



Research Article

Practical and Theoretical Comparison of Leaks in Drinking Water Systems

Merve Akdemir¹ , Salih Yılmaz¹ *

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Çankırı Karatekin University, 18100, Çankırı, Türkiye

* Correspondence: salihyilmaz@karatekin.edu.tr

Received: 16 October 2023; Accepted: 4 December 2023; Published: 31 December 2023

Abstract: In drinking water systems, leaks and failures occur in pipes that provide water transmission due to various factors. One of the main factors in the damage of pipes is pressure fluctuation. In order to eliminate this fluctuation, pressure management is applied with different pressure regulation methods. In addition to reducing leakages, pressure management also has cost elements. In order to meet this cost, the condition of the water distribution system should be analyzed before pressure management, which pressure regulation method will be preferred should be decided and how much water loss will be prevented as a result of pressure management application should be calculated. In this study, leakages were calculated theoretically with the Fixed and Variable Area Discharges (FAVAD) equation, which establishes a relationship between leakage and pressure in the isolated measurement area where pressure regulation is applied, and compared with the field application. Pressure regulation methods that do not give results close to practice were identified by analysis and a new calculation method was developed for these methods. The results in the field application were compared with the developed method and it was tested that it gives results close to the field. In this study, it was aimed to create an algorithm that would give results closer to the application area for the evaluation of water losses and it was successful. This method is considered to be one of the deciding factors in the calculation of leakage in different pressure methods.

Keywords: water drinking system, pressure management, leakage, water loss, Favad equation

Araştırma Makalesi

İçme Suyu Sistemlerinde Sızıntıların Uygulamalı ve Teorik Olarak Karşılaştırılması

Öz: İçme suyu sistemlerinde çeşitli unsurlara bağlı olarak su iletimini sağlayan borularda sızıntı ve arızalar meydana gelmektedir. Boruların hasar görmesindeki temel etkenlerden biri basınç dalgalanmasıdır. Bu dalgalanmanın giderilmesi için farklı basınç düzenleme yöntemleriyle basınç yönetimi uygulaması yapılmaktadır. Basınç yönetimi uygulamasının sızıntıların azaltılmasının yanında maliyet unsurları da vardır. Bu maliyeti karşılaması için basınç yönetimi öncesi su dağıtım sisteminin durumu analiz edilmeli, hangi basınç düzenleme yöntemi tercih edileceğine karar verilmeli ve basınç yönetimi uygulaması sonucu ne kadar su kaybı önleneceği hesaplanmalıdır. Bu çalışmada basınç düzenlemesi yapılan izole ölçüm bölgesinde sızıntı ve basınç arasında ilişki kuran Fixed and Variable Area Discharges (FAVAD) denklemiyle sızıntılar teorik olarak hesaplanmış ve saha uygulamasıyla karşılaştırılmıştır. Uygulamaya yakın sonuç vermeyen basınç düzenleme yöntemleri analizlerle tespit edilmiştir ve bu yöntemler için yeni bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemle saha uygulamasındaki sonuçlar karşılaştırılmış ve sahaya yakın sonuçlar verdiği test edilmiştir. Yapılan çalışmada su kayıplarının değerlendirilmesi için uygulama sahasına daha yakın sonuç verecek bir algoritma oluşturulması amaçlanmış ve başarılı olunmuştur. Bu yöntemin farklı basınç yöntemlerinde sızıntıların hesaplanması konusunda karar verici unsurlardan biri olması düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: içme suyu sistemi, basınç yönetimi, sızıntı, su kaybı, Favad denklemi

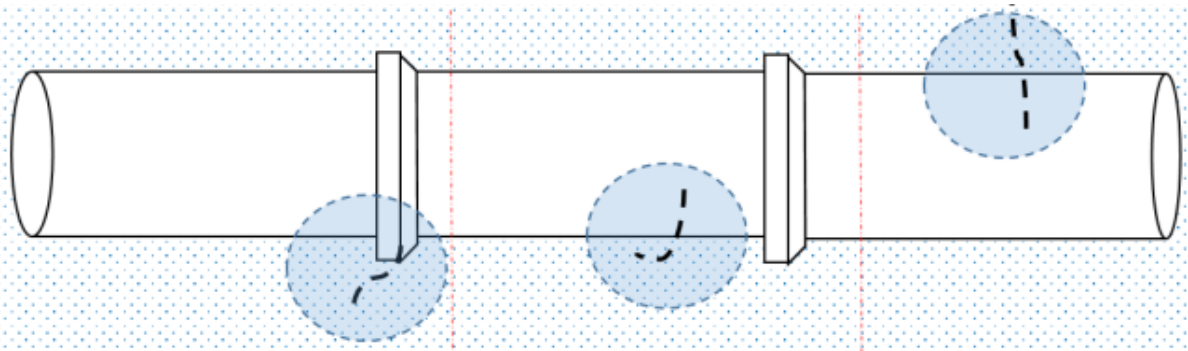
Citation: M. Akdemir and S. Yılmaz, "Practical and Theoretical Comparison of Leaks in Drinking Water Systems", *Journal of Studies in Advanced Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 55-66, Dec 2023, doi: 10.5281/zenodo.10445009

1. Giriş

İçme suyu dağıtım şebekelerinde şebeke hattındaki basınç, borunun zamanla yaşlanması, boru malzemesinin kalitesi, şebekenin işçiliği, iklim ve yer hareketleri, boru üzerinde meydana gelen trafik yükü gibi çeşitli fiziksel, çevresel, hidrolik gibi faktörlerden dolayı fiziksel su kayıpları ve arızalar meydana gelmektedir [1]. Su kaynaklarının her geçen gün azalması ve artan nüfusa bağlı olarak su talep debilerinin artması sonucu su kayıplarının kontrol edilmesi önem kazanmıştır [1]. Thornton vd. [2] ABD’de yaptıkları bir çalışma sonucunda boru arızalarından kaynaklı oluşan sızıntıların ülkedeki su kaynaklarının %20’sini bulduğunu ve bu durumun ülke ekonomisini de olumsuz açıdan etkilediğini belirtmiştir. Su kayıpları içme suyu dağıtım şebekesinde meydana gelen fiziksel ve idari kayıpların toplamını ifade etmektedir. Fiziksel su kayıpları şebekeye verilen ancak tüketiciye ulaşmadan sızıntı yoluyla kaybolan suyun ölçüsüdür. İdari su kayıpları ise şebekeye verilen ve tüketicilerin suya ulaştığı ancak izinsiz kullanım, ölçüm ve veri işleme hataları gibi sebeplerden dolayı su idaresinin ücretini tahsil edemediği suyun ölçüsüdür [3], [4]. Dağıtım sisteminde izinli su tüketimi kapsamında ibadethane, park ve bahçelere verilen faturalandırılmayan su kullanımları ile su kayıpları (fiziksel ve idari kayıplar) bileşenlerinin toplamı gelir getirmeyen suyu (GGS) oluşturmaktadır [4]. Sisteme verilen su hacminden su idaresinin gelirini aldığı su hacmi faturalandırılmış yasal tüketimdir [3], [4].

