

Baraj Yıkılması Probleminin Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği Yöntemi Kullanılarak Sayısal Olarak İncelenmesi

Ali Ersin Dinçer

ODTÜ İnş. Müh. Böl. K3-109

Tel: 0 312 210 2476

E-Posta: aliersin@metu.edu.tr

Zafer Bozkuş

ODTÜ İnş. Müh. Böl. K3-210

Tel: 0 312 210 5409

E-Posta: bozkus@metu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının hareketi sayısal olarak incelenmiştir. Başlangıçta, iki boyutlu bir su sütunu, kapak arkasında hidrostatik basınç altında durgun halde bulunmaktadır. Kapağın ani olarak kaldırılması durumu Lagrange yaklaşımı kullanan Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği (DTH) yöntemi ile modellenmiştir. Bu model kullanılarak yapılan zamana bağlı su yüzü profili hesaplamalarında bulunan sonuçlar, Navier-Stokes denklemlerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çözen bir paket programdan ve mevcut bir deney çalışmasından elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği (DTH), baraj yıkılması, sayısal modelleme

Giriş

Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının hareketi önemli bir araştırma konusudur. Barajlar şiddetli depremler, yapısal problemler, tasarımdaki eksiklikler veya bakım eksiklikleri gibi doğal veya doğal olmayan sebeplerden zarar görebilir ve yıkılabilir (Bell ve diğ., 1992). Acil durum planları için baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının hızının ve derinliğinin doğru hesaplanması çok önemlidir. Bu konudaki çalışmalar 19. Yüzyılda başlamıştır. Ritter (1892) ani baraj yıkılmasını modellemek üzere, dikdörtgen bir su sütunu için su yüzü profilinin gelişimini hesaplayan teorik bir çözüm üretmiştir. Ritter bu çalışmada türbülans etkisini dikkate almamıştır ve su haznesinin ve kanalının uzunluğunu sonsuz olarak varsaymıştır. Dressler (1952) zemindeki sürtünme kaybının etkisini incelemiştir. Dressler ve Ritter'in sonuçları diğer araştırmacıların bulduklarıyla doğrulanmıştır (Pohle, 1950; Whitham,

1955). Martin ve Moyce (1952) kuru mansap yatağı durumunu incelemek için bir çok deney yapmışlardır. Dalga cephesi hızının, ilk su sütunu yüksekliğinin kare köküyle orantılı olduğu bulunmuştur. Stoker (1957), Ritter'in analitik çalışmasını ıslak mansap yatağı durumu için geliştirmiştir. Stansby ve diğ. (1998) baraj yıkılması problemini incelemek üzere, ıslak ve kuru mansap yatağı için, bir çok deney yapmışlardır. Islak mansap yatağı durumunda, baraj yıkıldıktan hemen sonra, mantara benzeyen su profilinin olduğu gözlemlenmiştir. Baraj yıkılması problemini inceleyen deneysel çalışmalar, genellikle su yüzü profilini incelemek için yapılmıştır (Miller ve Chaudhry, 1989; Aziz, 2000; Ozmen-Cagatay ve Kocaman, 2010). Aleixo ve diğ. (2011) akışkan taneciklerini izleyerek akımın hızını belirleyen bir (particle tracking velocimetry) yöntemi kullanarak iki boyutlu baraj yıkılması problemi için, su hızı profillerini hesaplamışlardır. Günümüze dek baraj yıkılması problemini inceleyen bir çok deneysel çalışma olmasına rağmen, baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının dinamiğini inceleyen nümerik çalışma çok fazla bulunmamaktadır (L. Lobovský ve diğ., 2014). Baraj yıkılmalarının matematiksel modeli için, genel olarak Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemler, düşey doğrultudaki ivme bileşeni ihmal edilerek, sığ-su veya Saint-Venant denklemlerine indirgenebilir (Kocaman ve Güzel, 2011). Literatürde, sığ-su denklemleri karakteristikler yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmüş olup, bir ve iki boyutlu matematiksel modeller geliştirilmiştir (Elliot ve Chaudhry, 1992; Fennema ve Chaudhry, 1989).

Saint-Venant denklemleri Euler yöntemini kullanmaktadır. Su yüzü profilini belirlemek Euler yaklaşımı ile çok kolay değildir. Bu nedenle, Lagrange yöntemi kullanan Düzleştirilmiş Tanecik Hidrodinamiği (DTH) yöntemi baraj yıkılması sonucu oluşan su yüzü profillerinin incelenmesinde büyük avantaj sağlar. DTH yöntemi ilk olarak astrofizik problemleri için geliştirilmiştir. Fakat Monaghan (1994), bu yöntemi açık kanal problemlerine uyarlamıştır. DTH yönteminde, su tanecikleri hesaplama alanında özgür olarak hareket eder ve bu yöntemde kütle kesin olarak korunur (Liu ve Liu, 2003). DTH yönteminde Navier-Stokes denklemleri çözülür. Baraj yıkılması problemi DTH yöntemi ile modellenirken, genellikle su, çok az sıkıştırılabilir olarak kabul edilir (Colicchio ve diğ., 2002). DTH yöntemi ile ilgili ayrıntılı bilgi ikinci kısımda verilmiştir.

