

# Mikro-sulama sistemi lateral borularının hidrolik tasarımında hesap metotlarının karşılaştırmalı analizi

Gürol YILDIRIM\*, Necati AĞIRALIOĞLU

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

Mikro-sulama sisteminin temel unsuru olan lateral borular, sistemin tamamında öngörülen üniformluk seviyesi, basınç yükü değişimi ve toplam sürtünme kaybı kriterlerine bağlı olarak tasarlanabilen hidrolik yapılardır. Hidrolik bakımdan lateraldeki akım, mansap yönünde damlatıcı debisindeki azalmayla birlikte, yere bağlı değişken debi fonksiyonunun geçerli olduğu düzenli boru akımıdır. Mikro-sulama sistemi lateral borularının projelendirilmesinde genellikle takip edilen metot, öngörülen damlatıcı özelliği, lateral boru uzunluğu ve boru çapı için, damlatıcı debileri arasındaki değişimin belirli bir sınır değerini aşmamasını sağlamaktır. Bir başka anlatımla, damlatıcı debileri arasındaki değişimin kabul edilebilir bir üniformluk katsayısını sağlayacak biçimde düzenlenmesidir. Diğer taraftan, lateral boyunca menba ve mansap noktalarındaki başlangıç ve sınır şartları ile belirlenen bir projelendirme aralığı içerisinde, sistemde öngörülen toplam yük kaybı ve üniformluk seviyesi kriterlerini sağlayacak optimum giriş basınç yükü değerinin belirlenmesi lateral hidroliğinin temel problemi- midir. Zira lateral boyunca enerji çizgisinin değişimi ve çıkış akımı dağılımı, lateral girişindeki basınç yükü değerine bağlı olarak farklı profillerde oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında, üniform eğimli ve sabit çaplı bir lateral boru için lateral hidroliğinin temel prensipleri sunulmaktadır. Çalışmanın ikinci kısmında, sabit veya yere bağlı değişken debi yaklaşımlarından hareketle ortaya konan 7 adet hidrolik hesap metodunda, tasarım parametreleri için elde edilen başlıca denklemlere yer verilerek, optimum giriş basınç yükünün belirlenmesinde, sağlanması gereken hidrolik kriterler değerlendirilmektedir. Söz konusu metotların karşılaştırmalı analizi için, farklı eğim koşulları ve damlatıcı karakteristikleri için örnek bir uygulama seçilerek, her bir metottan elde edilen sonuçlar, boyutsuz eğri- ler halinde karşılaştırılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Sulama sistemleri, mikro-sulama, lateral hidroliği, pürüzsüz boru akımı, hidrolik tasarım, analiz.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Gürol YILDIRIM. yildirimg3@itu.edu.tr; Tel: (212)285 68 45.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Mikro-sulama sistemi lateral borularında hidrolik hesap metotlarının karşılaştırmalı analizi ve çok çaplı borular için lineer çözüm metodu" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 12.01.2007 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 05.04.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.02.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Comparative analysis of calculation methods in hydraulic design of micro-irrigation laterals

### Extended abstract

*An important objective of any micro-irrigation (drip, trickle) system is a uniform distribution of water delivered through the emitters along the lateral line.*

*Adequate analysis of micro-irrigation laterals is very important for the design and evaluation of micro-irrigation systems. The increasing progress in computer technology has led to the development of numerical methods of hydraulic analysis as the finite-element method, the finite difference method, successive approximations method, and others.*

*Lateral pipes are hydraulic structures whose design is limited by the desired level of uniformity, pressure head variation and total friction loss criteria. Design of this system depends upon a good understanding of lateral hydraulics and emitter characteristics.*

*Hydraulically, flow in the lateral pipe is considered to be a steady, spatially varied flow with decreasing emitter outflow in the downstream direction. With decreasing discharge along the lateral, the energy gradient line decreases. Computation of flow distribution requires knowledge of the variables such as pressure, flow rate, length or internal diameter of the lateral, orifice characteristics, and frictional losses in the system.*

*The hydraulic design of a lateral or a sub-main unit in a micro-irrigation system has been a problem tackled by many authors. In applications of previous analytical approaches for trickle lateral hydraulic computation, the primary solution is based on a discharge that is uniform, although ramifications of the manufacturer's variability have been modeled based on the derived hydraulic profile. However, significant deviations from accurate numerical solutions in hydraulic analysis could be caused by this basic assumption of constant emitter outflow.*

*Recently, some alternative hydraulic calculation methods with more accurate results were developed based on the spatially variable outflow approach. The errors caused by the basic assumption of spa-*

*tial invariance of the emitter outflow are minimized when the new alternative approaches are used.*

*Design of a lateral pipe includes the determination of the required operating inlet pressure head, the pipe length or the inside diameter and total friction head losses along the lateral, assuming that the total flow rate at the inlet, characteristic of the emitter, and the acceptable level of uniformity are known previously.*

*In the first stage of this study, basic principles of lateral hydraulics are clearly analyzed, and then basic equations of the seven hydraulic calculation methods are evaluated based on the governing equations for the steady flow in a smooth pipe.*

*In the second stage, for determining optimum value of the inlet pressure head, hydraulic criteria depend on the initial and boundary conditions along the pipe, are also evaluated.*

*In the third stage, the comparison test for the design example based on determination of inlet pressure head was applied for zero and uphill slope cases and various emitter characteristics, and showed graphically in dimensionless form. In these figures, residual flow rate ratios, variation of total friction head losses and uniformity coefficients depend on the operating inlet pressure head range are also evaluated.*

*Comparison test shows that the Forward-Step-Method (FSM) that takes into account the velocity head change and variation of the Reynolds number, which affects the selection of the proper friction coefficient formula to be applied along the different reaches of the lateral pipes, has the highest accuracy because only the basic equations of the hydraulics of steady pipe flow were used. To apply the method, a computer program in Visual Basic 6.0 language named LATCAD was developed for analyzing and designing of micro-irrigation laterals.*

*A comprehensive comparison test clearly shows that the FSM method using LATCAD yields highly accurate results in comparison with the other analytical and numerical procedures examined here.*

**Keywords:** *Irrigation systems, micro-irrigation, lateral hydraulics, smooth pipe flow, hydraulic design, analysis.*

## **Giriş**

Mikro-sulama sisteminin başarısı, sistemin önemli bir parçası olan lateral boruların hidrolik prensiplere uygun biçimde tasarlanmasına ve lateral boru üzerindeki damlatıcı özelliklerinin iyi bilinmesine bağlıdır (Ağırlioğlu vd., 2000; Ağırlioğlu ve Yıldırım, 2002). Mikro-sulama sisteminin temel unsuru olan lateral borular, sistemin tamamında öngörülen üniformalık seviyesi, basınç yükü değişimi ve toplam sürtünme kaybı kriterlerine bağlı olarak tasarlanabilen hidrolik yapılardır. Hidrolik bakımdan lateraldeki akım, mansap yönünde damlatıcı debisindeki azalmayla birlikte, yere bağlı değişken debi fonksiyonunun geçerli olduğu düzenli boru akımıdır (Yıldırım, 2001; Yıldırım ve Ağırlioğlu, 2001).