Fiziksel kayıplar oluşma şekline göre 3’e ayrılır.

- **Belirsiz Sızıntılar:** Borunun alt yüzeyinde meydana gelen ve yüzeye çıkmayan sızıntılardır. Sızıntı debisi küçük olduğu için akustik yöntemlerle tespit edilmesi zordur. Sızıntının farkına varma, tespit ve onarım süreci oldukça uzun bir süreçtir ve sızıntı debisi çok küçük olsa da bu süreçte ciddi miktarda su kayıpları meydana gelmektedir [1], [5].
- **İhbar Edilmeyen Sızıntılar:** Borunun alt yüzeyinde meydana gelen ve basınç etkisinde yüzeye çıkmayan sızıntılardır. Sızıntıların farkına varılması için yer mikrofoni, dinleme çubuğu gibi akustik yöntemler kullanılmalıdır. Sızıntı tespiti yapılmazsa sızıntının farkına varılıp onarılma süresi artar. Birim zamanda kaybolan su miktarı belirsiz sızıntılardan fazla, ihbar edilen sızıntılardan azdır [1,5].
- **İhbar Edilen Sızıntılar:** Arızaların yüzeye çıkmasıyla meydana gelen ve büyük sızıntı debisine sahip sızıntılardır. Birim zamanda kaybolan su miktarı fazladır ancak sızıntı yüzeye çıktığı için tespit edilmesi de kolaydır. Sızıntının hacmi arızanın bildirilmesine, dağıtım sistemindeki basınca ve arızaya müdahale etme süresine bağlıdır [1], [5].



Şekil 1: Oluşma Şekline Göre Sızıntılar [6]

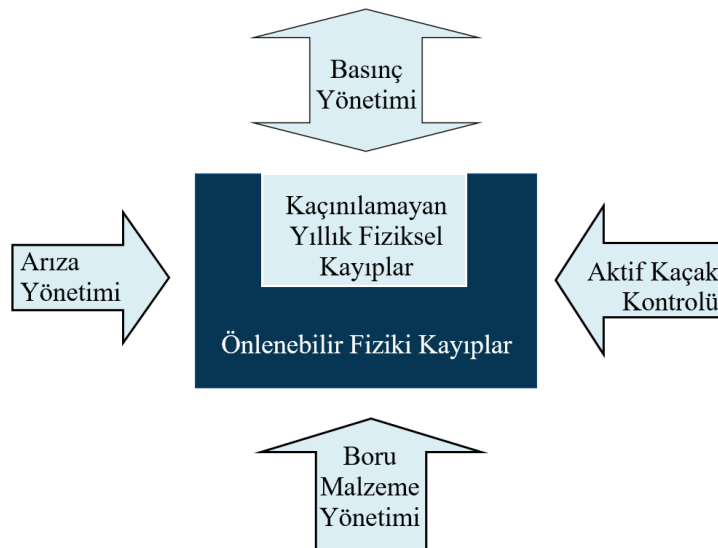
Adedeji vd. [1] yaptıkları çalışmada su dağıtım şebekelerinde uygulanan sızıntı tespit yöntemlerini farklı açılardan karşılaştırmıştır. Uygulanan mevcut yöntemlerin belirsiz sızıntıları etkili bir şekilde tespit edemediğini belirtmiştir. Belirsiz sızıntılardan meydana gelen su kayıplarını önlemek için sensörlerin kullanılması gerektiğini ve belirsiz sızıntıların tespiti için araştırmaların sayısının artması gerektiğini ifade etmiştir.

Tablo 1: IWA/AWWA Standart Su Dengesi

Sisteme Giren Su	İzinli Tüketim	Faturalandırılmış İzinli Su Tüketimi	Faturalandırılmış Ölçülmüş Kullanım	Gelir Getiren Su
		Faturalandırılmamış İzinli Su Tüketimi	Faturalandırılmamış Ölçülmüş Kullanım	
Su Kayıpları	Su Kayıpları	İdari Kayıplar	İzinsiz Tüketim	Gelir Getirmeyen Su
		Fiziki Kayıplar	Sayaç Ölçüm Hataları	
			Dağıtım Sistemindeki Kayıp ve Kaçaklar	
			Depolardaki Kayıp ve Kaçaklar	

Türkiye’de su kayıplarının kontrolü için Orman ve Su İşleri Bakanlığı tarafından 8 Mayıs 2014’te “İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği” 16 Temmuz 2015’te “Teknik Usuller Tebliği” yayımlanmıştır. Bu yönetmelikle su kanal idarelerinin su kayıp oranlarını belirlenen takvimde belli oranlara düşürmesi hedeflenmiştir. Ancak su kanal idarelerinin birbirinden farklı teknolojiler kullanması, belediyelerdeki su kayıp oranlarının farklı olması ve depo beslenme şekillerinin farklı olması gibi sebeplerden dolayı hedefe ulaşılmasının zor olması nedeniyle 31 Ağustos 2019’da çıkan “İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Yönelik Yönetmelik” ile hedeflenen değerler güncellenmiştir. 2014’te yayımlanan yönetmeliğin 9. maddesi, “Büyükşehir ve il belediyeleri su kayıplarını 2023 yılına kadar en fazla %30, 2028 yılına kadar ise en fazla %25 düzeyine; diğer belediyeler su kayıplarını 2023 yılına kadar en fazla %35, 2028 yılına kadar en fazla %30, 2033 yılına kadar ise en fazla %25 düzeyine indirmekle yükümlüdürler.” ifadesiyle değiştirilmiştir.

Dağıtım sistemlerinde verimlilik açısından temel prensip GGS oranını minimum seviyeye düşürerek sistem verimliliğini ve abone memnuniyetini yükseltmektir [5]. Fiziksel kayıpların azaltılması ve kontrol edilmesi amacıyla çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden en çok tercih edilenleri basınç yönetimi, aktif kaçak kontrolü, arıza yönetimi ve boru malzemesi yönetimidir [4]. Bu yöntemler sızıntı azaltmada birbirinden farklı sonuçlar vermekte olup saha uygulamaları için farklı ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla maliyet bakımından farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır [7].

