

IV. ÇEVİRİLER

POMPAJLA SULAMA SİSTEMLERİNDE EKONOMİK BORU ÇAPI (1)

Mehmet APAN (2)

GİRİŞ

Pompajla çalışan sulama sisteminde en ekonomik boru boyutu, boru çapına bağlı olarak değişen toplam yatırım için; yani boru uzunluğu boyunca oluşan sürtünme kaybını karşılamak için gerekli olan yıllık pompalama masrafı ile bu boru uzunluğuna yapılan yatırımın yıllık geri ödeme (kendini kurtarma) değerinin toplamı için minimum olan büyüklüktür. Hesaplamalar genellikle birim boru uzunluğu (100 m gibi) için yapılır. En ekonomik boru çapı prensip olarak borudan akan debi ve yıllık pompaj süresine bağlı olarak değişir.

Sık sık uygulanan, sınaama yoluyla en ekonomik projenin seçimi çok yorucu bir uygulamadır. Bu metot bilgisayar programlarının uygulandığı geniş kapsamlı sistemlerin plânlanması durumunda kullanılabilir. (De Boissezon 1965). Alternatif olarak en ekonomik boru çapının farklı şekilde bulunmasında, boru çapının bir fonksiyonu olarak toplam masraf için bir ifade bul-

nabilir. Bu belirli bir debi, yıllık pompaj süresi ve pompa randımanı için seçilen boru çapına dayanan sürtünme yük kaybı ile ilgili olarak yıllık güç (enerji) maliyeti deyimini ile yapılabilir. Hesaplamalar birim boru uzunluğu için yapılabilir. Fresen (1939) aşağıda ince çeperli boru formülünde gösterildiği şekilde boru maliyetinin boru çapının karesi ile değiştiğini farzederek bir çözüm yapmıştır. Aynı araştırmacı sürtünme yükünün değişimi nedeniyle pompaj tesisinin büyüklüğündeki değişime etkisi için bir tolerans da bırakmıştır. Hidroelektrik santralindeki cebri boru için ekonomik boru çapının belirlenmesi sorunu da bir pompaj tesisindekine benzer şekilde yapılır ve Low (1962) bu durumda Fresen'inine benzer bir çözümle en ekonomik boru çapını belirlemiştir. Garton (1960) boru maliyetinin boru çapının karesi ile değiştiğini kabul ederek belirli debi ve yıllık kullanma süresi için en ekonomik boru çapının bulunmasında kullanılan bir

(1) Makalenin orijinali: Roland P. Perold. "Economic Pipe Sizing in Pumped Irrigation Systems" Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 100 No: 1R4, December 1974, S. 425-441

(2) Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Kültürteknik Bölümü Öğretim üyesi.

seri grafik vermiştir. Bagley ve Linsley (1961) boru çapı ile maliyet arasında doğrusal bir değişim olduğunu kabul ederek 8 değişkeni aynı eksenli olarak yerleştirip arka arkaya sıra halinde kullanarak elde edilen 7 grafik yardımıyla grafiksel bir çözüm vermiştir. Sungur (1967) çap ile cebri boru maliyeti arasındaki karesel ilişkinin uygulamada geçerli olduğunu bulmuştur. Aynı araştırmacı ilk projede bulunan çapı düzeltmek yoluyla en ekonomik çapın belirtilmesinde bir metot geliştirmiştir. Richards (1963) Low'un makalesini analiz ederek çap boyunca belirli aralıklarla tertip edilen cebri boruları saptamıştır. Aynı araştırmacı hangi noktalarda (yük) cebri boru çapının değişmesinin gerektiğinin belirtilmesinde bulunabilen müteakip boru boyutları ile kârlılık noktasının nasıl bulunduğunu göstermiştir.

Pompaj sulama sistemleri durumunda genellikle elde mevcut olan boru

boyutları kullanılır. Bu durumda boru çapı aralıklı olarak değişir ve çap ile normal bir değişim göstermeyebilir. Nitekim, sürekli fonksiyonun farkını alma bu durum için genellikle uygulanmaz. Keller (1965) tarafından takdim edilen metotta akış debisi için bir boru boyutundan bitişik (bir önceki veya bir sonraki) boru boyutuna değişimin ekonomik oluşu, müteakip boru boyutunun uygun bir aralığı ve belirli bir yıllık pompaj süresi, pompa randımanı ile uygulanabilir. belirli plânlama durumundaki birim güç maliyeti için hesaplanır. Bu metot ileride açıklanacaktır. İki yakın boyutta eşit şekilde ekonomik olan ve çeşitli boru çapı için borudaki debiye karşı çizilen yıllık çalışma süresine göre kârlılık noktasını (masraf karşılama noktası) veren plânlama grafiği tertip edilmiştir. Bu grafik yardımıyla belirli plânlama durumu için en ekonomik boru çapı doğrudan doğruya okunabilir.

PRENSİP

Daha küçük çaplı borunun kullanılması sonucu ortaya çıkan yıllık fazla pompalama masrafına karşılık, küçük boyutlar için yıllık geri ödeme maliyetindeki azalma belirtilmek suretiyle belirli bir debi ve yıllık kullanma süresi için uygun boru boyutlarının birim uzunlukları karşılaştırılır. Akım-zaman grafiğindeki noktalar, sınır değerleri arasındaki bölgede kârlılık durumu (birim boru uzunluğu için en az masrafın olduğu) için en ekonomik bo-

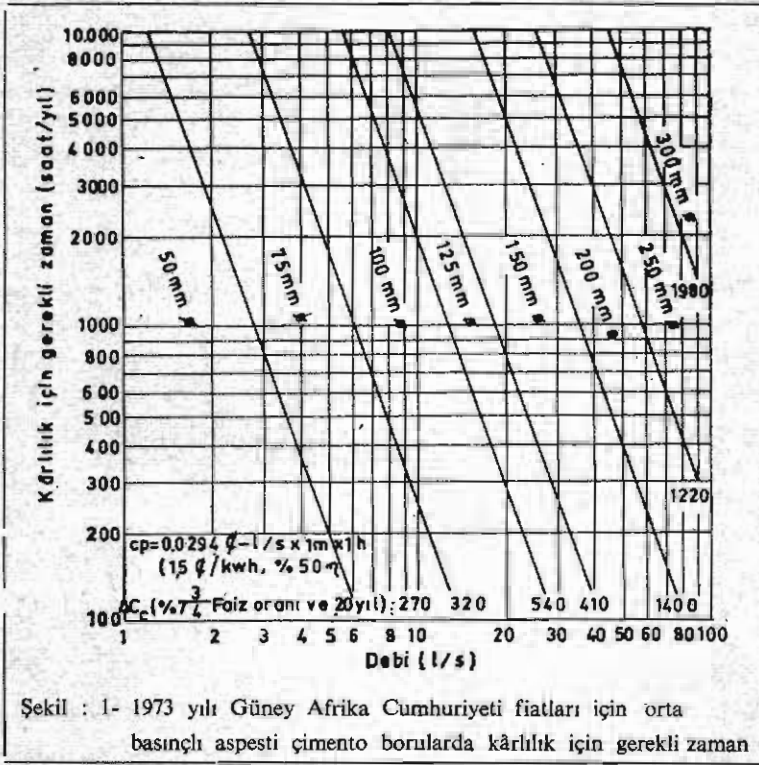
ru boyutunu verir (Şekil. 1). Böyle bir grafikten kullanılan boru büyüklüğü doğrudan doğruya okunabilir.