Lateral borunun hidrolik tasarımı için araştırmacılar iki temel kabulden yola çıkarak analitik ve nümerik çözüm yöntemleri geliştirmişlerdir.

Bu kabullerden birincisi, lateral boyunca üniform bir ortalama birim boy debisinin geçerli olduğu kabulüdür. Ancak, bu basitleştirmeden yola çıkılarak elde edilen analitik metotların çözümlerinden elde edilen sonuçların doğru nümerik metotların çözümlerinden elde edilen sonuçlardan önemli mertebede sapma gösterdiği ortaya konmuştur.

Araştırmacıların lateral boyunca enerji çizgisinin (basınç profilinin) doğru biçimde belirlenebilmesi için esas aldıkları ikinci temel kabul, lateral boyunca boru girişinden itibaren mansap yönünde damlatıcı çıkış akımındaki azalma ile birlikte, yere göre değişen bir debi fonksiyonunun geçerli olduğu kabulüdür.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, lateraldeki değişken debi profilinin belirlenebilmesi için farklı yaklaşımlardan ve kabullerden yola çıkılarak analitik ve nümerik çözüm metotları ortaya konmuştur. Lateral boruların hidrolik hesaplamalarına ilişkin literatürdeki mevcut çalışmalar şu ana başlıklar altında gruplandırılabilir:

**1.** Lateral borulardaki sürtünme kayıplarının belirlenmesi (Anwar, 1999a,b, 2000; Scaloppi

ve Allen, 1993; Vallesquino ve Luque-Escamilla, 2002; Yitayew, 1989; von Bernuth, 1990; von Bernuth ve Wilson, 1989; Watters ve Keller, 1978).

**2.** Damlatıcı bağlantılarından kaynaklanan yerel kayıpların belirlenmesi (Howell ve Barinas, 1980; Al-Amoud, 1995; Bagarello vd., 1995, 1997; Juana vd., 2002a,b; Sinobas vd., 1999; Provenzano ve Pumo, 2004; Provenzano vd., 2005; Yıldırım ve Ağırlioğlu, 2006; Yıldırım ve Ağırlioğlu, 2004c,e; Yıldırım, 2006).

**3.** Lateral boyunca debi ve basınç profillerinin belirlenmesi (Anyoji ve Wu, 1987; Wu ve Gitlin, 1973, 1974, 1975; Wu, 1992, 1997; Wu ve Yue, 1993; Keller ve Bliesner, 1990; Warrick ve Yitayew, 1987, 1988; Yitayew ve Warrick, 1987, 1988; Vallesquino ve Luque-Escamilla, 2001; Yıldırım ve Ağırlioğlu, 2002a; 2003a,b; 2004d; 2005a,b).

**4.** Lateral boruların hidrolik tasarımı (Howell ve Hiler, 1974; Bralts vd. 1993; Kang ve Nishiyama, 1996a,b; Hathoot vd., 1993, 2000; Jain vd., 2002; Saad ve Marino, 2002; Valiantzas, 1998, 2002; Yıldırım ve Ağırlioğlu, 2002b; 2004a,b,f; 2005c).

Ancak, üzerinde çok detaylı çalışmalar yapıldığı ve halen yapılmakta olan mikro-sulama sistemi lateral borularının tasarımında, literatürde ortaya konan belli başlı hidrolik hesap metotlarında ortaya konan yaklaşımların detaylı bir analizine ve çözümlerinden elde edilen sonuçların kapsamlı biçimde karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma bulunmamaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında, üniform eğimli ve sabit çaplı bir lateral boru için lateral hidroliğinin temel prensipleri detaylı olarak sunulmaktadır. Çalışmanın ikinci kısmında, sabit ve yere bağlı değişken debi yaklaşımlarından hareketle ortaya konan analitik ve nümerik hidrolik hesap metotlarında kullanılan denklemler, ilk kısımda verilen yönetici denklemlerle ilişkilendirilerek sunulacaktır.

Söz konusu metotların uygulamaları için farklı tipte lateral tasarım problemleri seçilerek; farklı eğim koşulları ve damlatıcı karakteristikleri için



damlatıcı tipine bağlı akış üssüdür. Lateral boyunca çok sayıda damlatıcı bulunduğu ve çıkış akımının yere göre sürekli olarak değiştiği göz önüne alınarak, birim boru uzunluğundaki çıkış akımı  $q$ , aşağıdaki bağıntı ile belirlenebilir (Warrick ve Yitayew, 1988):

$$q = \left( \frac{c}{s} \right) H_n^y \quad (2)$$

Lateral boyunca kütle korunumu denklemi şu genel formda yazılabilir:

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{dA}{dt} = -q \quad (3)$$

Denklemden;  $A$ : Lateral borunun kesit alanı;  $x$  ve  $t$ , yer ve zaman koordinatlarıdır.

Mikro-sulama lateralleri için düzenli boru akımı şartı ( $dA/dt = 0$ ) düşünülerek (3) denklemi aşağıda formda yazılabilir:

$$A \frac{dv}{dx} = -q \quad (4)$$

Denklemden;  $v$ , lateral borudaki ortalama akım hızıdır.

Şekil 2.a'da gösterildiği gibi,  $(n)$  ve  $(n+1)$  inci damlatıcılar arasındaki lateral debisi,  $Q_{n+1}$ , (4) denklemi ile verilen süreklilik prensibinden hareketle elde edilebilir:

$$Q_{n+1} = Q_n - q_n \quad (5)$$

Mansap yönünde lateral debisindeki azalmanın sonucu olarak momentumdaki değişim, momentumun korunumu denkleminin aşağıdaki formu ile belirlenebilir (Streeter ve Wylie, 1983):

$$\Delta F = \rho(Q_{n+1}V_{n+1} - Q_nV_n) \quad (6)$$

Denklemden;  $\Delta F$ , basınç kuvvetindeki değişim;  $\rho$ , sulama suyunun yoğunluğu;  $V_n$ ,  $V_{n+1}$ ,  $(n-1) \sim (n)$  ve  $(n) \sim (n+1)$  damlatıcıları arasında kalan boru dilimindeki ortalama akım hızlarıdır.

Ardışık  $(n)$  ve  $(n+1)$  damlatıcıları arasındaki boru diliminde momentum değişiminden dolayı meydana gelen basınç yükü değişimi,  $\Delta H_{n+1}$ , (6) denklemi yardımıyla aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\Delta H_{n+1} = \frac{\Delta p}{\gamma} = \frac{\Delta F}{A\gamma} = \frac{\rho(Q_{n+1}V_{n+1} - Q_nV_n)}{A\gamma} \quad (7a)$$

$$V_{n+1} = \frac{Q_{n+1}}{A} \quad V_n = \frac{Q_n}{A} \quad \gamma = \rho g \quad (7b)$$

eşitlikleri (7a) denklemine yerlerine yazılıp düzenlenerek,

$$\Delta H_{n+1} = \frac{(Q_{n+1}^2 - Q_n^2)}{gA^2} \quad (7c)$$

elde edilir (Streeter ve Wylie, 1983; Featherstone ve Nalluri, 1982). Denklemden;  $g$ , yerçekimi ivmesidir.

