

EPANET ile hidrolik simülasyon yoluyla bir su dağıtım şebekesinin işletiminin enerji verimliliği açısından iyileştirilmesi

Improvement of the operation of a water distribution network in terms of energy efficiency via hydraulic simulation with EPANET

Hasan SARPTAŞ^{1*}, Sevgi TOKGÖZ GÜNEŞ², Davut ÖZDAĞLAR²

¹Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
hasan.sarptas@ege.edu.tr

²Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
sevgi.tokgoz@deu.edu.tr, davut.ozdaglar@deu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.01.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 29.05.2017

doi: 10.5505/pajes.2017.20438

* Yazışılan yazar/Corresponding author

Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

Öz

Su dağıtım şebekeleri, genellikle, şebekede basınç açısından en kritik noktalarda yeterli basınç olacak şekilde işletilir. Ancak günün saatleri içindeki debi salınımlarına uyacak ve enerji tüketimini en aza indirecek bir işletme tipi yerine, işletme kolaylığı için, genellikle, basınçların en düşük basıncın oldukça üstünde olduğu düşük basınç şikayetlerine göre bir işletim uygulanmaktadır. Su dağıtım sistemlerinde, zaman, tüketilen su miktarı ve basınç gibi parametreler dikkate alınarak şebeke işletiminin iyileştirilmesi, hem sistemde su kayıplarının önlenmesi hem de enerji verimliliğinin artırılmasını sağlar. Yerel yönetimler için önemli bir maliyet kalemi olan içmesuyu dağıtım sistemlerindeki enerji tüketimi şebekenin optimum işletimi ile önemli miktarda azaltılarak enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, bir organize sanayi bölgesinin su dağıtım şebekesi örnek şebeke olarak ele alınmıştır. Örnek şebekede, su tüketim farklılıkları esas alınarak üç ayrı işletme bölgesi oluşturulmuştur. Bu bölgelerde minimum ve maksimum su tüketimlerinin debi için ekstrem koşullar olduğu kabul edilerek iki ayrı tüketim değeri ve üç işletme için sekiz farklı hidrolik durum oluşturulmuştur. Bu durumlarda oluşan hidrolik koşullar EPANET yazılımı ile simülasyon yoluyla çözümlenmiştir. İşletmede yapılacak iyileştirmelerle elde edilecek enerji tasarrufunu belirleyebilmek için örnek şebekede iki farklı işletme prosedürü tanımlanmıştır: (i) normal (basit) işletme ve (ii) iyileştirilmiş işletme. Çalışma sonunda, iyileştirilmiş işletmenin toplam enerji tüketimini %16 oranında azalttığı hesaplanmıştır. Birim enerji tüketimi normal işletme için 0.314 kWh/m³ değerinden iyileştirilmiş işletme için 0.261 kWh/m³ değerine düşmüştür. Bu çalışma, su dağıtım şebekeleri işletiminin su tasarrufu ve enerji verimliliği açısından iyileştirilmesine ilişkin planlanma çalışmalarında, hidrolik simülasyon yazılımı EPANET'in etkin bir araç olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Su dağıtım şebekesi, Pompa, Basınç, İşletim, EPANET, Enerji verimliliği

Abstract

Water distribution systems are generally operated so as to provide enough pressure at all nodes that are critical in terms of pressure in the network. But, instead of applying an operational plan that fits the flowrate fluctuations in the hours of a day and thus minimizes the energy consumption, for the operation practicality, a complaints-based operational procedure in which pressures at all nodes are well above the minimum allowable pressure limit is preferred. In water distribution systems, improvement of the operational procedure of the network based on time, the amount of consumed water and pressures at the nodes allows both to reduce water losses in the network, to enhance sustainability and also to provide energy efficiency. In water distribution systems, energy consumption, one of the major expenses for local governments today, can be decreased significantly by optimization of water network operations. In this study, the water network of an organized industrial district was considered as the case water network. There operational zones in the network were identified based on the differences in water consumption patterns. With considering minimum and maximum water consumptions as the extreme conditions for flowrate, eight scenarios were identified for two flowrates (i.e. minimum and maximum) and three operational zones. Hydraulic conditions for these scenarios were then analyzed by hydraulic simulations in EPANET 2. In order to assess energy savings via operational improvements, two different operational procedures were identified for the case water network: (i) base operational procedure and (ii) improved operational procedure. As the result of the study, improved operational procedure reduced energy consumption almost 16% for the case water network. Unit energy consumption lowered from 0.314 kWh/m³ for base operation procedure to 0.261 kWh/m³ for improved operational procedure. This study indicates that EPANET, a hydraulic simulation software, can effectively be applied in the planning of operational improvements of water distribution networks.

Keywords: Water distribution network, Pump, Pressure, Operation, EPANET, Energy efficiency

1 Giriş

Su temini sistemlerinde suyun kaynaktan son kullanıcıya pompaj yoluyla iletimi önemli düzeyde enerji tüketimine neden olduğundan, su temini ve dağıtım kentlerde yerel yönetimler, organize sanayi bölgelerinde ise bölge yönetimi açısından en yüksek maliyet kalemidir. Günümüzde her sektörde olduğu gibi su temininde de, gerek ekonomik gerekse çevresel açıdan sürdürülebilirliğin sağlanmasında temel araçlardan biri enerji verimliliğinin artırılmasıdır. Sektördeki talepler ve daha

verimli motor ve pompa kullanımı yönündeki yasal zorunluluklar nedeniyle pompa üreticileri enerji açısından pompa ve motor verimleri üzerinde araştırma yapmakta ve daha verimli yeni modeller piyasaya sürülmektedir. Ayrıca, basınçlı su dağıtım şebekelerinde terfi sistemlerinin enerji açısından verimli çalıştırılabilmesi için, tasarımda uygun pompaların seçimi ve uygun pompa kumanda sistemlerinin kullanımı çok önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bir su dağıtım şebekesinde pompa seçimi ve işletiminin enerji verimliliğine etkisinin bir örnek ile gösterilmesi amaçlanmıştır.