Yukarıdaki gibi bir plânlama grafiği; plânlamada kullanılması düşünülen her çeşit boru için yapılmalıdır. Bu grafikler belirli birim masraf esasına göre hazırlanmış olduklarından birim masraftaki değişim burada açıklandığı gibi derhal intibak ettirilir.

MUAMELE (KOLLARA AYRILMIŞ AKIM DURUMUNDA)

Ana taşıyıcıya erişen debi pompa-dan saptırılan q 'nın bir kısmı olarak

düşünüldüğünde bir boru boyutundan bitişik boyuta azalmanın etkisiyle 100



m boru uzunluğunda Δh (m) kadar bir sürtünme yükü arttığı düşünülebilir. O zaman pompaj gücündeki artış 100 m boru uzunluğu için KW olarak aşağıda şekilde hesaplanabilir.

$$\Delta W = \frac{\rho \times g \times q \times \Delta h}{1000 \times \eta} \quad (1)$$

Burada;

ρ : Suyun hacim ağırlığı (1 kg/l),

g : Yerçekimi ivmesi ($g = 9,807$ m/sn²),

q : Borudan akan debi (l/s)

η : Pompa sistemindeki toplam randıman (ondalık olarak)

ΔW : 100 m'lik boru uzunluğunda çaptaki değişim için KW

olarak pompa gücündeki artış (kw/100 m boru).

Sabit değerler yukarıdaki eşitlikte yerine yazılarak eşitlik aşağıdaki şekilde basitleştirilebilir.

$$\Delta W = \frac{q \times \Delta h}{102 \times \eta} \quad (2)$$

Gereksinilen Yıllık Ek Enerjinin Maliyeti:

$$\Delta C_E = \Delta W \times t \times C_u \text{ olacaktır (3)}$$

Eşitlikte;

ΔC_E : Çapı değişen 100 m boru uzunluğu için bir yılda eklenen masraf (cent/yıl/100 m boru).

t : Yıllık pompaj süresi: (saat)

Cu: Birim güç maliyeti (cent/
kw-saat)

Aşağıdaki uygulamada birim güç masrafı (veya birim yakıt masrafı) (Cu) belirli bir durum için sabit farzedilmiştir. Bu durum boru çapındaki değişime bağlı olarak sistem boyutundaki değişimle birim güç masrafının fazla etkilenmediği yerlerde genellikle doğru olmaktadır.

Ek enerji masrafı (ΔC_E) eşitlik 1'in yerine geçmek üzere birim pompaj maliyetine dayanılarak daha uygun bir şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta C_E = q \times \Delta h \times C_p \quad (4)$$

Burada $C_p = \frac{\rho \times g}{1000 \times \eta} \times C_u = \frac{C_u}{102 \times \eta}$ olur (5)

Yukarıdaki eşitliklerde:

ΔC_E : 100 m uzunluğundaki boruda çap değişimi için yıllık ek enerji masrafı (cent/yıl/100 m boru)

C_p : Akan debiye (l/s) göre 1 m yük için saatlik masraf (cent/h/1/s-1 m yük)

Daha küçük çaplı borunun kullanılmasıyla 100 m boru uzunluğunda yıllık yatırımı kurtarma (yatırımı geri ödeme) miktarındaki tasarrufun ΔC_c olduğunu fazedelim. (Yıllık faiz oranının $\% 7 \frac{3}{4}$ kullanma süresinin 20 yıl, yatırımı kurtarma oranının (r) her yıl için 0,1 veya $\% 10$ olması durumunda $\Delta C_c =$ her 100 m boru uzunluğu için bulunan maliyet farkının $1/10$ 'u olacaktır.)

Plânlanan boru boyutundaki değişimin sonucu olarak boyutta olabilecek uygun değişme sebebiyle pompaj sistemindeki yatırımı kurtarma miktarındaki herhangi bir değişim

$$\Delta CE = \Delta C_c \dots\dots\dots (6),$$

olduğu zaman kârlılık noktasında her iki boyutta eşit şekilde ekonomik olduğundan ihmal edilir. Eşitlik 4'de bu sonuç yerine konulduğunda kârlılık zamanı

$$T = \frac{\Delta C_c}{C_p} \times \frac{1}{q \times \Delta h} \text{ bulunur. (7)}$$

Burada:

T: Yıllık çalışma süresi (saat/yıl)

Δh : Herhangi bir boru sürtünme formülünde q'nun bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. (Örneğin, belirli bir boru için William-Hazen formülünde $\Delta h = a \times q^{1,85}$ olur burada "a" sabitedir.)

Böylece $T = \frac{\Delta C_c}{C_p} \times f(q)$ elde edilir (8)

Eşitlikte:

f(q): Üslü bir fonksiyondur (örneğin $f(q) = b \times q^{-2,85}$, burada "b" bir sabitedir.)

ΔC_c ve C_p değerleri pompa büyüklüğünün fazla değişken olmadığı yerlerde belirli durum için belirli sürede genellikle sabit olarak düşünülebilir. Logaritmik kâğıdın kullanılması durumunda eşitlik 8'den düz hat halinde sonuçlar elde edilir. Şekil 1'de 1973 yılı Güney Afrika Cumhuriyeti fiyatları esas alınarak 20 yıllık kullanma periyodu

du ve % 7 $\frac{3}{4}$ 'lük faiz oranına göre

orta basınçlı aspertli çimento borularda q'ya karşı T için bu çeşit doğrular grubu görülmektedir (Bu eğriler q ve Δh değerlerine bağlı olarak sürtünme kaybını veren çizelge veya grafiklerden okunan belirli boru boyutları ile eşitlik 7'den hesaplanan T değerlerine göre çizilebilir).

Farklı çalışma zamanında ΔC_c ve C_p 'nin farklı değerler alması durumunda aynı eğriler grubu pompaj süresinin aşağıdaki şekilde düzenlenmesiyle kullanılabilir.

$$T = \frac{\Delta C_c}{C_p} \times \frac{C'_p}{\Delta C'_c} \times t \dots (9)$$

Burada:

t: gerçek pompaj süresi

T: Şekil 1'in kullanılmasıyla bulunan değer

$\Delta C'_c$: ΔC_c 'nin yeni değeri

C'_p : C_p 'nin yeni değeri

Örneğin 30 l/s'lik debi için yılda çalışma süresinin 1000 saat olması

durumunda 150 mm çapındaki boru, 4000 saat olması durumunda 200 mm çapındaki boru ekonomik boru boyutu olarak doğrudan doğruya şekil 1'den okunabilir. Yaklaşık olarak yıllık çalışma süresinin 1600 saat olması halinde her iki boru da aynı şekilde ekonomik olmaktadır.

Şekil 1'deki gibi bir grafiğin teşkil edilmesi yerine, şekil 2'de gösterildiği gibi boru sürtünme grafiğinin mevcut olmasıyla da aynı malumat elde edilebilir. Bu, belirli bir boru düzeni için eşitlik 8, yardımıyla çeşitli kârlılık sürelerindeki debilerin hesaplanmasıyla yapılabilir. (veya daha önce açıklandığı şekilde boru sürtünme grafiğinden belirli akım için eşitlik 7 yardımıyla kârlılık zamanı hesaplanır) ve kârlılık zamanı çizgisinden başlanılarak (noktalar işaretlenerek) 2 belirli boru için sürtünme grafiği çizgileri arasına çizilir; (örneğin belli bir akımla kesim noktasının tam ortası). Çeşitli çizgiler üzerindeki bulunan noktalar yıllık kârlılık süresi eğrisi olarak birleştirilebilir. Böylece hazırlanan grafik, pompaj süresi değeri ve belirli bir debiye göre uygun olan noktanın bulunmasında kullanılabilir.

