



Açık kanal akımında hidrolik pürüzlü taban üzerinde ağır tanelerin boyuna dispersiyonu

Selçuk DEMİRBAŞ*

İstanbul Teknik Üniversitesi, FBE Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı, İstanbul
sdemirbas@itu.edu.tr ORCID: 0000-0003-2407-5966, Tel: (532) 486 81 53

V. Ş. Özgür KIRCA

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
kircave@itu.edu.tr ORCID: 0000-0003-1374-5039 Tel: (212) 285 70 06

M. Sedat KABDAŞLI

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
kabdaslis@itu.edu.tr ORCID: 0000-0003-0663-2378 Tel: (212) 285 37 33

Geliş: 13.07.2018, Kabul Tarihi: 25.08.2017

Öz

Bu çalışmada, serbest yüzey akımında, hidrolik pürüzlü ve cilalı taban üzerinde, çeşitli ağırlıklardaki taneciklerin boyuna dispersiyonunun Lagrangian bir sayısal model kullanılarak hesaplanması amaçlanmıştır. Daha önceki benzer modellerin kullandığı yöntemlerin geliştirilmiş hallerini kullanarak bir sayısal model oluşturulmuş, aynı zamanda Cebeci ve Chang koordinat kayması yaklaşımı ile pürüzlülük etkisi de bu hesaba dâhil edilmiştir. Tanecikler sayısal olarak derinlik boyunca eşit dağıtılarak aynı başlangıç x koordinatına yerleştirilmiş, ve akım doğrultusundaki zamansal ortalama hıza ve cidara dik türbülans kaynaklı hızlara maruz bırakılmıştır. Taneciklerin hareketleri, rastgele yürüyüş metodu kullanılarak, tekil tanecik analizi ile hesaplanmıştır. Hesaplanan dispersiyon katsayılarının daha önce Sumer (1973, 1974), Sayre (1968) ve Elder (1959) tarafından bulunan sonuçlara uygun olduğu görülmüştür. Elde edilen bulgulara göre, ağırlıksız ve ağır tanecikler için pürüzlülüğün dispersiyon katsayısı üzerindeki etkisi oldukça zayıftır, yalnızca yüksek pürüzlülük değerlerinde pürüzlülük elemanları akımın içerisine girdiğinde boyutsuz dispersiyon katsayısında küçük bir azalma görülebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dispersiyon; katı madde hareketi; rastgele yürüyüş; sayısal modelleme; türbülans;

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Türbülanslı akımlar içerisinde ağır tanelerin boyuna dispersiyonu konusu; doğal akımların taşıdığı kirleticiler, tarama işlemlerinin sebep olduğu askıya geçmiş malzeme, akarsularda ve kıyılarda katı madde taşınımı, çökeltim havuzları tasarımı gibi hesaplar ve öngörüler için büyük bir önem taşımaktadır.

Türbülanslı dispersiyon konusundaki en önemli çalışmalardan birisi Elder (1959) tarafından, taneciklerin düşey pozisyonunun olasılık yoğunluğu ve kanal kesiti boyunca parabolik bir hız dağılımı kullanılarak taneciklerin ortalama hızı ve dispersiyon katsayısının hesaplanmasıyla yapılmıştır. Bununla birlikte Sayre (1968), Sumer (1973, 1974) ve Bayazıt (1972) tarafından geliştirilen analitik ve sayısal modeller mevcuttur. Daha yeni çalışmalar da Deng ve

Jung (2008) ve Riahi-Madvar vd. (2008) tarafından doğal yataklar için yapılmıştır. Son olarak Kirca vd. (2016) türbülanslı dalga sınır tabakası altında ağır tanelerin boyuna dispersiyonunu Lagrangian bir yöntemle çalışmışlardır. Bir açık kanal akımında dispersiyon hızının analitik ya da sayısal olarak tahmin edilmesi mümkündür, ancak bir nehir akışı gibi düzgün ve prizmatik olmayan doğal bir kesitteki türbülanslı akımda karışım süreci çok karmaşık olduğundan dispersiyon katsayısı çok daha büyük fazladır. Tablo 1, farklı açık kanal akımı geometrileri için boyuna dispersiyon katsayısının, D , hesabı adına ortaya konulmuş ampirik ifadelerle yer vermektedir. Burada h ortalama kesit derinliği, B kesit genişliği, U_f sürtünme hızı, \bar{U} kesitsel ortalama hız ve ε_t kesitsel ortalama enine karışım katsayısıdır.