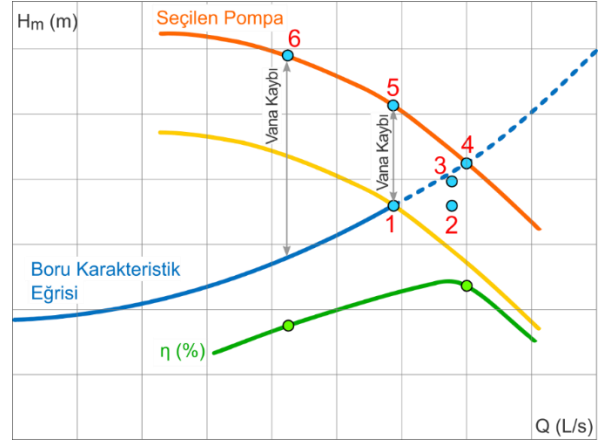
2 Su terfi sistemleri ve enerji tüketimi

Elektrik motoru, pompa, pompa kumanda sistemi, boru, özel parçalar (çek vana, dirsek, T parçası, redüksiyon, vana vb), enerji temin sistemleri ve sayaçlar terfi sistemlerini oluşturan ana bileşenlerdir. Yıllık 2000 saat ve üzerinde çalışan bir pompanın yaşam döngüsü maliyetinde ilk yatırım maliyeti (satın alma) %5-8 ve bakım maliyeti %2-5 düzeyinde iken pompanın enerji tüketim maliyeti toplam maliyetinin yaklaşık olarak %90'ını oluşturmaktadır [1],[2]. Amerikan Hidrolik Enstitüsü'nün yapmış olduğu bir çalışmada gelişmiş ülkelerde tüketilen enerjinin %20'sinin pompaların tüketiminden oluştuğu açıklanmıştır. Su terfi sistemlerinde, iyi bir tasarım ile - yani uygun pompa ve kumanda sistemleri ile - %30'a varan enerji tasarrufu sağlanabileceği belirtilmiştir [3]. Dolayısıyla, terfi sistemlerinde enerji verimliliği çalışmalarında öncelikle üzerinde çalışılması gereken konu pompa ve kumanda sisteminin seçimi ve uygun işletimi olmaktadır.

Pompalarda enerjinin etkin kullanımında tasarım ve işletme olarak iki aşama göz önünde bulundurulmalıdır. Tasarım aşamasında; uygun güçte ve yüksek verimli pompa ve elektrik motoru seçimi ve değişken devirli pompaya sahip bir sistemin oluşturulması önemli faktörlerdir [3]. Pratikte, su temini sistemlerinde pompa seçiminde, gereksinim duyulandan daha büyük kapasitede pompaların kullanıldığı çok sık görülmektedir. Bu durum, debi ve basma yüksekliği olarak çok daha fazlasına basabilecek pompanın gücünün kısık vana kullanarak azaltılması anlamına gelmekte ve sonuçta gereksiz bir şekilde yüksek miktarda enerji kullanımına ve kaybına neden olmaktadır. Şekil 1'de, uygulamada pompa seçimindeki faktörlerin pompa işletme noktasının belirlenmesine etkisi grafiksel olarak gösterilmektedir. Gerekli olan pompa işletme noktası (tasarım değerleri: Q-H) (1) No.lu nokta ile gösterilmiştir. Pompa seçiminde genellikle debi için %10-%20 ve basma yüksekliği için %10 gibi emniyet düşüncüyle debi (2) ve basma yüksekliği (3) arttırılır. Pompa satıcısı ise, gerek birebir işletme noktasında pompa bulamadığı gerekse emniyetli bir seçim için %5 civarında büyük bir pompa önerir (4). Pompa işletmeye alındığında debinin büyük olmasının istenmediği durumlarda istenen debi kısık vana ile işletme noktasına (5) gelir. Pompa sistemleri genellikle 20 - 30 yıl sonraki ihtiyaca göre boyutlandırılır. Bu nedenle, sistemin ilk işletmeye alındığı yıllarda su ihtiyacı daha az olacağından vana kısılarak debi azaltılacak ve bu durumda işletme noktası (6)'ya kayacaktır. Vana kısılarak sistemin istenilen işletme noktalarına getirilmesi ise vanada aşırı enerji kaybına neden olmaktadır. Ayrıca, pompa en verimli işletme noktasında ya da yakınında çalışmak yerine çok daha düşük verimli olduğu bölgede çalıştırılmaktadır. Bu nedenlerle gereğinden yüksek değerlerde pompa seçimi yerine biraz büyük motor ve kasa seçerek ileride tüm pompayı değiştirmek yerine pompa çarkının daha büyük bir çark ile değiştirilmesi de yeterli olabilecektir [2].

