

KARARSIZ AKIM KOŞULLARINDA KATI MADDE TAŞINIMININ SONLU HACİMLER YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

Birol KAYA, Amin GHAREHBAGHI

İnş. Müh. Böl., Müh. Fak., Dokuz Eylül Üniversitesi, 35160 Buca, İzmir.

birol.kaya@deu.edu.tr, gharehbaghi.amin@gmail.com

(Geliş/Received: 16.11.2011; Kabul/Accepted: 12.07.2012)

ÖZET

Katı madde taşınımının önceden hesaplanabilmesi, taşkın kontrolünde, barajlarda, sulama şebekelerinde vs. bu yapıların en iyi şekilde tasarlanmasında ve kullanımında etkili parametrelerden biridir. Bu çalışma kapsamında katı madde taşınımı problemi bir boyutlu olarak sonlu hacimler yöntemi kinematik dalga yaklaşımı ile çözülmüştür. Ayrıca katı madde taşınımının modellenmesi için açık ve kapalı çözüm şemaları, dengede ve dengesiz taşınım durumları için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve dengesiz taşınım durumunda kapalı çözüm şeması kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu hacimler yöntemi, Kinematik dalga modeli, Dengede ve Dengesiz katı madde taşınımı.

MODELLING OF SEDIMENT TRANSPORT WITH FINITE VOLUMES METHOD UNDER UNSTEADY CONDITIONS

ABSTRACT

Estimation of sediment transport phenomenon is one of the significant mechanisms in optimum design, better use and management of water structures such as flood controls, dams, irrigation systems. In this study, the sediment transport problem was solved as 1D using finite volumes method with kinematic wave model approach. Furthermore, this phenomenon was investigated using explicit and implicit schemes under equilibrium and non-equilibrium transport conditions. The results of numerical solutions are compared with experimental data, and it was observed that results in non-equilibrium sediment transport using implicit scheme are more compatible with those of experimental studies.

Key Words: Finite Volumes Method, Kinematic Wave Model, Equilibrium and Non- Equilibrium Sediment Transport.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katı madde taşınımı su yapılarının optimum kullanımı ve akarsu morfolojisi açısından bilinmesi gereken önemli bir konudur. Buna karşın doğada en zor anlaşılan ve en karmaşık olaylardan birisidir. Son zamanlarda bilim adamlarının bu olayı anlama ve çözme konusundaki çabaları artmış ve akarsularda katı madde taşınımının hesaplanması için bir çok deneysel bağıntı önerilmiştir [1-5]. Ama çoğu zaman bu bağıntıların sonuçlarının gerçek ölçümlerle pek uyumlu olmadığı görülmektedir. Bundan dolayı son yıllarda katı madde taşınımının sayısal modellenmesi

konusunda çalışmalar özellikle bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak artmıştır.

Katı madde taşınımının sayısal modellenmesinde ana denklemler St.Venant denklemleri ve katı madde için yazılan süreklilik denklemdir. Bu denklemlerin çözümünde kinematik dalga, difüzyon dalgası, dinamik dalga gibi denklemlerde bazı basitleştirmeler sağlayan yaklaşımlar kullanılabilir. Katı madde taşınımının kinematik dalga yaklaşımıyla uyumlu gerçekleşmesinden dolayı [2] bu çalışma kapsamında kinematik dalga yaklaşımı kullanılmıştır.

Denklemlerin sayısal çözümü için sonlu farklar, sonlu elemanlar, sonlu hacimler gibi yöntemler kullanılabilir [6]. Sonlu farklar yöntemi katı madde taşınımının modellenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Katı madde taşınımını bir boyutlu olarak modellemeye çalışan Vries (1965) suyun yüksekliği ve tabandaki değişimi sonlu farklar yöntemini açık şema ile çözmeye çalışmıştır [7]. Paquier (1998) Saint Venant denklemlerinin çözümünde ikinci dereceden Godunov tipi kapalı şemayı kullanmıştır [8]. Tayfur ve Singh (2006)'de Saint Venant denklemlerinin çözümü için sonlu farklar yöntemini açık şema ile kullanmışlar ve alüvyonlu kanallarda tabandaki değişimi dengeli taşınım durumu için incelemiştir [9]. Yine Tayfur ve Singh (2007) katı madde taşınımını sonlu farklar yöntemini açık şema ile ve dengede olmayan taşınım durumu için modellemiştir [10]. Benzer şekilde Fuladipanaah vd. (2010) sonlu farklar yöntemini kullanarak katı madde taşınımını bir boyutlu olarak incelemiştir ancak kapalı şema kullanarak hesaplamıştır [11]. Fang vd.(2008) katı madde taşınımının genel denklemlerinin çözümünde dört noktalı sonlu farklar yöntemini, kapalı Preissmann şemasını kullanmışlardır [12]. Bir diğer yöntem de sonlu elemanlar yöntemidir. Seo vd.(2009) katı madde taşınımının modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır [13]. Wu ve Wang (2008) ise baraj yıkılması durumunda katı madde taşınımının bir boyutlu modellenmesi için sonlu hacimler yöntemini açık şema ile kullanmışlar, modelde akım için iyi sonuçlar alınmakla birlikte katı madde taşınımının yoğun olması durumunda taban profili için çok olumlu sonuçlar elde edilmemiştir [14]. Son yıllarda hidrolik mühendisliğinde kullanım alanı bulan bir diğer yöntem de diferansiyel kuadratur yöntemidir. Kaya ve Tayfur (2011) taban profilindeki bir boyutlu değişimi diferansiyel kuadratur yöntemi ile incelemiştir [15]. Gharehbaghi ve Kaya(2011) taban profilinin değişimini bir boyutlu olarak sonlu hacimler yöntemi ile dengede katı madde taşınımını durumu için incelemiştir [16].