Tablo 1. Boyuna dispersiyon katsayısı için ampirik ifadeler (Riahi-Madvar vd., 2008)

Denklem	Yazar
$D = 5.93hU_f$	Elder, 1959
$D = 0.58 \left(\frac{h}{U_f}\right) \bar{U}B$	McQuivey ve Keefer, 1974
$D = 0.011 \left(\frac{\bar{U}^2 B^2}{hU_f}\right)$	Li vd., 1998
$D = 0.18 \left(\frac{\bar{U}}{U_f}\right)^{0.5} \left(\frac{B}{h}\right)^2 hU_f$	Liu, 1977
$D = 2.0 \left(\frac{B}{h}\right)^{1.5} hU_f$	Iwasa ve Aya, 1991
$D = 5.92 \left(\frac{\bar{U}}{U_f}\right)^{1.43} \left(\frac{B}{h}\right)^{0.62} hU_f$	Seo ve Cheong, 1998
$D = 0.6 \left(\frac{B}{h}\right)^2 hU_f$	Koussis ve Rodriguez-Mirasol, 1988
$D = 0.2 \left(\frac{\bar{U}}{U_f}\right)^{1.2} \left(\frac{B}{h}\right)^{1.3} hU_f$	Li vd., 1998
$D = \frac{0.15}{8\varepsilon_t} \left(\frac{\bar{U}}{U_f}\right)^2 \left(\frac{B}{h}\right)^{1.67} hU_f$ $\varepsilon_t = 0.145 + \frac{1}{3520} \frac{\bar{U}}{U_f} \left(\frac{B}{h}\right)^{1.38}$	Deng vd., 2001
$D = 10.612 \left(\frac{\bar{U}}{U_f}\right) h\bar{U}$	Kashefipour ve Falconer, 2002
$D = 7.428 + 1.775 \left(\frac{B}{h}\right)^{0.62} \left(\frac{\bar{U}}{U_f}\right)^{1.572} h\bar{U}$	Kashefipour ve Falconer, 2002

Bu çalışmada, hidrolik pürüzlü ve cilalı taban üzerindeki açık kanal akımlarında, çeşitli çökme hızlarına sahip tanelerin boyuna dispersiyonu bir sayısal model kullanılarak tahmin edilecektir. Bu amaçla, hesaplarda kullanılacak olan türbülanslı akım parametrelerini ve tanecik hareketlerini belirlemek üzere, daha önce analitik ve sayısal modellerde (Sumer 1973, 2013) kullanılmış olan yöntemler rafine edilmiş ve yer yer geliştirilerek kullanılmıştır. Bu modelde taban pürüzlülüğü etkisi, Cebeci ve Chang (1978) koordinat kayması yaklaşımı ve ampirik bir türbülans çalkantısı denklemi (Kırca ve Sumer, 2013) kullanılması suretiyle önceki benzerlerinden farklı olarak ilk defa parametrik biçimde hesaba dahil etmektedir.

Yöntem

Rastgele Yürüyüş Metoduyla Akışkan İçerisinde Tanecik Hareketlerinin Modellenmesi

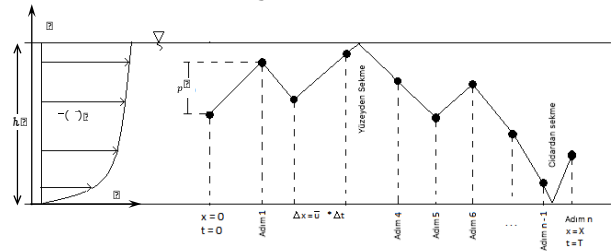
Çalışma kapsamında çok geniş bir kanalda (iki boyutlu durum için) h akım derinliği boyunca eşit dağıtılmış ve aynı başlangıç x koordinatına yerleştirilmiş taneciklerin, akım ve türbülans etkisinde izleyecekleri farklı yolların belirlenmesi problemi çalışılacaktır (Şekil 1). Tanecikler, buldukları derinlikteki zamansal ortalama hız (\bar{u}) nispetinde akım yönünde (x doğrultusunda) ilerlerken, cidara dik türbülans hızlarının (v') etkisiyle de y koordinatı boyunca savrulurlar. Bu rastgele hareketler sonucunda derinliği sürekli değişen taneciğin maruz kaldığı akım yönündeki hız da değişecektir. Dolayısıyla farklı hızlarda ilerleyen tanecikler zamanla birbirlerinden uzaklaşacaklardır. Bu olgu *boyuna dispersiyon* olarak adlandırılmakta olup, iki elzem unsuru vardır: (1) ortalama akımın hız gradyanı ve (2) cidara dik türbülans hızları. Dolayısıyla boyuna dispersiyonun modellenmesi için bu iki akım özelliğinin derinliğin (y ekseninin) bir fonksiyonu olarak bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada hız profili $\bar{u}(y)$, Coleman ve Alanson'un (1983) yaklaşımı ile formüle edilmiştir (Denklem 1):