Pompaların enerji verimliliğinin değerlendirildiği büyük endüstriyel sanayi tesislerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, ölçülen veriler kullanarak mevcut pompa ve elektrik motor verimleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda; mevcut düşük verime sahip pompaların değiştirilmesi, önemli derece verim düşüşü başlayan pompaların bakımlarının yapılması, yüksek güçte seçilmiş olan pompa ve elektrik motorlarının uygun olanlarıyla değiştirilmesi ve kavitasyon problemlerinin ortadan kaldırılması önemli tasarruf fırsatları olarak belirlenmiştir. Ayrıca, her bir tasarruf için yatırım maliyetleri ve geri ödeme

süreleri verilmiştir [3]. Enerji verimliliği yüksek pompaj sistemlerinin oluşturulmasında şu hususlara dikkat edilmelidir: a)Debi özellikleri (sabit, değişken, kesikli, sürekli vb) b)Pompanın (ISO; HI; EUROPUMP), TSE TS EN 60034- 30 standartlarına uygunluğu c)Pompa karakteristik eğrisi (dik-yatık en verimli olduğu yerde verim) d)pompanın ömür boyu maliyet esaslarına uygunluğu e)boru ve pompaj sistemlerinin işletme debileri ile uyumlu olması [2].



Şekil 1: Emniyet faktörleri ve pompa seçimi.

3 Değişken devirli pompa kullanımı

Su terfi sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak (enerji açısından verimli bir sistem oluşturmak) amacıyla, sabit devirli pompalar yerine frekans konvertörleri (değişken frekanslı sürücüler) ile değişken devirli pompaların kullanımı son yıllarda kararlı bir şekilde artmaktadır [4],[5]. Değişken devirli pompaların kullanımı enerji tüketimini azalttığı için aynı zamanda çevre kirliliğinin önlenmesine de katkı sağlamaktadır. Sağladığı verimlilik artışı ve değişken hızlı pompa ve kumandasının maliyetlerinin zamanla düşmesi gibi gelişmeler değişken devirli pompa teknolojisinin su dağıtım sistemlerinde daha yaygın kullanımına olanak sağlamıştır. Değişken hız sağlayan sürücü (frekans konvertör) alternatif elektriğin frekansını değiştirerek pompanın farklı hızlarda çalıştırılmasını sağlar. Böylece farklı pompa eğrileri (Q-H) oluşur. Bir değişken devirli pompanın farklı hızlarda farklı işletme noktalarında çalışması durumu Şekil 2'de örneklenmiştir. Değişken devirli pompalarda elektrik frekansı değiştikçe pompanın hızı ve dolayısıyla bastığı debi ve basma yüksekliği değişir. Devir değişimi ile pompa eğrisi paralel olarak yukarı ya da aşağı yer değiştirir (Şekil 2). Pompa çark çapı sabit olmak koşuluyla, pompa devir sayısının değişimi ile debi, basma yüksekliği ve güçte meydana gelen değişimler pompa afinite yasaları ile tanımlanmaktadır (Denklem (1-3)):

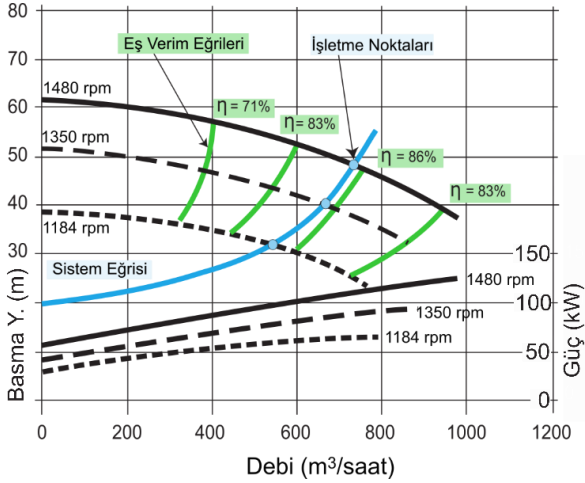
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (2)$$

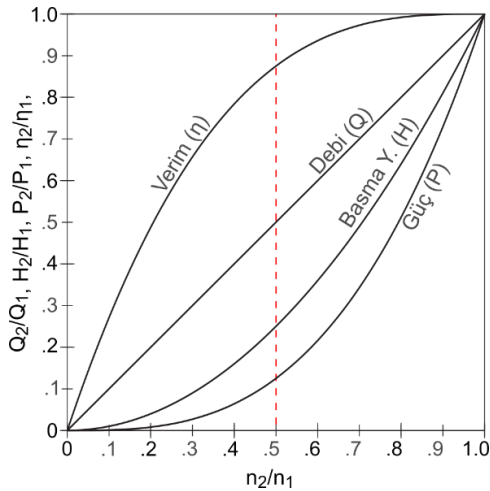
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (3)$$

Burada n devir sayısı, Q debi, H basma yüksekliği ve P pompa gücüdür. Örneğin, devir oranının %100'den %80'e düşmesi durumunda, iletilen debi %20 oranında azalırken, basma

yüksekliği %36 ve güç ise %48.8 oranında azalmaktadır. Pompa devir oranının (n_2/n_1) değişimi ile pompanın debi, basma yüksekliği, verim ve güç oranlarının değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Pompa devir oranı %50'nin altına düştüğünde pompa verimi (%15 daha) düştüğü için işletmede değişken devirli pompaların devrinin %50'nin altına düşürülmemesi istenir. Şekil 3'te görüldüğü üzere, pompa devir oranının %75'e dek düşürülmesi durumunda oluşacak verim düşüşü önemsenmeyecek düzeyde kalmaktadır. Sistem eğrisine uyum sağlayan pompa kullanımı verim düşüşünü azaltır. Yani sistem eğrisi ile eş verim eğrisinin paralel olması tercih edilir.



Şekil 2: Değişken devirli pompa işletimi.



Şekil 3: Devir oranı (n_2/n_1) ile debi, basma yüksekliği, güç ve verim değişimi.