**Şekil 2:** Fiziksel Kayıplarla Mücadele Yöntemleri

Samir vd. [8] yaptıkları çalışma sonucunda su kayıp azaltma yöntemleri içinde basınç yönetimi uygulamasının diğer yöntemlere kıyasla sızıntıları azaltmada en iyi sonucu verdiğini belirtmiştir. Basınç yönetimi uygulaması sızıntıları azaltma konusunda etkili bir çözüm ortaya koyarken sahada uygulanması durumunda finansal anlamda ciddi maliyetleri vardır [7]. Bu nedenle basınç yönetimi uygulanmadan önce ekonomik açıdan fayda maliyet analizi yapılması önerilmiştir [7], [8].

Faydaların finansal olarak belirlenmesinde Fixed and Variable Area Discharges (FAVAD) denklemi kullanılmaktadır. Ancak FAVAD denklemi ile hesaplanan finansal faydalar tüm basınç kontrol yöntemleri için (sabit çıkışlı, zaman ayarlı, debi ayarlı, kapalı devre) doğru sonucu vermemektedir. Bu nedenle tüm basınç kontrol yöntemlerinde faydaları doğru bir şekilde hesaplayan yönteme gereksinim vardır. Azalan su kaynakları karşısında şebekede oluşan sızıntıların azaltılması amacıyla pek çok sayıda basınç yönetimi çalışması vardır. Ancak tüm basınç kontrol yöntemlerinde oluşan sızıntıları tek bir yöntemle hesaplayan çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışma kapsamında basınç düzenlemesi yapılan ölçülebilir alt bölgenin basınç ve debi verileri alınarak teorik olarak FAVAD denklemiyle karşılaştırılmış ve şebekede oluşan sızıntıların doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlayan yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. Basınç Yönetimi

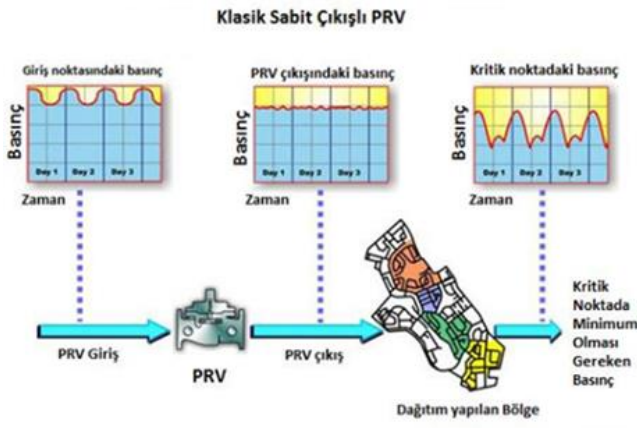
Su dağıtım şebekelerinin en verimli şekilde çalışması için yönetilmesi gereken en önemli faktörlerden biri basınçtır. Bölge topoğrafyasına bağlı olarak abonelere su yeterli ve etkin şekilde iletilerek, kritik noktalarda minimum basınç seviyesi sağlanarak ve kullanıcılara yeterli miktarda debiyi iletecek şekilde sistem basıncının düzenlenmesi gerekmektedir [9]. Su dağıtım şebekesi kritik noktaların basınç gereksinimini sağlayacak şekilde tasarlandığında su taleplerinin az olduğu zaman dilimlerinde sistem çalışması gerekenin üstünde bir basınçla çalışabilir. Bu durum basınç etkisinde su kayıp miktarlarının ve arıza sıklıklarının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle su dağıtım sistemlerinde basınç yönetimi uygulaması yapılmalıdır [9], [10].

Basınç yönetimi uygulaması için sınırları belirlenen, tek veya birden fazla girişi olan, kendi içinde değerlendirilen, karmaşık şebekelerin daha küçük ağlara bölünmesiyle elde edilen izole alt bölgelerin oluşturulması zorunludur. İzole alt bölgelerin oluşturulmasıyla fiziksel kayıpları azaltmak için uygulanan yöntemlerin uygulanması kolaylaşmaktadır. Elde edilen her bir izole alt bölgeye ölçülebilir alt bölge (ÖAB) adı verilir [4], [11], [12].

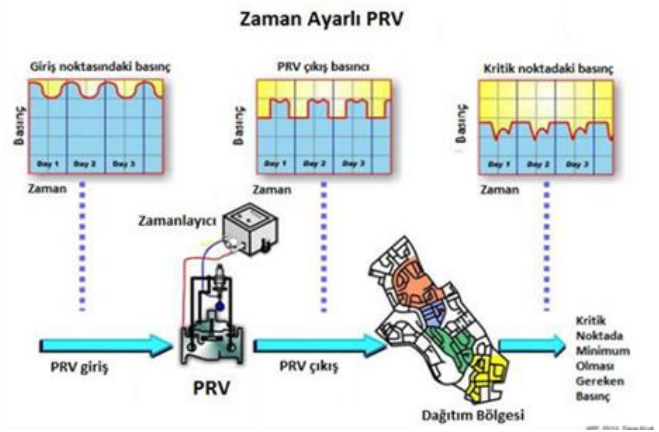
ÖAB planlanmasında sistemin işletilme kolaylığı ve yatırım maliyetleri göz önünde bulundurulmalıdır. Şebeke uzunluğu kısa planlanırsa maliyetler artarken uzun planlanırsa şebekenin işletilmesi zorlaşmaktadır. Literatürde şebeke uzunluğunun 4 km ile 30 km arasında seçilmesi gerektiği belirtilip ve ortalama 15 km olarak planlanabileceği belirtilmiştir. Servis bağlantı sayısının dikkate alınması gereken durumlar için de için de 500 ile 3000 bağlantı arasında olması gerektiği ifade edilmiştir [4].

Dağıtım sisteminde borular basınca duyarlı olup şebekede sızıntıyı azaltmak için farklı basınç kontrol yaklaşımları önerilmiş ve yapılan çalışmalar sonucu basınç düzenlemesinin dağıtım şebekelerinde kayıpların azaltılması için önemli olduğu kanıtlanmıştır [12]. Basınç kontrolünü sağlamak için çeşitli yöntemler uygulandığı görülmektedir.