$$\frac{\bar{u}}{U_f} = \int_0^{y^+} \frac{2dy^+}{1 + \left\{ 1 + 4\kappa^2(y^+ + \Delta y^+)^2 \left[1 + \exp\left(-\frac{(y^+ + \Delta y^+)}{A_d}\right) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{y^+}{h^+}\right)^2 \left(1 - \frac{y^+}{h^+}\right) + \left(\frac{2\Pi}{\kappa}\right) \left(\frac{y^+}{h^+}\right)^2 \left[3 - 2\frac{y^+}{h^+}\right]} \quad (1)$$

Burada U_f sürtünme hızı, ν kinematik viskozite olmak üzere $y^+ = yU_f/\nu$ cidara dik boyutsuz koordinat, κ Von-Karman Sabiti, $h^+ = hU_f/\nu$ boyutsuz derinlik, A_d sönümlenme sabiti (~ 25) ve Π iz (wake) parametresidir. Nezu ve Nakagawa (1993) Π parametresini Reynolds sayısının ve akımın türbülans derecesinin bir fonksiyonu olarak vermektedir. Δy^+ ise Cebeci ve Chang (1978) koordinat kayması olup, k_s^+ Nikuradse eşdeğer kum pürüzlülüğü ve $k_s^+ = k_s U_f/\nu$ pürüzlülük Reynolds sayısı olmak üzere Denklem (2) ile ifade edilir. Bu sayede taban pürüzlülüğünün ortalama akım hızı üzerindeki etkisi dikkate alınmış olmaktadır. Bilindiği üzere $k_s^+ \leq 5$ olduğunda hidrolik cilalı cidar, $k_s^+ \geq 70$ ise tam pürüzlü cidar ve $5 < k_s^+ < 70$ is geçiş kategorisinde cidar durumu geçerli olmaktadır.

$$\Delta y^+ = 0.9 \left[\sqrt{k_s^+ - k_s^+ \exp\left(-\frac{k_s^+}{6}\right)} \right]; \quad 5 < k_s^+ < 2000 \quad (2)$$



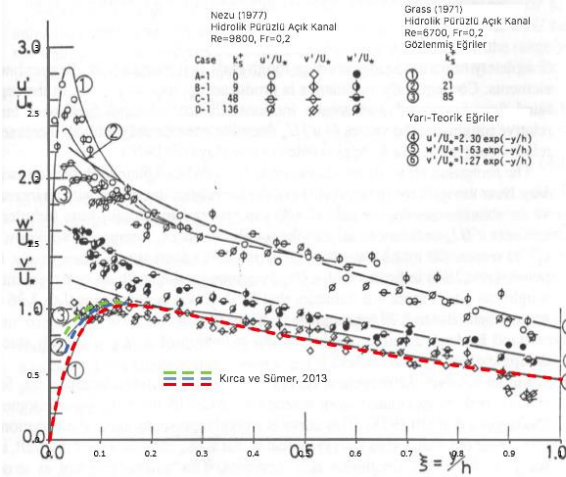
Şekil 1. Problemin geometrisi ve $x = 0$ 'a bırakılan şematik olarak bir taneciğin izlediği yol.

Öte yandan cidara dik türbülans hızlarının belirlenmesi için Nezu ve Nakagawa (1993) tarafından önerilen ampirik denklem, sınır tabakası iç bölgesini kapsayacak ve cidarda sıfır

değeri verecek şekilde geliştirilerek kullanılmıştır (Kırca ve Sumer, 2013):

$$\frac{\sqrt{v'^2}}{U_f} = 1.27 \exp \left[- \left(\frac{y}{h} + \frac{\Delta y^+}{Re_f} \right) \right] \left[1 - \exp \left(\frac{-(y^+ + \Delta y^+)}{16} \right) \right] \quad (3)$$

Burada $\sqrt{v'^2}$ cidara dik türbülans çalkantı bileşeninin standart sapması, $Re_f = hU_f/\nu$ sürtünme Reynolds sayısıdır. Şekil 2’de ise bu denklem deneysel veriyle karşılaştırılması verilmiştir. Görüldüğü gibi Δy^+ sayesinde taban pürüzlülüğünün türbülans çalkantı hızları üzerindeki etkisi de denklem (3) vasıtası ile modele dahil edilmiş olmaktadır.



Şekil 2. Cidara dik türbülans çalkantı bileşeninin ampirik profili (Kırca ve Sumer, 2013).

