

EL-CEZERİ'NİN BATAR TÜRÜDEN BİR SÜREÖLÇERİ (*TARCAHÂR*)

*Atilla Bir**, *Mustafa Kaçar***, *Mahmut Kayral****

Gündelik hayatta zaman, bir eylemin içinde geçtiği, geçeceği ya da geçmekte olduğu süre olarak değerlendirilir. Zaman, daha önce oluşmuş ve bundan sonra oluşacak olayların ardışıklığını belirten, sonsuz geçmişten, içinde yaşadığımız ana ve buradan sonsuz geleceğe uzanan soyut bir kavramdır. Tanımında zorlanan zaman kavramı tek yönlü, sıfır noktası genellikle belirli bir olaya göre tespit edilen, fiziksel sayıl (skaler) bir büyüklükle ifade edilir. Modern fizikteki görecelik kuramı gereği, zaman kişiye özel bir şekilde yaşanır ve cisimlerin kütle, hız ve enerjisiyle de yakın ilişkilidir.

Dünya üzerinde yaşayan insanlar, zaman kavramını bir gün süresiyle ilişkilendirmiş ve günümüzde kullanılmaya devam edilen saat kavramını türetmişlerdir. Saat, halen bir günlük sürenin yirmi dördte birine eşit olarak alınan bir zaman birimidir. Önce avcılık yapan ve sonra tarıma geçen yerleşik antik çağ insanı için günün aydınlık olan gündüz süresi gecedен çok daha önemlidir. Bu nedenden dolayı, ilkin gece ile gündüzün ayrı 12 eşit parçaya bölüdüğü değişken saat kavramı kullanılmıştır. Yakın zamanlara kadar kullanılan bu saat kavramında, yılın bulunulan gününe göre gündüzleri yazın uzayıp kışın kısalan saat, işlerini gündüz süresine göre ayarlayan çobanlar, çiftçiler ve kervancılar için çok daha kullanışlıdır. Ancak bu değişken saat süresinin hassas bir şekilde belirlenmesi ve ölçülmesi çok daha zordur.

Zaman süresi saat tanımı gereği en kolay ve pratik yere dikilen bir çubuğun gölgesi izlenerek ölçülür. Bu doğal ölçü yöntemi güneş saatlerinin geliştirilmesine neden olmuştur. Ancak güneş saatlerinin özellikle geceleri ve göğün bulutlarla kaplı olduğu günlerde kullanılamaması, başka bir çözümün aranmasını zorunlu kılmıştır. Alternatif çözümün su saatleri şeklinde Mısır'da geliştirildiği bilinir.¹ Mısır tapınak kazılarında arkeologlar rahiplerin gece ayın zamanla-

rını belirlerken kullandıkları çeşitli su saatlerini gün ışığına çıkarmışlardır (Şekil 1).

Su saatinin çalışması bir kaptan diğer bir kaba su akıtarak biriken suyun seviyesinden geçen zamanı belirleme prensibine dayanır. Bu yöntem, suyun buharlaşması ve donması önlediği sürece, özellikle geceleri kullanmaya çok uygundur. Yapılan incelemelerden sıhhatli bir zaman ölçümü için çevre sıcaklığının fazla değişmemesi gerektiği, bu koşulun kalın duvarlı loş Mısır tapınaklarında yeterince gerçekleştiği bilinir.² Kapta biriken su geçen zamanla orantılı olduğuna göre, bu bilgi bir şamandıra, makara ve karşı ağırlık yardımıyla kolaylıkla başka mekanlara ve özellikle saat kadranlarına aktarılabilir. Su saatleri bu özellikleri nedeniyle, mekanik saatler XII. yüzyılda geliştirilinceye kadar şehirlerde görevlerini meydan saatleri olarak sürdürmüşlerdir.³



Şekil 1. Karnak'ta bulunan İ.Ö. 1400 tarihli kaymak taşından (alabaster) boşalmalı türden bir su saati (W. z. Megede, *Am Wege zur Automation, Antiker Traum moderne Wirklichkeit*, Siemens Aktiengesellschaft, Münih 1974, s. 31).

