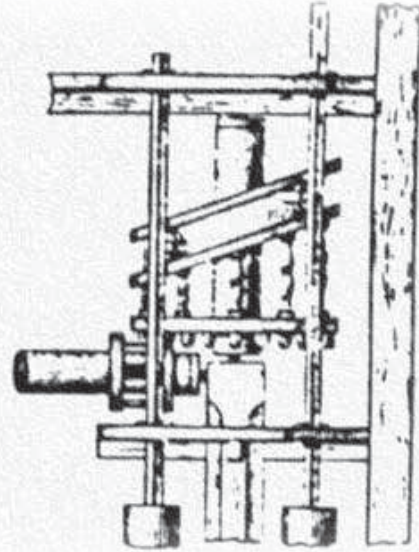
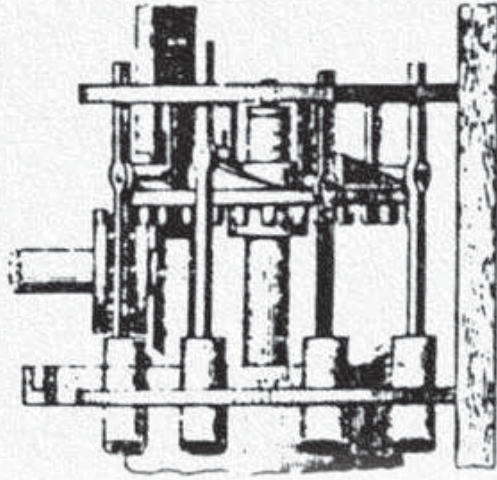
Predpostavka, da je Taccola prvi opisal sesalno črpalco [13], ni povsem utemeljena. Edina razlaga za nenaden pojav sesalne črpalke v spisih renesančnih inženirjev v Evropi je ta, da je bila ideja podedovana od islama, čigar inženirji so že dolgo poznali batne črpalke, že v zgodnjem srednjem veku [14].

Ismail Al-Jazari (1136 do 1206, islamski mislec, matematik, inženir, iznajditelj, artist) je leta 1206 napisal knjigo o strojih (približen prevod: *Knjiga znanja genialnih mehanskih naprav*). Med svojimi napravami za dviganje vode je opisal dvovaljno sesalno batno črpalco, za katero lahko rečemo, da je imela neposreden pomen pri razvoju sodobnega inženirstva. To črpalco sicer poganja vodno kolo, ki skozi sistem zobnikov dalje poganja nihajočo palico, na katero so pritrjene palice/batnice dveh batov. Bati se premikajo recipročno, eden proti drugemu, in so nameščeni v nasprotno ležečih si valjih, pri čemer je vsak valj opremljen s sesalnimi in dovodnimi cevmi ter dvema ventiloma – *slika 10*. Dovodne cevi so priključene nad sredino stroja, tako da tvorijo en izhod v namakalni sistem. [15], [16]

Ta črpalca je izjemnega pomena iz treh razlogov: predstavlja najzgodnejšo znano uporabo prave sesalne cevi v črpalci, uporablja princip dvojnega recipročnega delovanja in uporablja pretvorbo rotacijskega v translatorsko gibanje. Zato ima pomembno



Slika 10 : Al-Jazarijeva dvojna, recipročno delujoča črpalca z ročično gredjo; originalna risba (levo) in CAD risba črpalke (desno); [18]



Slika 11 : Ramellijeva aksialna batna črpalka [19]

mesto ne samo pri razvoju sodobnih batnih črpalk, temveč tudi pri razvoju parnega stroja. [17]

Ob koncu 16. in v začetku 17. stoletja so se pojavile vse »glavne« vrste črpalk, ki jih še danes uporabljamo kot glavne in najširše uporabljane hidravlične črpalke, ki delujejo po principu iztiskanja tekočine. Gre za zobniško, krilno in batno črpalko. Osnovna zgradba in princip delovanja je od prvih izvedb pa vse do danes ostal enak – vse delujejo na principu generiranja podtlaka v fazi sesanja tekočine, ki ji sledi faza iztiskanja tekočine.