Bu çalışmada, Özmen-Çağatay ve Kocaman'ın (2010) yaptığı deneysel çalışmalar DTH yöntemi kullanarak modellenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen su yüzü profilleri, Özmen-Çağatay ve Kocaman'ın çalışmalarında kullanılan ve Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) denklemlerini k-ε türbülans yöntemi ile çözen bir paket programdan ve DTH yönteminden elde edilen su yüzü profilleri ile karşılaştırılmıştır.

Matematiksel Model

DTH denklemleri hidrodinamik problemleri için geliştirilmiş olup, yoğunluk ve hız gibi değişkenler, kısmi diferansiyel denklem olarak verilir. DTH'nin formüle edilmesinde iki tane önemli adım vardır. Birincisi integral gösterimi ya da kernel yaklaşımı, ikincisi ise parçacık yaklaşımıdır (Liu ve Liu, 2003). Aşağıda DTH yönteminde kullanılan genel formül verilmiştir.

$$f(x) = \int f(x')\delta(x - x')dx' \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlikte f, bir pozisyon vektörünün, x fonksiyonu ve $\delta(x-x')$ Dirac delta fonksiyonudur (Liu ve Liu, 2003). Bu integral gösterimi, Dirac delta fonksiyonunu, kernel fonksiyonu olarak değiştirerek, $W(x-x', h)$ ve bazı dönüşümler yapılarak aşağıdaki toplam şeklinde ifade edilebilir. Bu dönüşümler Liu ve Liu'nun (2003) çalışmalarından takip edilebilir.

$$f(x) = \sum \frac{m_j}{\rho_j} f_j W(x - x_j) \quad (2)$$

2. eşitlikte $f(x)$ ilgili parçacığın herhangi bir fonksiyonu, m_j ilgili parçacığın çevresindeki herhangi bir parçacığın kütlesi, ρ_j ilgili parçacığın çevresindeki herhangi bir parçacığın yoğunluğu, $W(x-x_j)$ ise Kernel fonksiyonudur. Literatürde bir çok Kernel fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu çalışmada kübik kernel fonksiyonu kullanılmış olup, 3. eşitlikte formülü verilmiştir.

$$W(R) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

3. eşitlikte bir boyut için $\alpha_d = 1/h$, iki boyut için $\alpha_d = 15/7\pi h^2$ ve üç boyut için $\alpha_d = 3/2\pi h^3$ olarak değer alır. R ise iki parçacık arasındaki göreceli mesafedir.

$$R = \frac{r}{h} = \frac{|x - x'|}{h} \quad (4)$$

2. eşitlikten sanki bütün parçacıklar arasında etkileşim varmış gibi anlaşılabilir. Fakat, Kernel'in etkisi, çapsal olarak $2h$ ile sınırlıdır. Bu h mesafesine kernel fonksiyonun yumuşatma uzunluğu (smoothing length) denir.

Kütle ve momentumun korunumu parçacık biçiminde aşağıdaki şekillerde yazılabilir (Monaghan, 1992). 5. eşitlik kütle korunumunu, 6. eşitlik ise momentum korunumunu gösterir.

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j (u_i - u_j) \nabla_i W_{ij} \quad (5)$$

$$\frac{du_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{P_i}{\rho_i^2} + \frac{P_j}{\rho_j^2} + \pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + g \quad (6)$$

Bu eşitliklerde u, parçacıkların hızı, P parçacıkların basıncı, m parçacıkların kütlesidir.

$$\nabla_i W_{ij} = \nabla_i W(x_i - x_j) = \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} i + \frac{\partial W_{ij}}{\partial y_i} j \quad (7)$$

π_{ij} ise viskozite etkisini gösteren ampirik bir terimdir ve eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

$$\pi_{ij} = - \frac{\alpha \mu_{ij} \bar{c}_{ij}}{\bar{\rho}_{ij}} \quad (8)$$

8. eşitlikte α ampirik bir katsayı olup 0.01 ile 0.1 arasında alınır. Bu çalışmada 0.01 olarak alınmıştır. $\mu_{ij} = h(u_i - u_j)(x_i - x_j) / (r_{ij}^2 + 0.001h^2)$ olarak hesaplanır. Yapay viskozite ve gerçek viskozite aynı anda kullanılmıştır. Yapay viskozite sıvı parçacıkların birbiri içine girmesini engellemek için gereklidir. Yapay viskozite ile ilgili ayrıntılı bilgi için Liu ve Liu'nun (2003) çalışması incelenebilir.