4 Enerji verimliliğinin analizi için hidrolik simülasyon modelleri kullanımı

Su dağıtım sistemlerinin hidrolik koşullarının ve davranışının izlenmesi için geliştirilen hidrolik simülasyon modelleri aynı zamanda su dağıtım şebekelerinde en yüksek enerji giderini oluşturan pompa işletiminin iyileştirilmesi konusunda da uygulanmaya başlanmıştır. En yaygın hidrolik simülasyon modeli olan EPANET, pompa merkezinin işletme açısından yönetimi ve şebekedeki su ihtiyacı değişimlerine göre pompa işletiminin iyileştirilmesi amacıyla uygulanmıştır. Bu konudaki çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kahraman [6] ve Kahraman ve Özdağlar [7], Genetik Algoritma (GA) ve EPANET ile su dağıtım sistemlerinin optimizasyonu için SUGANET isimli bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, literatürdeki birçok araştırmacının çözüm yaptığı 8 borulu, iki gözlü hayali bir şebeke ve 34 borulu, üç gözlü Hanoi kenti şebekesi benzer koşullarla optimize edilerek uygun çözümler elde edilmiştir. Bohórquez ve diğ. [8], optimize edilmemiş pompa işletiminin su dağıtım sistemlerindeki yüksek enerji giderlerini ana nedeni olduğunu vurgulamış ve işletme maliyetlerini en aza indirmek için optimal pompaj işletimini belirlemeyi hedefleyen bir yöntem geliştirmiştir. EPANET ve GA tabanlı yöntemi 159 borulu bir şebekede hem sabit devirli pompalar hem de değişken devirli pompalar için uygulamış ve her iki durum için en uygun işletme prosedürlerini oluşturmuşlardır. Böylece, şebekedeki işletme basınçları 65-90 mss aralığından sabit devirli pompa durumu için 40-70 mss ve değişken devirli pompa durumu için 30-65 mss aralığına indirilmiştir. Georgescu ve diğ. [9] santrifüj pompaların değişken sistem ihtiyaçları altında işletiminin kontrolü için EPANET ile simülasyonu kullanmış ve 24 saatlik periyot için pompa işletimi kontrolünün verimliliğini tayin etmeyi hedeflemişlerdir. Modelde pompa işletimi için kontroller (pompa devri değişimi) EPANET'in kural tabanlı kontrolleri (*rule-based controls*) ile sağlanmıştır. Çalışma sonunda, değişken sistem ihtiyaçlarında pompa merkezi için farklı kontrol yöntemlerinin anlaşılması ve sınaması için EPANET ile simülasyonun kullanışlı olduğunu görüldüğü belirtilmiştir. Georgescu ve diğ. [10] EPANET ile nominal hızlarından farklı hızlarda çalıştırılan pompaların verimlerini belirlemeyi hedeflemiş; bu amaçla pompa karakteristik eğrisini ölçebilen mevcut bir deneysel düzenek EPANET ile modellenmiş ve ölçüm yoluyla bulunan sonuçlar ile modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada EPANET'in afinite yasalarını baz alarak debiye karşı basma yüksekliği değerlerini (pompa eğrisini) doğru modellediği ancak nominal hızdan farklı hızlarda çalışma durumunda EPANET'in pompa verim eğrisini değiştirmedikini belirlemişlerdir. Benzer şekilde Marchi ve Simpson [5]'de değişken devirli pompa işletmesinde pompa devri değiştiğinde EPANET'in pompa verim eğrisini hesaplamada afinite yasalarını göz önüne almadığını bunun yerine nominal hızdaki verim eğrisini kullandığını belirtmektedirler. Bu soruna çözüm olarak, EPANET kaynak kodu için bir düzeltme önermişlerdir.