Denklem (3)’ten elde edilen cidara dik hızlar, rastgele yürüyüş uyarınca her adımda bilgisayar tarafından üretilen standart normal dağılıma uygun farklı bir rastgele sayıyla çarpılır. Taneciklerin sudan daha ağır olmaları durumunda ise w_s kadar bir çökme hızları olacak ve bu çökme hızı taneciklerin cidara dik yaptıkları savrulma hareketlerinde türbülans çalkantı bileşenlerine aşağı yönde eklenecektir. Taneciklerin bu şekilde $\pm v' - w_s$ şeklinde bir cidara dik hızla kat edebileceği mesafe ise türbülansın ölçeği ile sınırlı olacaktır. Penetrasyon uzunluğu l_p olarak adlandırılan bu

uzunluk için Sayre (1968) ve Sumer (1973) tarafından denklem (4)’te verilen yaklaşım önerilmiştir. Bu çalışmada ise aynı yaklaşım $0.21h$ asimptotlu bir tanh fonksiyonu ile yumuşatılarak kullanılmıştır (Denklem 5).

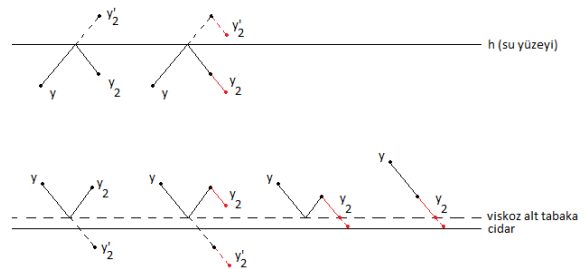
$$l_p(y) = \min(y, 0.21h) \quad (4)$$

$$l_p(y) = 0.21 h \left(\tanh \left(\left(\frac{y/h}{0.21} \right)^3 \right) \right)^{1/3} \quad (5)$$

Taneciklerin cidara dik rastgele hareketinin su yüzeyini ya da cidarı kestiği durumları yönetmek üzere sınır koşulları belirlenmiştir. Bu çalışmada taneciklerin hem serbest yüzeyden hem de taban cidarından enerji kaybetmeksizin sektiği varsayılmıştır (hidrolik cilalı cidar durumunda tanecikler kanal tabanı yerine viskoz alt tabaka sınırından, δ_b , sektirilmiştir). Bu sınırlarda normalde yaşanacak enerji kaybını, aynı zamanda da taneciğin düşey hareketi sırasında meydana gelecek momentum transferinin neden olacağı enerji kaybını modele dâhil etmek için düşey hızlarda bir düzeltme katsayısı kullanılmıştır. Şekil 1’de bir taneciğin izlediği yol örnek olarak verilmektedir. Şekil 3’te ise sınır koşulları görselleştirilmiştir. Bu sınır koşulları denklem (5)’te verilen bir parçalı fonksiyon ile yönetilmektedir (Demirbaş, 2015).

$$y_2 = \begin{cases} y_1 + \Delta y, & \delta_b < y_1 + \Delta y < h \\ 2h - y y_1 + \Delta y, & y_1 + \Delta y \geq h \\ \max\{\delta_b, [2\delta_b - (y_1 + \Delta y) - 2w_s \Delta t]\}, & y_1 + \Delta y \leq \delta_b \end{cases} \quad (5)$$

Burada y_1 ve y_2 taneciğin cidara dik hareketinin başladığı ve bittiği derinlikler, Δy ise kat edilen cidara dik mesafedir.



Şekil 3. Su yüzeyi ve tabana tanecik hareketinin sınır koşulları (siyah bölgeler türbülans hızı, kırmızı bölgeler ise çökme hızı sebebiyle kat edilen mesafeleri göstermektedir).

Dispersiyon Katsayısının Hesaplanması

Sayısal model, Şekil 1'de görüldüğü üzere derinlik boyunca üniform olarak dizilen taneleri birer birer akıma bırakır ve tanenin her rastgele yürüyüş adımında hesaplanan penetrasyon uzunluğunu cidara dik türbülans hızına bölerek o adımın süresini (Δt) hesaplar. Tanecik bu süre boyunca geçtiği derinliklerdeki akım doğrultusunda hıza maruz kalmış olacağından, bu doğrultuda belli bir Δx mesafesi kat etmiş olacaktır. Model, taneciğin cidara dik penetrasyonunun başladığı nokta ile bittiği nokta arasındaki cidara paralel hızların ortalamasını alır, bu ortalama hızı rastgele yürüyüş adımının süresi Δt ile çarpar ve taneciğin kat ettiği Δx mesafesini bulur:

$$\Delta x = \frac{\Delta t}{\Delta y} \cdot \int_{y_1}^{y_2} \bar{u}(y) dy \quad (5)$$