Darcy-Weisbach formülü, ardışık  $(n)$  ve  $(n+1)$ 'inci damlatıcılar arasındaki boru kısmı için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$H_{f_{n+1}} = f_{n+1} \frac{s}{D} \frac{Q_{n+1}^2}{2gA^2} \quad (8)$$

Formülde;  $f_{n+1}$ , ardışık  $(n)$  ve  $(n+1)$ 'inci damlatıcılar arasındaki boru kısmı için Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı ve  $D$ , lateral borunun iç çapıdır.

Bagarello ve diğerleri (1997); Juana ve diğerleri (2002a), damlatıcının menbasında büzülme ve mansabında genişleme (Chadwick ve Morfett, 1993) nedeniyle ortaya çıkacak yerel kayıpların Belanger veya Borda-Carnot denklemleri ile hesaplanabileceğini belirterek, toplam yerel yük kaybı için her iki durumun birlikte göz önüne alınması gerektiğine işaret etmişlerdir. Buna göre toplam yerel yük kaybı, aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir:

$$h_k' = h_c + h_e = \frac{(V_c - V_r)^2}{2g} + \frac{(V_r - V_{n+1})^2}{2g} = \left( \frac{1}{C_c r} - 1 \right)^2 \frac{V_{n+1}^2}{2g}$$

$$h_k' = K \frac{V_{n+1}^2}{2g} \quad (9)$$

Denklemden;  $K$ , yersel yük kaybı katsayısıdır.

Enerji denklemi,  $(n)$  ve  $(n+1)$ 'inci damlatıcılar arasında (7), (8) ve (9) denklemleri ile birlikte hız yükü de dikkate alınarak, aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\begin{aligned} H_n + \frac{V_n^2}{2g} + z_n + h_{kn}' \\ = H_{n+1} + \frac{V_{n+1}^2}{2g} + z_{n+1} + H_{fn+1} + \Delta H_{n+1} + h_{kn+1}' \end{aligned} \quad (10)$$

Denklemden;  $V_n^2/2g$ ,  $V_{n+1}^2/2g$ ,  $(n)$  ve  $(n+1)$ 'inci boru bölümlerindeki hız yükleri;  $z_n$  ve  $z_{n+1}$ : ardışık  $(n)$  ve  $(n+1)$ 'inci damlatıcıların kıyas düzlemine göre geometrik kotlarıdır.

Yukarıdaki açıklamalardan görüleceği üzere, lateral hidrolik problemleri 4 temel denklemle çözülebilir: **1.** Damlatıcının debi-basınç yükü ilişkisi, **2.** Süreklilik denklemi, **3.** Darcy-Weisbach sürtünme kaybı formülü ve yerel yük kayıpları için Borda-Carnot veya Belanger formülleri, **4.** Momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemleri.

Neticede, yukarıdaki temel denklemlere dayanılarak, lateralın herhangi bir  $(n+1)$ 'inci bölümüne ait 4 adet bilinmeyen hidrolik değişkene ( $Q_{n+1}$ ,  $q_{n+1}$ ,  $H_n$ ,  $H_{fn+1}$ ), bir önceki  $(n)$ 'inci bölüme ait bilinen değişkenlerine ( $Q_n$ ,  $q_n$  ve  $H_n$ ) ve diğer tasarım parametrelerine ( $z_n$ ,  $z_{n+1}$ ,  $f_{n+1}$ ,  $D$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $y$ ,  $N$ ) bağlı olarak, herhangi bir metot yardımıyla hesaplanabilir.

### Hidrolik hesap metotları

Aşağıdaki bölümde, çalışmada göz önüne alınan hidrolik hesap metotlarından kısaca bahsedilecektir. Söz konusu metotların algoritmaları hakkında detaylı bir çalışma literatürde mevcuttur (Yıldırım ve Ağırlioğlu, 2004b).

### İleri adım metodu

Hathoot vd. (1993), lateral boyunca hidrolik parametrelerin değişken lateral debisine bağlı olarak menbada mansaba doğru adım adım belirlendiği nümerik bir hesap metodu geliştirmişlerdir (Forward-Step Method, FSM).

Bilgisayar destekli bu metoda göre lateral girişindeki basınç yükü ( $H_{in}$ ), ortalama basınç yüküne ( $H_{av}$ ) makul bir yük artışı ( $\Delta_0$ ) eklenmek suretiyle hesaplanır (Başlangıç şartı).

$$H_{in} = H_{max} = H_1 = H_{av} + \Delta_0 \quad (11)$$

(5) ile verilen süreklilik denklemi ve (9) ile verilen enerji denkleminde hareketle, basınç yükü için aşağıdaki genel form denklemi elde edilir.

$$H_{n+1} = H_n + B \left[ Q_n^2 - (Q_n - q_n)^2 \right] - E f_{n+1} (Q_n - q_n)^2 \pm s s_0 \quad (12)$$

Denklemden;  $s_0$ , üniform lateral eğimi olup aşağı eğim halinde pozitif yukarı eğim halinde ise negatif alınır. Denklemden  $B$  ve  $E$  sabitleri ilgili eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

Araştırmacılar, lateral üzerindeki tüm damlatıcı debilerinin ortalama damlatıcı debisinden sapmalarının değerlendirildiği  $U_C$  üniformluk katsayısının aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabileceğini göstermişlerdir.

$$U_C = 1 - \left[ \frac{1}{N q_{av}} \right] \sum_{n=1}^{n=N} |q_n - q_{av}| \quad (13)$$

Diğer taraftan lateralın son çeyreğindeki ortalama debinin, lateralın tamamındaki ortalama debiye oranı olarak tanımlanan  $DU_{LQ}$  üniformluk katsayısı şu eşitlikle verilmektedir.

$$DU_{LQ} = \frac{4 \left[ \sum_{n=3N/4}^{n=N} q_n \right]}{N q_{av}} \quad (14)$$

### Diferansiyel metot

Warrick ve Yitayew (1988) lateral boyunca sürekli ve üniform olmayan debi yaklaşımından

hareketle, lateral boruda cereyan eden akımın ikinci mertebeden lineer olmayan basit diferansiyel denklem formunda incelendiği analitik bir çözüm metodu geliştirmişlerdir (Differential Method, *DM*).