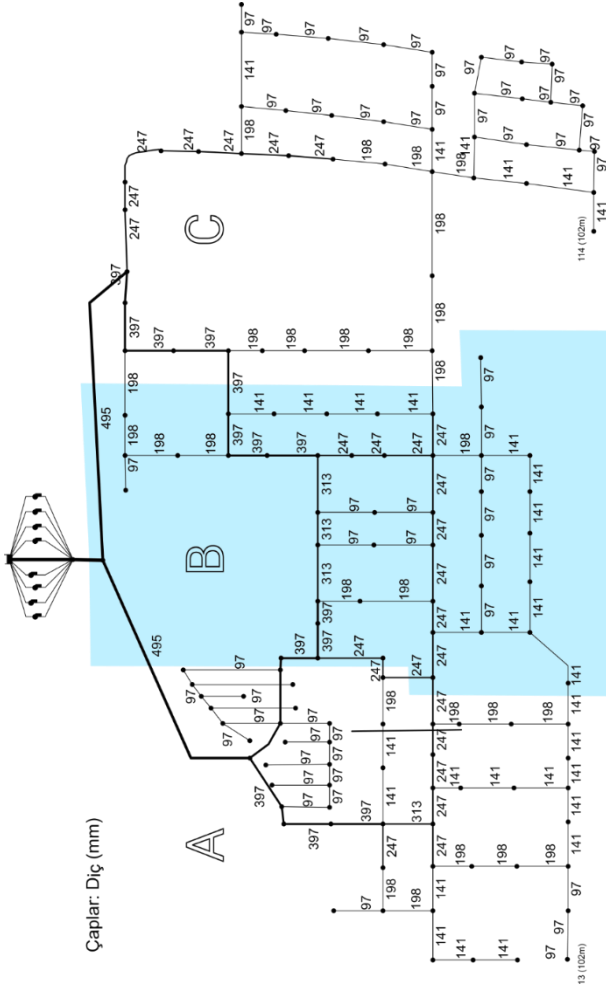
5 Örnek çalışma

5.1 Örnek şebekenin tanıtımı, veri ve kabuller

Bu çalışmada değinilen su dağıtım sistemlerindeki pompaj kaynaklı yüksek enerji maliyetleri (enerji verimliliği) ve işletme sorunları hemen her şebeke için yaşanan sorunlardır. Bu nedenle bu çalışmada, daha önce Özdağlar [11] tarafından boyutlandırılan bir organize sanayi bölgesi şebekesi örnek şebeke olarak ele alınmıştır. 100 mm-500 mm arası çaplarda borulardan oluşan şebekedeki toplam boru uzunluğu 30 km'dir. Gerçekte iki ayrı noktadan basınçlı su girişi olan şebeke, pompaj sistem örneği oluşturmak için bu çalışmada şebekeden 15 m daha düşük kotta hayali bir kaynak ve bir pompa merkezinden beslenecek duruma getirilmiştir. Oluşturulan şebekede pompa merkezinden gelen su, gerçekte olduğu gibi şebekeye iki ayrı borudan verilmektedir. Şebeke boru geçkisi ve boru çapları (D_{ic}) Şekil 4'te verilmiştir. Şebeke için 2001 yılında yapılan ilk projede, su, organize sanayi bölgesindeki fabrikaların 134 düğüm noktasından noktasal (uç) debi olarak

dağıtılmıştır. Bu çalışmada da debi dağıtımları benzer şekilde aynı düğüm noktalarından noktasal olarak yapılmıştır.

Farklı su ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı durumlarda oluşacak debi değişimleri, debi katsayıları ile ifade edilmiş ve uç debiler ile debi katsayısının çarpımı ile hesaplanmıştır. Ortalama şebeke debisi 700 L/s olacak şekilde ihtiyaçlar bir çarpan ile artırılmıştır.



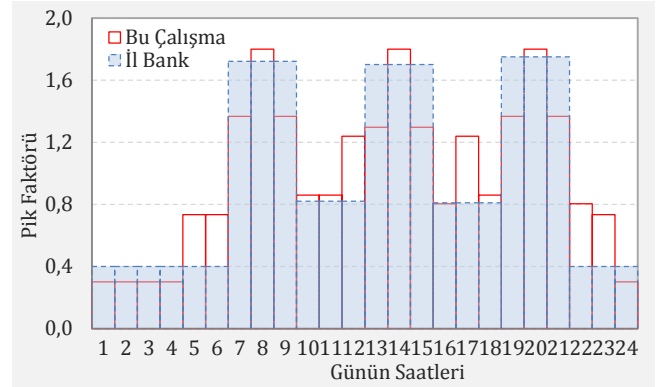
Şekil 4: Örnek şebekedeki boru çapları ve dağıtım bölgeleri.

Su dağıtım şebekelerinde su tüketimlerinin zamana göre değişimi bölgesel olarak farklılıklar gösterebilmektedir. Bu değişimleri temsil etmek üzere örnek şebekede su tüketimleri için zamana göre birbirinden farklı 3 ayrı bölge planlanmıştır (1) A bölgesi, (2) B bölgesi ve (3) C bölgesi (Şekil 4). Bu bölgelerde su ihtiyaçlarındaki değişim EPANET içinde 'demand pattern' ile tanımlanmıştır.

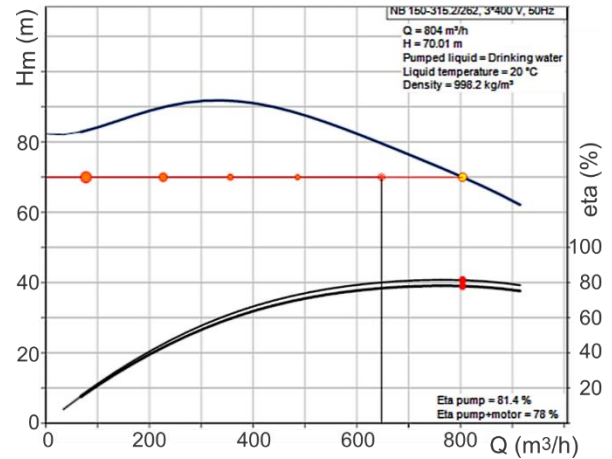
İlbank [12] küçük nüfuslu yerleşimler için su tüketimi değişimlerinde saatlik tüketim faktörünün 0.4–1.75 arasında olacağını ifade etmektedir (Şekil 5). Ancak, organize sanayi bölgesi şebekelerinde, kentsel su şebekelerinden farklı olarak, su tüketimleri günün saatlerinde daha büyük değişimler gösterebilmektedir. Bu değişim, gece saatlerinde (22–06) çalışmayan, günün ilk saati yüksek üretim yapan veya çok su kullanan tesislerin su ihtiyacındaki salınımlardan kaynaklanmaktadır. Kısacası, organize sanayi bölgelerinde saatlik su tüketimi değişimleri çok daha büyük olabilmektedir.

Bu nedenle, bu çalışmada saatlik tüketim faktörü en düşük 0.3 ve en yüksek 1.8 olarak alınmıştır.

Örnek şebeke için yapılacak tüm çözümlerde bir pompa tipi kullanılmıştır. Debi ve basma yüksekliği ihtiyacına göre, çok sayıda pompa paralel bağlı olarak işletilmiştir. Örnek şebeke için seçilen pompanın grafiği Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5: İlBank ve örnek şebeke için saatlik tüketim pik faktörleri.



Şekil 6: Seçilen pompa grafiği.