Su saatlerinde temel sorun bir kabın dibinden diğer bir kaba boşalan su debisinin kaptaki suyun seviyesine bağlı olarak sürekli değişmesidir. Bir kabın dibinden su yerçekimi kuvveti etkisiyle başka bir kaba boşalırken suyun potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüşür. Eğer kaptaki suyun kütlesi m , suyun dışarıya akış hızı v , yerçekimi ivmesi g ve kaptaki suyun seviyesi h ile ifade edi-

* İTÜ, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Bölümü; abir@elk.itu.edu.tr

** İÜ, Edebiyat Fakültesi, Felsefe Bölümü, Bilim Tarihi Anabilim Dalı, mkacar_99@yahoo.com

*** İTÜ, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Bölümü, emekli öğretim görevlisi.

¹ A. Pogo, "Egyptian Water Clocks", *Philosophers and Machines*. ed. Otto Mayr, History of Science Selection from ISIS, Science History Publications, New York, s.11-37, 1978; B. Cotterell, J. Kamminga; *Endüstri öncesi Teknolojilerin Mekanığı*. Çeviren Atilla Bir, Literatür Yayınları, İstanbul 2002, bölüm 3. M. Clagett, *Ancient Egyptian Science*, vol. II, American Philosophical Society, Philadelphia 1995, 65-83.

² B. Cotterell, J. Kamminga, *a g e.*, s. 74.

³ H. Diels, *Antike Technik*, Otto Zeller, 1965, 155-232.

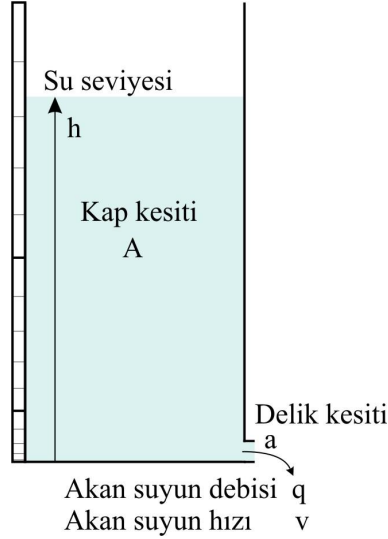
lirse (Şekil 2), enerjinin sakınımı prensibi gereği kinetik enerji potansiyel enerjiye eşitlenerek

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (1)$$

ilişkisi yazılabilir. Ayrıca suyun hızı $v = q / a$ şeklinde suyun boşalma debisi q ve boşalma deliği kesiti a cinsinden yazılırsa

$$q = a\sqrt{2gh} = k\sqrt{h} \quad (2)$$

ilişkisi elde edilir.



Şekil 2. Boşalmalı türden su saatlerinin prensibi.

Kabın içindeki suyun seviyesi $dh/dt = k\sqrt{h}/A$ kuralına uyarak değişir.

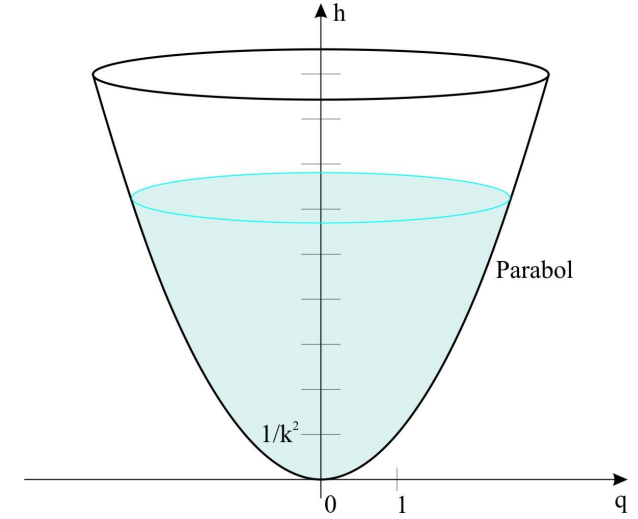
Burada $k = a\sqrt{2g}$ serbest akış katsayısı olarak adlandırılır. Serbest akış kuralına göre bir kabın altındaki delikten dışarıya akan suyun debisi, su seviyesinin kare köküyle orantılı olarak değişir. Aynı şekilde bu debi kabın içinde, A kap kesiti ve h su seviyesi olmak üzere, $q = A dh/dt$ değişimine neden olduğundan kabın içinde su seviyesinin zamana göre değişimi

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k\sqrt{h}}{A} \quad (3)$$

kuralına uyarak azalır.