Leta 1588 je Agostino Ramelli (1531 do 1610), italijanski vojaški inženir, najbolj znan po svoji knjigi ilustracij različnih naprav »*Le diverse et artificiose machine del Capitano Agostino Ramelli*«, objavil prvo sliko krilne črpalke. Omenjena knjiga vsebuje 195 ilustracij najrazličnejših naprav, med katerimi je prikazana tudi zasnova preproste krilne črpalke. Omenjena vrsta črpalke se ni pretirano pogosto omenjala in uporabljala vse do druge polovice 19. stoletja, ko je Američan Charles Barnes dodelal zasnovo te črpalke. Pomembna je postala šele po letu 1920, ko je njeno zasnovo in delovanje izboljšal Harry Vickers. Kot tlačno uravnoteženo izvedbo jo danes pogosto srečamo v različnih aplikacijah. Medtem ko je Ramelli le izumil to vrsto črpalke oz. v svoji knjigi le prikazal možno rešitev, pa vseeno ni jasno ali res gre za prvi dokumentirani primer rotacijske hidrostatične črpalke, ki deluje po principu iztiskanja tekočine. V tistih časih bi se lahko tovrstna črpalka tudi praktično uporabljala, ali za izčrpavanje vode npr. iz rudnikov ali pa zgolj za »okrasne namene«, npr. kot vodomet, vendar o njeni dejanski uporabi viri ne poročajo.

Razen zobniške črpalke je Ramelli v isti knjigi opisal tudi aksialno batno črpalko, ki bi naj bi bila tudi

dejansko izdelana in praktično uporabljena za odvodnjavanje rudnikov. Čeprav je bila v leseni izvedbi (kot tudi vse prve ostale črpalke tega obdobja), pri čemer so bili bati tesnjeni z usnjenimi manšetami, je bila po zgradbi in načinu delovanja enaka današnjim batnim črpalkam. Ramellijevo batno črpalko, kot eno od njegovih 110 rešitev za namene odvodnjavanja rudnikov, prikazuje *slika 11*.

Okoli leta 1600 je Nemški astronom, matematik in astrolog Johannes Kepler (1571 do 1630) zasnoval prvo zobniško črpalko. Preden se je pričel poglobljeno ukvarjati z astronomijo, je Kepler kot matematik poučeval v Grazu, v Avstriji. Iz virov ni znano, kako je Kepler prišel na idejo o zobniški črpalki, ki je danes najpogosteje uporabljena vrsta hidravlične črpalke. Bajе mu je lokalni graditelj vodnjakov oz. fontan naročil, da zasnuje preprosto in robustno črpalko, ki bi jo bilo tudi enostavno izdelati, a prvi izdelani prototip zaradi nenatančne izdelave naj ne bi zadovoljivo deloval. Zato je leta 1604 prosil za pomoč Josta Buergija, ki je bil urarski mojster, zato mu je bila natančnost izdelave veliko bolj blizu kot Keplerju. Drugi izdelani prototip zobniške črpalke je očitno deloval, saj so o njem krožile novice v smislu »zanimiva mala fontana z dokaj visokim curkom«. Kepler svoje črpalke ni patentiral in komercializiral, saj je imel v mislih »veliko večje ideje«, kot je bila ta črpalka. Intenzivno se je namreč pričel ukvarjati z gibanjem planetov okoli sonca, zato se mu je zdela zobniška črpalka za fontane nekako nepomembna. Je pa Kepler nekoliko povezan tudi s Slovenijo. Iz Graza je bil zaradi protestantske vere izgnan in je zatočišče našel v dvorcu Kastelišče, katerega ostanke lahko najdemo na Petanjcih v Prekmurju. Čeprav je na Petanjcih je prebival le nekaj mesecev, preden se je »pokesal« in sprebrnil nazaj v katoliško vero, smo na ta način povezani s tem velikim

inženirjem črpalk. Njegova črpalka je imela dva zobnika z zunanjim ozobjem, s po šestimi zobmi oz. šestimi medzobnimi prostori oz. komorami.