- **Sabit Çıkışlı Basınç Kontrolü:** Sistem çıkış basıncı bölgedeki tüm noktaların su gereksinimini karşılayacak tek bir değere ayarlanır. Basınç düzenleyici vana (PRV) dışında cihaz kurulumu gerektirmediğinden uygun maliyetlidir ancak gündüz ve gece su kullanımlarında ciddi farklar olmasına karşın tek çıkış basınç değerine ayarlı olmasından su basıncı ayarlama konusunda esnek değildir. Bu nedenle basınç dalgalanmasının fazla olduğu durumlarda tercih sebebi değildir [13].
- **Zaman Ayarlı Basınç Kontrolü:** Su tüketimlerinin az veya fazla olduğu zaman dilimlerine göre sistem çıkış basıncı ayarlanır. Su talebinin yoğun olmadığı dönemlerde daha fazla basınç düşüşü sağlamak için ağa ek bir cihaz eklenir, bu cihaz basınç ayarlama esnekliği sunar. Sabit çıkışlı basınç kontrolüne göre kıyaslandığında daha fazla su tasarrufu sağlar ve maliyet açısından daha maliyetlidir [13].

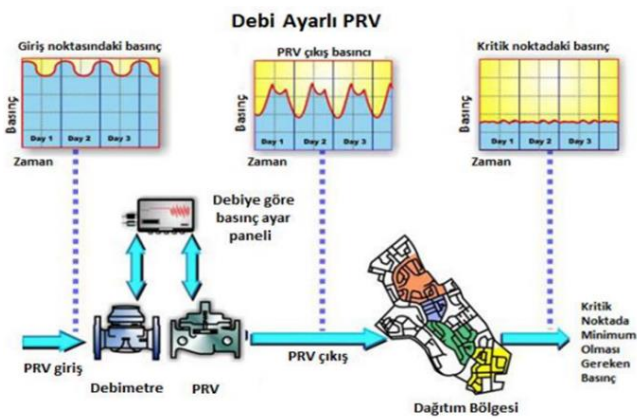


Şekil 3: Sabit Çıkışlı Basınç Kontrolü [13]

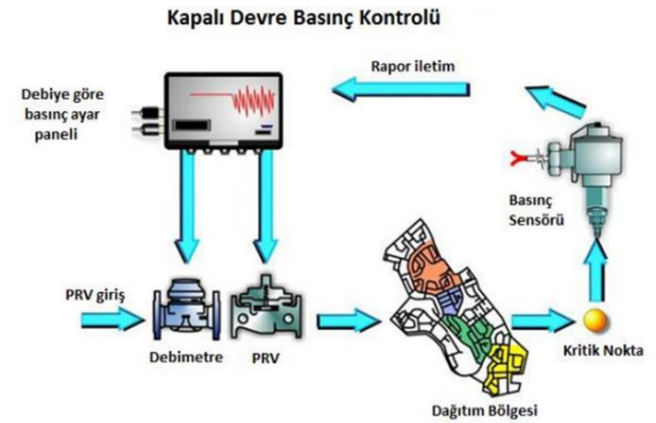


Şekil 4: Zaman Ayarlı Basınç Kontrolü [13]

- **Debi Ayarlı Basınç Kontrolü:** Su dağıtım şebekesindeki anlık su talep gereksinimlerine göre basınç ayarlanır. Basınç düzenleyici vana (PRV) dışında debimetre ve sistemin izlenmesi için ilave cihazlar gerekir. Diğer yöntemlere göre maliyeti fazladır ancak su talep gereksinimine göre çıkış basıncını düzenlemesiyle su kayıplarına karşı en etkili yöntemdir [13].
- **Kapalı Devre Basınç Kontrolü:** Su dağıtım şebekesinde kritik noktadaki basınç sürekli olarak sensörle ölçülür. Kritik noktada ölçülen basınç değeri basınç düzenleyici vanaya elektronik iletişimle bildirilir. Anlık veri almak için kullanılan basınç sensörü maliyeti artırsa da üst düzeyde kontrol sağlar [13].



Şekil 5: Debi Ayarlı Basınç Kontrolü [13]



Şekil 6: Kapalı Devre Basınç Kontrolü [13]

Thornton vd. [2] su kaybına neden olan unsurları açıklayarak yapılması gereken çalışmalardan bahsetmiştir. Su kaybindan dolayı ülkelerin finansal açıdan olumsuz etkilendiği, yapılacak çalışmaların su kaybının azaltılmasının yanı sıra ülke ekonomisini de olumlu yönde etkileyeceğini belirtmiştir. Farley vd. [4] yüksek orandaki gelir getirmeyen suyun kötü su yönetimini işaret ettiğini ve bunun sonucu olarak ülkelerin su temini için fazla harcama yapacağını belirtmiştir. Samir vd. [8] içme suyu dağıtım sistemlerinde düşük basıncın kullanıcıların talebini karşılamadığını ve basınç düzenleyici vana, türbin pompa, özel cihazlar kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Lambert vd. [20] basınç düzenlemenin su dağıtım sistemindeki arızaya etkisini inceleyerek sistem çalışma basıncının düşürülmesinin arıza oranını da düşüreceğini belirtmiştir.

Literatürdeki çalışmalar basınç yönetimi stratejisinin fiziksel su kayıplarını doğrudan azaltacağını, su üretim maliyetini ve su iletim maliyetini düşüreceğini, birim zamanda tüketilen su hacmini azaltacağını, boru ekonomik ömrünü uzatacağını ve şebekede oluşacak arıza sayılarını azaltacağını göstermektedir [14].

Basınç yönetiminin sahada uygulanmasında faydalarının yanı sıra debimetre odası kurulması, saha testleri yapılması, ölçülebilir alt bölgelerin (ÖAB) oluşturulması, otomasyon sistemlerinin temin edilmesi gibi maliyetleri de vardır [15]. Bu sebeple fayda ve maliyetler finansal açıdan kıyaslanarak fayda maliyet analizi yapılmalıdır. Faydalar finansal olarak maliyetlerden daha fazla çıkıyorsa basınç yönetimi uygulanmalıdır [16].