Serbest akış kuralı $h = (q/k)^2$ biçiminde ifade edilebileceğine göre, eğer kabın iç yüzeyi, Şekil 3'te olduğu gibi, bu ilişkiye uygun paraboloid bir yüzeye dönüştürülürse, akan su debisi su seviyesinden bağımsız hale gelir. Mısırlılar Şekil 1'de görüldüğü gibi zamanı ölçtükleri kapların şeklini bir paraboloid yüze-

ye yaklaştırarak su seviyesinin belirli zaman aralıklarında aynı miktarlarda değişmesini amaçlamışlardır. Böylece kabın içine konan bir çubuğa yada kabın iç yüzeyine çizilen ölçü ıskalasını zamanı eşit aralıklı ölçer.



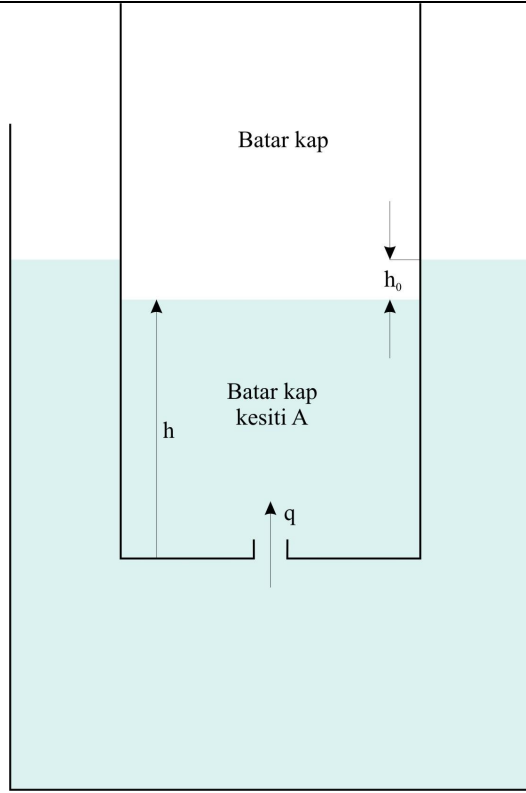
Şekil 3. Akıtmalı türden bir su saatinde su seviyesinin zamana göre yeknesak değişmesi için su kabına verilmesi gereken paraboloid şekil.

Zamanı ölçmek için ilginç diğer bir yöntem, dibinde bir delik bulunan bir kabı suyun üzerine bırakarak kabın batmasını beklemektir. Bu tür 'batar' saatlerde ölçeklendirme işlemi kabın iç yada dış yüzeyinde yapılabilir. Eğer batan kap kesiti yüksekliği boyunca değişmiyor ve batan kabın içine konduğu su kabının boyutları büyük, diğer bir deyişle batan kap tamamen battığında kaptaki suyun seviyesi ihmal edilebilecek kadar az değişiyor ise, batma hızı batış süresince aynı kalır ve eşit aralıklı bir ölçeklendirme elde edilir.

Bu durumda Şekil 4'te görüldüğü gibi kabın içi ve dışı arasında bir h_0 seviye farkı oluşur. Arkimedes yasası gereğince, batan kabın m kütlesi yer değiştiren su kütlesine eşit olması gerektiğinden, A batan kabın yükseklik boyunca değişmeyen kesit alanı ve ρ_s suyun özgül kütlesi olmak üzere

$$h_0 = \frac{m}{\rho_s A} \quad (4)$$

ilişkisiyle ifade edilebilir. Batma süresince kabın dibinden batan kabın içine giren suyun q debisi, serbest akış kuralında h_0 yüksekliğine karşı düşen miktardır:



Şekil 4. Batar türden su saatlerinin prensibi. Burada dış kabın büyük olduğu ve su seviyesinin batan kabın hacmi nedeniyle değişmediği varsayılmıştır.