Preprostejšo zobniško črpalko, kjer je zobnik z zunanjim ozobjem imel le štiri zobe oz. medzobne prostore, je leta 1624 zasnoval Francoski inženir Jean Leurechon (1591 do 1670). Tako zasnovano zobniško črpalko je opisal v knjigi »*La Recreation Mathematique*«. V knjigi je podal podroben opis zgradbe črpalke in natančen opis delovanja, kaj več pa ni mogel storiti, saj je najverjetneje dobro poznal Keplerjevo črpalko. Leta 1630 je Leurechonov sonarodnjak Nicolas Grollier zgradil celo vrsto mehanskih strojev in modelov, s katerimi je lahko demonstriral njihovo delovanje. Med njimi je tudi bila zobniška črpalka z zunanjimi zobmi v izvedbi zobnika s petimi zobmi. Izvedbo črpalke je opisal kot zelo zanesljivo črpalko za dviganje vode iz vodnjaka ali iz rezervoarja ter transport na veliko višino.

Leta 1636 se je Keplerjeva izvedba zobniške črpalke s šestimi zobmi pojavila kot t. i. »Pappenheimska črpalka«. Pappenheima pogosto navajajo kot iznajditelja zobniške črpalke, čeprav je koncept te črpalke bil znan že vsaj trideset ali štirideset let. Poganjalo jo je vodno kolo, uporabljena pa je bila v vodni fontani, za kar mu je kralj Ferdinand podelil neke vrste avtorsko pravico Imperial Privilege (predhodnik današnjega patenta) – od tod misel o iznajdbi zobniške črpalke Pappenheimu. Tudi glede lastništva in pridevnika »pappenheimska« si zgodovinarji niso povsem enotni. Po eni razlagi gre za mesto Pappenheim na Bavarskem v Nemčiji, po drugi pa, da gre za grofa Pappenheima, po katerem se je to mesto tudi imenovalo in ga je rodbina vodila. Vprašanje, ali je ta črpalka pappenheimska ali Pappenheimova, ostaja odprto. Vse tri omenjene vrste omenjenih zobniških črpalk prikazuje *slika 12*.

Proti sredini 17. stoletja so tako že bile znane in tudi uporabljane vse tri vrste danes najpogosteje

uporabljenih vrst hidrostatičnih črpalk, zobniška, krilna in batna črpalka. Razen omenjenih pionirjev gradnje rotacijskih črpalk današnje oblike, bi lahko omenili še številne druge pionirje in inženirje kot npr. Fabrya, Jones-Roota, Paytona, Evrarda, Lecoega, ki so vsaki od že znanih črpalk dodali določeno izboljšavo, ki je črpalko naredila bolj učinkovito in zanesljivo. Z iznajdbo rotacijsko delujočih črpalk se je tako začelo obdobje neodvisnosti od naravnih virov energije.

4 Zaključek

Zametki današnjih hidravličnih naprav segajo že daleč v preteklost in so povezani z naprednimi civilizacijami takratnega časa. Nekatere izvedbe so bile zelo praktične in dodelane, rešitve izvirne in povečini praktično uporabne. Evropa v današnjem pomenu ozemlja ni bila med vodilnimi. Po zatonu teh civilizacij se nekako zdi, da je po času Rimljanov, približno do 16. stoletja vladalo zatišje (ali pa morda tudi gre za pomanjkanje virov), ko se je pričelo obdobje gradnje hidravličnih črpalk v današnji obliki. To dolgo obdobje lahko imenujemo obdobje vodnih koles in naprav za transport vode, pri čemer so deloma že bili znani zametki določenih fizikalnih zakonitosti, povezanih z delovanjem teh strojev, a le v osnovni obliki, brez globljega zavedanja njihove uporabnosti.

Z gledišča hidravlične pogonske tehnike je bilo pomembno predvsem zadnje obdobje, ko so se pojavile in praktično zgradile ter uporabile osnovne vrste rotacijskih črpalk, delujoče na principu iztiskanja tekočine. Snovalci le-teh so razumeli in premislili način delovanja, ki je ostal ohranjen do današnjih dni, a brez kakršnegakoli računskega ozadja. Obdobje pojava teh črpalk lahko zato brez dvoma smatramo za prvi večji mejnik razvoja hidravličnih naprav.