POMPAJ TESİSİ MALİYET DEĞİŞİMLERİNİN ETKİSİ

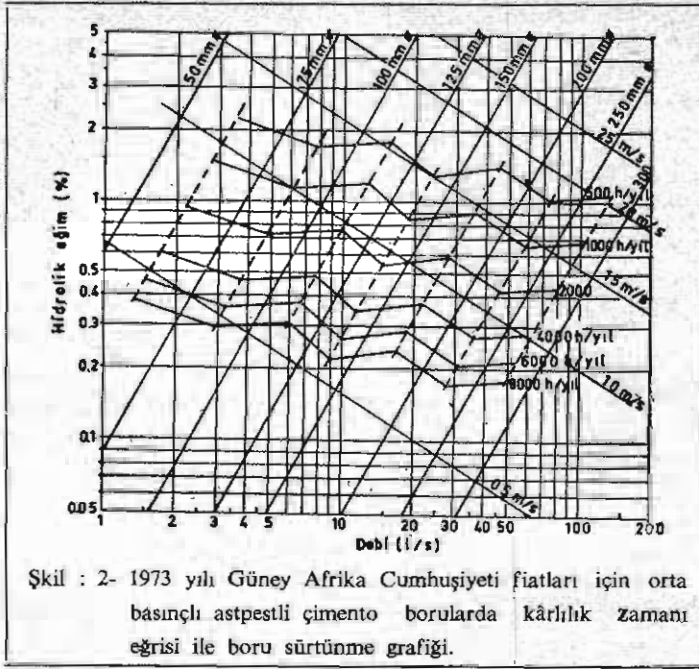
Bu makalede gösterildiği gibi, boru büyüklüğündeki değişme sonucu pompaj tesisinin maliyetindeki değişimin etkisi ilk plânlamada genellikle ihmal edilir. Bununla beraber yük değişiminin etkisiyle pompaj tesisinin yatırım masrafı, düzenlenen gücün sürekli bir fonksiyonu olarak düşünülürse bu etki bu devreyi kapsayabilir. Daha küçük boru boyutunun kullanılması sonucu toplam yatırımı kurtarma miktarındaki tasarruf

$$\Delta C_{ct} = \Delta C_c - \Delta C_{cp} \text{ olur. (10)}$$

Burada:

ΔC_{ct} : 100 m boru uzunluğu için yatırımı kurtarma miktarındaki yıllık tasarruf. (Cent/yıl/100 m boru)

ΔC_{cp} : 100 m borunun boyutunun küçültülmesi sonucu pompaj tesisi büyüklüğünün artması ne-



deniyle yıllık yatırımı kurtarma değeriindeki artış.

Plân aralığında sistemin maliyetine karşı kilowatt büyüklüğünün doğrusal olduğunu farzedilirse.

$$\Delta C_{cp} = rx C''_p \times \Delta W \text{ olur. (11)}$$

Eşitlikte:

C''_p : Yük değişimi nedeniyle her kilowatt artış için pompaj te-

sisindeki yatırım maliyetinin değişim oranı (cent/kw)

r: Yatırımı kurtarma (geri ödeme) faktörü

Her iki boru boyutunun da eşit şekilde ekonomik olduğu kârlılık noktasında

$$\Delta C_E = \Delta C_{ct} \text{ olur. (12)}$$

Bu sonuç eşitlik 4,6 ve 7'de yerine yazılırsa kârlılık zamanı

$$\tau = \frac{\Delta C_c}{C_p} \times \frac{1}{qx\Delta h} - r \times \frac{C''_p}{C_p} \times \frac{\Delta W}{qx\Delta h} \text{ olur. (13)}$$

Burada τ : yıllık çalışma süresidir (Saat/yıl) Eşitlik 5 ve 2 ile

$$\tau = \frac{\Delta C_c}{C_p} \times \frac{1}{qx\Delta h} - r \times \frac{C''_p}{C_u} \text{ (14)}$$

$$\tau = T - \Delta T \quad (15)$$

Yıllık pompaj süresi (t) ile plânlama grafiği kullanıldığında $T = t \times \Delta T$ olur (16)

Burada:

T: Pompaj sistemi boyutundaki değişim etkisinin ihmal edilmesi durumunda yıllık kârlılık zamanı.

t: Pompaj sistemi boyutundaki değişimin etkisi değerlendirildiğinde zaman düzeltme değeri

$$\Delta t = r \times \frac{C''p}{Cu} \quad (17)$$

Sürtünme yükünün atması sonucu pompaj tesisinin yıllık yatırım masrafındaki artışın pompa tesisinin çalışma masrafındaki artış miktarına eşit olduğu durumda Δt bir yıl içerisinde gereksinilen eşit çalışma zamanı artışıdır.

Pompaj sulama tesisi durumunda Δt yaklaşık olarak yılda 200 saat olabilir. Şekil 1 kontrol edildiğinde T'deki 200 saatlik değişimin birbirini takip eden iki kârlılık eğrisi arasındaki düşey arakesitin nispeten küçük bir parçasına eşit olduğu görülecektir. Bu nedenle sonuç, yalnızca gerçek çalışma zamanının belirli bir kârlılık zamanına yakın olduğu yerlerde etkili olacaktır. Bu noktada her iki boru da hemen hemen eşit şekilde ekonomik olur ve seçimdeki bir hata ciddi sorun yaratmaz. Muhtemelen bu sebeptendir ki, nispeten büyük hatalar yapılsa bile ekonomik boru çapının ciddi olarak etkilenmediğini belirten Christiansen (1971) ve Sullivan (1971) tarafından plânlama yükündeki değişim nedeniyle pompa te-

sisini büyüklüğündeki değişim ihmal edilmiştir.

Kısa süreli yıllık çalışma devreleri için sistem maliyetindeki artışın etkisinin önemi Şekil 1'de açık olarak görülmektedir.

Önceden açıklandığı şekilde, pompa tesisi yatırım masrafınının, yükün sürekli bir fonksiyonu olarak değiştiği farzedilir. Gerçekte sistem büyüklüğü ayırt edilen dilimlerde (aralıklarda) değişmeye meyillidir. Bununla birlikte, bu aralıklar boru boyutundaki bir değişimden dolayı karşılaştırılan oldukça geniş bir aralıksa; boru çapındaki bir değişim, oluşan ana pompaj tesisi maliyet aralığı dikkate alınmadan intibak ettirilebilir. Boru çapı dilimleri çoğunlukla 1/3 oranı tarzında geniş sürtünme yükü değişimi verebilen boru büyüklükleridir. Pompaj sulama tesisi durumunda sürtünme yükü genellikle toplam yükün yalnızca bir kısmıdır; bu durum özellikle oldukça yüksek statik yüke gerek duyulan yağmurlama yöntemiyle sulamalar için geçerlidir. Toplam yük kademesi ekseriya sonradan 1:1,5 veya daha küçük bir oranla azaltılır. Boru hattının değişen debili birçok kısımdan oluştuğu durumlarda toplam yük kademesi bir kısımdaki değişim sebebiyle ayrıca (ilave olarak) azalır.