$$q = k\sqrt{h_0} \quad (5)$$

Batan kaba giren q debisi sonucu, kap

$$q = A \frac{dh}{dt} \quad (6)$$

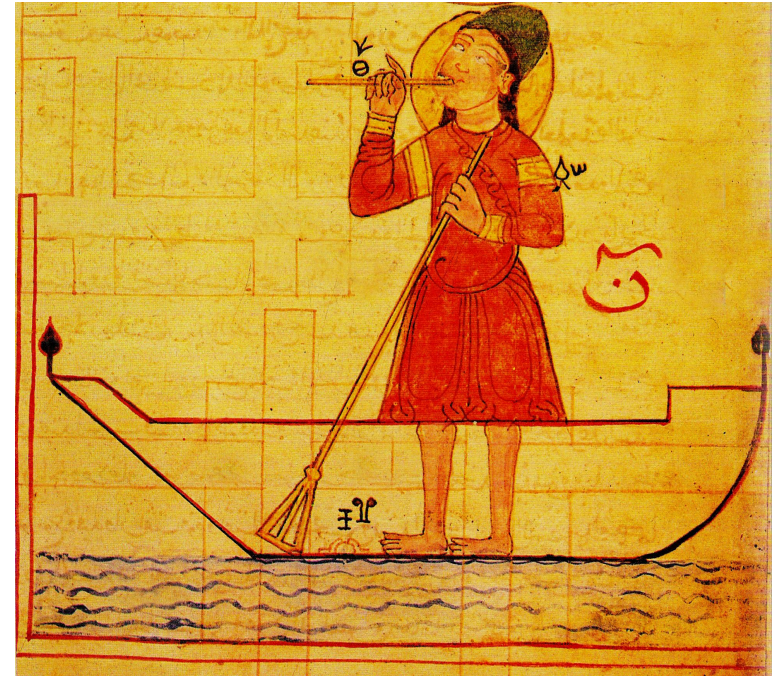
ilişkisi gereği dh/dt hızıyla batmaya başlar. Bu iki ilişki eşitlenir ve düzenlenirse

$$dt = \frac{A}{k\sqrt{h_0}} dh \quad (7)$$

ifadesi elde edilir. Bu durumda batar kaptaki su seviyesinin $h = h_1$ seviyesine kadar batma zamanı $t = t_1$, bu ifade entegre edilerek

$$t_1 = \frac{h_1}{a} \sqrt{\frac{\rho_s A^3}{2gm}} \quad (8)$$

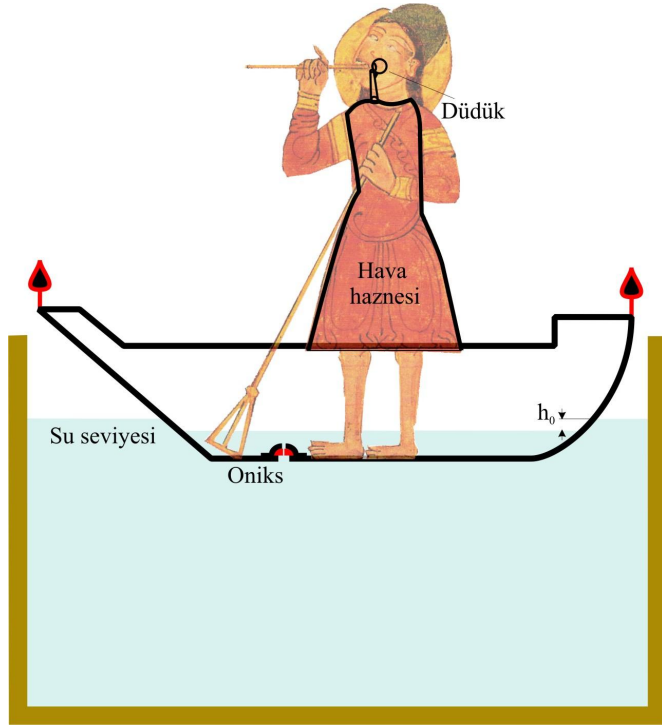
ilişkisinden hesaplanabilir.



Şekil 5. El-Cezerî'nin 'Kitab el-Hiyel' adlı eserinde 6. kısım 5. bölümde yer alan batar türden çalar saat (El-Cezerî; *Olağanüstü Mekanik Araçların Bilgisi Hakkında Kitap*, Tıpkı basım, Kültür Bakanlığı Yayınları, Bilim Teknoloji dizisi 2, 1990).

Batar su saatlerinin yirminci yüzyıl başlarına kadar Kuzey Afrika'da sulamada, tarla sahiplerine verilecek suyun zamanını belirlemede kullanıldığı bilinir. Suyun bol olduğu dönemlerde sulama zamanı karşılığında ödenecek parayla orantılıdır. Suyun kıt olduğu dönemlerde kişilere sırayla belirli bir süre su dağıtırdı. Ayrıca antik şehir meclislerinde ve mahkemelerde her konuşmacıya ayrılan zamanın batmalı saatlerle belirlendiği bilinir. Bu tür saatlerden İslam Ortaçağında da yaygın kullanıldığı anlaşılır. Zira el-Cezerî'nin 'Kitab el-Hiyel' adlı eserinin 6.kısım, 5.bölümünde, kitapta ele alınan son ellinci düzen olarak, günümüzdeki çalar saatleri anımsatan uyarıcı bir su saati anlatılmaktadır (Şekil 5).⁴

⁴ E. Wiedemann, Fritz Hauser; "Über die Uhren im Bereich der islamischen Kultur," *Nova Acta, Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher*, Band C. Nr. 5, Halle 1915, s.165-166; Donald R. Hill, *The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices*, Reidel, Dordrecht, 1974, s.204-5.