Naslednji mejnik v razvoju hidravlike oz. hidrostatike predstavlja zapis Pascalovega zakona, kot osnov-



Slika 12 : Prve izvedbe zobniških črpalk; Keplerjeva (levo), Leurechonova (sredina) in Pappenheimska/-ova (desno); [19], [21]

nega zakona okoli leta 1650 in na osnovi njega razumevanje hidrostatičnega principa prenosa sil in gibanja. Na podlagi znanih principov hidrostatike – vzrok nastanka tlaka, princip transformacije sile in princip transformacije tlake, je bila šele približno 150 let kasneje zgrajena prva hidravlična stiskalnica. Prva hidrostatična stiskalnica pa je občutno pripomogla k neslutnemu razmahu te tehnologije na različnih področjih tehnike.

Literatura

- [1] N.N.: Water wheel history; <http://www.top-alternative-energy-sources.com/water-wheel-history.html>
- [2] Agricola, Georg: De re metallica; 1st ed. Basil: Hieronymus Froben & Nicolaus Episcopius, 1556
- [3] Agricola, Georg: De re metallica; <https://www.flickr.com/photos/bookhistorian/33951216891/in/album-72157682587188056/>
- [4] Belidor, Bernard Forest de: Architecture hydraulique, ou L'art de conduire,
- [5] N. N.: Interesting Engineering – 8 Ancient Water Engineering Wonders; <https://interestingengineering.com/8-ancient-water-engineering-feats>
- [6] Priscilla Chirom: Timeline of water machines, <https://www.sutori.com/story/timeline-of-water-machines--QemmdpmwHB4VzkNN-HLn4S7D1>
- [7] D. P. Agarwal: Needham on Early Indian Inventions of Hydraulics, <https://blastfferomthepast.wordpress.com/2018/04/30/the-early-water-lifting-devices-dhenkli-or-shaduf-and-the-araghatta-noria/>
- [8] Stefanie Wallace: Back to the beginning – A glimpse into the history of pumps; <https://www.groundwatercanada.com/new-products-equipment/back-to-the-beginning-1810/>
- [9] N. N.: History of Science and Technology in Islam; <http://www.history-science-technology.com/notes/notes2.html>
- [10] Hubert Walker: The Story of the fire pump; <https://www.fireengineering.com/articles/print/volume-119/issue-8/features/the-story-of-the-fire-pump.html>
- [11] White Jr., Lynn: Medieval Technology and Social Change; Oxford University Press, 1979
- [12] Prager, Frank D. and Gustino Scaglia: Mariano Taccola and his Book De Ingeneis, MIT Press, 1972, 44/15, str. 49-51
- [13] Shapiro, Sheldon: 'The Origin of the Suction Pump' in Technology and Culture, Vol. V, št. 4, str. 566-74
- [14] Smith, Norman: Man and Water, London, 1975, str. 98-99
- [15] Al-Jazari, Al- Jami` bayn al-ilm was `amal al-nafi` fi sina`at al-hiyal: (A Compendium on the Theory and Practice of the Mechanical Arts), Arabic text, edited by Ahmad Y. al-Hasan, Institute for the History of Arabic Science, University of Aleppo, 1979, str. 465
- [16] Hill, Donald R.: Islamic Science and Engineering, Edinburgh University Press, str.102
- [17] Hill, Donald R.: Studies in Medieval Islamic Technology, edited by David King, Ashgate, U.K., 1998, Article II, str. 229. (this paper is a reprint from the Proceedings of the First International Symposium for the History of Arabic Science, april, str. 5-12, 1976, Aleppo, Institute for the History of Arabic Science, 1979.)
- [18] Salim Al-Hassani: The Journey of Automatic Machines in Muslim Civilisation, International Symposium on Al- Jazari "The Bright Age Shown as Dark" 13-14 May 2016; <http://muslimheritage.com/article/journey-of-automatic-machines>
- [19] Weingarten, F.: Die Entwicklung der hydrostatischen Energieuebertragung im 19. Und 20. Jahrhundert, O+P – Oelhydraulik und Pneumatik, 26, No.12, 1982, str. 873-878
- [20] Stavros I. Yannopoulos, Gerasimos Lyberatos, Nicolaos Theodossiou, Wang Li, Mohammad Valipour, Aldo Tamburrino, Andreas N. Angelakis: Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide; Water 2015, 7, 5031-5060; doi:10.3390/w7095031
- [21] Steve Skinner: Hydraulic Fluid Power; A Historical Timeline, 2014, Steve Skinner Presentations
- [22] Hunter Rouse, Simon Ince: History of Hydraulics; Dover publications Inc.; 1957