DTH yönteminde akışkan az bir şekilde sıkıştırılabilir olarak kabul edilir. 6. eşitlikte kullanılan parçacık basınçları bu kabul sayesinde, yoğunluğa bağlı bir şekilde bulunur. Her bir parçacığın basıncını hesaplamak için aşağıdaki durum denklemi kullanılmıştır.

$$P = B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (9)$$

9. eşitlikte $\gamma=7$ olarak alınmıştır (Monaghan, 1994). B katsayısının formülü ise aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir.

$$B = \frac{200gH}{\rho\gamma} \quad (10)$$

DTH yönteminde sınır koşulları farklı yöntemlerle belirlenebilir. Bu çalışmada tam sınırın bulunduğu yere parçacıklar yerleştirilmiştir. Bu sınır parçacıkları, sıvıyı oluşturan parçacıklara merkezi kuvvet uygularlar ve bu sayede sıvı parçacıkların sınıra girmesi veya sınırın dışına çıkması engellenir. Uygulanan kuvvetin büyüklüğü, sıvı parçacık sınıra yaklaştıkça artar. Aralarında r mesafesi bulunan sınır ve sıvı parçacığı için, sınır parçacığının sıvı parçacığına uyguladığı kuvvet, 11. Eşitlik yardımıyla hesaplanır (Monaghan, 1994).

$$f(r) = \frac{D}{r} \left(\left(\frac{r_0}{r} \right)^{p_1} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^{p_2} \right) \quad (11)$$

Bu eşitlikte eğer $r > r_0$ ise kuvvet değeri sıfır alınır ve r_0 değeri sınır ve sıvı parçacıklarının arasında bulunan başlangıç mesafesidir. Sınır parçacıkları, daha kuvvetli bir engel yaratmaları amacıyla daha sık yerleştirilir. Bu çalışmada iki sınır parçacığı arasındaki mesafe, iki sıvı parçacığı arasındaki mesafenin yarısı olarak alınmıştır. Literatürde p_1 ve p_2 katsayıları için farklı değerler önerilmiştir. Bu çalışmada p_1 değeri 12, p_2 değeri ise 6 olarak kabul edilmiştir.

DTH eşitliklerinde açık (explicit) yöntemler kullanılır. Bu çalışmada Leap-Frog algoritması kullanılmıştır (Liu ve Liu, 2003). Zaman adımı Courant durumu (CFL) ile kontrol edilir. CFL ile ilgili ayrıntılı bilgi için Anderson'un (1995) veya Hirsch'un (1988) çalışmaları incelenebilir.

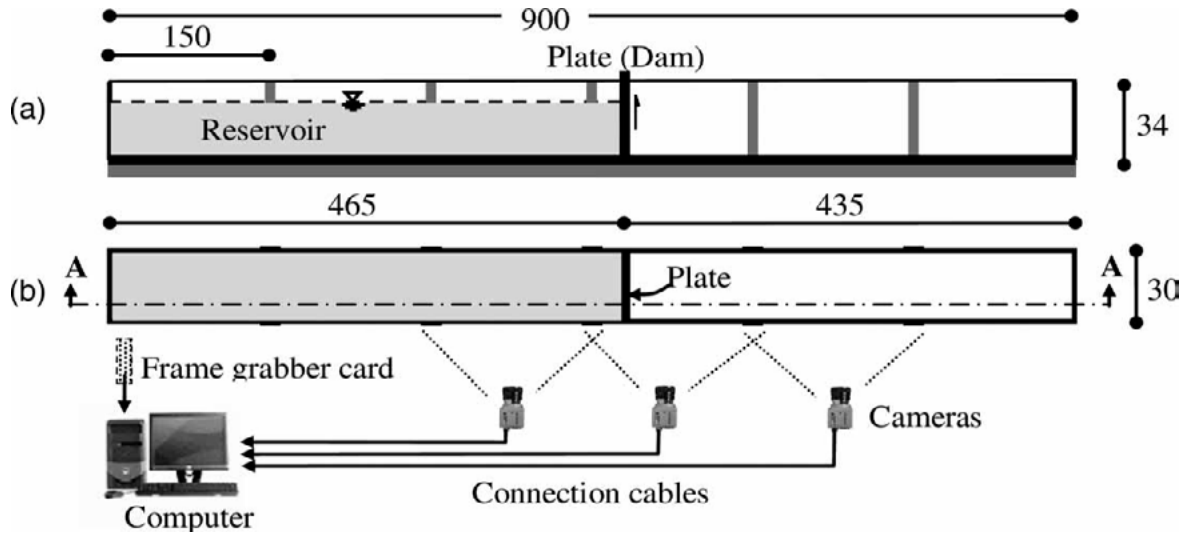
Genel olarak bu kısımda anlatılan eşitlikler ve yöntemler kullanılarak, FORTRAN dilinde bir bilgisayar kodu oluşturulmuştur. Sayfa sınırlamasından ötürü, oluşturulan kod ile ilgili daha fazla bilgi verilememektedir, fakat, ayrıntılı bilgi yazarların çıkarmayı planladıkları diğer makalelerde verilecektir.