2. GENEL DENKLEMLER (GENERAL EQUATIONS)

Hareketli tabanlı akımlarda, katı maddenin hareketi dengede ve dengede olmayan taşınım durumu olmak üzere St. Venant denklemleri ile birlikte iki açıdan incelenebilmektedir. Katı madde taşınımının dengede olması durumu bir kontrol hacminde tabandan ayrılan katı madde miktarı ile sudan tabana dönen katı madde miktarının eşit olması durumudur [10]. Katı madde taşınımının dengede olduğu hareketli tabanlı akımlarda su ve katı madde için süreklilik denklemleri

$$W = \begin{bmatrix} h(1-c) + pz \\ hc + (1-p)z \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} hu(1-c) \\ huc + q_{bs} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} q_{tw} \\ q_{ts} \end{bmatrix} \quad (1)$$

olmak üzere

$$W_t + F_x - S = 0 \quad (2)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu eşitliklerde h su derinliğini (m), u akımın hızını (m/s), c askıda katı maddenin hacimsel konsantrasyonu (m^3/m^3), p hareketli tabanın porozitesi (m^3/m^3), z hareketli tabanın yüksekliği (m), q_{tw} yanal su akımı (m^3/s), q_{bs} hareketli tabanda katı madde akımı (m^2/s), q_{ts} yanal katı madde akımı (m^3/s), ρ_s katı maddenin yoğunluğu (kg/m^3) olmaktadır.

Dengede olmayan durum birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yukarıda verilen denklemler bazı araştırmacılar tarafından farklı şekillerde ve bazen bazı parametreleri gözardı ederek yeniden yazılmıştır. Bu çalışmada dengede olmayan durumu incelemek amacıyla katı maddenin süreklilik denklemi a) askıdaki katı madde b) tabandaki katı madde için ayrı ayrı yazılmıştır. Bu durumda (2) denklemi yerine askıda katı maddenin miktarı ve tabandaki katı maddenin miktarı için süreklilik denklemlerinin ayrı ayrı yazılmasıyla (1) denkleminin elemanları

$$W = \begin{bmatrix} h(1-c) + pz \\ hc \\ (1-p)z \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} hu(1-c) \\ huc \\ q_{bs} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\rho_s} [E_z - D_c] \\ \frac{1}{\rho_s} [D_c - E_z] \end{bmatrix} \quad (3)$$

şeklini almaktadır. Bu denklemlerde E_z tabandan ayrılan katı madde miktarı ve D_c sudan tabana eklenen katı madde miktarıdır (Şekil 1). Suyun askıda katı madde içermediği, yanal debi ve katı madde girişinin olmadığı bir durumda yukarıdaki denklemlerde q_{tw} , q_{ts} ve q_{bed} sifıra eşittir.

Dengede olmayan taşınım durumunda yazılan denklemler incelendiğinde yedi tane bilinmeyen (h , u , c , z , q_{bs} , E_z ve D_c) söz konusudur. Bu bilinmeyenlerin çözülebilmesi için dört yardımcı denklem daha yazılması gerekmektedir.

Bunlardan ilki akım hızı ile akım derinliği arasındaki ilişkinin genel biçimini ifade eden

$$u = \alpha h^{\beta-1} \quad (4)$$

şeklindeki denklemdir. Bu denklemde α ve β akım derinliği ve hızı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılan ampirik bağıntıya (Manning, Chezy vs.) göre değişmektedir. Chezy denklemi kullanıldığında C Chezy katsayısı ($m^{0.5}/s$) olmak üzere $\beta=1,5$ ve $\alpha=CS_f^{0.5}$ olmaktadır. Kinematik dalga yaklaşımında

$$S_0 = S_f \quad (5)$$

olarak ifade edilmektedir. Akım derinlik katsayısı ya da kinematik dalga direnç parametresi olarak da tanımlanan α ve β değerleri ile 5 denklemi 4'de yerine konulduğunda [17]

$$u = C\sqrt{hS_0} \quad (6)$$

ifadesi elde edilmektedir.

Bir diğer denklem, bir akım alanında askıdaki katı maddenin konsantrasyonunu gösteren

$$c = \delta u^\eta h^\xi \quad (7)$$

denklemdir. [9, 18-20] Bu denklemde δ , η ve ξ parametreleri su derinliğine ve katı maddenin özelliklerine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan ve

$$c = \frac{\kappa u^3}{g v_f h} \quad (8)$$

şeklinde verilen Velikanov (1954) bağıntısında $\eta=3$ ve $\xi=-1$ olarak alınmaktadır [20]. (7) ve (8) denklemleri göz önüne alarak δ değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilmektedir.

$$\delta = \frac{\kappa}{g v_f} \quad (9)$$

Bu eşitlikte v_f katı maddenin ortalama çökme hızı (m/s) ve κ katı madde taşıma kapasitesi katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Ching ile Cheng (1964) bazı arazi çalışmalarını göz önüne alarak κ için $0,756 \times 10^{-4}$ değerini önermişlerdir [18].

Taşınan katı madde debisini hesaplayabilmek amacı ile değişik araştırmacılar tarafından deneylere dayalı ampirik bağıntılar önerilmektedir. Bu araştırmada Engelund ve Fredsoe tarafından önerilen

$$q_{bs} = 18,74 \sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_{50}^3 (\tau_* - \tau_{*cr})} (\sqrt{\tau_*} - 0,7 \sqrt{\tau_{*cr}}) \quad (10)$$

bağıntısı kullanılmıştır [22]. Bu bağıntıda d_{50} tabandaki malzemenin 50% büyüklüğünün milimetre cinsinden değerini, τ_* ile τ_{*cr} tabandaki boyutsuz kayma gerilmesi ile boyutsuz kritik kayma gerilmesini göstermektedir. Δ is γ_s katı maddenin özgül ağırlığı, γ_w suyun özgül ağırlığı olmak üzere

$$\Delta = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (11)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Boyutsuz kayma gerilmesi

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{g \Delta d_s} \quad (12)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmekte, bu denklemde d_s katı madde parçacıkların çapı ve

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g \cdot h \cdot S_0} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanabilen kayma gerilme hızı olmaktadır. Bu denklemde τ_0 kayma gerilmesi, ρ suyun yoğunluğu, g yer çekimi ve S_0 ise taban eğimini göstermektedir. Engelund ve Fredsoe tabandaki kritik kayma gerilmesi için $\tau_{*cr} = 0,05$ değerini önermişlerdir.

Yang tabandan ayrılan katı madde miktarı (E_z) ve çökelen katı madde miktarı (D_c) için aşağıdaki eşitlikleri önermiştir [23].