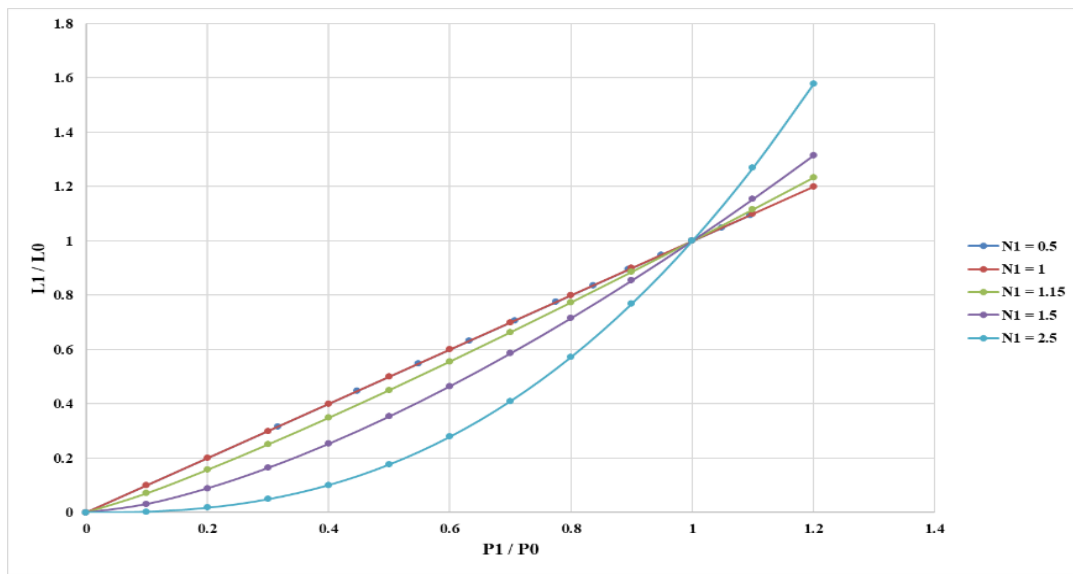
Bu yöntemler önemli maliyetler oluşturmaktadır ve sahada uygulanabilmesi için teknik, teknolojik ve personel alt yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Her bir basınç düzenleme yöntemi fayda ve maliyetler

bakımından farklılık gösterdiğinden bölgenin su tüketim karakteristiğine göre belirlenip uygulanabilir ve en doğru yöntem seçilmelidir [17]. Su dağıtım şebekesinde ekonomik açıdan en çok sızıntıyı önleyecek şekilde basınç düzenleme yönteminin seçilmesi gerektiğine dikkat çekilmiştir [17], [18].

3. Şebekedeki Sızıntıların Hesaplanması

İçme suyu dağıtım şebekelerinde sistem basıncından dolayı meydana gelen sızıntı ve arızalar kaçınılmazdır [1]. May [19], orifis denkleminde bağı olarak geliştirdiği Fixed and Varied Area Discharge (FAVAD) denklemiyle (Denklem 3.1) uygulama sahasındaki ölçümlere dayanarak basınç ve sızıntı arasında bir ilişki önermiştir. FAVAD denklemi basınç değişimleri, debi değişimleri ve boru malzemesi katsayısına bağı olarak geliştirilmiştir. Denklemde; L1 basınç düzenlemesi sonrasındaki sızıntı debisini, L0 basınç düzenlemesi yapılmadan önceki sızıntı debisini, P1 düzenlenmiş ortalama basınç değerini, P0 düzenlenmemiş basınç değerini, N1 boru malzemesi katsayısını ifade etmektedir.

$$L1/L0=(P1/P0)^{N1} \quad (3.1)$$

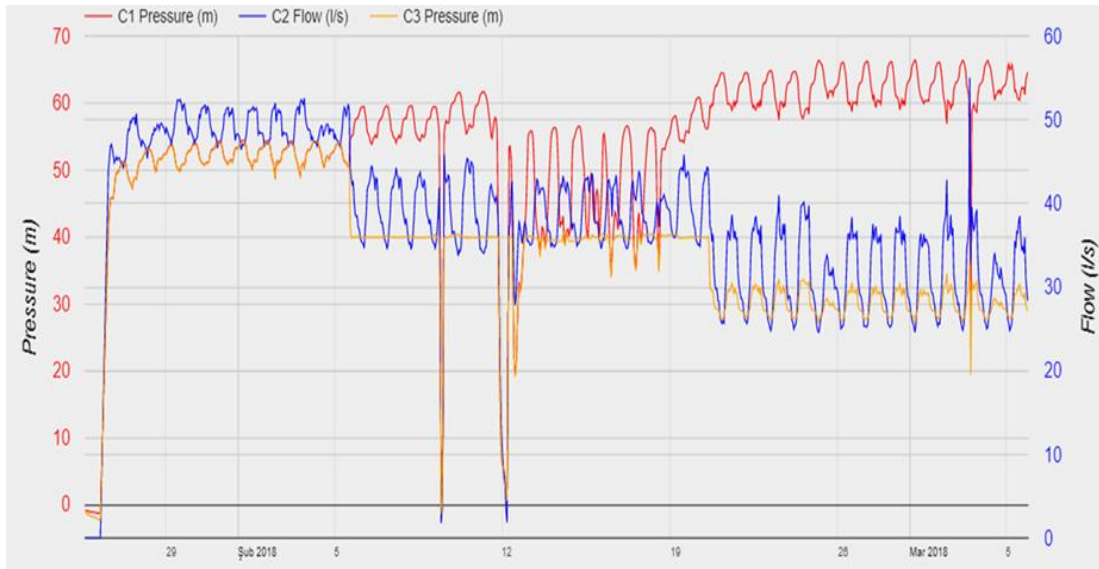


Şekil 7: N1 Boru Malzemesi Katsayısının Sızıntıya Etkisi

Yapılan çalışmalar N1 boru malzemesi katsayısının 0.5 ile 1.5 arasında değiştiğini göstermektedir [20]. Yılmaz vd. [21] dağıtım sisteminde farklı boru malzemelerinin (asbest, düktil, pvc vb.) seçilmesinin sızıntılar üzerinde etkisinin farklı olacağını belirtmiştir.

FAVAD denklemi içme suyu dağıtım sisteminde basınç düzenlenmesi yapılmasıyla su akış debisindeki ve arıza oluşumundaki değişimleri teorik olarak hesaplamaya yardımcı olmaktadır [22]. Denklemden teorik olarak hesaplanan sonuç ve saha uygulamasındaki sonuç kıyaslandığında dağıtım şebekelerinde basınç kontrolünü sağlamak için kullanılan sabit çıkışlı basınç kontrolünde yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak FAVAD denklemi zaman ayarlı ve debi ayarlı basınç kontrolü için teorik anlamda sahaya yakın sonuç vermemektedir.

Sızıntıların doğru bir şekilde tahmin edilmesine yönelik olarak yapılan bu çalışmada Malatya MASKİ’de aktif olarak çalışan Sanayi ölçülebilir alt bölgesine ait saha uygulamasına ait basınç-debi grafiği alınmıştır.



Şekil 8: Basınç-Akış Grafiği

Ölçülebilir alt bölgede basınç yönetimi uygulanmadan önce ortalama basıncın (P0) 51 m, ortalama giriş debisinin (L0) 50 L/s dolaylarında ölçüldüğü görülmektedir. İlk olarak sabit çıkışlı basınç kontrolü uygulanmış ve basınç yönetimi sonrası ortalama basınç değeri (P1) 40 m'ye, ortalama giriş debisi (L1) ise 40 L/s seviyelerine düşmüştür. Yaklaşık olarak ortalama basınçta 11 m'lik bir azalmayla 10 l/s'lik su kaybı azaltılmıştır. Bu da debide %20'lik bir azalma meydana getirmiştir. Şebekede PVC boru malzemesi seçildiği bilinmektedir.