Deneysel ve Sayısal Sonuçlar

Deney Düzenegi

Oluşturulan bilgisayar kodundan elde edilen sonuçlar, Özmen-Çağatay ve Kocaman'ın (2010) yaptığı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu kısımda, deney düzeneginden kısaca bahsedilecektir. Daha ayrıntılı bilgi Özmen-Çağatay ve Kocaman'ın (2010) çalışmasında bulunmaktadır.

Deneyler 9 m uzunluğunda, 0.30 m genişliğinde, ve 0.34 m yüksekliğinde yatay dikdörtgen bir kanalda yapılmıştır. Baraj için koyulan plaka, kanal girişinden 4.65 m uzaklıkta bulunmaktadır. Kanalın geometrisi ve boyutları şekil-1 'de gösterilmiştir (Özmen-Çağatay ve Kocaman, 2010). Deneylerde başlangıç hazne yüksekliği $h_0 = 0.25$ m olarak alınmıştır.



Şekil-1 Deney düzenegi. (a) A-A kesiti, (b) plan (cm)

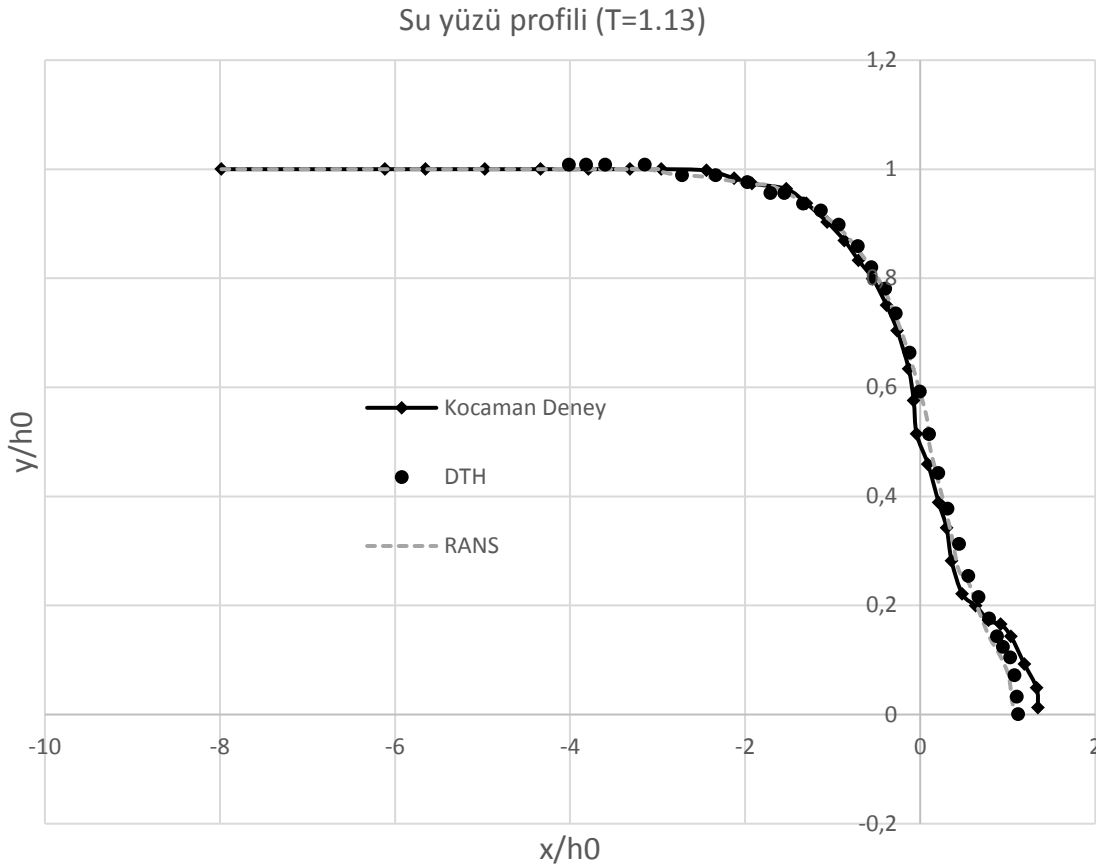
Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Hem DTH yönteminde hem de paket program modelinde kapağın ani olarak kaldırıldığı varsayılmıştır. Deneysel modelde kapak 0.06 s ile 0.08 s arasında kaldırılmıştır. Lauber ve Hager'in (1988) çalışmalarına göre bu süre için "ani kaldırma" denebilir. DTH yöntemi için sıvı parçacıkları arasındaki mesafe 0.01 m olarak alınmıştır. 11625 adet sıvı parçacığı oluşturulmuştur. Bir parçacığın kütlesi x ve y yönündeki parçacıklar arasındaki mesafe (iki yönde de 0.01 m) ile parçacığın yoğunluğunun (1000 kg/m^3) çarpımından bulunur. Kernel için gereken yumuşatma uzunluğu iki parçacık arasındaki mesafeye eşit alınmıştır (0.01 m). Sol duvarda 50, sağ duvarda 50 ve kanal tabanında 1802 adet olmak üzere, toplamda 1902 adet sınır parçacığı oluşturulmuştur. Sınır parçacıkları arasındaki mesafe 0.005 m olarak alınmıştır. DTH yönteminde zaman