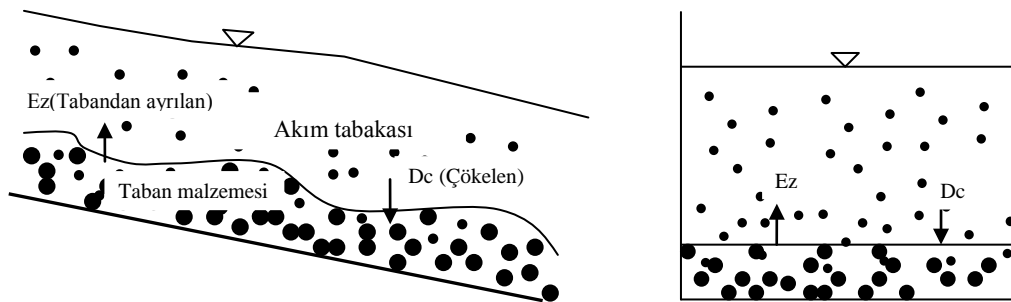
$$E_z = \sigma T_c = \sigma [\phi (\tau - \tau_{*cr})^k] \quad (14)$$

$$\tau = \gamma_w h S_0 \quad (15)$$

$$\tau_{*cr} = \kappa (\gamma_s - \gamma_w) d_s \quad (16)$$

$$D_c = \sigma \rho_s q_{ss} = \sigma [\rho_s h u c] \quad (17)$$

Bu denklemlerde σ taşınım oranı katsayısı (1/m), T_c akımın taşıma kapasitesi (kg/m/s), ϕ toprağın aşınabilme gücü, τ kayma gerilmesi (kg/m²), k ve κ sabitler, ve q_{ss} askıda olan katı madde debisi (kg/m/s) olmaktadır.

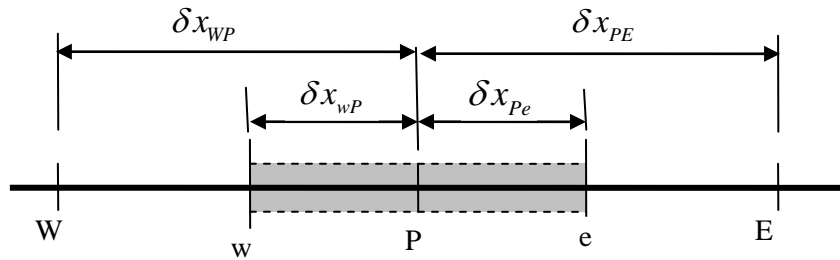


Şekil 1. İki katmanlı sistemin genel görünümü (General view of two layer system)

3. SAYISAL YÖNTEM (NUMERICAL METHOD)

Sonlu hacimler yöntemi aslında sonlu farklar yönteminin geliştirilmiş özel bir formülasyonudur [24]. Bir boyutlu bir problemde sonlu hacimler yönteminde kullanılan notasyonlar Şekil 2'de ki gibi olmak üzere, P noktası hesaplanacak noktayı E ve W ise bu noktanın sağındaki ve solundaki noktaları göstermektedir. Kontrol hacminin yanıl yüzeylerini e ve w ile olmaktadır. δ_x simgesi ise noktalar arası mesafeyi göstermektedir.

(2) denkleminin zamana ve hacme göre integrali alındığında



Şekil 2. Bir boyutlu Sonlu hacimler yönteminde notasyonlar (1D discretization of finite volumes method)

$$(W_p - W_p^0)\Delta V = -(A_e \cdot F_e - A_w \cdot F_w)\Delta t + S \cdot \Delta t \cdot \Delta V \quad (19)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Yukarıdaki denklemde θ indisli değerler t zamanındaki bilinen değerleri göstermekte, A kontrol hacminin yanıl yüzey alanı ve ΔV hacmi olmaktadır.

Çözümün genel formu θ ağırlık parametresine göre

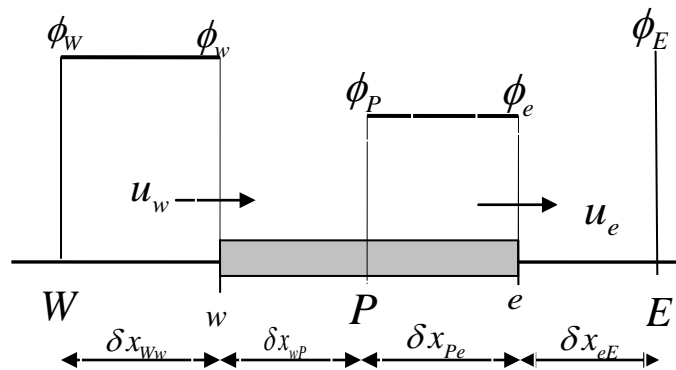
$$(W_p - W_p^0)\Delta V = \theta[-(A_e^0 \cdot F_e^0 - A_w^0 \cdot F_w^0)\Delta t] + (1 - \theta)[-(A_e \cdot F_e - A_w \cdot F_w)\Delta t] + S \cdot \Delta t \cdot \Delta V \quad (20)$$

$$\int_{CV} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial W}{\partial t} dt \cdot dV = - \int_{CV} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial F}{\partial x} dt \cdot dV + \int_{CV} \int_t^{t+\Delta t} S dt \cdot dV \quad (18)$$

şekline dönüşmektedir. (18) denklemini integrasyon sonucunda

olmaktadır. θ değerini 1 alındığında, (20) denklemin sağında yalnız t zamanındaki bilinen değerler yer almakta ve açık çözüm olarak tanımlanmaktadır. θ değeri 0 alındığında ise sağ tarafta $t+\Delta t$ anındaki bilinmeyen değerler yer almakta ve çözüm kapalı çözüm olarak adlandırılmaktadır.

Çözüm için Lax ve upwind şemaları kullanılmıştır. Upwind şemasının en önemli özelliklerinden birisi akış yönünün etkisini yansıtabilmesidir. Upwind şeması uygulandığında $\phi_w = \phi_w$ ve $\phi_e = \phi_p$ olarak alınmaktadır (Şekil 3) [24].