Tablo 2: Teorik Olarak Sızıntıların Hesaplanması

BASINÇ-DEBİ İLİŞKİSİ		
Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
BY Öncesi Ölçülen Debi (L0)	50	L/s
Sistem İlk Basıncı (P0)	51	m
Sistem Son Basıncı (P1)	40	m
Şebeke Ağırlıklı Boru Cinsi	PVC	-
Boru Malzemesi Katsayısı (N1)	1.5	-
BY Sonrası Ölçülen Debi (L1)	34.73	L/s
Net Fayda	15.27	L/s
Net Fayda	30.54	%

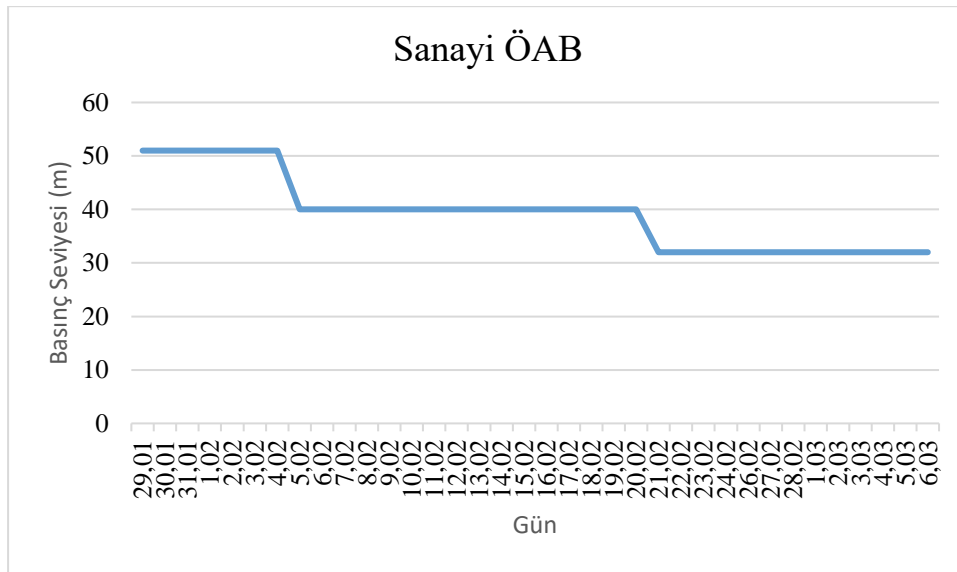
Debi ve basınç değişimlerini öngören FAVAD denklemi yaklaşımıyla teorik olarak hesaplama yapılmıştır [19]. Teorik olarak debide 15.27 L/s azalma hesaplanırken saha uygulamasında ortalama 10 L/s'lik bir azalma meydana gelmiştir. Bu da %34.51'lik bir sapmaya denk gelmektedir (Tablo 3). Bu farkın sebebi şebekenin dinamik yaşayan bir sistem olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuçlar basınç yönetimi uygulamasının sızıntı azaltmada önemli bir araç olduğunu da göstermektedir [14], [23].

Tablo 3: Net Faydaların Karşılaştırılması

Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
Teorik Hesaplanan Net Fayda	15.27	L/s
Saha Uygulamasındaki Net Fayda	10.00	L/s
Net Fayda Farkı	5.27	L/s
Net Fayda Farkı	34.51	%

Grafikten görüldüğü üzere (Şekil 8) dağıtım sistemi 2 hafta sabit çıkışlı basınç kontrolünde çalıştıktan sonra basınç düzenleme yöntemi değiştirilip debi ayarlı basınç kontrolünde işletilmeye başlanmıştır.

Ölçülebilir alt bölgede basınç yönetimi uygulanmadan önce ortalama basıncın (P0) 51 m, ortalama giriş debisinin (L0) 50 l/s dolaylarında ölçüldüğü görülmektedir.



Şekil 9: Ortalama Basınç Değişimleri

Sabit çıkışlı basınç kontrolünü dikkate almadan basınç yönetimi öncesi verilerle kıyaslandığında ortalama basınç değeri (P1) 32 m'ye, ortalama giriş debisi 35 L/s seviyelerine düşmüştür. Ortalama basınçta 19 m'lik bir azalmayla 15 L/s'lik su kaybı azaltılmıştır. Bu da debide %35.19'lük azalmaya tekabül etmektedir.

Tablo 4: Teorik Olarak Sızıntıların Hesaplanması

BASINÇ-DEBİ İLİŞKİSİ		
Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
BY Öncesi Ölçülen Debi (L0)	50	L/s
Sistem İlk Basıncı (P0)	51	m
Sistem Son Basıncı (P1)	32	m
Şebeke Ağırlıklı Boru Cinsi	PVC	-
Boru Malzemesi Katsayısı (N1)	1.5	-
BY Sonrası Ölçülen Debi (L1)	24.85	L/s
Net Fayda	25.15	L/s
Net Fayda	50.30	%

Debi ve basınç değişimlerini öngören FAVAD denklemi yaklaşımıyla teorik olarak hesaplama yapılmıştır [19]. Teorik olarak debide 25.15 L/s azalma hesaplanırken saha uygulamasında ortalama 15 L/s'lik bir azalma meydana gelmiştir. Bu da %40.36'lık bir sapmaya denk gelmektedir (Tablo 5).

Tablo 5: Net Faydaların Karşılaştırılması

Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
Teorik Hesaplanan Net Fayda	25.15	L/s
Saha Uygulamasındaki Net Fayda	15.00	L/s
Net Fayda Farkı	10.15	L/s
Net Fayda Farkı	40.36	%

Sabit çıkışlı basınç kontrolünü dikkate alarak basınç yönetimi uygulandıktan sonra elde edilen verilerle kıyaslandığında ortalama 40 m'de çalışan sistem çıkış basınç değeri (P1) ortalama 32 m'ye, ortalama giriş debisi (L1) 40 L/s'den 35 L/s seviyelerine düşmüştür. Yaklaşık olarak ortalama basınçta 8 m'lik bir azalmayla 5 L/s'lik su kaybı azaltılmıştır. Bu da debide %12.5'lük bir azalma meydana getirmiştir.