Taneciğin hareketi önceden belirlenmiş bir t_1 süresi tamamlanıncaya kadar devam ettirilir ve kat ettiği toplam x mesafesi bulunur. Bu süreç *tekil tanecik yaklaşımı* uyarında her bir tanecik için tekrarlanır ve taneciklerin kat ettiği x değerlerinin varyansı bulunur. Daha sonra bir t_2 süresine kadar süreç devam ettirilir ve x değerlerinin yeni varyansı bulunur. Varyansın zamanla değişiminden dispersiyon katsayısı elde edilir (Denklemler 6). Yapılan hassasiyet analizi uyarınca bu çalışmada hesaplar 10000 adet tanecikle yürütülmüştür.

$$D = \frac{1}{2} \frac{\partial(\text{var}(x))}{\partial t} \quad (6)$$

Bulgular

Modelde kullanılan tüm değişkenler daha önceki çalışmalardakine benzer biçimde boyutsuzlaştırılmıştır. T zaman, Y cidara dik koordinat, X akım doğrultusundaki koordinat, L boyutsuz penetrasyon uzunluğu, V cidara dik hız bileşeni, U akım doğrultusundaki hız bileşeni ve β Rouse parametresi (boyutsuz çökme hızı) olarak adlandırılmaktadır.

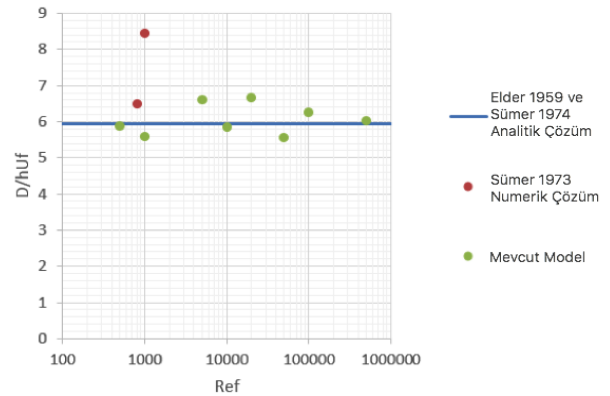
$$T = \frac{tU_f}{h} \quad Y = \frac{y}{h} \quad X = \frac{x}{h} \quad L = \frac{l_p}{h} \quad V = \frac{v}{U_f} \quad (7)$$

$$U = \frac{\bar{u}}{U_f} \quad \beta = \frac{w_s}{\kappa U_f}$$

Bu esaslara göre dispersiyon katsayısının boyutsuz ifadesi de $\frac{D}{hU_f}$ olmaktadır.

Hidrolik Cilalı Akımda Ağırlıksız Tanecik Durumu

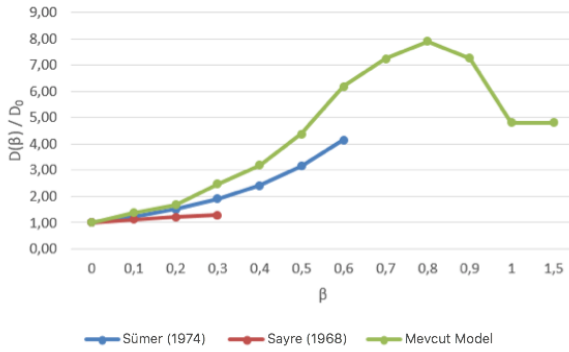
Bu durum için daha önce Elder (1959) ve daha sonra Sumer (1974) tarafından yapılmış olan analitik çözümler ve ayrıca Sumer (1973) tarafından yapılan sayısal çözüm mevcuttur. Şekil 4'te bu sonuçlar, model sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Burada düşey eksen boyutsuz dispersiyon katsayısını (D/hU_f), yatay eksen ise sürtünme Reynolds sayısını (Re_f) vermektedir. Analitik çalışmalarda olduğu gibi sonuçların sürtünme Reynolds sayısından genel olarak bağımsız olması ve $D/hU_f \approx 6$ mertebesinde bir sonuç vermesi beklenmektedir. Görüldüğü üzere model sonuçları önceki çalışmalarla tam olarak örtüşmektedir. Bu şekilde sayısal modelin sağlaması yapılmıştır. Çalışmanın sonraki aşamasındaki parametrik hesaplarda $Re_f=10000$ alınmıştır. Bu değer jeofiziksel akımlardaki (akarsu, haliç ve deniz ortamındaki akımlara) sürtünme Reynolds sayılarının mertebelerini yansıtmaktadır.