(2), (4) ve (8) bağıntıları (10) ile verilen enerji denkleminde yazılıp, boyutsuz hız ( $V = v/v_0$ ) ve boyutsuz mesafe ( $X = x/x_0$ ) için düzenlenerek,

$$\frac{d}{dx} \left( -\frac{dV}{dX} \right)^{1/y} x_0 + aV \left( \frac{dV}{dX} \right) + V^m + S_0 = 0 \quad (15)$$

diferansiyel denklemi elde edilir.

Denklemden;  $m$ , akım rejimine bağlı debi üssüdür. Karakteristik uzunluk ( $x_0$ ) ile kinetik enerji sabiti ( $a$ ) ve türetilmiş eğim sabiti ( $S_0$ ), ilgili formüller yardımıyla hesaplanır.

(15) diferansiyel denklemi için şu sınır şartları geçerlidir. Lateralin menba uç noktasında  $X = x/x_0 = 0$  ( $x = 0$ );  $V = v/v_0 = 1$  ( $v = v_0$ ); ve mansap uç noktasında  $X = L/x_0 = X_0$  ( $x = L$ );  $V = v/v_0 = 0$  ( $v = 0$ ).

Boyutsuz hız ( $V$ ) ve mesafe ( $X$ ) için verilen bağıntılar (2) denkleminde yazılarak ve  $a = 0$  için yeniden düzenlenerek, lateral boyunca rölatif debi dağılımı için aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{q}{q_{av}} = -\frac{X_0}{F(V)} \quad (16)$$

$$F(V) = \left[ (y+1) \left( \frac{V^{m+1}}{m+1} + S_0 V \right) + C \right]^{-y/(y+1)} \quad (17)$$

Denklemden;  $F(V)$ , boyutsuz hız fonksiyonu ve  $C$ , sınır şartlarına bağlı olarak belirlenen integrasyon sabitidir (Yıldırım ve Ağırlioğlu, 2004b).

$U_C$  ve  $DU_{LQ}$  üniformluk katsayıları aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$U_C = 1 - \left( \frac{2}{X_0} \right) [X_0(1 - V_{div}) - X_{div}] \quad (18)$$

Burada;  $X_{div}$ ,  $V_{div}$ ,  $q/q_{av} = 1.0$  noktasına ait boyutsuz koordinat ve hız değerleridir.

$$DU_{LQ} = 4V_{LQ} \quad (19)$$

Burada;  $V_{LQ}$ , lateralın son çeyreğinde,  $X = 0.75X_0 = 0.75(L/x_0)$  noktasındaki boyutsuz koordinata tekabül eden boyutsuz hız değeridir.

### Runge-Kutta nümerik metodu

Yitayew ve Warrick (1988), analitik çözüm metodundan elde edilen sonuçların doğruluğunu kontrol etmek üzere, Runge-Kutta nümerik çözüm metodunu (Runge-Kutta Numerical Method, *RKM*) kullanmışlardır. Runge-Kutta nümerik çözüm metodunda, (18) ve (19) denklemleri ile verilen  $U_C$  ve  $DU_{LQ}$  üniformluk katsayıları  $q/q_{av} = 1.0$ ;  $X = 0.75X_0$ ;  $V_{LQ} = v/v_0$  boyutsuz parametrelerine ait değerlerin, söz konusu  $X$ ,  $V$  ve  $q/q_{av}$  parametrelerinin tablolaştırılmış değerleri arasında uygun enterpolasyonlar yapılmak suretiyle belirlenmektedir.

### Basitleştirilmiş analitik yaklaşım

Yitayew (1989), bir önceki çalışmada (Warrick and Yitayew, 1988) geliştirilen analitik çözüm metoduna dayanarak, eğimsiz mikro-sulama lateral boruları veya yan ana borularda sürtünmeden doğan toplam enerji kayıplarının belirlenmesi için basitleştirilmiş bir analitik yaklaşım (Simplified Analytical Approach, *SAA*) sunmuştur.

Yatay lateral borudaki toplam enerji kaybı  $\Delta H$ , menba ve mansap uç noktadaki toplam enerjilerin farkı alınarak elde edilir.

$$\Delta H = H'(0) - H'(1) \\ \Delta H = \frac{v_0^2}{2g} \left[ \frac{\beta}{L} \left[ \left( \frac{q(0)}{q_{avg}} \right)^2 - \left( \frac{q(1)}{q_{avg}} \right)^2 \right] + 1 \right] \quad (20)$$

Eşitlikte görülen menba ve mansap uç noktalarındaki rölatif debiler  $q(0)/q_{avg}$ ,  $q(1)/q_{avg}$ ; (16) denklemi yardımıyla hesaplanır.

### Sabit debi metodu

Valiantzas (1998), enerji çizgisi eğimi metoduna (Wu ve Gitlin, 1974), dayanarak, boru boyunca sürekli ve sabit çıkış akımı dağılımı kabulünden hareketle analitik bir yaklaşım geliştirmiştir (Constant Discharge Method, CDM).

Sabit debi metodunda, lateralin mansap uç noktasından itibaren herhangi bir  $x$  mesafedeki bölümden geçen toplam debi,  $Q(x)$ , lateral girişindeki toplam debiye ( $Q_{in}$ ) bağlı olarak rölatif mesafenin lineer azalan bir fonksiyonudur.

$$Q(x) = Q_{in} (x/L) \quad (21)$$

Enerjinin korunumu prensibinden hareketle, lateral mansap uç noktasından itibaren herhangi bir  $x$  mesafesindeki basınç yükü,  $H(x)$  için aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$H(x) = H_{av} + \frac{H_{f0}}{(m+1)} \left[ \left( \frac{x}{L} \right)^{m+1} - \frac{1}{(m+2)} \right] + s_0 \left( \frac{L}{2} - x \right) \quad (22)$$

Denklemden;  $H_{av}$ , ortalama basınç yükü;  $H_{f0}$ , aynı çap ve uzunluk değerlerine sahip damlatıcısız düz bir borudaki toplam sürtünme kaybıdır.

$U_C$  üniformalık katsayısı için aşağıdaki denklem verilmektedir.

$$U_C = 1 - 0.798 \frac{y}{H_{av}} \left[ \frac{H_{f0}^2}{(2m+3)(m+2)^2} - \frac{H_{f0}s_0L}{(m+2)(m+3)} + \frac{(s_0L)^2}{12} \right]^{1/2} \quad (23)$$

### Değişken debi metodu

Valiantzas (1998) çalışmasının ikinci safhasında, lateral boyunca yere bağlı değişken debi temel yaklaşımından hareketle, sabit debi yaklaşımından hareketle elde edilen analitik denklemlerin geliştirildiği alternatif analitik bir metot ortaya koymuştur (Variable Discharge Method, VDM).

Değişken debi metoduna göre, lateral debisinin rölatif mesafe ile değişimi aşağıdaki güç formu denklemi ile verilmektedir.

$$Q(x) = Q_{in} (x/L)^\alpha \quad (24)$$

Denklemden;  $\alpha$ , değişken debi dağılımını karakterize eden üstel bir değerdir. Değişken debi metodu için, sabit debi metodu ile verilen tüm analitik denklemlerde  $m$  yerine, düzeltilmiş  $m_\alpha = \alpha m$  değeri geçerlidir.