Diğer taraftan santrifüj pompa kullanılması durumunda çark (fan) aşağıya döndürülmek suretiyle aynı pompa ile sağlanan aynı akım için basınçta geniş bir değişim olur. Bazen yalnızca randımandaki çok küçük bir değişim ile basınç aralığı 1:2 oranına kadar sağlanabilir. Bu nedenle, pompa maliyetinde büyük bir değişiklik yarat-

maksızın boru çapında komşu çapa benzer şekilde uygun bir değişim olabilir.

Mevcut motorun kademe büyüklüğü genellikle elektrik motorundan yaklaşık olarak % 20-30 daha küçüktür. Bundan dolayı, böyle bir veya iki kademe, boru çapındaki bir değişim sebebiyle oluşabilir.

Bununla beraber boru çapındaki bir değişim nedeniyle pompa tesisinin maliyetindeki değişim, genellikle en ekonomik noktada boru maliyetindeki değişimden oldukça küçüktür (örneğin yıllık pompaj süresi ve statik yüke bağlı olarak % 10 ve daha az miktarda). Sonuç olarak, böyle bir pompaj tesisi maliyeti yalnızca plânlama grafiğindeki kârlılık eğrisinin durumundaki küçük bir değişim sebebiyle değişir. Bu tür maliyet değişimi daha önce de belirtildiği gibi sonucu ciddi olarak etkilemeyecektir. Bundan dolayı, pompa tesisi maliyetinin etkisi ilk plânlamada ihmal edilebilir; fakat pompa gücü tam kesinlikle belirtildiği zaman bu etki kontrol edilebilir. İki komşu boru boyutu (çapı) için pompaj zamanının kârlılık zamanına yakın bulunduğu durumlarda toplam

yük ve güç her iki koşul için hesaplanabilir. Bu durumda pompa tesisinde yıllık yatırımı kurtarma miktarındaki farklılık belirtilir ve değişen her 100 m borudaki farklılık ΔC_{cp} ile gösterilir. Bu durumda zaman düzeltilmesi eşitlik 11, 13 ve 15'ten aşağıdaki şekilde bulunur.

$$\Delta T = \frac{\Delta C_{cp}}{C_{pxq} \Delta h} \quad (18)$$

Bu değer plânlama grafiğindeki en ekonomik boru boyutunun bulunması için eşitlik 16'da kullanılır.

Kompleks durumlarda, son plân makalenin ilerideki kısımlarındaki gösterildiği şekilde kontrol edilebilir.

Pompaj yükünün prensip olarak sürtünmeden oluştuğu yerlerde C_p 'nin belirtilmesi için ortalama pompaj maliyet eğrisine karşılık güç işaretlenerek ΔT 'nin hesaplanması için eşitlik 17 uygulanabilir. Daha sonra bu değer başlangıçtaki (ilk) plânlama için eşitlik 16'da kullanılabilir. Akımın kollara ayrıldığı durumda aşağıdaki eşikliklerdeki pompaj zamanına da bu düzeltme uygulanmalıdır.

DARALTILMIŞ KESİTLİ (KAPAKLI) ÇIKIŞA SAHİP KOLLARA AYRILAN AKIM

Boru sisteminin şekil 3'te görüldüğü gibi olması durumunda, akımın bir kısmı B'den çıkarılır ve bu noktada gereksinilen basınçta azalma (kısılma) olduğu farzedilir. Bu nedenle, BC kısından geçen akım "q" pompanın çektiği "Q" dan daha azdır. Bununla birlikte bu kısımdaki boru çapında olan bir değişim nedeniyle oluşan fazladan sürtünmeden dolayı toplam debiye "Q" uygulanan basınçta artış olur. Böylece eşitlik 2 aşağıdaki şekilde değişir.

$$\Delta W = \frac{Qx\Delta h}{102x\eta} = \frac{Qxqx\Delta h}{qx102x\eta} \quad (19)$$

önceden olduğu gibi "q" yerine $\frac{Q}{q}$ x q yazılırsa eşitlik 7 aşağıdaki şekilde dönüşür.

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q}{q} \times Y &= \frac{\Delta C_c}{C_p} \times \frac{1}{qx\Delta h} \\ \text{Bu nedenle } \frac{Q}{q} \times Y &= T \text{ olur.} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Burada:

$Y =$ Kârlılık noktasındaki pompaj zamanı

$T =$ Kollara ayrılmamış akım için kârlılık zamanıdır.

T değerini elde etmek için gerçek pompaj zamanını Q/q faktörü ile çarpmak suretiyle daha önce belirtilen grafik kullanılabilir.

AYNI ZAMANDA KULLANILAN KOLLARIN (DARALTIHMAMIŞ KESİTLİ) KARŞILIKLI ETKİSİ.

Biraz önc incelenen durumda, BC kısmındaki boru çapında herhangi bir değişim nedeniyle basınçtaki değişimin B noktasından ayrılan bir kola etkisinin olmadığı farzedilmiştir; aslında, basınç değişimi bu kısımdaki kısımla miktarındaki değişim vasıtasıyla dengelenebilir. Bununla birlikte, genellikle kollara ayrılan bir sistemin bir kısmındaki (kolundaki) kazanılan basınç azalımı bu kısmın ilerisindeki (önündeki) kısımda da azalmaya imkân verir; böylece yatırım harcamasındaki tasarruf artar. Şekil 4'de iki eşit kola ayrılmış sistem görülmektedir; BC kolundaki bir azalma BD kolunda da benzer bir azalmaya olanak verir ve sonuç olarak yatırımda iki kat bir tasarruf

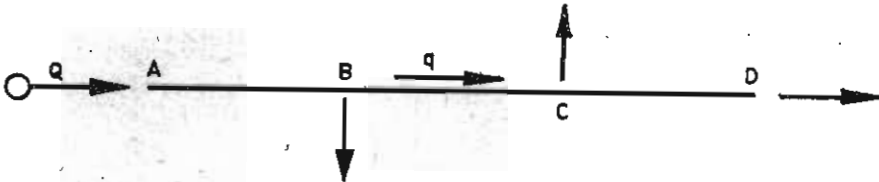
sağlanır. Eşitlik 20'nin türetilmesinden açıkça görüleceği gibi T değeri grafikte

$$T = \frac{1}{2} \times \frac{Q}{q} \times t = t$$

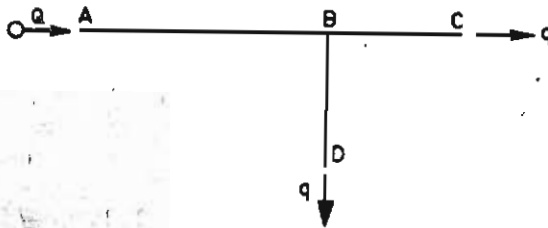
olarak kullanılabilir.

Bundan dolayı; eşit şekilde birçok kolya ayrılmış bir sistemde eşitlik 20 kullanılmaz; fakat belirli bir debi (q) için $T = t$ kullanılmalıdır.

Farklı debiler veya oldukça farklı hidrolik eğim nedeniyle kolların eşit olmadığı yerlerde, bir kısımdaki değişim oldukça farklı yatırım kazancı ile başka bir koldaki değişime imkân verir. Bu durum aşağıdaki gibi inelenebilir.



Şekil: 3-Kapaklı yan çıkışlı akım



Şekil: 4-Eşit şekilde kollara ayrılan akım.