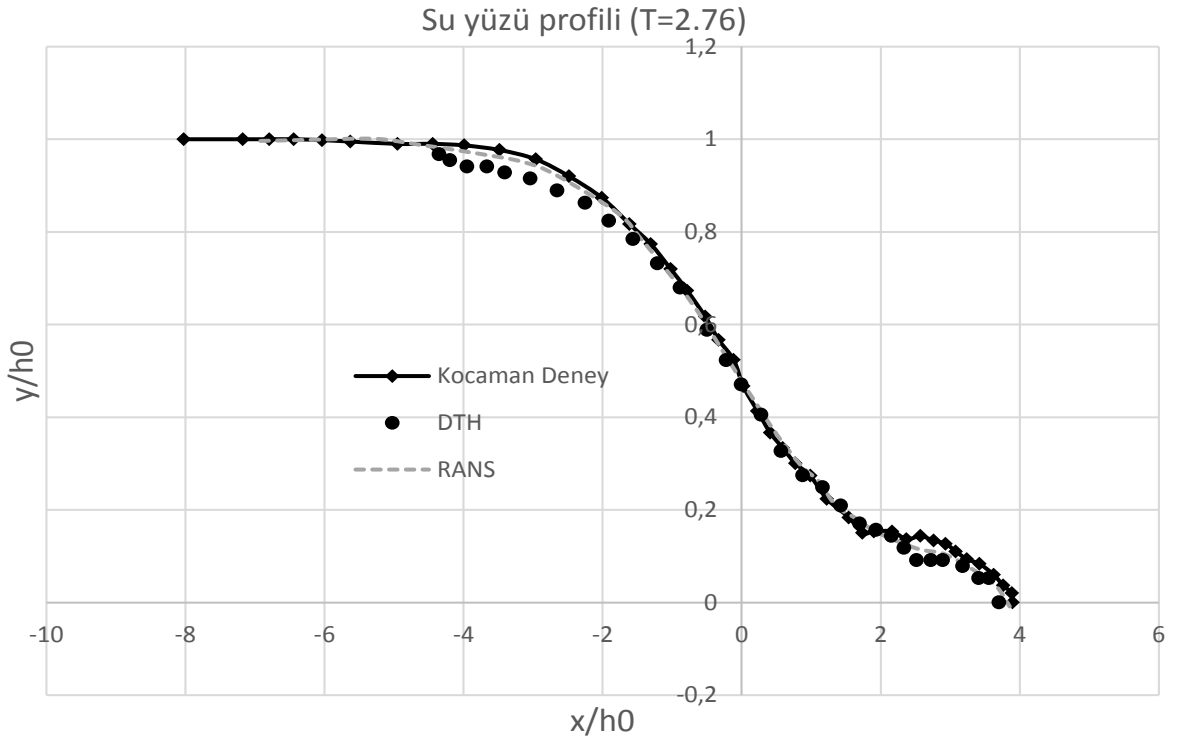
adımı, sonlu elemanlar yöntemini kullanan yöntemlerdeki zaman adımından oldukça küçük olmak durumundadır. Bu deney için alınan zaman adımı $dt=0.00003$ saniyedir.

Kuru mansap yatağı için deneysel ve sayısal sonuçlar Şekil 2-6 arası verilmiştir. Deney ve FLOW-3D sonuçları Özmen-Çağatay ve Kocaman'ın (2010) çalışmasından alınmıştır. FLOW-3D ile Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) denklemleri çözülmektedir. FLOW-3D modelinde hücre boyutu 5 mm ve kare olarak alınmıştır ve 106800 hücre kullanılmıştır (Özmen-Çağatay ve Kocaman, 2010). Özmen-Çağatay ve Kocaman sayısal modellerinde k- ϵ türbülans yöntemi kullanmışlardır. LaRocque'a (2013) göre, k- ϵ türbülans yöntemi baraj yıkılması problemleri için çok iyi sonuçlar vermemektedir. Fakat k- ϵ türbülans yöntemi ile bulunan su yüzü profilleri, bu çalışma için deneysel sonuçlarla yakındır. Sonuçlar boyutsuz olarak verilmiştir. Zaman terimi $T=t(g/h_0)^{1/2}$ kullanılarak boyutsuz hale getirilmiştir.