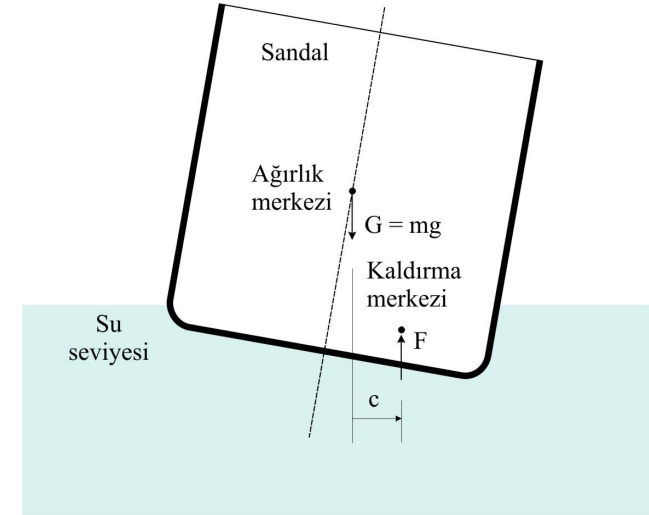
Şekil 6. Batar türden el-Cezerî süreölçerinin çalışma prensibi.

Batar çalar su saatinin amacı belirli bir zaman aralığını belirlemek ve bu zaman süresi sona erdiğinde çevresindekileri ikaz etmektir. Düzen bir kap ve içindeki pirinçten imal edilmiş zarif bir kayıktan oluşur. Kayığın içinde, sağ elinde bir flüt tutan ve sol elindeki bir küreğe omzuyla yaslanan bir adam durmaktadır.

Sandalın dibinde, dışla ilişkili bir yuva bulunur. Bu yuvaya, ortasına matkapla hassas bir delik açılmış bulunan bir balgamtaşı (*oniks*), kenarlarından su kaçırmayacak şekilde yerleştirilir (Şekil 6). Sandal kaptaki suyun yüzeyine bırakıldığında su taşın ortasındaki delikten sandalın içine girmeye başlar. Sandalın hacmi ve kütlesi sandal suya konduktan tam bir saat sonra batacak şekilde ayarlıdır (*tarcahâr*). Sandal battıktan sonra ikinci bir saat süresinin belirlenmesi için sandalın içindeki suyun boşaltılması ve tekrar suyun üzerine konması gerekir. Sandal battığında bir saatlik sürenin sona erdiği sandalın içindeki adam flüt çalarak bildirir.

Bu işlem şu şekilde gerçekleştirilir; sandalın içinde duran adamın gövdesi bir hava haznesi görevini üstlenir. Gövdenin sandala yönelik alt kısmı açıktır. Kafa ile gövde arasında bir ara bölme bulunur ve bu ara bölmenin üzerine tam

ağzın karşısına gelecek şekilde bir düdüğün küresi (*bunduka*) yerleştirilmiştir. Adamın eteği sandal kenarının az altına kadar uzanır. Sandal batmaya başlayınca su adamın eteğinden gövdesine girer ve gövdedeki havaya bir basınç uygular. Bu basınç gövdenin içindeki havayı düdüğe doğru ötelir ve düdüğün ötmesine neden olur. Düdüğün hava deposundaki su ile kaptaki su seviyesi eşitleninceye kadar ötmeye devam eder.



Şekil 7. Sandalın devrilmemesi için ağırlık ve kaldırma merkezlerinin birbirlerine göre konumu.

Sistemi tekrar kurmak için sandalı adamın kafasından tutarak kaldırmak, sandalın içindeki suyu yana eğerek boşaltmak ve tekrar suyun yüzeyine bırakmak gerekir.