Yıllık yatırımı kurtarma tasarruflarının toplamı ana koldaki boru boyunda olan değişimin her 100 m uzunluğundaki tasarruf (ΔC_c) olarak yazılabilir. Ana kolun bu kısmında değişebilen boru uzunluğunda L m uzunluk için 1 m sürtürme kaybı değişimi oldu-

ğu ve alt (tali) kollarında uygun olan uzunlukların L_2 , L_3 ve tasarrufların ΔC_{c2} , ΔC_{c3} olduğunu farz edelim. Bu durumda 1 m basınç farkı için toplam yıllık yatırımı kurtarma miktarındaki tasarruf.

$$S_c = \Delta C_c \times \frac{L}{100} + C_{c2} \times \frac{L_2}{100} + \Delta C_{c3} \times \frac{L_3}{100} + \dots \text{ olur (21)}$$

$$S_c = \Delta C_c \times \frac{L}{100} (1 + R_2 R_3 + \dots) \quad (22)$$

Burada "i" nci alt koldaki azalmanın ana kolda olan sermaye artışına oranı.

$$R_i = \frac{\Delta C_{ci} \times L_i}{\Delta C_c \times L} = \frac{\Delta C_{ci} \times \Delta h}{\Delta C_c \times \Delta h_i} \text{ olur.} \quad (23)$$

Burada:

Δh = Ana koldaki boru çapının komşu çapa azalması sonucu her 100 m boru uzunluğunda oluşan sürtünme kaybı değişimi.

Δh_i = "i" nci koldaki boru çapının komşu çapa azalması sonucu her 100 m boru uzunluğunda oluşan sürtünme kaybı değişimidir. Bundan dolayı ana koldaki her 100 m boru çapının azalmasıyla sağlanan tasarruf

$$S_{c100} = \Delta C_c (1 + R_2 + R_3 + \dots) = \Delta C_c \sum R_i \text{ olacaktır.} \quad (24)$$

Burada R_i ana kol için l'dir. Pompadan çıkan "Q" ve ana koldaki "q" akışı ile bir yıldaki "t" saati

için bu değişiklikten doğan güç masrafı

$$\Delta C_E = Q \times \Delta h \times \Delta C_p \times t = \frac{Q}{q} \times q \times \Delta h \times \Delta C_p \times t \text{ olur.} \quad (25)$$

$\Delta C_E = S_{c100}$ olduğu yerde kârlılık noktası oluşur, bundan dolayı eşitlik

7,24 ve 25'den

$$T = \frac{\Delta C_c}{C_p} \times \frac{1}{q \times \Delta h} = \frac{Q}{q} \times \frac{t}{\sum R_i} \text{ bulunur.} \quad (26)$$

Plânlanmanın bu aşamasında çeşitli alt kolların büyüklükleri henüz bilinmemektedir ve R_i değeri tahmin edilmeli-

dir. Başlangıçtaki (ilk) plânlama için aşağıdaki işlemler önerilmektedir.

İLK PLÂN

Toplam yükseklik farkı nedeniyle pompa yükünün en büyük kısmını oluşturan kol, bu koldan beslenen alt kollar ve onların uzunlukları bulunarak sistemin ana kolu seçilir. Sonra, kârlılık zamanı grafiğinden uygun boru çapı seçimi ile başlanarak ana kolun kısımları plânlanır. Öndeki kısımdan ayrılan alt kolların bu koldan (öndeki kısımdan) farkı olmadığı yerlerde, başka bir anlatımla aynı büyüklüğe sahip olduğu ve aynı debiyi taşıdığı yerlerde R_1 yaklaşık olarak 1 olacaktır ve R_1 değerinin 1 olduğu kabul edilir. Bununla birlikte, örneğin mevcut büyük bir rakım düşüşü veya daha az bir debi nedeniyle bu kolların açık bir şekilde da-

ha küçük boru çapına sahip olması durumunda R_1 değerinin sıfır olduğu farzedilir. Tecrübe ile R_1 için en uygun değerler tahmin edilebilir.

Bu şekilde ana kolun bütün kısımlarının büyüklükleri bulunduğundan sonra, son uçta gereksinilen basınç, tüm kollarındaki basınç ve pompa basıncı belirtilir. Alt kolların çıkış kısımlarında hesaplanan basınçlar her koldaki mevcut basınç kaybını belirtir ve her bir kol bu basınç düşüşünü normal yolla kapatacak şekilde plânlanır. Bu kolların tekrar yan kollara ayrıldığı yerlerde, bu kısmın plânlanması cazibe (gravity) sulama sistemlerinde olduğu gibi yapılır (Perold 1974).

SON PLÂN

Bu başlangıç plânında herhangi bir boru büyüklüğündeki değişimin ekonomik olup olmadığı aşağıda görüldüğü gibi son olarak kontrol edilir. Bu kısımdaki boru büyüklüğünün azalması ve bu kısmın önündeki bütün kollar-

daki çapın azalması nedeniyle pompa her 1 m yükselme için yıllık sermayeyi kurtarmadaki tasarrufu (S_c) belirtmek suretiyle ana kolun her kısmı incelenir.

$$S_c = \sum \left(\frac{L_i}{100} \times \Delta C_{ei} \right) = \sum \frac{\Delta C_{ei}}{\Delta h_i} \text{ Cent/Yıl/1 m yük} \quad (27)$$

Sonra bu tasarruf (S_c), 1 m yük artması nedeniyle oluşan yıllık ilave pompaj masrafıyla karşılaştırılır.

$$\Delta C_{Ei} = Q \times t \times C_p \dots \text{Cent/yıl} \quad (28)$$

Burada: Q = pompanın aldığı debi (1/s).

$$t = \text{yıllık toplam pompaj süresi (saat)}$$

Bu, boru çapındaki azalmanın ekonomik olup olmadığını gösterecektir.

Çap değişimiyle her metre basınç farkı için hesaplanan değişimin, maliyette oldukça fazla bir artışla pompa sisteminde müteakip büyüklüğe değişimi zorunlu kıldığı yerlerde; pompa tesisinden dolayı yıllık sermaye kurtarma masrafındaki artış yıllık pompaj masrafına ilave edilmelidir. Boru çapının, artması durumundaki ekonomi de benzer şekilde kontrol edilebilir.

SABİT POMPAJ BASINÇLI—ZAMAN DEĞİŞİMLİ KOLLARA AYRILAN KISIM

Sulama dağıtım şebekeleri durumunda sistemin belirli kolları toplam pompaj devresinin genellikle yalnız bir kısmında (devresinde) kullanılır. Sabit basınçlı pompa istasyonu olması durumunda, örneğin tek bir santrifüj pompanın sabit hız ve sabit debiyle çalıştığı durum, pompa basıncı ana kolun plânlandığı durum için belirtilir ve bu basınç daha sonra tüm pompaj devresi için uygulanır. Bu kısımda plânlanan boru büyüklüğünün değişimi nedeniyle plânlanan pompa basıncındaki değişim,

farklı zamanlarda çalışan bütün diğer kollara nakledilebilir. Bununla birlikte bu tür durumlarda, daha önce sabit akım (debi) durumunda yapıldığı gibi tüm sistem bir ünite olarak yeniden plânlanır. Takip edilen yol bir örnek yardımıyla daha iyi şekilde anlaşılır.

Şekil 5'te görülen sistemde çıkış kısmında 30 m yüke sahip minimum bir basınca gereksinim vardır. Toplam pompaj debisi 80 l/s şekil üzerinde belirtildiği gibi programlanmıştır. Toplam yıllık pompaj süresi 3360 saattir.