### Ardışık yaklaşımlar metodu

Vallesquino ve Luque-Escamilla (2001), lateral hidrolik hesaplamaları için, ardışık yaklaşımlar yöntemine dayanan alternatif bir metot (Successive-Approximations Method, SAM) ortaya koymuşlardır.

Bu metoda göre, mansaptan menba istikametine doğru her bir damlatıcıdan hasıl olan değişken çıkış akımı ayrık formda göz önüne alınarak, Taylor polinom serisi formunda ifade edilmektedir.

Buna göre, lateral boyunca damlatıcı debisi dağılımı,  $q_n$  için, aşağıdaki bağıntı geçerlidir.

$$q_n = q_0 + n\Delta_1 + \frac{n(n+1)}{2}\Delta_2 + \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}\Delta_3 + \dots \quad (25)$$

Bağıntıda;  $q_0$ , mansap uç noktasından itibaren ilk damlatıcının debisi,  $n$ , damlatıcının konumunu gösteren indis;  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ , ardışık damlatıcılara ait debilerin farkını gösteren karakteristik düzeltme parametreleridir.

Lateral boyunca debi dağılımı,  $Q_n$  için, (25) denkleminde hareketle aşağıdaki denklem elde edilir.

$$Q_n = (n+1)q_0 + \left[ \frac{n(n+1)}{2} \right] \Delta_1 + \left[ \frac{n(n+1)(n+2)}{6} \right] \Delta_2 + \left[ \frac{n(n+1)^2(n+2)}{12} \right] \Delta_3 + Q \quad (26)$$

Laminer rejim halinde, toplam sürtünme kaybı için, (27) denkleminde hareketle,

$$\Delta H_{fN} = \left( \frac{128\nu l}{g\pi D^4} \right)^{(N+1)} \left\{ Q_{r+(N+2)} \left[ \frac{q_0}{2} + N \left[ \frac{\Delta_1}{6} + (N+3) \left( \frac{\Delta_2}{24} + \frac{(2N+3)\Delta_3}{120} \right) \right] \right] \right\} \quad (27)$$



ve türbülanslı rejim halinde,

$$\Delta H_{fN} = \chi \left[ f_0 (q_0 + Q_r)^2 + \alpha_N + \beta_N + \gamma_N + \delta_N + \zeta_N \right] \quad (28)$$

denklemleri elde edilmektedir.

(28) denklemde;  $\chi = 8l / \pi^2 g D^5$  ile hesaplanan sabit;  $\alpha_N, \beta_N, \gamma_N, \delta_N, \zeta_N$  türbülanslı rejim hali için toplam düzeltme faktörleri olup, ilgili formüller yardımıyla hesaplanmaktadır.

## Uygulamalar ve karşılaştırmalı analiz

### Problem verileri

Ortalama damlatıcı debisi,  $q_{av} = 2lh^{-1} \cong 5.555 \times 10^{-7} m^3 s^{-1}$ ; ortalama basınç yükü,  $H_{av} = 7.2m$ ; damlatıcı ara mesafesi,  $s = 1.0m$ ; lateral boru iç çapı ve uzunluğu,  $D = 14mm$ ,  $L = 150m$ ; suyun kinematik viskozitesi  $\nu = 1.01 \times 10^{-6} m^2 s^{-1}$ ; damlatıcı debi üssü,  $y = 0.2, 0.5, 0.54$  ve  $1.0$ ; üniform lateral eğimi,  $s_0 = 0.0, -0.02, -0.05$  (yukarı eğim).

### Bilinmeyen parametreler

7 adet hidrolik hesap metoduna göre, projelendirme aralığı içerisinde rölatif giriş basınç yükü  $[H_{in} / H_{av}]$  değerlerine bağlı olarak rölatif enerji kaybı  $[H_f / H_{in}]$ , Christiansen üniformluk katsayısı  $[U_C]$  ve rölatif artık debi  $[Q_r / Q_{in}]$  değerlerindeki değişimin grafiksel olarak elde edilmesi.

### Sonuçların karşılaştırılması

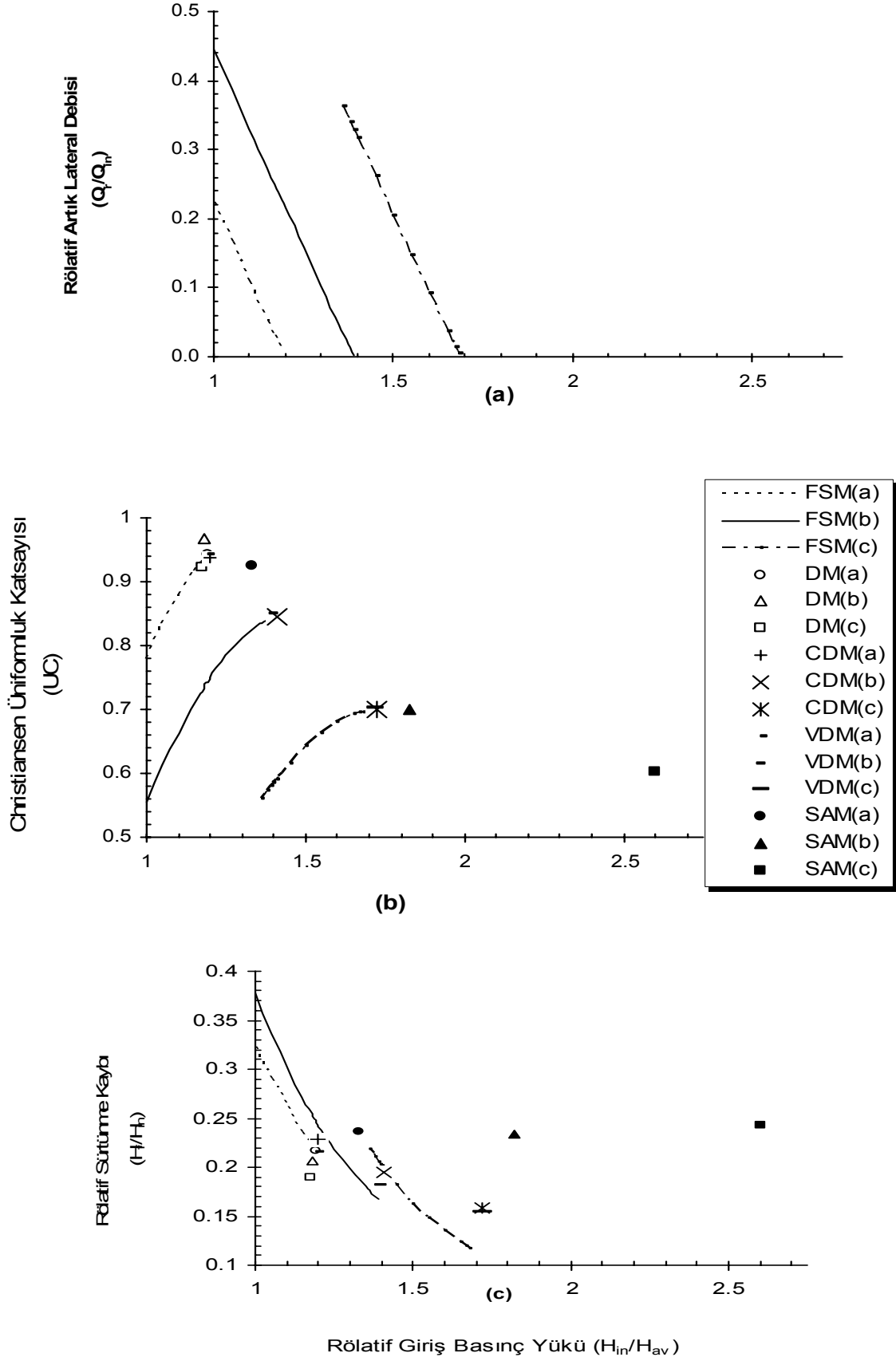
Bilinmeyen tasarım parametreleri, damlatıcı debi üssü,  $y = 1.0$  ve verilen eğim değerleri için 5 metot (**FSM**, **DM**, **CDM**, **VDM**, **SAM**) esas alınarak hesaplanmış, elde edilen sonuçlar Şekil 2'de boyutsuz grafiklerle gösterilmiştir (**RKM** ve **SAA** metotlarının çözümü  $y = 0.5$  ile sınırlı olduğundan,  $y = 1.0$  için yapılan bu karşılaştırmada söz konusu metotlar yer almamaktadır). Şekil 2'de rölatif giriş basınç yükü  $(H_{in} / H_{av})$  değerleri yatay eksen, buna tekabül eden rölatif enerji kaybı  $(H_f / H_{in})$ , Christiansen üniformluk katsayısı  $(U_C)$  ve rölatif artık lateral debisi  $(Q_r / Q_{in})$  değerleri düşey eksende gösterilmek-