Son olarak saatin boyutlandırılması ile ilgili olarak bazı düşünce ve hesapları aktarmaya çalışalım. El-Cezerî aletle ilgili olarak sadece kayığın pirinçten imal edildiğini, sandal boyunun $1\frac{1}{2}$ karış (yaklaşık 35 cm), eninin ise buna uygun bir boyutta olduğunu ve sandal suya konduğunda yana yatmaması için özellikle dengeli imal edilmesi gerektiğini ifade eder. Bir yüzen cismin ve özellikle teknelerin kararlılığını ağırlık ve teknenin yer değişimine neden olduğu su hacminin ağırlık merkezine karşı düşen kaldırma merkezlerinin birbirlerine göre göreceli konumları belirler. Sandalın yana yatması halinde, $M = c F$ kaldırma kuvveti momenti, sandalı dik konuma getirecek yönde etkili olmalıdır (Şekil 7). Bunu sağlamak için genellikle teknelerin suyun üzerinde kalan bölümlerinin fazla ağır ve yüksek olmamasına dikkat edilir, ayrıca teknenin dibine safla yerleştirilerek ağırlık merkezinin yeterince aşağıda kalması sağlanır.

Bu örnekte sandal gövdesi kullanılan diğer malzemelere göre daha ağır pirinçten imal edilmiştir. Sandalcı içi boş hafif malzemedan şekillendirilerek gerçekleştirilir. Ağır bir teknede teknenin h_0 batma miktarı fazla olur. Eğer dh/dt batma hızının sabit kalması isteniyor ise sandal hacminin yükseklik boyunca sabit kalmasını sağlamak gerekir.

Bir karış, bir elde beş parmak ayrılarak küçük parmak ile baş parmak arasındaki mesafe olarak tanımlanır ve ortalama olarak 23 cm kabul edilebilir. Buna göre sandal boyu için verilen $1\frac{1}{2}$ karış uzunluk 34,5 cm'ye karşılık gelecektir. Kolaylık sağlaması amacıyla, teknenin içi bir dikdörtgenler prizması şeklinde düşünülürse, teknenin boyu $l=35$ cm, genişliği $b=10$ cm ve yüksekliği $H=10$ cm kabul edilebilir. Bu durumda ortalama tekne alanı

$$A = l \times b = 35 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 350 \text{ cm}^2 \quad (9)$$

alınabilir. Ayrıca batan kabın kütlesi $m=200$ gram kabul edilir ve suyun özgül kütlesi $\rho_s=1$ g/cm³ alınır, sandal suyun üzerine konduğunda (4) ilişkisi gereği

$$h_0 = \frac{m}{\rho_s A} = 0,571 \text{ cm} \quad (10)$$

kadar batar. Bu sandal içi ve dışı arasındaki seviye farkı, sandal

$$h_1 = H - h_0 = 10 \text{ cm} - 0,571 \text{ cm} = 9,429 \text{ cm} \quad (11)$$

seviyeye batıncaya kadar korunur. Eğer sandalın h_1 seviyesine kadar battığı zamanı t_1 olarak adlandırırsak (*Şekil 8*) $0 < t < t_1$ zaman aralığında geçerli olan ilişkisinden, yerçekimi ivmesini $g=981$ cm/s² olarak

$$t_1 = \frac{h_1}{a} \sqrt{\frac{\rho_s A}{2gm}} = \frac{98,56}{a} \text{ [s]} \quad (12)$$

bulunur. Buna karşın $t_1 < t < T=1$ saat = 3600 saniye zaman aralığında seviye farkı değiştiğinden (3) serbest akış kuralı ilişkisi geçerlidir. Bu ifade düzenlenir

$$\int_{t_1}^T dt = \int_{h_1}^H \frac{A}{k\sqrt{h}} dh \quad (13)$$

ve entegre edilirse, serbest akış katsayısı $k=a\sqrt{2g}$ olduğuna göre

$$t_1 = T - \frac{2A}{a\sqrt{2g}} (\sqrt{H} - \sqrt{h_1}) = \left(3600 - \frac{1,463}{a} \right) \text{ [s]} \quad (14)$$

Eğer (12) ve (13) ilişkileri eşitlenirse delik kesitinin $a=0,0278$ cm² olması gerektiği hesaplanır. Buna göre açılması gereken deliğin çapı yaklaşık olarak

$$d = 2r = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} = 0,188 \text{ cm} \quad (15)$$