Şekil 4. Hidrolik cilalı akımda tanecik durumu dispersiyon katsayıları.

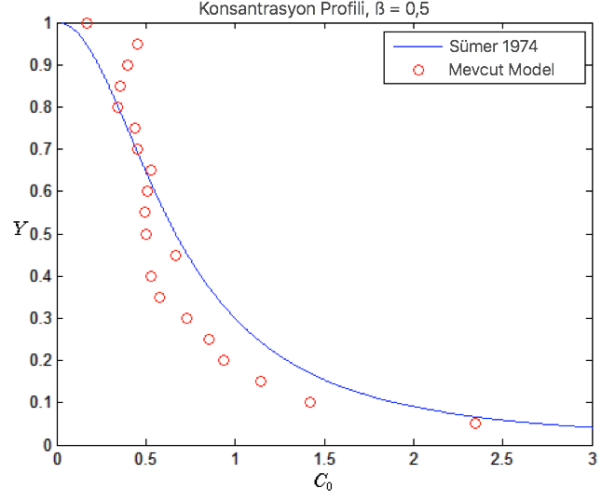
Hidrolik Cilalı Akımda Ağır Tanecik Durumu

Bir w_s çökme hızına sahip ($\beta = w_s/\kappa U_f > 0$) ağır tanecikler için, yine Sumer'in (1974) analitik çözümü ve Sayre'nin (1968) sayısal çözümü mevcuttur. Bu çözümlerin model sonuçları ile karşılaştırılması Şekil 5'te gösterilmiştir. Görülebileceği gibi sonuçlar olarak uyumludur. Tanecikler ağırlaştıkça, çökme hızlarının etkisi dolayısıyla hız gradyanının daha keskin olduğu tabana (cidara) yakın bölgelerde daha çok vakit geçirdiklerinden, artan çökme hızıyla birlikte dispersiyon katsayısında bir artış görülmesi beklenmektedir. Ancak bu artış ilânihaye devam etmeyecek, tanenin çökme hızı belli bir değeri geçtikten sonra trend tersine dönecektir.



Şekil 5. Hidrolik cilalı akımda ağır tanecik durumu dispersiyon katsayılarının ağırlıksız tanecik durumundaki dispersiyon katsayısına oranının Rouse parametresine göre değişimi.

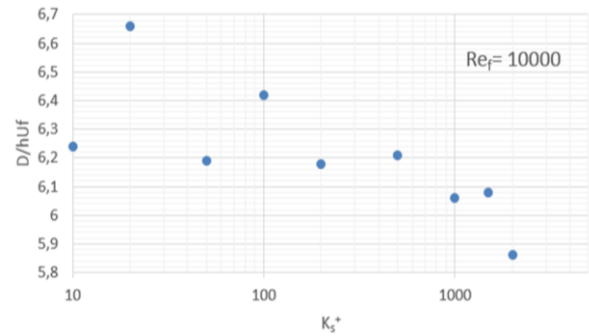
Rouse parametresi değeri $\beta = 0.5$ olan ağır tanecikler için, sayısal model ile hesaplanan düşeydeki tane konsantrasyonu (C_0) profili Şekil 6'da Sumer'in (1974) analitik çözümüyle karşılaştırılmaktadır. İki çözüm arasında genel bir uyum görülmektedir.



Şekil 6. $\beta=0.5$ tane konsantrasyonu profili.

Hidrolik Pürüzlü Akımda Ağırlıksız Tanecik Durumu

Cidar pürüzlülüğünün etkisi ilk olarak ağırlıksız tanecik durumunda incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, pürüzlülük elemanları yüksek değerlere ulaşip akımın içerisine girmediği sürece ($k_s^+ \geq 500$ gibi), ağırlıksız tanecikler için cidar pürüzlülüğünün etkisi kayda değer olmamaktadır. Yüksek pürüzlülük değerlerinde ise dispersiyon katsayısında küçük bir azalma olduğu görülmüştür. Şekil 7, boyutsuz dispersiyon katsayılarının (D/hU_f) pürüzlülük Reynolds sayısı (k_s^+) ile değişimini göstermektedir.



Şekil 7. Ağırlıksız taneciklerin dispersiyon katsayılarının cidar pürüzlülüğüyle değişimi.

Model sonuçlarının hidrolik pürüzlü akımda da sürtünme Reynolds sayısından bağımsız olduğu ayrıca çalıştırılan kombinasyonlarda görülmüştür. Ancak bu sonuçlar yer darlığı sebebiyle burada sunulmamıştır.