İLK PLÂNIN ANALİZİ

Ana Kol - Ana kol (plânlama kolu), pompa basıncının büyük kısmını oluşturan koldur (birçok alt kollarla en uzun boya sahiptir). Plânlama durumu bu nedenle alt periyot II'dir.

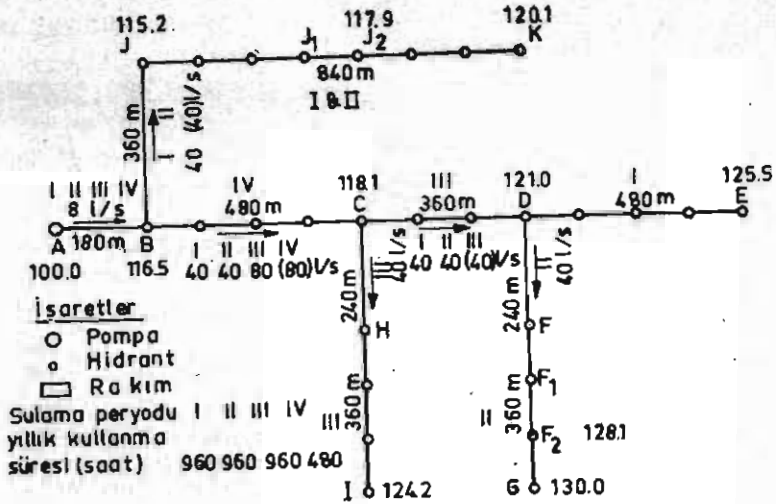
Plânlama debisi (q) - Bu debi, plânlama periyodu sırasında en kritik devre olan alt periyot II için ana kolun çeşitli kısımlarından akan debidir (diğer devreler sırasında vanalar veya diğer kollardaki boru çapının azaltılmasıyla pompa basıncı korunarak akım kısımlıdır).

Son kısımda (FG), iki çıkışa ayrılmış akım ile çalışmada düz arazi olması durumunda F_1 ve F_2 çıkışlarından olan çekilme ile normal olarak en ağır plân durumu meydana gelecektir. Bununla beraber, bu özel durumda bu kısmın sonunda zemindeki oldukça dik yükselmeye F ve G çıkışlarının beslendiği durumda pompa basıncı daha yüksek olarak bulunacaktır. F_1 ve F_2 den su alınması sırasında kontrol vanalarında kısılmaya gerek duyulabilecektir. Bundan dolayı DF kısmı $q=40$ l/s ve FG kısmı $q=20$ l/s için plânlanır.

ANA KOLUN PLÂNLANMASI

FG ve DF kısmı - FG kolunun diğer kollardan daha yüksek rakıma yükselmesi durumunda, alt kollar için R değerinin sıfır olduğu kabul edilebileceğinden, bu kısım (FG) diğer alt kollarından daha geniş boru büyüklüğüne sahip olabilir. Bununla birlikte işlemi daha iyi gösterebilmek amacıyla ilk

önce 4 kol için eşit olduğu kabul edilebilir. O zaman $\sum R=4$ olur. Daha sonra $q=20$ l/s ile FG için $T=[(80/20)/4] \times 3360=3360$ h/yıl bulunur. Grafikten 150 mm çapındaki boruya gerek duyulduğu görülür. Benzer şekilde $q=40$ l/sn ile DF için $T=[(80/40)/4] \times 3360=1680$



Şekil : 5- Zamanla değişen kollara ayrılmış akım sistemi

h/yıl bulunur ve bu sonuç 200 mm çaplı boruya gerek duyulduğunu gösterir.

Boru boyunca oluşan 3,61 m (2,23 + 1,38)'lik sürtünme kaybı nedeniyle D noktasındaki piezometrik seviye $130,00 + 30,00 + 3,61 = 163,61$ m olarak belirlenir. Bölünmüş ekim durumunda son çıkış kısmında 154,3' m'lik pizeometrik seviyeye gereksinim duyulan DE kolunda 150 mm çapındaki boru ve ve 125 mm çapındaki boru ile dengelenmek üzere 165 m'ye gereksinim vardır.

Önceki açıklamalardan açıkça görüldüğü üzere suyun daha yüksek rakıma yükseltilmesi nedeniyle son kısımdaki ana kol (DG) için diğer alt kollarda gereksinilenden daha büyük

çaplı boruya gereksinme olacaktır. Bu nedenle R değeri için kabul edilen 1 değeri çok yüksektir. İlk yaklaşımda olduğu gibi, alt kolları için bu değer sıfır kabul edilebilir veya daha iyi bir tahmin aşağıdaki şekilde yapılabilir. Alt kollardaki boru çapı ana koldaki boru çapından bir boyut daha küçük olabilir. Daha büyük $\sum R$ değeri büyük T değeri verecektir ve bundan dolayı yukarıda bahsedilen boru çapı muhtemelen artacaktır; inceleme sonucu alt kollardaki boru çapının 125 mm den 150 mm'ye değişimi FG kısmındaki boru çapının 150 mm'den 200 mm'ye yükselmesine sebep olmuştur. Debinin 20 l/s olması durumu için (şekil 1 ve 2'den ΔCc ve Δh değerleriyle)

$$R = \frac{0,46}{0,92} \times \frac{410}{1100} = 0,1465$$

Bundan dolayı

$$T = \frac{80}{20} \times \frac{1}{1+3 \times 0,1465} \times 3360 = 9330 \text{ h/yıl} \quad (29)$$

Böylece ana kolun FG kısmında 200 mm çaplı boru kullanılacağı belirtilir.

Benzer şekilde 40 l/s debi ve $R = 0,251$ için diğer üç kolda çapın 150 mm'den 200 mm'ye genişlemesine bağlı olarak DF kısmındaki çap 200 mm'den 250 mm'ye genişler. $T = (80/40)/(1+3 \times 0,251) \times 3360 = 3830$ h/yıl olmasından dolayı DF kısmında 250 mm çapındaki boru alınır.

CD kısmı - CD kısmındaki azalma CI ve BK kollarında bir azalmaya neden olur, fakat bu kollarda mevcut olan nispeten dik hidrolik gradyant mas-

raf tasarrufundaki azalma ile daha küçük boru çapının kullanılmasına müsaade edecektir. $R = 0,25$ farzedilmesi durumunda $T = [(80/40)/(1+2 \times 0,25)] \times 3360 = 4470$ h/yıl. Bu sonuç CD kısmında 250 mm çapındaki boru kullanımının gerektiğini gösterir.

BC kısmı - Benzer şekilde $R = 0,25$ farzedilerek $T = [(80/40)/1,25] \times 3360 = 5360$ h/yıl ve 250 mm çaplı boru kullanılmalıdır.

AB kısmı - 80 l/s ve $T = 3360$ h/yıl için 300 mm çaplı boruya gerek duyulduğu belirtilir.

YAN KOLLAR

Ana kolun boru büyüklüklerinin başlangıç plânında belirtildiği şekilde çeşitli alt kollara giriş kısmındaki mevcut basınç yükseklikleri çizelge 1'de görüldüğü şekilde belirtilir. Daha sonra yan kollar, mevcut yük kaybını kapatacak şekilde plânlanır.