Tablo 6: Teorik Olarak Sızıntıların Hesaplanması

Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
BY Öncesi Ölçülen Debi (L0)	40	L/s
Sistem İlk Basıncı (P0)	40	m
Sistem Son Basıncı (P1)	32	m
Şebeke Ağırlıklı Boru Cinsi	PVC	-
Boru Malzemesi Katsayısı (N1)	1.5	-
BY Sonrası Ölçülen Debi (L1)	28.62	L/s
Net Fayda	11.38	L/s
Net Fayda	28.45	%

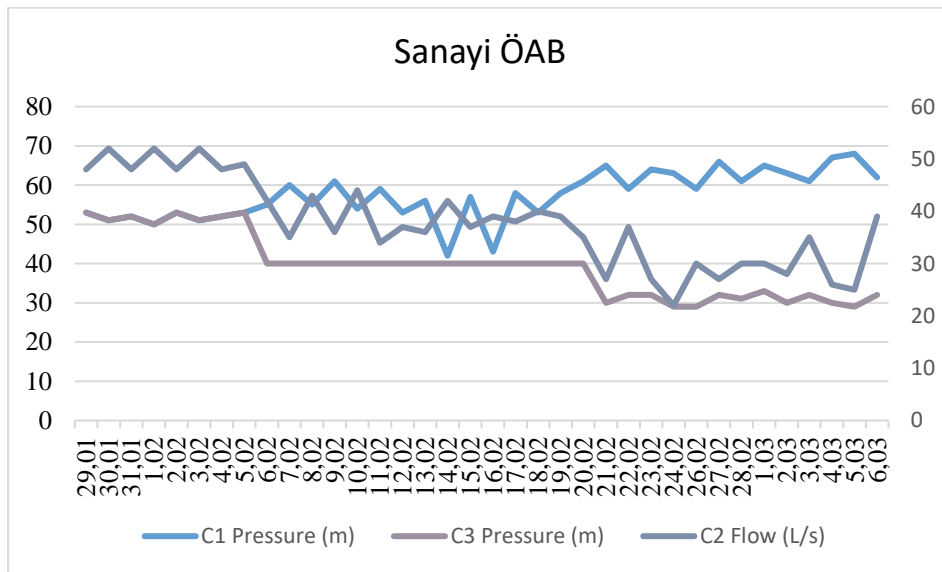
Debi ve basınç değişimlerini öngören FAVAD denklemi yaklaşımıyla teorik olarak hesaplama yapılmıştır [19]. Teorik olarak debide 11.38 L/s azalma hesaplanırken saha uygulamasında ortalama 5 L/s'lik bir azalma meydana gelmiştir. Bu da %56.06'lık bir sapmaya denk gelmektedir (Tablo 7).

Tablo 7: Net Faydaların Karşılaştırılması

Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
Teorik Hesaplanan Net Fayda	11.38	L/s
Saha Uygulamasındaki Net Fayda	5.00	L/s
Net Fayda Farkı	6.38	L/s
Net Fayda Farkı	56.06	%

Yapılan hesaplamalar sızıntı ve basınç arasında ilişki kurmaya olanak sağlayan FAVAD denklemi (Denklem 1) ile yapılan teorik hesaplamalardan elde edilen sızıntı miktarları saha uygulamasına göre karşılaştırıldığında yakın sonuçlar vermesi bakımından sabit çıkışlı basınç kontrolünün diğer basınç kontrol yöntemlerine göre daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. İlgili hesaplamalar zaman ayarlı ve debi ayarlı basınç kontrol yöntemleri için yapıldığında uygulama ve teori anlamında ciddi farklar meydana gelmektedir.

Bu sebeple Malatya MASKİ'den verisi alınan Sanayi ölçülebilir alt bölgesine ait debi ayarlı basınç kontrolüyle çalışan zaman dilimi için Şekil 8'den ilgili basınç ve akış verileri alınarak grafik oluşturulmuş (Şekil 16) ve alansal değişimler dikkate alınarak yeni bir yöntemle hesaplama yoluna gidilmiştir.

**Şekil 10:** Sanayi ÖAB Modellenmesi

Modellenen grafiğin denklemi çıkarılıp alan hesabı yöntemine gidilmiştir. Debi ayarlı basınç kontrolü ve sabit çıkışlı basınç kontrolüyle çalışan zaman dilimleri denklemde yerine koyularak ilgili basınç kontrol yöntemleri için su tüketim miktarları hesaplanmıştır (Tablo 8).

Tablo 8: Debi Değişimlerinin Hesaplanması

$y=$	-0.6937	$x+$	29970	
$F(x)=$	-0.6937	$/2x^2+$	29970	$*x+c$

Debi Ayarlı Basınç Kontrolü Debi Hesaplanması

x	$F(x)$	x	$F(x)$
20	599261.26	5	149841.32
32	958684.83	19	569304.78
Debi (L/s)	359423.6	Debi (L/s)	419463.46

Hesaplanan debi değişimleri doğrultusunda basınç yönetimi öncesi ve sonrası su tüketimleri dikkate alınarak net faydalar hesaplanmıştır (Tablo 9).

Tablo 9: Net Faydaların Hesaplanması

Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
Basınç Yönetimi Öncesi Toplam Su Tüketimi	419463.46	L/s
Basınç Yönetimi Sonrası Toplam Su Tüketimi	359423.57	L/s
Net Fayda Farkı	60039.89	L/s
Net Fayda Farkı	14.31	%

Sabit çıkışlı basınç kontrolünü dikkate alarak debi ayarlı basınç kontrolü uygulandıktan sonra ortalama basınçta yaklaşık olarak 8 m'lik bir azalmayla 5 L/s'lik su kaybı azaltılmıştır. Bu da debide %12.5'lük bir azalma meydana getirmiştir. Grafik yardımıyla yapılan net fayda hesaplamasında %14.31'lik bir değer elde edilmiştir. FAVAD denklemi ((Denklem(1)) ile yapılan hesaplama sonucu %28.45'lik bir net fayda hesaplanmış (Tablo 6) ve saha uygulamasıyla %56.06'lık bir sapma meydana getirmişti (Tablo 7).