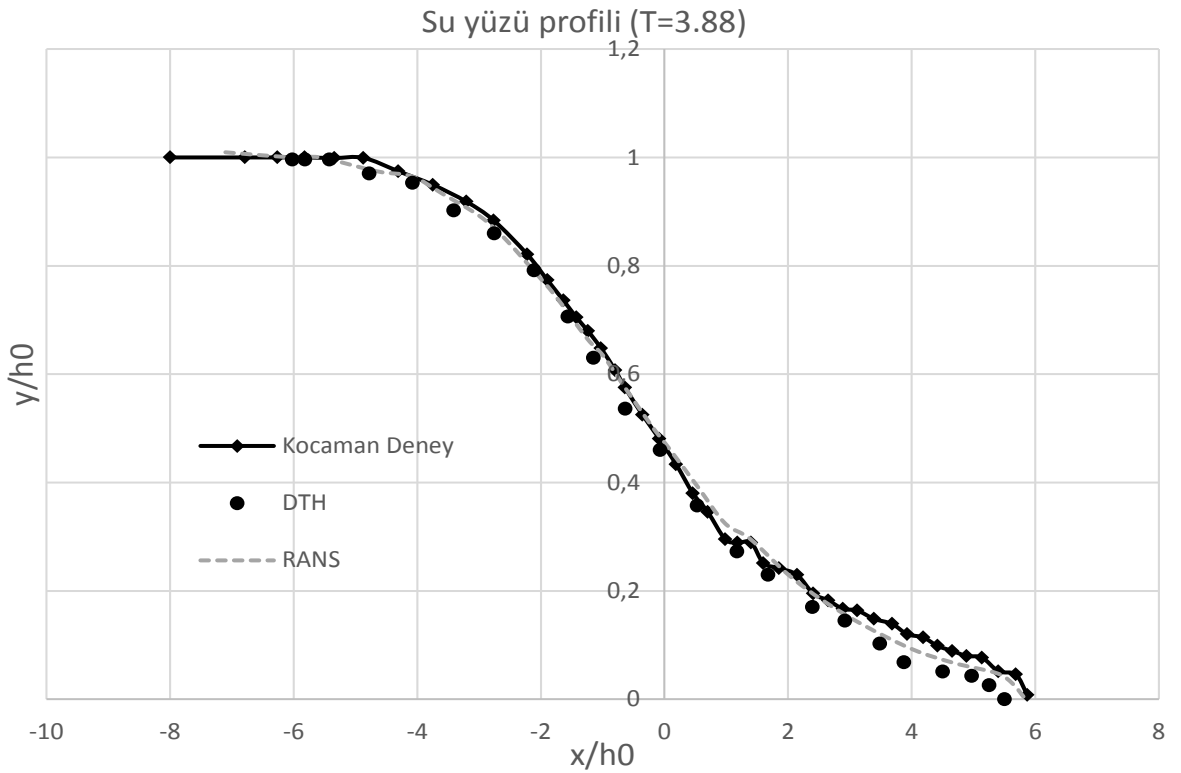
Şekil 2-6 arasında baklava simgesi ile düz çizgi Kocamanın deney sonuçlarını, çizgisiz yuvarlak simge DTH yönteminden elde edilen sonuçları ve kesikli çizgi ise FLOW 3D'den elde edilen sonuçları göstermektedir. Şekillerden görüleceği üzere deneysel ve sayısal sonuçlar uyum içindedir. $T=2.76$ ve $x/x_0= -2$ ile -4 arasında iken, DTH yönteminden elde edilen sonuçlar deney sonuçlarından biraz farklılık göstermektedir.



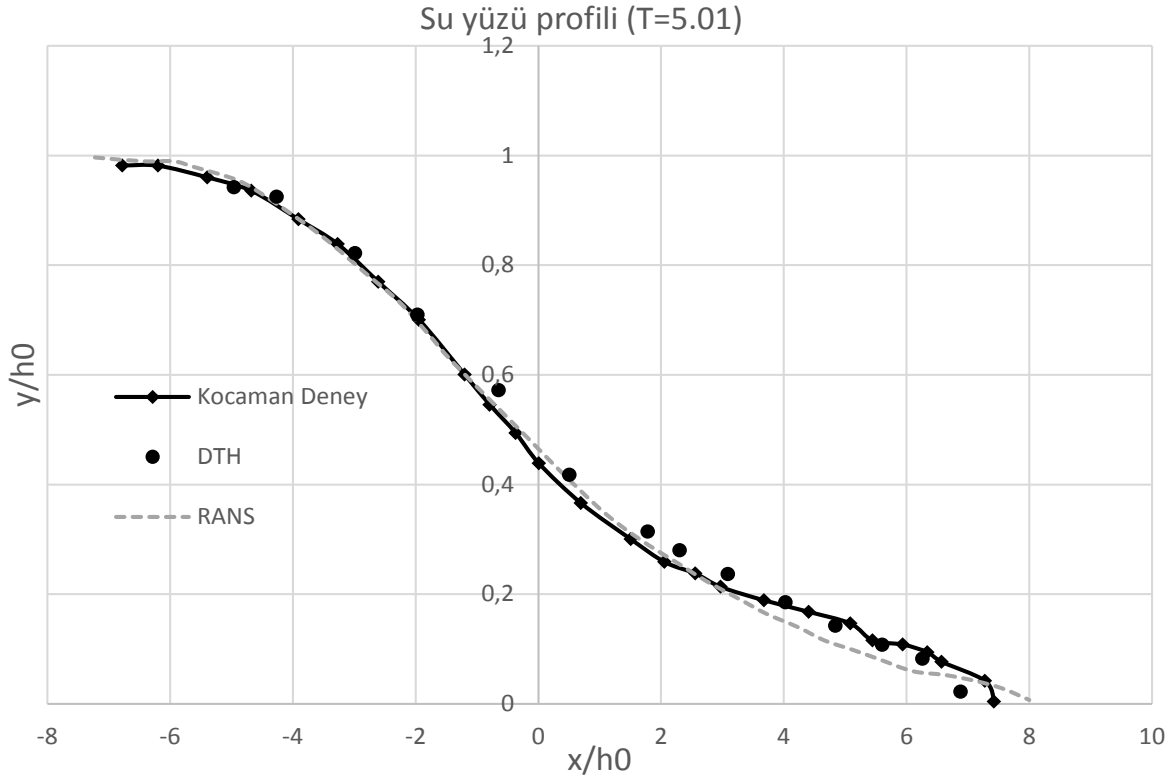
Şekil 2 Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması ($T=1.13$)