5.2 Şebeke işletme tipleri

Pompa işletiminin iyileştirilmesi ile elde edilecek enerji tasarrufunu örneklemek için bu çalışmada iki farklı pompa işletme şekli için çözüm ve enerji tüketimleri hesaplanmıştır: (1) Normal işletme ve (2) İyileştirilmiş işletme

Normal işletme tipinde, şebekedeki debi değişimleri paralel pompaların kesintili (aç/kapa) olarak çalıştırılması yoluyla sağlanmaktadır. Pompaların devreye alınma ya da çıkarılmasının basınç kontrolü sağlayan bir kontrol ünitesi ile gerçekleştirildiği kabul edilmiştir. Farklı işletme durumlarında şebekedeki su tüketimine göre debi değişmekte ama basma yüksekliği (82–87 mss aralığında) sabit kalmaktadır. Bu işletme şekli, pek çok su dağıtım sisteminde uygulanan ve sadece su ihtiyacının ve gerekli basınçların sağlanmasını hedefleyen şikâyetlere ve basma yüksekliğine (H_m) bağlı işletme tipidir.

İyileştirilmiş işletme tipinde de normal işletme ile aynı tip ve sayıda pompa ile aynı debilerde su iletimi sağlanmaktadır. Bu işletme şeklinde, pompalardan biri (P1) değişken devirli olarak çalıştırılarak tüm işletme şebekede belirlenen kritik noktalardaki minimum basınç sınırlamasını (30 mss)

sağlayacak basma yüksekliğine pompaj esasına dayanmaktadır. Şebekenin farklı bölgelerinde su tüketiminin değişimi nedeniyle farklı saatlerde farklı noktalar basınç açısından kritik olabilmektedir. Bu nedenle, değişen su ihtiyaçları için su farklı basma yüksekliklerine basılmak zorundadır. İyileştirilmiş işletme tipinde pompa merkezi (ihtiyaca göre en çok 7 sabit ve 1 değişken devirli pompa), şebekede basınç açısından en kritik noktalarda basınç minimum basınç sınırında olacak şekilde işletilmiştir. Bu işletme tipinde hedeflenen iyileştirme, şebekede basınç açısından en kritik noktalarda basıncın minimum basınç sınırında olacak şekilde işletmenin sağlanması ve böylece (8 ayrı debi durumunda) çalışma noktalarının sistem eğrisine daha yakın noktalarda tutulması yoluyla sağlanır.

5.3 Sınanan durumlar (Senaryolar)

Şebekede planlanan 3 bölgede az (0.3) ya da çok (1.8) su tüketimi olduğu kabul edilerek 8 farklı su kullanımı durumu oluşturulmuştur. Ortalama su tüketimi A bölgesinde 262 L/s, B bölgesinde 235 L/s ve C bölgesinde 203 L/s (toplam 700 L/s)'dir. Farklı saatlerde şebekenin A, B ve C bölgelerinde oluşabilecek ekstrem su tüketimlerine ait faktörler Tablo 1'de verilmiştir. Bölgelere ait ortalama su tüketimleri ile su tüketim faktörleri kullanılarak bu çalışmada ele alınan farklı durumlar (Durum 1–Durum 8) için şebeke debileri hesaplanmıştır (Tablo 1).

Senaryo analizlerinde (Durum 1–Durum 8) su ihtiyacının değişimleri (pik faktörleri) normalden daha yüksek olarak kullanılmıştır. Ancak, gerçek durumlardan çok uzak olmamaya özen gösterilmiştir. Örneğin, su kaynağının 15 m düşük kotta olduğu kabulü gibi ki bu 15 m'lik fark tüketilen enerjiyi artırmakta ancak her iki işletme tipinde de eşit olduğu için iyileşmenin yüzdesini azaltmaktadır.

Tablo 1: Farklı durumlarda şebeke bölgelerindeki su tüketimleri.

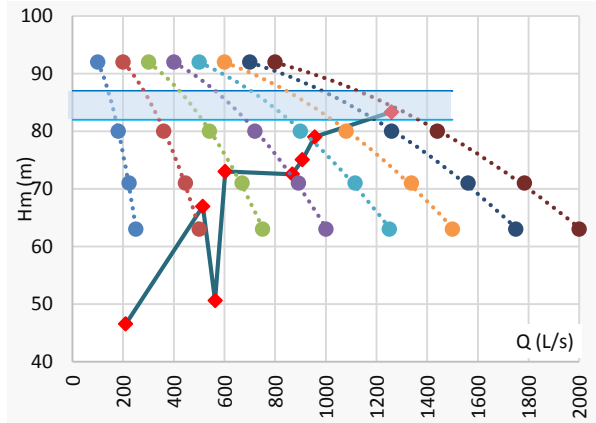
Durum	Tüketim Faktörü			Q (L/s)
	A	B	C	
1	Az (0.3)	Az (0.3)	Az (0.3)	210.0
2	Az (0.3)	Az (0.3)	Çok (1.8)	514.3
3	Az (0.3)	Çok (1.8)	Az (0.3)	563.0
4	Az (0.3)	Çok (1.8)	Çok (1.8)	867.3
5	Çok (1.8)	Az (0.3)	Az (0.3)	602.7
6	Çok (1.8)	Az (0.3)	Çok (1.8)	907.0
7	Çok (1.8)	Çok (1.8)	Az (0.3)	955.7
8	Çok (1.8)	Çok (1.8)	Çok (1.8)	1260.0