Şekil 3. Memba fark şeması (Upwind scheme)

(20) denklemi açık formda düzenlendiğinde

$$W_p = \left(\frac{W_E^0 + W_P^0}{2} \right) - (A_E^0 \cdot F_E^0 - A_P^0 \cdot F_w^0) \frac{\Delta t}{\Delta V} + S \Delta t \quad (21)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bu durumda bilinmeyen terimleri içeren W_p matrisi hesaplanabilmektedir. Aynı denklem kapalı formda ise

$$W_p + (A_E \cdot F_E - A_P \cdot F_P) \frac{\Delta t}{\Delta V} = \left(\frac{W_E^0 + W_P^0}{2} \right) + S \Delta t \quad (22)$$

şeklini almaktadır. Denklem takımının her t anında çözülmesiyle bilinmeyen terimler elde edilebilmektedir. (21) veya (22) denklemlerinin çözümünde problemin sınır koşullarının tanımlanmasına dikkat etmek gerekmektedir. Çünkü çözümün sonuçlarını doğrudan etkilemektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışmalar Dokuz Eylül Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarındaki 18,6 m uzunluğunda ve 80 cm genişliğindeki kanalda 109M627 nolu TUBITAK projesi kapsamında yapılmıştır. Taban eğiminin 0,005 olduğu kanalın genel görünümü Şekil 4'de



Şekil 4a. Kanalın sondan görünüşü
(View of channel from downstream)



Şekil 4b. Kanalın genel görünümü
(General view of channel)

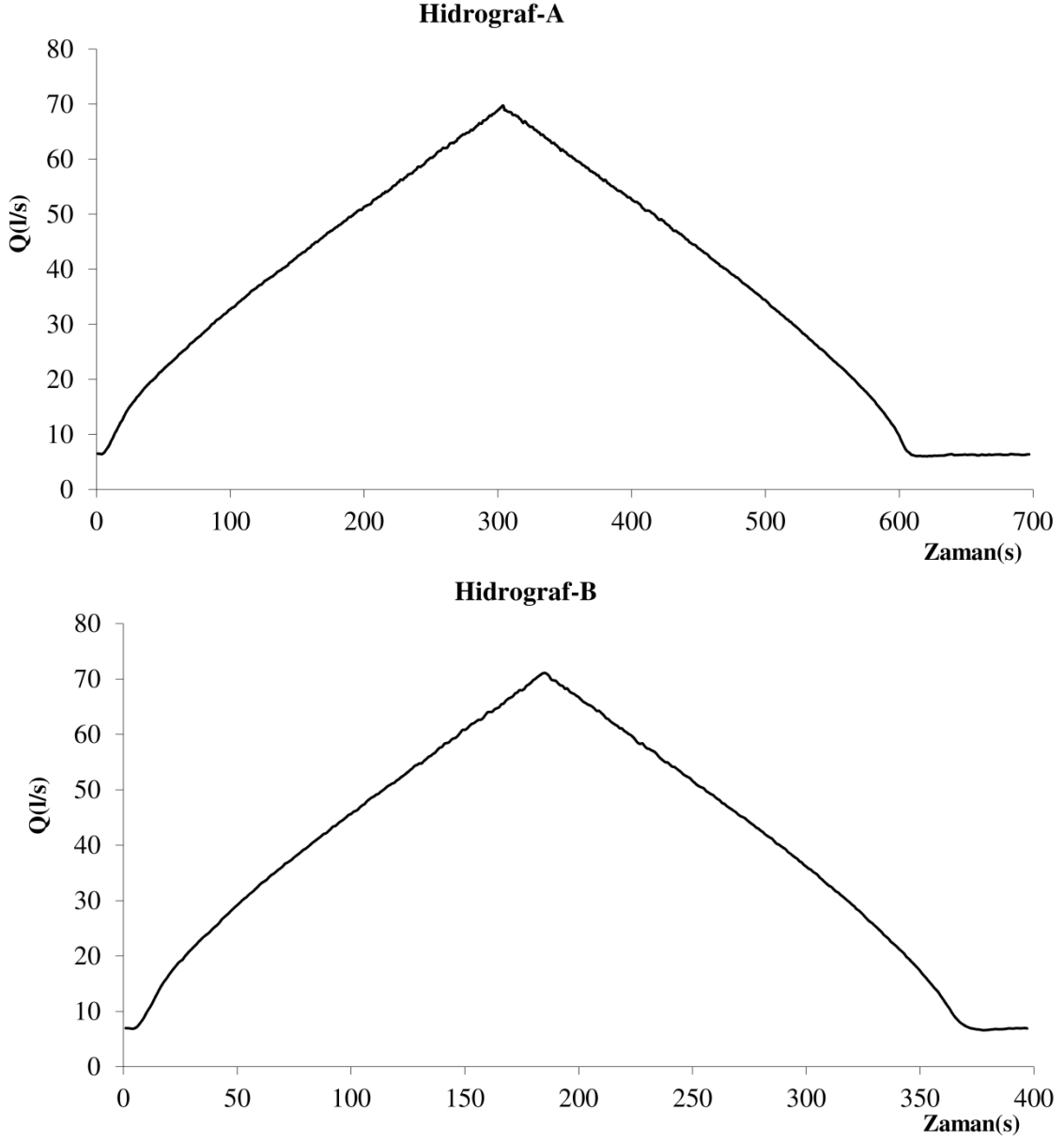
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

İki farklı giriş hidrografi için yapılan sayısal çözümlerde akımın derinliği, hızı ve aynı zamanda tabandaki katı madde kalınlığının değişimi zamana bağlı olarak hesaplanmaktadır. Tabandaki katı madde

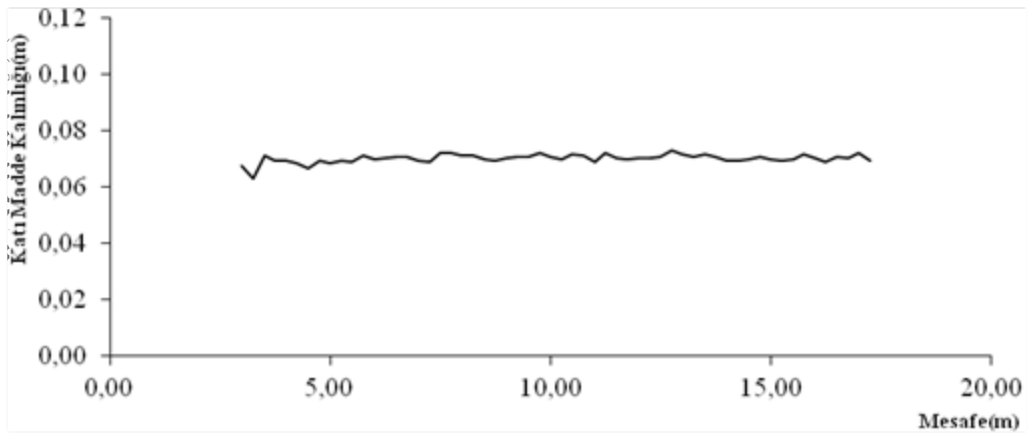
görülmektedir [25]. Kanalın ilk 3 metresi sabit tabandan oluşmuştur. Sabit taban ile aynı kotta taban malzemesi serilmiştir. Kullanılan taban malzemesinin $d_{50} = 3,4$ mm'dir. Kanalda oluşan akım derinliği ve hızlarının ölçümü kanalın başlangıcından itibaren 5, 8, 11 ve 15. metrelerde zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Kanal sonunda serbest düşü bulunmaktadır. Kanala temiz su verilmekte, kanaldan çıkan su- katı madde karışımından elekler aracılığıyla katı madde ayrılmakta ve havuzda toplanan su pompa besleme haznesine iletilmektedir. Ayrıca tabandaki katı maddenin başlangıçta suya doygun olması amacıyla 3,5 cm kadar üzerinde su bulunmaktadır.