Tablo 10: Net Faydaların Karşılaştırılması

Debi Değişiminin Hesaplanması	Değer	Birim
Teorik Hesaplanan Net Fayda	14.31	%
Saha Uygulamasındaki Net Fayda	12.50	%
Net Fayda Farkı	1.81	%

Değerlerden görüldüğü üzere FAVAD denklemi debi ayarlı basınç kontrolü için sahaya yakın sonuçlar vermezken alanları dikkate alarak yapılan hesaplamada %1.81'lik sapmayla (Tablo 10) sahaya daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, farklı basınç kontrol yöntemleri için sızıntılardan elde edilecek net faydalar FAVAD denklemi ve geliştirilen yeni hesaplama yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Sahadaki bilinen sonuçlar FAVAD denklemine göre karşılaştırıldığında en yakın sonucu sabit çıkışlı basınç kontrolü uygulamasının verdiği görülmüştür. Debi ayarlı basınç kontrolüne göre uygulama sahası ve teorik anlamda karşılaştırılmaya gidildiğinde teorik olarak hesaplanan değerler saha uygulamasından çok farklı sonuç verdiği görülmüştür. Bu durum basınç yönetimi uygulamasından önce fayda ve maliyetlerin hesaplanması açısından teorik olarak basınç ve sızıntı arasında ilişki kuran Fixed and Variable Area Discharges (FAVAD) denkleminin yalnızca sabit çıkışlı basınç kontrolü için sağlıklı bir ilişki kurabileceğini ve diğer yöntemler için yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu sebeplerle tüm basınç düzenleme yöntemleri için sızıntılardan elde edilecek faydayı hesaplayan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem alansal basınç değişimlerini dikkate alarak debi değişimlerini istenilen zaman diliminde hesaplayan bir algoritma olarak tasarlanmıştır. Yöntemle aynı izole alt bölgede sızıntılar hesaplanmıştır. Sonuçlar geliştirilen yöntemin uygulama sahasına yakın sonuç verdiğini göstermiştir. Geliştirilen bu hesaplama yönteminin basınç yönetimi uygulamasında fayda ve

maliyetlerin kıyaslanması, basınç düzenlemenin yapılıp yapılmaması konusunda önemli bir karar verici olması düşünülmektedir.

Kaynakça

- [1] K. B. Adedeji, Y. Hamam, B. T. Abe, and A. M. Abu-Mahfouz, "Towards Achieving a Reliable Leakage Detection and Localization Algorithm for Application in Water Piping Networks: An Overview," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20272–20285, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2752802.
- [2] J. Thornton, R. Sturm, and G. K. P.E., *Water Loss Control*, 2nd edition. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [3] J. Thornton and A. O. Lambert, "Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs," 2007.
- [4] M. Farley *et al.*, "The Manager's Non-Revenue Water Handbook A Guide to Understanding Water Losses," 2008.
- [5] M. Firat, S. Yilmaz, A. Ateş, and Ö. Özdemir, "Determination of Economic Leakage Level with Optimization Algorithm in Water Distribution Systems," *Water Economics and Policy*, vol. 07, no. 03, Jul. 2021, doi: 10.1142/S2382624X21500144.
- [6] F. J. Tardelli, "Controle E Redução De Perdas Nos Sistemas Públicos De Abastecimento De Água Posicionamento E Contribuições Técnicas Da Abes," 2015.
- [7] T. AL-Washali, S. Sharma, and M. Kennedy, "Methods of Assessment of Water Losses in Water Supply Systems: a Review," *Water Resources Management*, vol. 30, no. 14, pp. 4985–5001, Nov. 2016, doi: 10.1007/s11269-016-1503-7.
- [8] N. Samir, R. Kansoh, W. Elbarki, and A. Fleifle, "Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 56, no. 4, pp. 601–612, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.aej.2017.07.008.
- [9] AWWA, *Water Audits and Loss Control Programs-M36*, Fourth Edition. Denver: American Water Works Association, 2016.
- [10] A. Lambert and J. Thornton, "Pressure : Bursts Relationships : Influence of Pipe Materials, Validation of Scheme Results and Implications of Extended Asset Life," *Water Loss*, vol. 2, no. 11, 2012.
- [11] L. S. Araujo, H. Ramos, and S. T. Coelho, "Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management," *Water Resources Management*, vol. 20, no. 1, pp. 133–149, Feb. 2006, doi: 10.1007/s11269-006-4635-3.
- [12] B. Ulanicki, P. L. M. Bounds, J. P. Rance, and L. Reynolds, "Open and closed loop pressure control for leakage reduction," *Urban Water*, vol. 2, no. 2, pp. 105–114, Jun. 2000, doi: 10.1016/S1462-0758(00)00048-0.
- [13] R. S. Mckenzie and W. Wegelin, *Implementation of pressure management in municipal water supply systems*. IWA 0309, 2009.
- [14] A. O. Lambert, T. G. Brown, M. Takizawa, and D. Weimer, "A review of performance indicators for real losses from water supply systems," *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, vol. 48, no. 6, pp. 227–237, Sep. 1999, doi: 10.2166/aqua.1999.0025.
- [15] B. Charalambous, D. Foufeas, and N. Petroulias, "Leak detection and water loss management," 2014.
- [16] F. J. Salguero, R. Cobacho, and M. A. Pardo, "Unreported leaks location using pressure and flow sensitivity in water distribution networks," *Water Supply*, vol. 19, no. 1, pp. 11–18, Feb. 2019, doi: 10.2166/ws.2018.048.
- [17] V. Kanakoudis and K. Gonelas, "The Optimal Balance Point between NRW Reduction Measures, Full Water Costing and Water Pricing in Water Distribution Systems. Alternative Scenarios Forecasting the Kozani's WDS Optimal Balance Point," *Procedia Eng*, vol. 119, pp. 1278–1287, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.996.
- [18] S. Yilmaz, M. Firat, A. Ateş, and Ö. Özdemir, "Analyzing the economic water loss level with a discrete stochastic optimization algorithm by considering budget constraints," *Journal of Water Supply: Research and Technology—Aqua*, vol. 71, no. 7, pp. 835–848, Jul. 2022, doi: 10.2166/aqua.2022.060.
- [19] M. John Henry, *Pressure dependent leakage*. World Water and Environmental Engineering, 1994.

- [20] S. Ahopelto and R. Vahala, “Cost–Benefit Analysis of Leakage Reduction Methods in Water Supply Networks,” *Water (Basel)*, vol. 12, no. 1, p. 195, Jan. 2020, doi: 10.3390/w12010195.
- [21] S. Yilmaz, A. Ateş, M. Firat, Ö. Özdemir, and H. Cinal, “Determination of economic loss levels in water distribution systems with different network conditions by a district stochastic optimization algorithm,” *Water Supply*, vol. 23, no. 3, pp. 1349–1361, Mar. 2023, doi: 10.2166/ws.2023.047.
- [22] N. A. Barton, S. H. Hallett, S. R. Jude, and T. H. Tran, “An evolution of statistical pipe failure models for drinking water networks: a targeted review,” *Water Supply*, vol. 22, no. 4. IWA Publishing, pp. 3784–3813, Apr. 01, 2022. doi: 10.2166/ws.2022.019.
- [23] M. Girard and R. A. Stewart, “Implementation of Pressure and Leakage Management Strategies on the Gold Coast, Australia: Case Study,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 133, no. 3, pp. 210–217, May 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:3(210).
- [24] “Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (MASKİ),” Malatya, 2022.