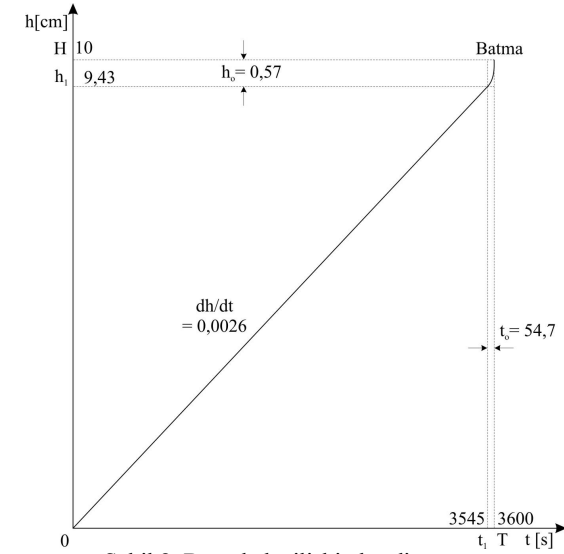
hesaplanır. Nihayet batma hızı (7) ilişkisinden

$$\frac{dh}{dt} = \frac{a\sqrt{2gh_0}}{A} = 0,026 \text{ cm/s} \quad (16)$$

ve t_1 zamanı (12) ilişkisinden

$$t_1 = \frac{98,56}{a} \text{ [s]} = 3545 \text{ s} \quad (17)$$

hesaplanır. Buna göre son h_0 yüksekliğinin batma süresi yaklaşık $t_0=55$ s sürer.



Şekil 8. Batar kaba ilişkin h-t diyagramı

Süreölçerle ilgili olarak türetilen modelin sistemin davranışı ve boyutlandırılması konusunda güvenilir sonuçlar verdiği anlaşılır. Buna rağmen burada göz önünde bulundurulmamış bulunan deliğin kılincelik (kapılarite) ve büzülme etkisi nedeniyle hesaplanan değerle gerçek değerler arasında bazı sapmalar oluşabilir. El-Cezerî zaman ayarının deneysel ayarlanması gerektiğini açık bir şekilde ifade etmiştir. Ayrıca suyun arı olması ve deliğin herhangi bir nedenden dolayı tıkanmamasını sağlamak gerekir

A sinking-type time-keeping vessel (*tarjahar*) of al-Jazarî

Atilla Bir, Mustafa Kaçar, Mahmut Kayral

In ancient Egypt the priests needed to tell the time during the night, so that the rites and sacrifices could be duly performed. On clear nights they could use the stars to designate the hours, but they needed a clock when it was cloudy. The Egyptians had a water-clock for this purpose in their temples which made use of the flow of water through a fine orifice for time regulation. Since the Egyptians used a linear scale on the inside of their clocks to mark the hours, the bottom of the vessel had to have a smaller cross-sectional area than the top.

The submersive float is another type of time measuring device. It was used in Antiquity to determine a given time duration. A vessel with a fine orifice on the bottom is put on a water surface. When the vessel sinks one knows that a predetermined time has passed. If desired, one can pour out the water and put the vessel for a second time on the water surface. If the vessel cross-section is equal along the height of the vessel the sinking rate is constant, and time scale generally marked on the in- or outside wall of the vessel is linear. This kind of time devices were in use from Antiquity till the beginning of twentieth century to determine the lecturing time of a speaker or the irrigation time in agriculture.

The most important work on engineering written before the Renaissance was the book on mechanics *Kitab al-hiyal* of Ibn al-Razzâz al-Jazari. It was composed in Diyarbakır (present day Turkey) in 1206. There are 50 different devices, such as water clocks, trick vessels, liquid dispensers, and phlebotomy measuring instruments, fountains, musical automata, and water-raising machines, as well as a submersive float (*tarjahar*) like the one described above. This is a 1½ span-long (app.35 cm) sinking vessel in the form of an elegant boat in which a boatman stands and plays a flute. The boat put on water surface sinks after one hour and the boatman informs the end of the hour by blowing a tone.

In this paper first, a detailed mathematical model of the outpouring and sinking process is given. Secondly, a calculation method is developed and applied for the orifice diameter in the determination of the al-Jazari type time-keeping vessel.

Key words: automata, al-Jazari, Kitab al-Hiyal, time measuring, tarjahar;
Anahtar kelimeler: el-Cezerî, Kitab el-Hiyel, otomatlar, tarcahar, zaman ölçme.