5.4 Bulgular

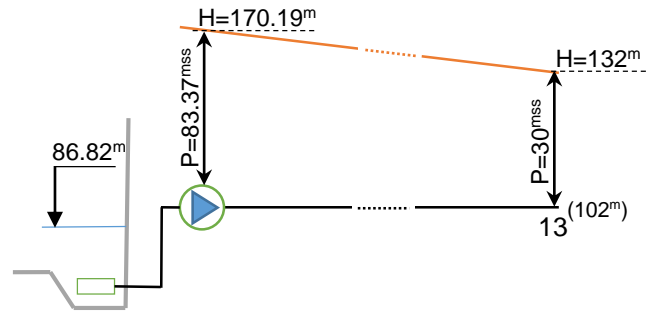
Örnek şebekede sınanan 8 farklı durumun hepsinde, basınç açısından şebekedeki en kritik yerler 13 ve 114 No.lu düğüm noktaları olmuştur. İşletmede bu noktalarda basıncın en az 30 mss olması sağlanacak şekilde P1 pompasının devrinin ayarlandığı varsayılmıştır. Pompa eğrileri (nokta nokta), "Normal işletme" ($H_m=82$ ve 87 mss), "iyileştirilmiş işletme" de şebeke boru karakteristik eğrisi (ve sistem eğrisi, kırık çizgi) Şekil 7'de verilmiştir. İyileştirilmiş işletmede farklı durumlar

için pompa çalışma planı ve debi – basma yüksekleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu işletmede ilk pompa (P1) değişken devirli olarak çalıştırılmış; farklı durumlarda gerekli sayıda sabit devirde P2 tip pompalarla birlikte çalıştırılarak istenen debi sağlanmıştır. Örnek olarak, Durum 1 için yalnızca P1 pompası 0.8525 devir oranı ile çalışmakta ve 210 L/s debiyi 46.57 mss yükseğe pompalamaktadır. Durum 2'de ise, P1 pompası 1.061 devir oranı ile P2 pompası ile birlikte çalışarak 514.3 L/s debiyi 66.99 mss basmaktadırlar. Bu durumda, P1 pompası 278 L/s ve P2 pompası 237 L/s debi pompalamaktadır. Benzer şekilde tüm durumlara ait detaylar Tablo 2'de görülebilir.

İyileştirilmiş işletme için $Q=210$ L/s örneğinde şematik şebeke profili ve işletme basınçları Şekil 8'de verilmiştir. Tüm işletme durumları (senaryolar) için şebeke çözümlerinden elde edilen sonuçlarda en kritik noktalar olan 13 ve 114 No.lu noktalardaki basınç değerleri ve gereken $H_{m, işletme}$ değerleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 7: Pompalar, şebeke (Q-H) eğrileri ve normal işletme basınçları.



Şekil 8: İyileştirilmiş işletme için şematik şebeke profili ve işletme basınçları ($Q=210$ L/s).

Normal işletme için: Normal işletme durumunda pompa güç hesabı için Denklem (4)'te verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$N_p = \frac{\gamma \cdot Q_t \cdot H_m}{75 \cdot \eta} \quad (4)$$

Pompa gücü hesabında $H_m=(87-82)/2=85$ mss, pompa ve motor toplam verimi $\eta = 0.74$ ve $\rho s u = 998.2$ kg/m³ değerleri kullanılarak hesap yapılmıştır. Toplam enerji hesabında bu bağıntıdan elde edilen güç değerleri Tablo 4'te verilen çalışma süreleri ile çarpılarak elde edilmiştir. Bulunan tüm değerlerin toplamı ile günlük enerji tüketimi elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 2: İyileştirilmiş işletme için farklı durumlarda pompa çalışma planı.

Durum	Hm (mss)	P1 Devir Oranı	Q (L/s)								
			P1	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4	P2-5	P2-6	P2-7	Q _{top}
1	46.57	0.8525	210	0	0	0	0	0	0	0	210.0
2	66.99	1.061	278	237	0	0	0	0	0	0	514.3
3	50.63	0.968	271	292	0	0	0	0	0	0	563.1
4	73.04	1.0055	176	213	213	0	0	0	0	0	602.7
5	72.55	0.96	221	216	216	216	0	0	0	0	867.3
6	75.06	0.905	93	204	204	204	204	0	0	0	907.0
7	79.03	1.035	217	185	185	185	185	0	0	0	955.7
8	83.37	1	158	158	158	158	158	158	158	158	1260

Tablo 3: En kritik noktalarda basınç.

Durum	H _{m,işl}	Basınç (mss)	
		13	114
1	46.57	30.01	30.20
2	66.99	49.08	30.01
3	50.63	30.61	30.04
4	73.04	30.66	53.99
5	72.55	50.33	30.01
6	75.06	30.03	34.62
7	79.03	30.00	53.98
8	83.37	30.00	35.23

Tablo 4: Normal ve iyileştirilmiş işletme için farklı durumlarda enerji tüketimleri.

Durum	Q _i (L/s)	Pik Fak.	Şüre (saat)	Normal İşletme		İyileştirilmiş İşletme						
				Güç (kW)	Enerji (kWh)	P1		P2		P1+n·P2		
						η (%)	Güç (kW)	η (%)	Güç (kW)	n*	Toplam (kW)	Enerji (kWh)
1	210	0.30	5	236.3	1181	0.78	122.3			0	122.3	611.5
2	514	0.73	3	578.7	1736	0.71	255.0	0.77	200.8	1	455.8	1367
3	563	0.80	2	633.5	1267	0.73	185.0	0.68	211.7	1	396.7	793.5
4	603	0.86	3	678.1	2034	0.77	164.6	0.78	194.8	2	554.2	1663
5	867	1.24	2	975.9	1952	0.78	200.5	0.78	195.7	3	787.6	1575
6	907	1.30	2	1020.5	2041	0.57	118.5	0.78	191.3	4	883.5	1767
7	956	1.37	4	1075.4	4302	0.78	214.7	0.77	184.8	4	954.1	3816
8	1260	1.80	3	1390.5	4172	0.74	173.8	0.74	173.5	7	1390.5	4164
Σ			24		18685							15758

* n: P2 tip çalışan pompa sayısı.