Şekil 4'de görülen kanalın girişindeki iki farklı hidrograf için (Şekil 5) yapılan deneylere başlamadan önce tabandaki malzeme düzeltilmiş ve kalınlıkları ölçülmüştür. Deneyler öncesi taban malzemesi kalınlığının kanal boyunca değişimi Şekil 6'da görülmektedir. Taban malzemesi kalınlıkları en kesitte ölçülen değerlerin ortalaması olarak alınmıştır. Deney sonrası kanal tabanındaki katı madde kalınlıkları yeniden ölçülerek katı madde kalınlığında ortaya çıkan değişim belirlenmiştir. katı madde kalınlıkları 80 cm genişliğindeki kanalın 20, 40 ve 60. cm'lerinde ölçülmüş bir boyutlu sayısal çözümde kullanılmak üzere ortalama değerler kullanılmıştır.

kalınlığı ancak deneylerden sonra ölçülebildiği için katı madde kalınlıkları son durum için karşılaştırılmaktadır. Şekil 5'de görülen A hidrografının geçirilmesi durumunda kanalın 8 ve 15. metrelerinde ölçülen ve hesaplanan akım derinlikleri Şekil 7a ve 7b'de görülmektedir.



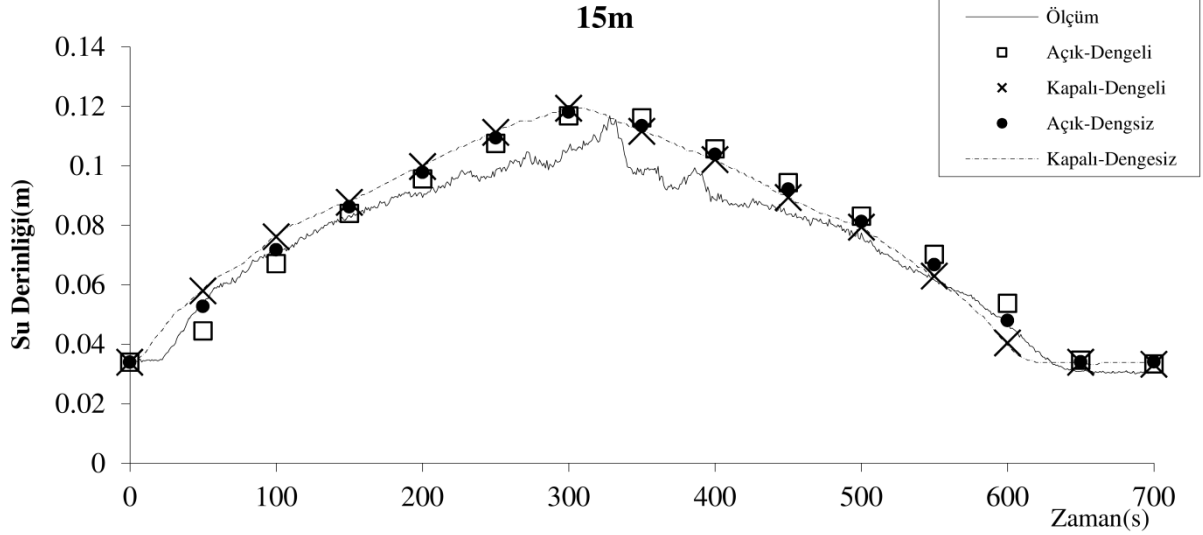
Şekil 5. Giriş hidrografları (Inflow hydrographs)



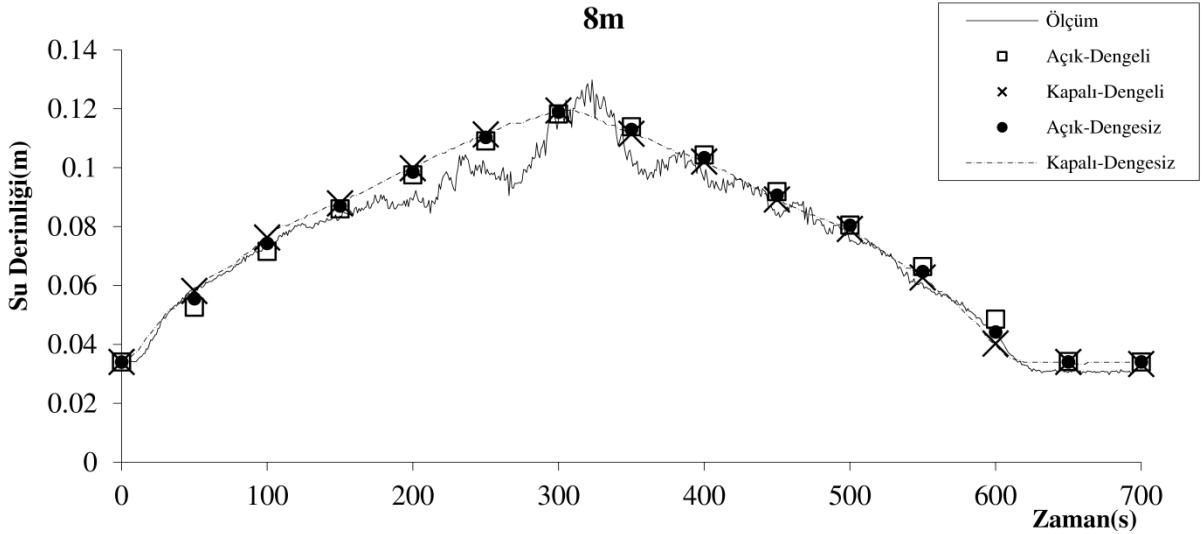
Şekil 6. Başlangıçtaki taban profili (Bed profile at initial condition.)

