

Dalga Kırılma Bölgesi Dışında
Katı Madde Hareketi
Ders Notları

V.Ş. Özgür KIRCA
kircave@itu.edu.tr

İstanbul, 2013

İçindekiler

1 Giriş	2
2 Tabanda Hareketin Başlangıcı	3
2.1 Taban Kayma Gerilmesi	3
2.2 Hareketin Başlangıcı ve Taban Malzemesi Debisi	4
3 Katı Madde Hareketi Debisi	6
3.1 Permanan Akımda Askıda ve Toplam Katı Madde Debisi	6
3.1.1 Permanan Akımda Hız Profili	6
3.1.2 Permanan Akımda Askıda Katı Madde Konsantrasyonu	7
3.2 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Askıda Katı Madde Debisi	8
3.2.1 Dalga Sınır Tabakası	8
3.2.2 Dalga Etkisi Altında Hareketli Taban ve Taban Şekli Re- jimleri	10
3.2.3 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Askıda Katı Madde Kon- santrasyonu	12
3.2.4 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Hız Profili	13
3.3 Toplam Katı Madde Debisi	15
4 Örnek Uygulamalar	17
4.1 Permanan Akımda Taban Malzemesi Debisi Hesabı	17
4.2 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Toplam Katı Madde Debisi Hesabı	18
5 Kaynakça	23

Bölüm 1

Giriş

Bu dokümanın amacı İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında verilen KBM 504 KİYILARDA KATI MADDE HAREKETİ dersi içinde anlatılan “hareketin başlangıcı ve kırılma bölgesi dışında katı madde hareketi” bölümleri için öğrencilere bir özet ve bu bölümde anlatılan bilgileri kullanarak inceleyecekleri örnek sayısal uygulamalar sunmaktır.¹

Katı madde hareketi konusu hem Hidrolik hem de Kıyı Mühendisliği disiplinleri içinde oldukça geniş bir perspektifte çokça çalışılmış olsa da, konuyla ilgili tam olarak çözüme kavuşturulmamış birçok problem bulunmaktadır. Bu itibarla konu güncelliğini ve popülerliğini son 50 yıldır korumakta, öğrencilerin kolayca ulaşabileceği konuyla ilgili yüzlerce uluslararası ve onlarca Türkçe kaynak kitap bulunmaktadır. Bu ders notları kaynak kitap niteliğinde olmak iddiasından çok uzaktır.

¹Sayısal uygulamalar öğrencilere ödev olarak verildiği için çözümleri bu notlarda yer almamaktadır.

Bölüm 2

Tabanda Hareketin Başlangıcı

2.1 Taban Kayma Gerilmesi

Bir açık kanal akımında permanan ve üniform akım için toplam cidar kayma gerilmesi

$$\tau_0 = R \cdot \gamma \cdot J \quad (2.1)$$

olarak verilmektedir. Burada R hidrolik yarıçap olup, kesit alanının (A) ıslak cidar çevresine (P) oranı olarak $R = \frac{A}{P}$ şeklinde verilmektedir. γ suyun özgül ağırlığı ve J de kanal eğimidir. Cidar kayma gerilmesi sürtünme hızı (U_f) cinsinden de ifade edilebilmektedir:

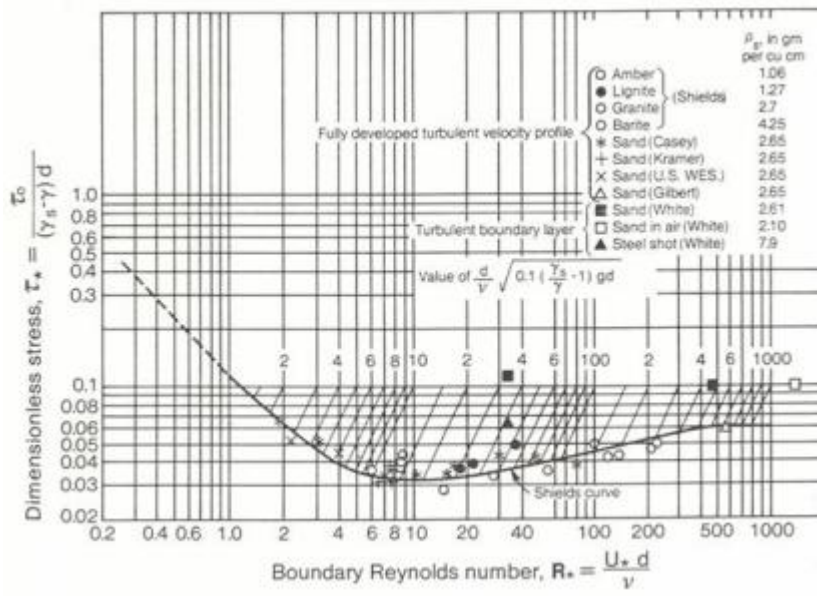
$$U_f = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.2)$$

Tabandaki kayma gerilmesi (τ_b) toplam cidar kayma gerilmesinden (τ_0) farklı olabilir. Zira tabandaki pürüzlülük genellikle yan cidarlardaki pürüzlülükten farklıdır.