tedir. Şekil 2'den görüleceği üzere  $y = 1.0$  için yapılan çözümlemede, 5 metot arasında **FSM** metodundan elde edilen sonuçlar diğer 4 metotun (**DM**, **CDM**, **VDM**, **SAM**) sonuçlarından şu yönüyle farklıdır. **FSM** metodunda, rölatif enerji kaybı, Christiansen üniformluk katsayısı ve rölatif artık lateral debisi değerleri, rölatif giriş basınç yükünün projelendirme aralığı içerisinde verilen değerleri ile değişirken, diğer 4 metot (**DM**, **CDM**, **VDM**, **SAM**) söz konusu tasarım parametreleri  $[(H_{in} / H_{av}), (H_f / H_{in}), (U_C)]$  için sabit değerler vermektedir. Diğer taraftan Şekil 2.a'dan görüleceği üzere, artık lateral debisinin rölatif giriş basınç yükü ile değişimi de ancak **FSM** metodu ile elde edilebilmektedir.

**FSM** metodunda, verilen eğim şartları için rölatif giriş basınç yükünün projelendirme aralığı  $[A \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B]$ , başlangıç ve sınır şartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 2.c'de gösterildiği gibi, en uygun giriş basınç yükü değerinin tayininde,  $s_0 = 0.0$  eğim durumu için  $[A = 1.0 \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B = 1.19]$ ,  $s_0 = -0.02$  için  $[A = 1.0 \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B = 1.39]$  ve  $s_0 = -0.05$  için  $[A = 1.36 \leq H_{in} / H_{av} \leq B = 1.68]$  projelendirme aralıkları belirlenmiştir.

Genel tasarım halinde, farklı eğim şartları ve damlatıcı debi üssü değerleri için gerekli projelendirme aralığı değerlerinin,  $y = 1.0$  için hesaplanan değerlere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Karşılaştırma testi sonucunda, tüm tasarım kombinasyonları ve eğim şartlarında **FSM** metodu için şu genel sonuç elde edilmektedir. Giriş basınç yükü oranının değeri  $A$ 'dan  $B$ 'ye doğru arttıkça  $[A \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B]$ , toplam sürtünme kaybı ve artık lateral debisi değerleri gittikçe azalmakta buna mukabil üniformluk katsayısının değeri gittikçe artmaktadır.

Şekil 2.a'dan; rölatif artık lateral debisi  $(Q_r / Q_{in})$ ;  $s_0 = 0.0$  eğim şartı için  $[A = 1.0 \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B = 1.19]$  projelendirme aralığında  $0.2$ 'den başlayıp  $0$ 'a doğru azalan;  $s_0 = -0.02$  eğim şartı için  $[A = 1.0 \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B = 1.39]$  projelendirme



Şekil 2. FSM, DM, CDM, VDM ve SAM metotlarına göre:  $s_0 = 0.0, -0.02, -0.05$ ;  $y = 1.0$  için tasarım parametrelerinin rölatif giriş basınç yükü ile değişimi

aralığında 0.44'den 0'a doğru azalan ve  $s_0 = -0.05$  eğim şartı için ( $A = 1.36 \leq H_{in} / H_{av} \leq B = 1.68$ ) projelendirme aralığında 0.36'dan 0'a doğru azalan değerler almaktadır.

Şekil 2.b'den; Christiansen üniformluk katsayısı [ $A = 1.0 \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B = 1.19$ ] projelendirme aralığında 0.80'den 0.94'e doğru artan;  $s_0 = -0.02$  eğim şartı için [ $A = 1.0 \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B = 1.39$ ] projelendirme aralığında 0.56'dan 0.84'e doğru artan ve  $s_0 = -0.05$  eğim şartı için ( $A = 1.36 \leq H_{in} / H_{av} \leq B = 1.68$ ) projelendirme aralığında 0.56'dan 0.69'a doğru artan değerler almaktadır.

Benzer halde Şekil 2.c'den; rölatif enerji kaybı ( $H_f / H_{in}$ ),  $s_0 = 0.0$  eğim şartı için [ $A = 1.0 \leq (H_{in} / H_{av}) \leq B = 1.19$ ] projelendirme aralığında 0.34'den 0.22'ye doğru azalan;  $s_0 = -0.02$  eğim şartı için ( $A = 1.36 \leq H_{in} / H_{av} \leq B = 1.68$ ) projelendirme aralığında 0.24'den 0.12'ye doğru azalan değerler almaktadır. Buna göre tüm tasarım kombinasyonları için projelendirme aralığı içerisinde en uygun giriş basınç yükünün değeri, artık lateral debisi ve toplam sürtünme kayıplarının minimum; buna mukabil üniformluk katsayısının maksimum olduğu ( $H_{in} / H_{av} = B$ ) sınır değerlerinde elde edilebilmektedir.