A hidrografi için kanalın 8 ve 15. metrelerinde ölçülen akım derinlikleri ile hesaplanan değerlerin uyumlu olduğu görülmektedir. katı madde taşınımının dengede olması ve dengede olmaması durumları için yapılan

hesaplarda akım derinliğinin fazla değişmediği özellikle kapalı çözümden birbirine çok yakın değerlerin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7a. A Hidrografi için 8. m'de akım derinlikleri (flow depths in 8.m for Hydrograph A)

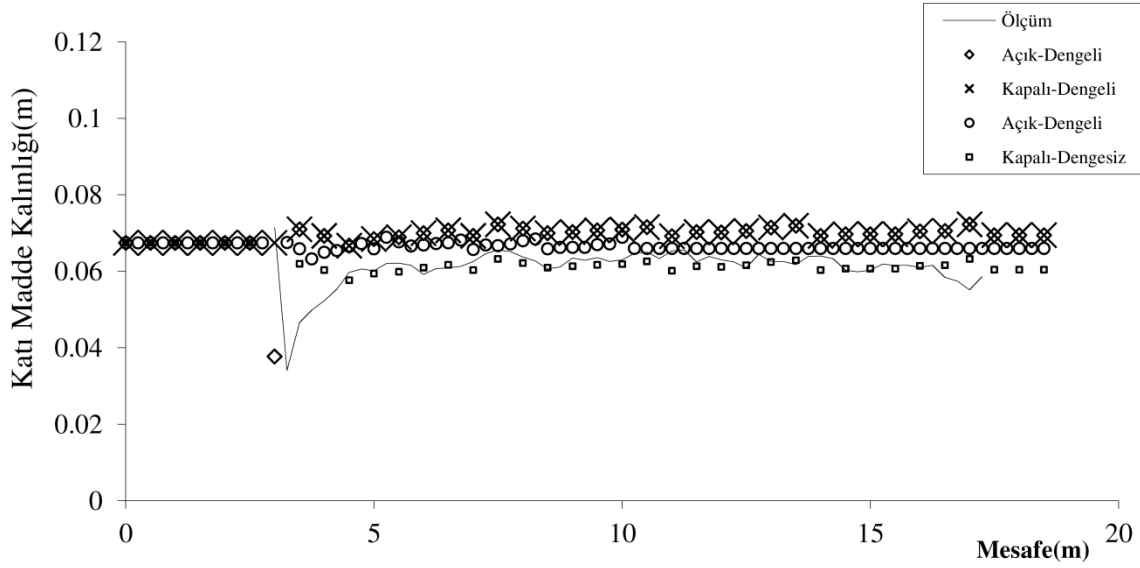


Şekil 7b. A Hidrografi için 15. m'de akım derinlikleri (flow depths in 15.m for Hydrograph A)

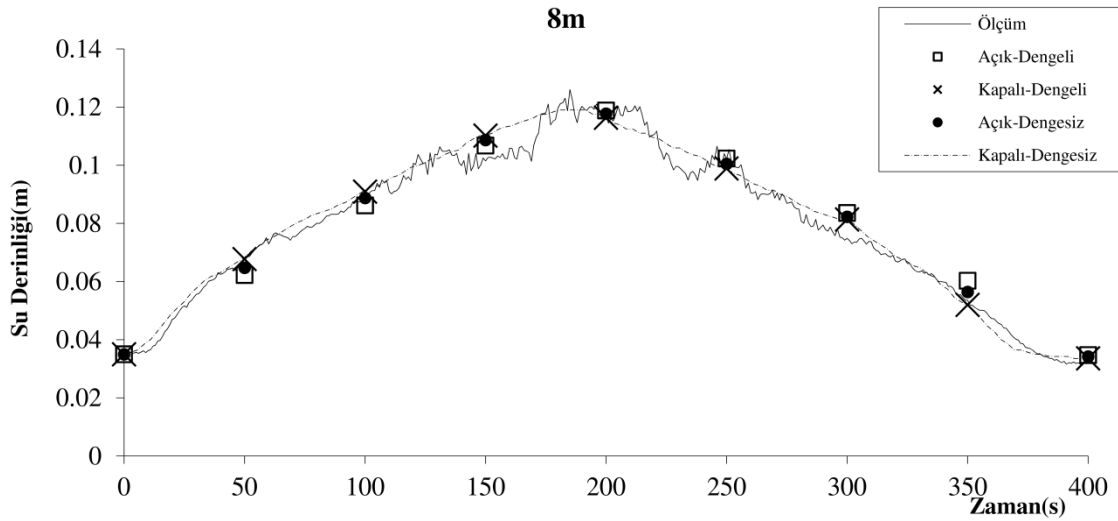
katı madde debisi için tanımlanan ampirik bağıntı hesaplanan katı madde kalınlığı üzerinde oldukça etkilidir. Literatürde verilen ampirik bağıntılar kendi deneysel koşulları için geliştirildiğinden farklı deneysel koşullarda gerçek değerlerden oldukça farklı değerler verebilmektedirler. (10) bağıntısı kullanılarak A hidrografının geçirilmesi sonunda ortaya çıkan katı madde kalınlıkları için hesaplanan değerler ile deney sonunda ölçülen katı madde kalınlıkları Şekil 8'de verilmiştir. Dengede olmayan durum için yapılan hesaplar sonucunda elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 5'de verilen B Hidrografının geçirilmesi durumunda 8 ve 15. metrelerde ölçülen ve hesaplanan akım derinlikleri Şekil 9'da ve taban profili ise Şekil 10'da verilmiştir.