Hidrolik Pürüzlü Akımda Ağır Tanecik Durumu

Son olarak model pürüzlü cidar üzerinde ağır tanecikler durumu için çalıştırılmış ve Tablo 2’de gösterilen değerler elde edilmiştir. Bu tablodan görülebileceği üzere, tane çökme hızı düşük

olduğu durumlarda, ağırlıksız tanelere benzer şekilde pürüzlülük arttıkça dispersiyon katsayılarında hafif bir azalma görülmektedir. Ancak tanecikler ağırlaştıkça, cidar pürüzlülüğünün dispersiyon katsayısını azaltıcı etkisinin gittikçe ortadan kalktığı görülmektedir.

Tablo 2. Çeşitli ağırlıklarda tanecikler için çeşitli cidar pürüzlülüklerinde dispersiyon katsayıları.

k _s ⁺	B										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
10	6.24	8.12	10.91	16.33	22.73	27.70	41.11	48.89	52.64	45.35	25.35
20	6.66	8.00	11.42	13.75	19.82	27.80	35.70	45.38	42.88	41.71	26.50
50	6.19	8.48	10.54	14.14	17.55	26.18	33.77	42.30	39.03	39.28	28.28
100	6.42	8.39	10.33	15.66	17.27	25.66	34.93	43.00	41.29	40.53	29.17
200	6.18	8.17	10.18	12.88	20.60	26.13	30.29	42.31	46.30	39.10	27.57
500	6.21	8.31	10.23	14.98	21.38	27.15	36.74	40.27	43.80	36.64	28.64
1000	6.06	8.17	10.97	14.72	18.81	23.20	31.98	42.41	46.35	39.24	27.57
1500	6.08	8.38	10.65	15.55	18.72	27.21	33.28	41.62	46.30	39.50	27.20
2000	5.86	7.89	10.61	12.70	17.77	23.79	33.20	42.13	46.10	39.01	27.78

Sonuç

Bu çalışmada, çok geniş (iki boyutlu) bir serbest yüzey akımında çeşitli çökme hızlarına sahip taneciklerin boyuna dispersiyonunun hesaplanması için bir sayısal model oluşturulmuş ve cidar pürüzlülüğünün dispersiyona etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Modelde, önceki modellerde kullanılan yöntemler geliştirilmiş ve ilgili denklemlerin daha rafine halleri kullanılmıştır. Pürüzlülük etkisi zamansal ortalama akıma Coleman ve Alanso (1983) yaklaşımıyla dâhil edilmiş, türbülans çalkantısı ise ampirik bir denklem ile (Kırca ve Sumer, 2013) tanımlanmıştır.

Sayısal model ilk önce hidrolik cilalı taban üzerinde hem ağırlıksız hem de ağır taneler için çalıştırılmış ve literatürdeki değerler ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Model daha sonra farklı pürüzlülüklerdeki cidar özelliklerine sahip akımlar için parametrik olarak çalıştırılmış ve hem ağırlıksız hem de ağır taneler için taban pürüzlülüğünün dispersiyon katsayısına etkisi araştırılmıştır. Genel olarak cidar pürüzlülüğünün dispersiyona etkisinin zayıf olduğu görülmüştür. Bu kısıtlı etki de ancak

pürüzlülüğün çok yüksek olması ve pürüzlülük elemanlarının akım alanına iyice girmesi durumunda açığa çıkmaktadır. Diğer yandan tane ağırlıkları arttıkça bu etkinin de gittikçe ortadan kalktığı görülmektedir.

Kaynaklar

- Bayazit, M. (1972). Random Walk Model for Motion of a Solid Particle in Turbulent Open-Channel Flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 10, p.1-14
- Cebeci, T. and Chang, K.C. (1978). Calculation of incompressible rough-wall boundary-layer flows. *AIAA Journal*, vol. 16, No. 7, p.730.
- Coleman, N. L. and Alanso, C.V. (1983). Two-Dimensional channel flows over rough surfaces. *J. Hydraul. Eng., Proc. ASCE*, vol 109, No. 2, p.175.
- Demirbaş, S., (2015). Longitudinal Dispersion of Heavy Particles in a Free Surface Flow over Rough Bed, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Deng, Z. Q., Singh, V. P., & Bengtsson, L. (2001). Longitudinal dispersion coefficient in single channel streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(10), 901–916.
- Deng, Z. Q., and Jung, H. S. (2008). Scaling dispersion model for pollutant transport in rivers. *Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, LA.*