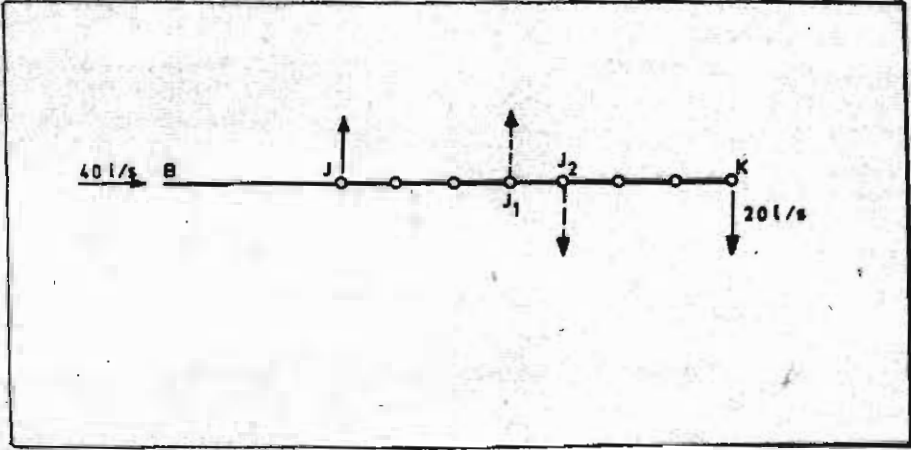
Bir örnek olarak bölünmüş akım halindeki çalışma durumu için BJK kolu (şekil 6) plânlanmıştır; bu koldaki J_1 ve J_2 noktalarından 20 l/s'lik debinin alınması halinde en kritik durum oluşur. J_2 noktasında gerekli, olan piezometrik seviyenin 147,9 m olması ve J_1 J_2 kısmında (20 l/s) 150 mm'lik boru çapının kullanılması kabul edildiğinde J_1 noktasında 148,65 mm'lik piezometrik seviyeye gereksinim vardır. Bu sonuca göre J_1 noktasına kadar olan kısmın 93 m'sinden 200 mm çapındaki boru ve 677 m'sinde 150 mm çapındaki borunun kullanılmasının gerektiği bulunur. J_2 K üzerindeki mevcut düşme belirtilip, J_2 'de hesaplanan basınç dikkate alınarak ve J ve K nok-

ta- larından su alındığı farzedilerek son kısım (J_2 K) plânlanır. Böylece son 140 m'lik kısımda 125 mm çapındaki borunun düşünülebileceği bulunur.

Şekil 7'de ilk plânın son durumu görülmektedir. Bu plân her bir kısım dikkatle incelenerek kontrol edilebilir. Bu inceleme, aşağıdaki örnekte ana kolun FG kısmı için yapıldığı şekilde uygulanır.

Pompa yükünde 1m değişim için eşitlik 28'den yatırım farkı 7900 cent/yıl olarak bulunur. FG kısmında boru çapının 200 mm'den 15 mm'ye azalması ile diğer kollardaki her 1 m basınç kaybı farkı eş değer azalmaların toplamı (DE kısmında 150 mm'den 125 mm'ye; CHI kısmında 200 mm'den 150 mm'ye ve BJK kısmında 200 mm'den 150 mm'ye) yılda 5460 centlik bir tasarruf sağlayacaktır ki bu değer pompaj masrafındaki artıştan daha azdır.

FG'nin 200 mm'den 250 mm'ye genişlemesi ile diğer kollardaki eşdeğer

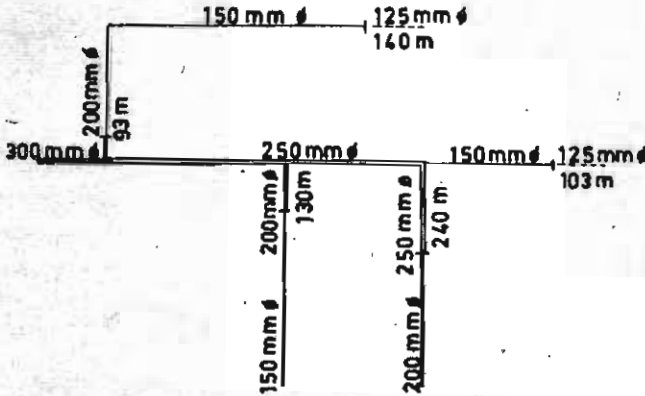


Şekil: 6- BJK kısmının planlanması

Çizelge 1- Çeşitli Yan Kollara Giriş Kısımında Mevcut Basınç Yükü.

İncelenen Kısım	Plânlama Debisi (q) (l/s)	T h/yıl	Boru çapı (mm)	Basınç kaybı(m)	Piezometrik Seviye (m)	Nokta
FG	20	9330	200	0,46	160,56	F
DF	40	3830	250	0,72	16,128	D
CD	40	4470	250	0,72	162,00	C
BC	40	5360	250	0,96	162,96	B
AB	80	3360	300	0,49	163,45	A

Not : Pompa basıncı 63,45 m.



Şekil: 7- Son Plan

genişlemeler toplamı (CH'da 150 mm'den 200 mm'ye; DE ve BJK kısımlarında 125 mm'den 150 mm'ye) yıllık sermayeyi kurtarma miktarında 11014 cent/yıl kadar bir artış sağlar; bu değer pompaj masrafındaki tasarruftan fazladır. Bu nedenle FG kısmı ilk

plânda belirtildiği gibi 200 mm çaplı olmalıdır.

Diğer kısımlar için de en ekonomik boru büyüklüğü benzer şekilde bulunur ve böylece ilk plânın uygun olduğu kabul edilir.

YÜKSELTİCİ (GÜÇ ARTIRICI)

Sistemde bir kolun nispeten yüksek basınca ihtiyaç duyduğu yerlerde (örneğin rakım farkı nedeniyle) bu kol- da gücü artırmak (yardımcı pompa kullanmak) ekonomik olabilir. O zaman, daha küçük pompa ve muhtemelen daha yüksek güç ünitesi masrafı (örneğin elektrik gücü yerine yakıt) sebebiyle C_p 'den daha büyük olabilen yardımcı pompa ünitesi pompaj masrafı (C'_p) kullanılmak suretiyle bu kol ayrı olarak plânlanır. Böylece zaman değeri aşağıdaki gibi düzeltilir.

$$T = \frac{C'_p}{C_p} \times t \quad (30)$$

Sistemin geri kalan kısmı yeni bir ana kolun seçimiyle ayrı olarak plânlanır.

Sistemde yardımcı pompa kullanılması ya da kullanılmaması durumlarından hangisinin ekonomik olduğu karşılaştırma yapılarak saptanır. Daha önce örnek olarak gösterilen plân durumunda DG kısmında yardımcı pompa kullanılması az bir basınç gösterir, fakat yardımcı pompanın ayrı olarak çalışmasının elverişli olmaması nedeniyle önerilen bir durum olmadığı düşünülür.

BASINCI DEĞİŞEBİLEN POMP AJ ÜNİTESİNDE ZAMANLA DEĞİŞEBİLİR AKIM

Pompa istasyonunun basınç ve akım miktarındaki değişimlere müsaade eden esnek pompa ünitelerine sahip olması durumunda, farklı zamanlarda kullanılan sistemin çeşitli kısımlarının birbirleriyle olan karışıklı uyumları zayıflayabilir. O zaman bazı kollar- da kısılmanın zorunlu olduğu bu kısımlar, çalışma devreleri üst üste gelmiyorsa (örneğin BK, DE ve DG bağlamalı

kollarındaki I ve II devre (şekil 4) kendilerinin ayrı yıllık çalışma devreleri için ayrı olarak plânlanabilir.