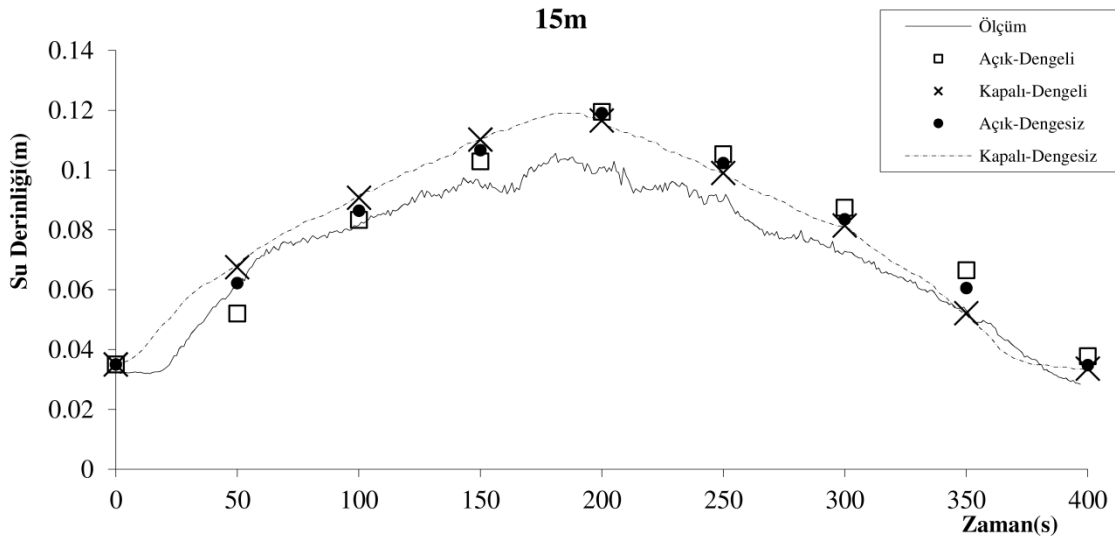
Şekil 8 ve 10 da kanalın 3. metresinde ölçümlerde ve sayısal çözümlerde bir oyulma görülmektedir. Kanalın ilk 3 metresi sabit tabanlı olduğundan bu kesite kanalın önceki kesimlerinden gelen bir katı madde taşınımı söz konusu değildir. Bu nedenle bu kesitte sadece oyulma gerçekleşmektedir. Kanalın 3. metreden sonraki kesimlerinde ise akım doğrultusunda gelerek çökelen ve tabandan ayrılan katı madde nedeniyle oyulma ya da birikme görülebilmektedir.



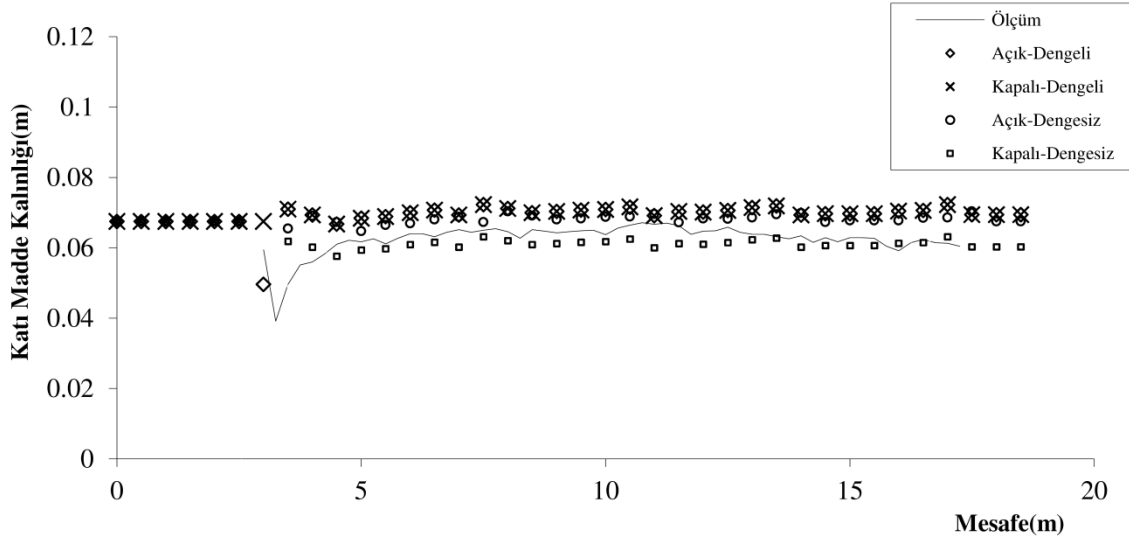
Şekil 8. A Hidrografi için 700. sn'de taban profili (bed profiles at 700 sec. for hydrograph A)



Şekil 9a. B Hidrografi için 8. m'de akım derinlikleri (flow depths in 8.m for Hydrograph B)



Şekil 9b. B Hidrografi için 15. m'de akım derinlikleri (flow depths in 15.m for Hydrograph B)



Şekil 10. B Hidrografi için 400 s'de taban profili (bed profiles at 400 sec. for hydrograph B)

Sayısal çözüm sonucunda elde edilen akım derinlikleri deneysel sonuçlarla uyumludur. Deneylerde geçirilen hidrografların pik değerleri aynı ancak süreleri birbirinden farklıdır. Deney sonucunda gözlenen taban profilleri birbirine benzemekle birlikte, oyulma miktarları da farklı olarak gerçekleşmiştir. Kullanılan farklı yaklaşımlar akım derinliklerini önemli mertebede etkilememiştir. B hidrografının geçirilmesi durumunda da yine dengede olmayan durum için yapılan kapalı çözümün deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmektedir.

katı madde taşınımı probleminin çözümünde genellikle sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmaktadır. Sonlu hacimlerin kullanıldığı çalışmalar az sayıdadır. Kararsız akım koşullarında katı madde taşınımında sonlu hacimler yöntemini kullanan Wu ve Wang (2008)'in çalışmasında akım derinlikleri sayısal model ile doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Ancak açık şemanın kullanıldığı söz konusu çalışmada özellikle katı madde taşınımının yoğun olduğu durumlarda taban profilinin çok iyi modellenemediği görülmektedir [14]. Bu çalışmada ise sonlu hacimler yöntemi farklı yaklaşım ve çözüm şemaları ile kullanılmıştır. Kapalı şema kullanılarak ve dengesiz katı madde taşınımı durumu için yapılan hesapların taban profili ölçümleri ile daha uyumlu olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Dokuz Eylül Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında yapılan deneylerde akım derinlikleri zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Ancak taban profilinin zamana bağlı olarak değişimini ölçmek çok zor olduğundan model sonuçları ile deney sonunda ölçülen taban profili karşılaştırılmıştır.

Kinematik dalga modelinin kullanıldığı bu çalışmanın sonucunda dengede ve dengede olmayan

taşınım kabullerinin akım derinliklerini çok etkilemediği görülmüştür. Hareketli taban profili sonuçları ise kullanılan yaklaşımlardan etkilenmektedir. Ayrıca taban profilinin belirlenmesinde kullanılan ampirik katı madde debisi bağıntıları da katı madde kalınlığını doğrudan etkilemektedir. katı madde taşınımının dengede ve dengede olmayan durumu için yapılan incelemelerde dengede olmayan durum için elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada katı madde taşınımı problemi sonlu hacimler yöntemi ile bir boyutlu olarak incelenmiştir. Sonlu hacimler yöntemi ile elde edilen sonuçların diğer sayısal çözüm yöntemi sonuçları ile de karşılaştırılmasında yarar vardır.

7. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

TUBİTAK tarafından desteklenen 109M637 numaralı projenin bir bölümünü içeren ve yüksek lisans tezi olarak yürütülen bu çalışmada Dokuz Eylül Üniversitesi Hidrolik Laboratuvarında yapılan deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Yazarlar desteği için TUBİTAK'a ve ölçümlerdeki katkılarından dolayı deney ekibine teşekkür ederler.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

h : su derinliği

u : akımın hızı

c : askıda katı maddenin hacimsel konsantrasyonu

p : hareketli tabanın porozitesi

z : hareketli tabanın yüksekliği

q_{lws}, q_{ls} : yanal su ve katı madde debisi

q_{bs}, q_{ss} : hareketli tabanda ve askıda katı madde debisi

E_z : tabandan ayrılan katı madde miktarı

D_c : sudan tabana eklenen katı madde miktarı

C : Chezy katsayısı

v_f : katı maddenin ortalama çökme hızı

κ : katı madde taşıma kapasitesi katsayısı
 d_{50} : tabandaki malzemenin 50% büyüklüğü
 τ_0, τ_* ve τ_{*cr} : kayma gerilmesi, boyutsuz kayma gerilmesi ve kritik kayma gerilmesi
 $\rho_s, \rho_w, \gamma_w, \gamma_s$: suyun ve katı maddenin yoğunluğu ve özgül ağırlıkları
 S_0 : taban eğimini
 σ : taşınım oranı katsayısı
 T_c : akımın taşıma kapasitesi
 \emptyset : toprağın aşınabilme gücü
 θ : ağırlık parametresi
 u_* : kayma gerilme hızı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Guy, H.P., Simons, D.B. ve Richardson, E.V., "Summary of alluvial channel data from flume experiments:1956–1961", **U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.**, 462–I, 96, 1966.
- Langbein, W.B., ve Leopold, L.B., "River channel bars and dunes: Theory of kinematic waves", **U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.**, 422-L, 20, 1968.
- Soni, J.P., "Laboratory study of aggradation in alluvial channels", **J. Hydrol.**, Cilt 49, 87– 106, 1981(a).
- Wathen, S.J., ve Hoey T.B., "Morphological controls on the downstream passage of a sediment wave in a gravel-bed stream", **Earth Surf. Processes Landforms**, Cilt 23, 715– 730, 1998.
- Lisle, T.E., Cui, Y.T. Parker, G. Pizzuto, J.E. ve Dodd A.M., "The dominance of dispersion in the evolution of bed material waves in gravelbed rivers", **Earth Surf. Processes Landforms**, Cilt 26, 1409– 1420, 2001.
- Öner, A.A., "Numerical investigation of flow around a surface mounted and semi-buried elliptical cylinder in steady current", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 24, No 4, 575-582, 2009.
- De Vries, M., "Consideration About Non – Steady Bed Load Transport in Open Channels." **XI Congress, Int Assoc. of Hydraul. Eng. and Res.** St. Petersburg, Russia, 1965.
- Paquier, A. "1-D and 2-D models for simulating dam-break waves and natural floods", **Union Europeenne CADAM meeting**, Wallingford, GBR, Mars 1998.
- Tayfur, G. ve Singh, P., "Kinematic wave model of bed profiles in alluvial channels." **Water Resources Research**, Cilt 42, No W06414, 1-13, 2006.
- Tayfur, G. ve Singh, P. "Kinematic wave model for transient bed profiles in alluvial channels under non equilibrium conditions" **Water Resources Research**, Cilt 43, No W12412, 1-11, 2007.
- Fuladipannah, M., Musavi-Jahromi, S.H., Shafai-Bajestan, M., ve Khosrojerdi, A., "One dimensional flow and sediment transport fully coupled model applicable to sandy river streams" **World Applied Science Journal**, Cilt 9, No 4, 427-433, 2010.
- Fang, H., Chen, M., ve Chen, Q., "One-dimensional numerical simulation of non-uniform sediment transport under unsteady flows", **International Journal of Sediment Research**, Cilt 23, No 4, 316-328, 2008.
- Seo, I.W., Jun, I., ve Choi, H.S., "1-D Finite element model for suspended sediment transport analysis", **World City Water Forum**, 3107-3112, 2009.
- Wu, W., ve Wang, S.Y., "One-dimensional explicit finite-volume model for sediment transport with transient flows over movable beds" **Journal of Hydraulic Research**, Cilt 46 ,No 1, 87- 98, 2008.
- Kaya, B. ve Tayfur, G., "Differential Quadrature Method for Solving Bed Load Sediment Transport", **International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering BCCE**, 19-21 May 2011, EPOKA University, Tirana, Albanian, 2011.
- Gharehbaghi, A. ve Kaya, B. "Simulation of bed changes in rivers with finite volume method by kinematic wave model", **International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)**, Cilt 3, No 3, 33-46, 2011
- Singh, V.P., "Kinematic Wave Modeling in Water Resources" **Surface Water Hydrology**, John Wiley, Hoboken, N. J, 1996.
- Ching, H.H., ve Cheng, C.P., "Study of river bed degradation and aggradation by the method of characteristics " **J. Hydraul. Eng.**, Cilt 5, 1 – 54, 1964.
- Lai, C., "Modeling alluvial-channel flow by multimode characteristic method", **J. Eng. Mech.**, Cilt 117, 32– 53, 1991.
- Pianese, D., "Comparison of different mathematical models for river dynamics analysis", **paper presented at International Workshop on Floods and Inundations related to Large Earth Movements**, Trent Univ., Trent, Italy, 4 – 7 Oct, 1994.
- Velikanov, M.A., "Gravitational theory of sediment transport (in Russian) ", **J. Sci. Soviet Union**, 4, 1954.
- Engelund, F. ve Fredsoe, J., "A sediment transport model for straight alluvial channels", **Nordic Hydrology**, Cilt 7, 293-306, 1976.
- Yang, C.T., "**Sediment Transport Theory and Practice**", McGraw-Hill, New York. 1996.
- Versteeg, H.K., ve Malalasekera, W. **An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method (1th ed.)**, New york: Longman scientific & technical., 257 ,1995.
- Bombar, G. **Experimental and Theoretical Study of Sediment Transport in Unsteady Flows**. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009