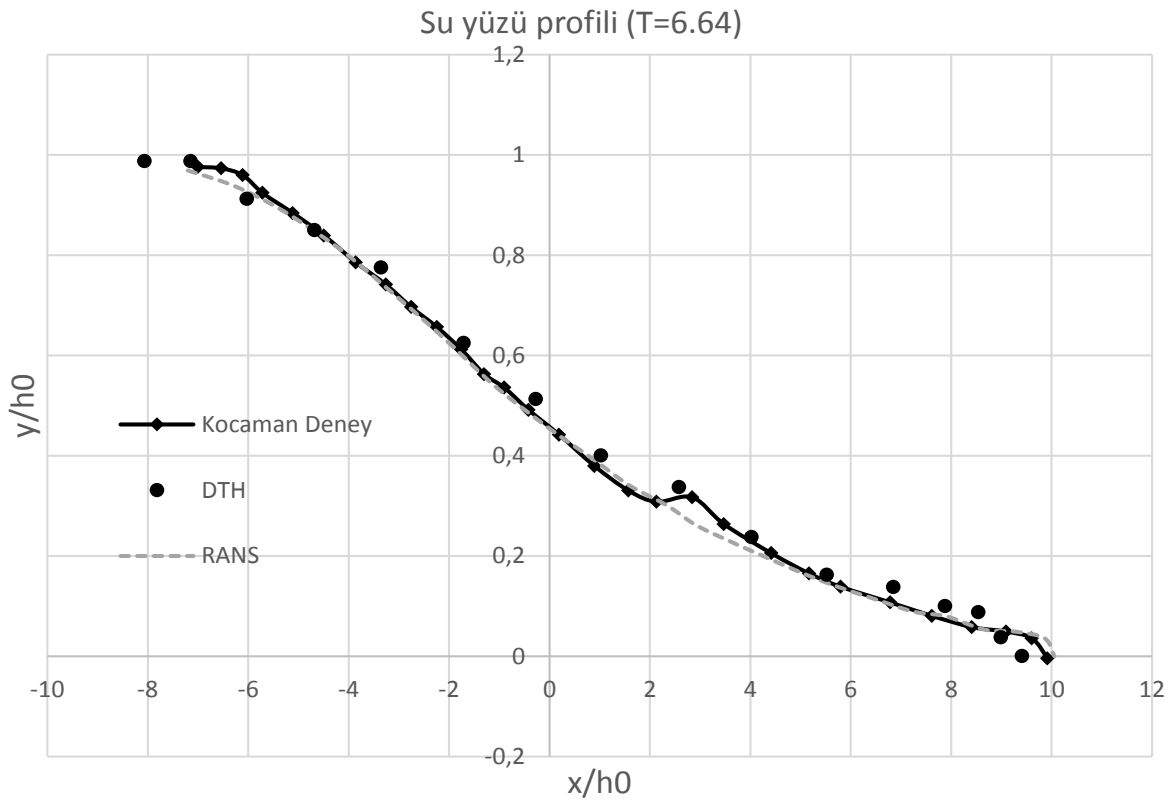
Şekil 3 Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması (T=2.76)



Şekil 4 Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması (T=3.88)



Şekil 5 Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması (T=5.01)



Şekil 6 Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması (T=6.64)