Taban kayma gerilmesi katı madde hareketini ilgilendiren değişkenler ile boyutsuzlaştırıldığında, Shields parametresi olarak bilinen θ elde edilir:

$$\theta = \frac{\tau_b}{(s-1)\gamma d} = \frac{U_f^2}{(s-1)gd} \quad (2.3)$$

Burada $s = \frac{\rho_k}{\rho}$ katı maddenin özgül ağırlığı, g yerçekimi ivmesi ve d katı maddenin çapı olarak verilmektedir.



Şekil 2.1: Tane Reynolds sayısının (Re_*) bir fonksiyonu olarak Kritik Shields sayısı (θ_c).

2.2 Hareketin Başlangıcı ve Taban Malzemesi Debisi

Tabandaki hareketin başlangıç koşulu boyutsuz kayma gerilmesi θ' 'nin kritik bir değere ulaşmasıdır. θ_c olarak gösterilen bu kritik değer aşıldığında tabanda hareket başlayacaktır. θ_c parametresinin yapılan deneyler sonucu tane Reynolds sayısının ($Re_* = \frac{U_* d}{\nu}$) bir fonksiyonu olarak elde edilen değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir.

Hareket başladığı andan itibaren taban artık düz olmayacak ve hareket halindeki taneler tabanda farklı boyutlarda tepeler ve çukurlar oluşturacaktır. Artık yalnızca tabandaki sürtünmeden dolayı değil, bu taban şekillerinden dolayı da akıma karşı bir direnç oluşacaktır. Bu sebeple taban kayma gerilmesinin (dolayısıyla sürtünme hızı ve Shields parametresinin) iki ayrı bileşenden meydana geldikleri ortaya çıkmaktadır:

$$\tau_b = \underbrace{\tau_b'}_{\text{sürtünme direnci}} + \underbrace{\tau_b''}_{\text{şekil direnci}} \quad (2.4)$$

Benzer şekilde U_f' ve θ' de sürtünme direnci bileşenlerini temsil etmektedir ve katı madde hareketi hesaplamalarında da bu bileşen kullanılmaktadır.

Shields parametresinin düşük değerlerinde ($\theta_c < \theta' \lesssim 0.25$) gerçekleşen taban malzemesi hareketinin debisi için farklı ampirik ve teorik bağıntılar ortaya

konulmuştur. Bunlardan en çok kullanılanları Meyer-Peter ve Müller [?] ile Engelund ve Fredsøe [1976] yöntemleridir (Bu yöntemlerle ilgili ayrıntılı bilgi Fredsøe ve Deigaard,[1992] referansının 7. bölümünde bulunabilir). Meyer-Peter ve Müller'in katı madde hesabı için ortaya koyduğu formül aşağıdaki şekildedir:

$$q_B = 8 (\theta' - \theta_c)^{1.5} \sqrt{(s - 1) g d^3} \quad (2.5)$$

Burada q_B birim genişlik için taban malzemesi debisidir.

Bölüm 3

Katı Madde Hareketi Debisi

3.1 Permanan Akımda Askıda ve Toplam Katı Madde Debisi

Permanan (zamanla değişmeyen) bir akım ortamında birim genişlikten geçen askıda katı madde debisi, q_S , genel olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$q_S = \int_{z_0}^h c(z) u(z) dz \quad (3.1)$$

Burada $c(z)$ katı madde konsantrasyonu profili, $u(z)$ ise hız profilidir. Toplam katı madde debisi (q_T) ise hem taban malzemesi debisi (q_B), hem de askıda katı madde debisi (q_S) dikkate alınarak hesaplanmalıdır.

$$q_T = q_B + q_S \quad (3.2)$$

3.1.1 Permanan Akımda Hız Profili

Permanan akımda taban yakınlardaki hız profili genel itibarı ile cidar kanunu olarak anılan logaritmik hız kanununa uyar. Bununla birlikte hız profilinin ifadesi cidar üzerindeki pürüzlülük elemanlarının karakterine bağlıdır. Eğer taban pürüzsüz (hidrolik cilalı)¹ ise hız profili tabandaki pürüzlülük elemanlarının yüksekliğinden (k_s) bağımsız olacaktır.

$$\frac{u(z)}{U_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{zU_f}{\nu} \right) + 5.1 \quad (3.3)$$

Denklemdaki $\kappa = 0.4$ Von Karman sabiti ve ν da kinematik viskozitedir. Buradaki sürtünme hızı (U_f), ortalama akım hızı V 'ye de bağlanabilir:

$$\frac{V}{U_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{U_f h}{\nu} \right) + 3.7 \quad (3.4)$$

¹Taban şartlarının hidrolik cilalı olması için $k_s \approx 2.5d \leq \frac{5\nu}{U_f}$ şartı sağlanmalıdır.