Belirtilen örnekte değişebilir basınçlı pompa ünitesinin plânlanması durumunda sabit basınçlı sistemle karşılaştırıldığında toplam yıllık masrafta yaklaşık %3'lük azalma görülür; fakat maksimum pompaj basıncında ve tesis edilen güçte % 6,5 artış olur.

ÖZET VE SONUÇLAR

Bu makalede, yıllık pompaj süresine bağlı olarak boru büyüklüğünün

bir boyuttan diğerine değişmesini gerektiren akım debisi belirtilmek sure-

tiyle pompaj sisteminde en ekonomik boru büyüklüğünün bulunmasında genel uygulama için geliştirilen metot açıklanmıştır. Kollara ayrılan akım sisteminin plânlanması durumunda metodun uygulanmasından pompaj tesisinin sabit ve değişebilir yüklerle çalışma

durumunun her ikisi için inceleme yapılmıştır.

Sonuç olarak uygulanan metot örneklerle açıklandığı gibi oldukça hızlı ve en iyi çözümü veren uygun bir metot olarak bulunmuştur.

SEMBOLLER

Bu makalede aşağıdaki semboller kullanılmıştır.

a ve b = katsayı

$g = 9,807 \text{ m/s}^2 = \text{Yerçekimi ivmesi}$

i = Alt kol sayısı

L = 1 m basınç değişimi için komşu çapa değişen ana kol uzunluğu (m)

$L_i = 1 \text{ m}$ basınç değişimi için komşu çapa değişen "i" nci kol uzunluğu (m)

Q = Pompaj debisi (l/s)

q = Akım debisi (l/s)

$R_i =$ Alt kolların sayısındaki azalma nedeniyle ortaya çıkan sermaye artışının ana kolda aynı farklılık nedeniyle sürütünme kayıplarından doğan azalmaya oranı.

r = Her yıl için yatırımı kurtarma faktörü, maliyet değişiminin yüzdesi veya kesiri olarak

$S_c = 1 \text{ m}$ pompa basıncı yükselmesi için ilgili bütün kollardaki boru çapının azalması nedeniyle yıllık yatırımı kurtarma miktarındaki toplam tasarruf (cent/yıl)

$S_c 100 =$ Ana kolda 100 m'lik borudaki çapın azalması ve aynı basınç değişimini veren ilgili yatırımı kurtarma miktarındaki toplam tasarruf (cent/yıl)

T = Pompa tesisi büyüklüğündeki değişikliklerin etkisinin dik-kate alınması durumunda, iki komşu boru çapının eşit şekilde ekonomik olduğu yerdeki kârlılık zamanı.

t = Pompaj süresi veya yıllık kullanma süresi (h/yıl)

$\Delta C_c = 100 \text{ m}$ boru uzunluğunda çapın bitişik (komşu) değere azalması durumunda yıllık yatırımı kurtarma miktarındaki tasarruf (cent/yıl)

$\Delta C'_c =$ Farklı çalışma zamanındaki ΔC_c

$\Delta C_{ci} =$ "i" nci kısım için ΔC_c

$\Delta C_{cp} =$ Boru çapının azalması sebebiyle pompa tesisi büyüklüğündeki artıştan dolayı yıllık yatırımı kurtarma miktarındaki artış. (100 m boru için cent/yıl)

$\Delta C_{cp1} = 1 \text{ m'lik}$ pompaj yükünün artışı nedeniyle oluşan ΔC_{cp} değeri (1 m yük için cent/yıl)

$\Delta C_{ct} = \Delta C_c - \Delta C_{cp}$ = yatırımı kurtarma miktarındaki toplam tasarruf.

$\Delta C_E = 100$ m boru uzunluğunun komşu çapa değişimi sebebiyle yıllık enerji maliyeti değişimi (cent/yıl)

$\Delta C_{E_1} =$ Pompaj yükünün 1 m değişimi sebebiyle yıllık enerji maliyeti (cent/yıl)

$\Delta h = 100$ m boru uzunluğunda çapın komşu çapa değişimiyle sürtünme yükündeki değişim (m)

$\Delta T =$ Artan pompa işletme maliyetinin artan pompa yatırımını kurtarma değerine eşit olduğu durum için yıllık eşit çalışma zamanı (eşitlik 17).

$\Delta W = 100$ m uzunluğundaki boru çapının komşu çapa değişimiyle güçteki değişim (kilowat)

$\eta =$ Pompa tesisinin toplam randımanı (odalıklı)

$g =$ Suyun özgül ağırlığı (kg/l)

$\Sigma R =$ Ana kolun belli bir bölgenin önünde kalan alt kolların R değerlerinin toplamının 1 fazlası

$\tau =$ Bütün maliyet değişimleri dikkate alındığında iki komşu boru çapının eşit olarak ekonomik olduğu durumdaki kârlılık zamanı (h/yıl)

$Y =$ Kollara ayrılan sistem için kârlılık zamanı (h/yıl)

$C_p =$ Birim pompaj maliyeti; 1 m'lik yük için pompalanan 1 l/s'lik debinin 1 saat sağlanmasındaki maliyet (cent)

$C'_p =$ Farklı çalışma zamanındaki C_p yardımcı pompa kullanımını için C_p

$C''_p =$ Yük değişimi nedeniyle pompaj tesisi yatırım masrafının değişim oranı (cent/kilowat)

$C_u =$ Birim güç için yakıt masrafı cent/kilowat-Saat)

KAYNAKLAR

Bagley, J. M., ve R. K. Linsley, 1961. "Graphical Determination of the Most Economical Pipe Size", Agricultural Engineering, Vol, 42, No. 10, S. 550-551.

Christensen, N. A., 1971. "Aqueducts for Least Cost Conveyance for Water", Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol, 97, No. IR 3 Proc. Paper 8381, S. 383-499

De Boissezon, J., 1964. "Utilisation des Moyens Modernes de Calcul Pour l'etablissement des Avant-Projets et Projets de Resaux d'irrigation par Aspersion", la Houille Blanche, Vol. 20, No. 4, S. 457-464

Fresen, M. H., 1939. "Economic Size of Pipelines for Pumping Water Oil and Other Fluids", Thesis Presented to the University of Co-

- lorado, at Boulder, Colo., in Partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering.
- Garton, J. E., 1960. "Design of Irrigation Pipe Lines of Minimum Annual Cost", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 3, No. 1, S. 29-30.
- Keller, J., 1965. "Selection of Economical Pipe Sizes for Sprinkler Irrigation Systems", Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 8, No. 2, S. 196-190
- Low, E. J. 1962. "Optimum Penstock Diameter in Hydroelectric Plants" Journal of the Power Division, ASCE, Vol. 88, No. PO 2, Proc. Paper 3186, S. 9-16
- Perold, R. P., 1974. "Economic Pipe Sizing for Gravity Sprinkler Systems", Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 100, No. IR2, Proc. Paper 10583, S. 107-116
- Richards, G. V., 1963. discussion of "Optimum Penstock Diameter in Hydroelectric Plants", by Edwards, J. Low, Journal of the Power Division, ASCE, Vol. 89, No. PO1, Proc. Paper 3642, S. 109-110
- Sullivan, R. K., 1971. "Sizing of Pumped Storage Conduits", Journal of the Power Division, ASCE, Vol. 97, No. PO3, Proc. Paper 8252, S. 667-673
- Sungur, T., 1967. "Economical Penstock, Water Power, S. 239-333