Sonuçlar

Bu çalışmada diğer CFD yöntemlerine göre daha yeni olan DTH yöntemi ile kod yazılmış olup, bu kod Özmen-Çağatay ve Kocaman'ın (2010) baraj yıkılması için yaptığı çalışmaya uyarlanmıştır. DTH yönteminde kullanılan sıvı ve sınır parçacıkları ara mesafesi, yumuşatma uzunluğu veya zaman adımı gibi parametreler, literatürde önerilen değerlere uygun olarak alınmıştır. Sıvı ve sınır parçacıkları arasındaki mesafeyi azaltmak sonuçları az da olsa deneysel sonuçlara yaklaştırabilir. Fakat, sıvı ve sınır parçacıkları arasındaki mesafeyi azaltmak, simülasyonda kullanılan tanecik sayısını arttıracığından, kodun çalışma süresini önemli ölçüde arttıracaktır. Yumuşatma uzunluğu ilk durumdaki sıvı parçacıkları arasındaki mesafeye yakın bir değer alınır. Bu değeri değiştirmek sonucu etkilemeyecektir. Son olarak zaman adımı Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) durumuna göre belirlenmiş olup daha büyük alınamamaktadır. Daha küçük alındığında ise sonuçlar değişmemektedir. DTH yönteminde en büyük sorun, açık yöntem kullanıldığı için zaman adımının çok küçük alınması gerekliliğidir. Fakat, paralel hesaplamalarla bu sorunun üstesinden gelinebilir. DTH yönteminden elde edilen sonuçlar deneyden ve RANS denklemlerini çözen paket programdan elde edilen sonuçlarla uyum içindedir. DTH yöntemi, özellikle su yüzü profillerinin takibi için çok avantajlı bir yöntemdir. (Liu ve Liu, 2003). DTH yöntemi, özellikle açık kanal problemleri için, su yüzü profillerini elde etmek açısından, Euler yaklaşımı kullanan diğer nümerik yöntemler yerine tercih edilebilir.

Kaynaklar

- Aleixo, R., Soares-Fraza, S., and Zech, Y. (2011). “Velocity-field measurements in a dam-break flow using a PTV Voronoi technique.” *Exp. Fluids*, 50(6), 1633–1649.
- Anderson, J. D. (1995). “Computational fluid dynamics: the basics with applications”. Mc Graw-Hill.
- Aziz, M. (2000). “Dam breaching model.” *Proc., Joint Conf. on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, ASCE, Minneapolis*, 56–56.
- Bell, S., Elliot, R., and Chaudhry, M. H. (1992). “Experimental results of two-dimensional dam-break flows.” *J. Hydraul. Res.*, 30(2), 225–252.
- Colicchio G, Colagrossi A, Greco M and Landrini M. (2002). “Free surface flow after a dam break”. *Ship Technol.Res.* 49:95–104
- Dressler, R. (1952). “Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions.” *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U. S.)*, 49(3), 217–225.
- Elliot, R., and Chaudhry, M. (1992). “A wave propagation model for twodimensional dam-break flows.” *J. Hydraul. Res.*, 30(4), 467–483.
- Fennema, R., and Chaudhry, M. (1990). “Explicit method for 2-D transient free-surface flows.” *J. Hydraul. Res.*, 116(8), 1013–1034.

Hirsch C. (1988). “Numerical Computation of Internal and External Flows”. Volume 1, Wiley-Interscience publication.

Kocaman, S. ve Güzel, H. (2011). “Baraj yıkılması taskin dalgasi yayilmasinin 3 boyutlu deneysel ve nümerik karsilastirilmesi”. e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences, 1A0162, 6, (1), 406-414.

LaRocque, L., Imran, J., and Chaudhry, M. (2013). “Experimental and numerical investigations of two-dimensional dam-break flows.” J. Hydraul. Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000705, 569–579

Lauber, G., Hager, W.H. (1998). “Experiments to dam-break wave: Horizontal channel”. J. Hydraulic Res. 36(3), 291–308.

Liu, G.R., Liu, M.B., (2003). “Smoothed Particle Hydrodynamics: a Meshfree Particle Method”. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

Lobovský, L., Botia-Vera, E., Castellana, F., Mas-Soler J. and Souto-Iglesias, A. (2014). “Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break”. Journal of Fluids and Structures. 48, 407–434

Martin, J.C., Moyce, W.J., (1952). “PartIV. An experimental study of the collapse of liquid columns on a rigid horizontal plane”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 244 (882), 312–324.

Miller, S., and Chaudhry, M. H. (1989). “Dam-break flows in curved channel.” J. Hydraul. Eng., 115(11), 1465.

Monaghan, J.J., (1992). “Smoothed particle hydrodynamics”. Annual Review of Astronomy and Astrophysics 30, 543–574.

Monaghan, J.J., (1994). “Simulating free surface flows with SPH”. Journal of Computational Physics 110, 399 – 406.

Ozmen-Cagatay H, Kocaman S (2010). “Dam break flows during initial stage using SWE and RANS approaches”. Journal of Hydraulic Research 48(5):603-611.

Pohle, F.V., (1950). “The Lagrangian equations of hydrodynamics: solutions which are analytic functions of the time (Ph.D. thesis)”. New York University.

Ritter, A. (1892). “Die fortpflanzung de wasserwellen.” Z. Ver. Dtsch. Ing., 36(33), 947–954 (in German).

Stansby, P., Chagin, A., and Barnes, T. (1998). “The initial stages of dam-break flow.” J. Fluid Mech., 374, 407–424.

Stoker, J. (1957). “Water waves”. Interscience/Wiley, New York.

Whitham, G. (1955). “The effects of hydraulic resistance in the dam-break problem.” Proc. R. Soc. London, 227(1170), 399–407.