Şekil 2.b ve 2.c'den görüleceği üzere  $s_0 = 0.0$  eğim durumu için, ( $H_{in} / H_{av}$ ), ( $H_f / H_{in}$ ), ( $U_c$ ) tasarım parametrelerinin belirlenmesinde, **FSM**, **DM**, **CDM** ve **VDM** metotları birbirine yakın sonuçlar verirken, **SAM** metodu bunlardan çok farklı sonuçlar vermektedir.

## Sonuçlar

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Karşılaştırma testi sonucunda, tasarım parametrelerinin belirlenmesinde damlatıcı debi üssünün  $y = 1.0$  değeri için; ileri adım metodu, diferansiyel metot ve değişken debi metodu birbiri

ile uyumlu sonuçlar verirken; sabit debi metodu ve ardışık yaklaşımlar metodundan elde edilen sonuçlar diğer metotların sonuçlarından önemli mertebede sapmaktadır. Ardışık yaklaşımlar metodu diğer metotlara kıyasla, giriş basınç yükü ve toplam sürtünme kaybı için daha yüksek değerler verirken, üniformluk katsayısı için daha düşük değer vermektedir. Tüm tasarım kombinasyonları ve eğim şartları göz önüne alındığında, üniformluk katsayısı için diferansiyel metot diğer metotlara göre en yüksek değerleri vermektedir. Damlatıcı debi üssünün  $y = 1.0$  değeri için Runge-Kutta nümerik metodundan elde edilen sonuçlar üniformluk katsayısının başlangıçtaki sınırlı bir aralığında diferansiyel metodun sonuçları ile uyum sağlarken; basitleştirilmiş analitik yaklaşım üniformluk katsayısının tüm değerleri için diferansiyel metotla uyumlu sonuçlar vermektedir.

İleri-adım metodunda, rölatif sürtünme kaybı, Christiansen üniformluk katsayısı ve rölatif artık lateral debisi değerleri, rölatif giriş basınç yükünün projelendirme aralığı içerisinde verilen değerleri ile değişirken; diğer metotlarda söz konusu tasarım parametreleri rölatif giriş basınç yükünün sabit bir değerine bağlı olarak değişmektedir.

Projelendirme aralığı içerisinde en uygun giriş basınç yükünün, artık lateral debisi ve toplam sürtünme kayıplarının minimum düzeyde; buna mukabil üniformluk katsayısının maksimum düzeyde olduğu, maksimum giriş basınç yükü sınır değerinde elde edilmektedir. Şayet, giriş basınç yükü için maksimum giriş basınç yükü sınır değerinden büyük olacak şekilde bir değer seçilirse, lateral boyunca tüm damlatıcı debileri toplamının lateral giriş debisinden büyük bir değerde çıkacağı anlaşılır ki bu durum, lateralın mansap uç noktasından menba istikametine doğru bir geri akımın oluştuğunu göstermektedir.

Çap ve uzunluk değerlerinin sabit olması halinde lateral eğiminin tasarım parametreleri üzerindeki etkisini araştırmak üzere yapılan analiz sonucunda şu sonuca varılmaktadır. Eğimsiz bir lateral boruya nazaran, yukarı eğim değeri arttıkça giriş basınç yükü değeri artarken,

üniformluk katsayısının değeri azalmakta; buna mukabil aşağı eğim değeri arttıkça giriş basınç yükü değeri azalırken, üniformluk katsayısının değeri artmaktadır.

Lateral çapı, uzunluğu ve eğimi değerlerinden bağımsız olarak, damlatıcı debi üssünün üniformluk katsayısı üzerindeki etkisini belirlemek üzere yapılan analiz sonucunda, damlatıcı debi üssünün küçük değerlerinde üniformluk katsayısı yüksek değerler alırken, büyük değerlerinde üniformluk katsayısının daha küçük değerler aldığı belirlenmiştir. Buradan hareketle, damlatıcı debi üssü ile üniformluk katsayısı arasında ters bir ilişki olduğu sonucuna varılmaktadır.

## Kaynaklar

- Agiralioglu, N., Eren, R. H. ve Yildirim, G., (2000). İstanbul'da peyzaj sulaması için su kaynakları, teknik bülteni, *İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi*, İstanbul.
- Agiralioglu, N., ve Yildirim, G., (2002). Determining water requirements for landscape irrigation in Istanbul region. *Proc., International Conference on Water Resources Management in Arid Regions*, Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait.
- Al-Amoud, A.I., (1995). Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. *J. Agricultural Engineering Researches*, **60**, 1, 1-5.
- Anyoji, H., ve Wu, I.P., (1987). Statistical approach for drip lateral design. *Transaction ASAE*, **30**, 1, 187-192.
- Anwar, A. A., (1999a). Factor G for pipelines with equally spaced multiple outlets and outflow. *J. Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, **125**, 1, 34-39.
- Anwar, A. A., (1999b). Adjusted factor  $G_a$  for pipelines with multiple outlets and outflow. *J. Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, **125**, 6, 355-359.
- Anwar, A. A., (2000). Inlet pressure for horizontal tapered laterals. *J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **126**, 1, 57-63.
- Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., ve Pumo, D., (1995). Experimental study on flow resistance law for small diameter plastic pipes. *J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **121**, 5, 313-316.
- Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., ve Pumo, D., (1997). Evaluating pressure losses in drip irrigation lines. *J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **123**, 1, 1-7.
- Bralts, V. F., Kelly, S.F., Shayya, W. H., ve Segerlind, L. J., (1993). Finite element analysis of microirrigation hydraulics using a virtual emitter system. *Transaction ASAE*, **36**, 3, 717-725.
- Chadwick, A., ve Morfett, J., (1993). *Hydraulics in civil and environmental engineering*, E&FN SPON, London, U.K.
- Featherstone, R.E., ve Nalluri, C., (1982). *Civil engineering hydraulics, essential theory, worked examples*. Granada Publishing, New York, N.Y.
- Hathoot, H. M., Al-Amoud, A. I., and Mohammad, F. S., (1993). Analysis and design of trickle-irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, **119**, 5, 756-767.
- Hathoot, H.M., Al-Amoud, A.I., Al-Mesned, A.S., (2000). Design of trickle irrigation laterals considering emitter losses. *Irrigation and Drainage*, **49**, 2, 1-14.
- Howell, T. A. ve Hiler, E. A., (1974). Trickle irrigation lateral design. *Transaction ASAE*, **17**, 5, 902-908.
- Howell, T. A. ve Barinas, F. A., (1980). Pressure losses across trickle irrigation fittings and emitters. *Transaction ASAE*, **23**, 4, 928-933.
- Jain, S. K., Singh, K. K., ve Singh, R. P., (2002). Micro-irrigation lateral design using lateral discharge equation. *J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **128**, 2, 125-128.
- Juana, L., Sinobas, L. R., Losada, A., (2002a). Determining minor head losses in drip irrigation laterals.I: methodolgy. *J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **128**, 6, 376-384.
- Juana, L., Sinobas, L. R., Losada, A., (2002b). Determining minor head losses in drip irrigation laterals.II: experimental study and validation. *J. Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, **128**, 6, 385-396.
- Kang, Y., ve Nishiyama, S., (1996a). Analysis and design of microirrigation laterals. *J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **122**, 2, 75-81.
- Kang, Y., ve Nishiyama, S., (1996b). Design of microirrigation submain units. *J. Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, **122**, 2, 83-89.
- Keller, J., ve Karmeli, D., (1974). Trickle irrigation design parameters. *Transaction ASAE*, **17**, 4, 678-683.
- Keller, J., ve Bliesner, R. D., (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Provenzano, G., Pumo, D., (2004). Experimental analysis of local pressure losses for

- microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **130**, 4, 318-324.
- Provenzano G., Pumo, D., ve Di Dio, P., (2005). Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **131**, 6, 525-532.
- Saad, J. C. C., ve Marino, M. A., (2002). Optimum design of micro-irrigation systems in sloping lands. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **128**, 2, 116-124.
- Scaloppi, E. J., ve Allen, R.G., (1993). Hydraulics of irrigation laterals: Comparative analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **119**, 1, 91-115.
- Sinobas, L. R., Juana, L., Losada, A., (1999). Effects of temperature changes on emitter discharge. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **125**, 2, 64-73.
- Streeter, V. I., ve Wylie, B. E., (1983). *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill Co., New York, N.Y.
- Valiantzas, J. D., (1998). Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **124**, 6, 300-305.
- Valiantzas, J. D., (2002). Continuous outflow variation along irrigation laterals: Effect of the number of outlets. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **128**, 1, 34-42.
- Vallesquino, P., ve Luque-Escamilla, P. L., (2001). New algorithm for hydraulic calculation in irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **127**, 4, 254-260.
- Vallesquino, P., ve Luque-Escamilla, P. L., (2002). Equivalent friction factor method for hydraulic calculation in irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **128**, 5, 278-286.
- von Bernuth, R. D., (1990). Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **116**, 2, 294-298.
- von Bernuth, R. D., ve Wilson, T., (1989). Friction factors for small diameter plastic pipes. *Journal of Hydraulic Eng., ASCE*, **115**, 2, 183-192.
- Warrick, A.W., ve Yitayew, M., (1987). An analytical solution for flow in a manifold. *Advances in Water Resources*, 10, 58-63.
- Warrick, A. W., ve Yitayew, M., (1988). Trickle lateral hydraulics.I: Analytical solution. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **114**, 2, 281- 288.
- Watters, G. Z., ve Keller, J., (1978). Trickle irrigation tubing hydraulics. *Summer Meeting of ASAE*, Utah State University, Logan, Utah.
- Wu, I. P., ve Gitlin, H. M., (1973). Hydraulics and uniformity for drip irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Div., ASCE*, 99, IR2, Proc. Paper 9786, June, pp. 157-168.
- Wu, I.P., ve Gitlin, H. M., (1974). Drip irrigation design based on uniformity. *Transaction. ASAE*, **17**, 429-432.
- Wu, I.P., ve Gitlin, H. M., (1975). Energy gradient line for drip irrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **101**, 4, 323-326.
- Wu, I. P., (1992). Energy gradient line approach for direct hydraulic calculation in drip irrigation design. *Irrigation Science*, **13**, 21-29.
- Wu, I.P., ve Yue, R., (1993). Drip lateral design using energy gradient line approach. *Transaction ASAE*, **36**, 2, 389-394.
- Wu, I. P., (1997). An assessment of hydraulic design of microirrigation systems. *Agricultural Water Management*, **32**, 275-284.
- Yıldırım, G., (2001). Damla sulamasında lateral boruların bilgisayar destekli projelendirilmesi. Yüksek lisans tezi, *Istanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Yıldırım, G., ve Ağralıoğlu, N., (2001). Computer aided design of lateral pipes in drip irrigation. *Proc., International Symposium on Water Resources and Environmental Impact Assessment*, Technical University of Istanbul, İstanbul.
- Yıldırım, G., ve Ağralıoğlu, N., (2002a). Variation of total friction head losses and uniformity coefficients based on inlet pressure head in trickle laterals. *Proc., International Conference on Water Resources Management in Arid Regions*, Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait.
- Yıldırım, G., ve Ağralıoğlu, N., (2002b). Variation of design parameters in micro-irrigation laterals. *Proc., International Conference on Advances of Civil Engineering*, Technical University of Istanbul, İstanbul.
- Yıldırım, G., ve Ağralıoğlu, N., (2003a). Discussion of "New algorithm for hydraulic calculation in irrigation laterals" *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **129**, 2, 142-143.
- Yıldırım, G., ve Ağralıoğlu, N., (2003b). Discussion of "Continuous outflow variation along irrigation laterals: effect of the number of outlets" *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **129**, 5, 382-386.
- Yıldırım, G., ve Ağralıoğlu, N., (2004a). Linear solution for hydraulic analysis of tapered microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **130**, 1, 78-87.

- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2004b). Comparative analysis of hydraulic calculation methods in design of microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **130**, 3, 201-217.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2004c). Discussion of “Determining minor losses in drip irrigation laterals.I: methodology” *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **130**, 3, 248-252.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2004d). Discussion of “Equivalent friction factor method for hydraulic calculation in irrigation laterals” *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **130**, 4, 335-339.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2004e). Discussion of “Determining minor losses in drip irrigation laterals.II: experimental study and validation” *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **130**, 4, 344-346.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2004f). Variation of design parameters in micro-irrigation laterals. *ARI Interdisciplinary Journal of Physical and Engineering Sciences*, **54**, 1, 42-53.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2005a). Discussion of “Inlet pressure, energy cost, and economic design of tapered irrigation submains” *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **131**, 2, 220-224.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2005b). Discussion of “Explicit hydraulic design of microirrigation submain units with tapered manifold and laterals” *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **131**, 3, 299-300.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2005c). Closure to “Linear solution for hydraulic analysis of tapered microirrigation laterals” *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **131**, 5, 490-491.
- Yıldırım, G., ve Ağırlioğlu, N., (2006). Closure to “Comparative analysis of hydraulic calculation methods in design of microirrigation laterals” *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **132**, 1, 85-88.
- Yıldırım, G., (2006). Discussion of “Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals.” *Journal of Irrigation and Drainage Eng.*, **132**, 2, 189-192.
- Yitayew, M., (1989). Head loss in manifolds or trickle lateral: Simplified approach. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **115**, 4, 739-743.
- Yitayew, M., ve Warrick, A. W., (1988). Trickle lateral hydraulics.II: Design and examples. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **114**, 2, 289-300.
- Yitayew, M., ve Warrick, A. W., (1987). Velocity head considerations for trickle laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE*, **113**, 4, 611-615.