İyileştirilmiş işletme için: İyileştirilmiş işletmede değişken devirli olarak çalıştırılan P1 pompası her durumda ve 7 adet P2 pompası ise ihtiyaca göre kullanılmaktadır. P1 değişken devirli olduğu için her durumdaki basma yüksekliğine karşı gelen verim değerleri ve Q_{P1} pompaj debileri kullanılarak her durumdaki güç ihtiyacı hesaplanmıştır. Diğer pompaların hepsi aynı konumda çalıştığı için önce benzer şekilde yalnızca P2 için güç hesaplanmış sonra ihtiyaca göre artan sayıda P2 pompası gücünden toplam güç hesaplanmıştır. Böylece toplam gücün hesaplanması için 1 tane P1 pompası güç ihtiyacı ile gerektiği kadar P2 pompası için oluşan güç ihtiyaçları toplanmıştır.

6 Sonuçlar ve değerlendirme

Bu çalışmada, su dağıtım sistemlerinde şebekenin işletimini ve sistem enerji tüketimini etkileyen iki önemli konu ele alınmıştır: (1) su tüketiminin zaman içindeki salınımı (değişimi) ve (2) su ihtiyacının şebekenin farklı bölgelerinde alansal değişimi.

Bu çalışmada, su ihtiyacının zaman içindeki salınımı az (%30) ve çok (%180) debi oranları olarak, alansal değişimi ise su ihtiyacı farklı üç ayrı bölge ile göz önüne alınmıştır.

Geniş alanlara hizmet veren büyük şebekelerde suyun farklı zaman ve konumlarda değişen kullanımının tek bir şebeke karakteristik eğrisi ile ifade edilemeyeceği örneklenmeye çalışılmıştır. Böyle şebekelerin işletilmesinde, sabit devirli pompaları dur – kalk ile çalıştırmak yerine, pompa gurubunda en az bir değişken devirli pompa kullanılmasının ve şebekedeki basınca bağlı olarak değişen bir işletme şeklinin uygulanmasının enerji tüketimini önemli düzeyde azaltabileceği hesaplanarak gösterilmiştir. İlave iki basınçölçer (basınç açısından kritik noktalar için), bir frekans konvertör (değişken devirli pompa için) ve kumanda sistemi kullanımı ile dur – kalk çalışan kumanda sistemine göre elektrik tüketiminde %16'lık tasarruf sağlandığı hesaplanmıştır. Bu şekilde sağlanan enerji tasarrufunun uzun vadede (20 ya da 30 yıl) hesaplanırsa çok büyük değerlere ulaşacağı açıktır. Şebeke işletiminin iyileştirilmesi amacıyla değişken hızlı kumanda sistemi ve basınçölçerler bir gider olarak görünse de, bu sayede elde edilen enerji tasarrufunun yapılan harcamaları kısa sürede amorti edeceği açıktır. Son zamanlarda pompalar, üzerlerinde birçok kontroller yapabilen ve devir ayarlayabilen elektronik sistemler ile satılmaya başlanmıştır. Çok yakında çok daha kompleks yani akıllı diyebileceğimiz kumanda sistemleri ile işletme maliyetlerinin oldukça düşeceği umulmaktadır.

7 Kaynaklar

- [1] Henden B, Karaman B. "Pompalarda Enerji Verimliliği- Minimum Verimlilik İndeksinin Belirlenmesi". MASGrup, <http://www.masgrup.com/>, 2015.
- [2] Yumurtacı Z, Sarigül A. "Santrifüj pompalarda enerji verimliliği ve uygulamaları". *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 122, 49-58, 2011.
- [3] Kaya D, Yağmur EA, Yiğit KS, Kılıç FC, Eren AS, Çelik C. "Energy efficiency in pumps". *Energy Conversion and Management*, 49 (6), 1662-1673, 2008.
- [4] Lingireddy S, Wood D. "Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps". *Journal of Energy Engineering*, 124(3), 90-103, 1998.
- [5] Marchi A, Simpson AR. "Correction of the EPANET inaccuracy in computing the efficiency of variable speed pumps". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(4), 456-459, 2013.
- [6] Kahraman AM. Optimal Design and Expansion of Water Distribution Systems using Genetic Algorithm". Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, İzmir, 2003.
- [7] Kahraman AM, Özdağlar D. "Su dağıtım sistemlerinin genetik algoritma ile optimizasyonu". *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 1-18, 2004.
- [8] Bohórquez J, Saldarriaga J, Vallejo D. "Pumping pattern optimization in order to reduce WDS operation costs". *13th Computer Control for Water Industry Conference*, 2015.
- [9] Georgescu AM, Georgescu SC, Cosoiu CI, Hasegan L, Anton A, Bucur DM. "EPANET simulation of control methods for centrifugal pumps operating under variable system demand". *13th Computer Control for Water Industry Conference*, 2015.
- [10] Georgescu AM, Cosoiu CI, Perju S, Georgescu SC, Hasegan L, Anton A. "Estimation of the efficiency for variable speed pumps in EPANET compared with experimental data". *Procedia Engineering*, 89, 1404 - 1411, 2014.
- [11] Özdağlar D. İzmir Atatürk Organize Sanayi Bölgesi Su Dağıtım Projesi Raporu, DEÜ SUMER, 2001.
- [12] İl Bank. "İçmesuyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname". Ankara, 2013.