- Elder, J. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 5, p. 544.
- Iwasa, Y., and Aya, S. (1991). Predicting longitudinal dispersion coefficient in openchannel flows. In *Proceedings of international symposium on environmental hydraulics, Hong Kong*, (pp. 505–510).
- Kashefipour, S. M., & Falconer, A. (2002). Longitudinal dispersion coefficients in natural channels. In *Proceedings of the fifth international hydro informatics conference, 1–5 July, Cardiff University*. (pp. 95–102).
- Kırca, V. S. O. & Sumer B.M. (2013). Dispersion in wave boundary layers. *Mermaid project presentation. Santander, Spain (17.09.2013)*
- Kırca, V. O., Sumer, B. M., Steffensen, M., Jensen, K. L., & Fuhrman, D. R. (2016). Longitudinal dispersion of heavy particles in an oscillating tunnel and application to wave boundary layers. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2(1), 59–83.
- Koussis, A. D., & Rodriguez-Mirasol, J. (1998). Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 124, 317–320.
- Li, Z. H., Huang, J., & Li, J. (1998). Preliminary study on longitudinal dispersion coefficient for the gorges reservoir. In *Proceedings of the seventh international symposium environmental hydraulics, 16–18 December, Hong Kong, China*.
- Liu, H. (1977). Predicting dispersion coefficient of stream. *Journal of Environment Engineering Division, ASCE*, 103(1), 59–69.
- McQuivey, R. S., & Keefer, T. N. (1974). Simple method for predicting dispersion in streams. *Journal of Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineering*, 100(4), 997–1011.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). Turbulence in free surface flows. *A. A. Balkema, Rotterdam*.
- Riahi-Madvar, H., Ayyoubzadeh, S. A., Khandangi, E., Ebadzadeh, M. M. (2008). An expert system for predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by using ANFIS. *Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Department of Computer Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran*.
- Sayre, W. W. (1968). *Hydraulic Papers, No. 3, Colorado State University, Fort Collins*.
- Seo, I. W., & Cheong, T. S. (1998). Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural Stream. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(1), 25–32.
- Sumer, B. M. (1973). Simulation of dispersion of suspended particles. *Journal of the Hydraulics Division. Vol. 99, No. 10 pp. 1705-1726*
- Sumer, B. M. (1974). Mean velocity and longitudinal dispersion of heavy particles in turbulent open-channel flow. *J. Fluid Mech. Vol. 65, Issue 01, pp 11-28*.
- Sumer, B. M. (2013). Lecture notes on turbulence. *Technical University of Denmark*.

Longitudinal dispersion of heavy particles in an open channel flow over rough bed

Extended abstract

This study intends to calculate the longitudinal dispersion rate of particles of various weights in a free surface flow over smooth and rough beds, by means of a Lagrangian numerical model. The study will be using somewhat refined methods from the previous studies to determine the parameters used to calculate the dispersion rates.

Random walk method is modelled numerically for this study to use one particle analysis to determine the dispersion rates for various particle weights and bed roughness values. For the mean streamwise velocity, Coleman and Alanso (1983) approach is used. Roughness is modelled using the Cebeci and Chang (1978) coordinate shift approach. For wall-normal turbulence, Nezu and Nakagawa (1993) semi-theoretical curve based on experimental data, modified to cover the inner region of the flow by Kirca and Sumer (2013) is used. For heavy particles, a characteristic parameter representing the effect of gravity, called the Rouse parameter is used.

The random walk method requires particles to move upwards and downwards randomly along the cross section of the flow. A scale is used to determine the length of this movement, namely the penetration length scale, which basically represents the vertical size of the turbulent eddy, which carries the particle vertically. The study uses Sayre (1968) and Sumer (1973) approximation of this length scale, smoothed by Kirca and Sumer (2013) for using a continuous and differentiable value across the depth, with a tangent-hyperbolic function.

Particles which encounter flow boundaries across the way are considered to bounce back into the flow. For any energy loss that would occur in nature, a tuning parameter is used in the model built for this study. To model the bouncing effect, a piecewise function by Kirca and Sumer (2013) is used.

The model is tested for naturally buoyant particles over smooth bed, for various Re_f values from 500 to 50000, for heavy particles with the Rouse parameter of $\beta = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$ and 1.5 over smooth wall ($ks^+ < 5$). It is also tested for rough beds ks^+ roughness values from 5 to 2000; with heavy particles with the Rouse parameter of $\beta = 0.1, 0.2$, to 0.9 and 1 .

Resulting dispersion rates agree well with the previous studies of Sumer (1973, 1974), Sayre (1968) and Elder (1959).

As conclusion, roughness seems to have little effect on the dispersion of buoyant and heavy particles, but only when it becomes so large that roughness elements penetrate into flow domain; which causes a slight decrease in the non-dimensional dispersion coefficient.

Keywords: Dispersion, numerical modelling, random walk, sediment transport, turbulence.