Diğer taraftan tam pürüzlü akım² için hız profili;

$$\frac{u(z)}{U_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30z}{k_s} \right) \quad (3.5)$$

olarak verilmekte ve U_f ile V arasındaki bağıntı

$$\frac{V}{U_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{14.8h}{k_s} \right) \quad (3.6)$$

halini almaktadır.

Geçiş kategorisindeki cidarlar³ için durum nispeten daha karmaşık bir hal almaktadır. Bu tarz cidarlar için U_f ile V arasındaki ilişki

$$\frac{V}{U_f} = -2.5 \ln \left(\frac{k_s}{14.8R_h} + \frac{\nu}{4.5R_h U_f} \right) \quad (3.7)$$

denklemleri hesaplanabilir. Geçiş kategorisindeki cidarlarda hız profilinin nasıl hesaplanacağı ise Sumer [2007]'de verilmektedir.

3.1.2 Permanan Akımda Askıda Katı Madde Konsantrasyonu

Permanan akım altındaki katı madde konsantrasyonu en temel haliyle Vanoni dağılımı kullanılarak elde edilebilir:

$$c(z) = c_0 \left[\frac{(h-z)}{z} \frac{z_0}{(h-z_0)} \right]^{\frac{w_s}{\kappa U_f}} \quad (3.8)$$

Burada w_s çökme hızı, U_f sürtünme hızı, $w_s/\kappa U_f$ Rouse parametresi, z_0 tabandan bir referans yükseklik ve c_0 da o noktadaki referans katı madde konsantrasyonudur. Genellikle tabandaki tane çapının iki katı olarak $z_0 = 2d$ alınması mâkul sonuçlar verir. Referans konsantrasyon değerini bulmak için birçok farklı yaklaşım geliştirilmiştir, geliştirilmektedir. Bunlardan bazıları Luque and Beek [1976], Einstein [1950] ve Engelund and Fredsoe [1976] tarafından önerilmiştir. Yüksek kayma gerilmelerinde de kullanılabilmesi itibarıyla Engelund and Fredsoe [1976] yaklaşımı aşağıda verilmektedir. Bu yaklaşımda $z_0 = \alpha d$ iken referans konsantrasyon c_0 çizgisel konsantrasyon λ_0 cinsinde ifade edilmekte;

$$c_0 = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda_0}\right)^3} \quad (3.9)$$

çizgisel konsantrasyon da aşağıdaki denklem yardımıyla Shields parametresi ve kritik Shields parametresi cinsinden hesaplanabilmektedir:

$$\lambda_0 = \sqrt{\left(\theta' - \theta_c - \frac{\pi}{6}p\right) \frac{\kappa^2 \alpha^2}{0.013 s \theta'}} \quad (3.10)$$

²Tabanın tam pürüzlü olması için $k_s \approx 2.5d \geq \frac{70\nu}{U_f}$ şartı sağlanmalıdır.

³Taban pürüzlülüğü $\frac{70\nu}{U_f} \geq k_s \approx 2.5d \geq \frac{5\nu}{U_f}$ limitleri arasında ise cidar geçiş kategorisinde-dir.

Burada $\alpha \approx 2$, $s = \frac{\rho_s}{\rho} \approx 2.65$ katı maddenin boyutsuz özgül ağırlığı, p tabandaki bir tanenin hareket etme olasılığı [Luque and Beek, 1976], θ' Shields parametresinin sürtünme bileşeni ve θ_c ise kritik Shields parametresidir. Bu denklemin en önemli özelliği yüksek taban kayma gerilmelerinde $z_0 = 2d$ için $c_0 = 0.35$ değerine ulaşmasıdır. Taban üzerinde hareketli durumdaki tanelerin konsantrasyonunun bu değer üzerine çıkması beklenmeyeceğinden, bu durum tutarlılık arz etmektedir.

Diğer taraftan, askıda katı madde debisi hesabında yüksek konsantrasyonların su kolonunun özgül kütlelerini ve tanelerin difüzyon karakterini değiştirdikleri aşıkardır. Bununla ilgili bir düzeltme yapmak için çökelme hızı van Rijn [1984] tarafından önerilen şekilde değiştirilebilir (bknz. *hindered settlement*):

$$w'_s = w_s(1 - c)^4 \quad (3.11)$$

3.2 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Askıda Katı Madde Debisi

Permanan olmayan (zamanla değişen) bir akım ortamında da birim genişlikten geçen askıda katı madde debisi, q_S , genel olarak aşağıdaki denklem (3.1)'de verilen şekilde hesaplanacaktır. Ancak q_S zamanın da bir fonksiyonu olacağı için, bir dalga periyodu boyunca ortalaması alınarak net askıda katı madde debisi bulunabilir.

$$q_S(t) = \int_{z_0}^h c(z, t) u(z, t) dz \quad (3.12)$$

$$\overline{q_S} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{z_0}^h c(z, t) u(z, t) dz dt \quad (3.13)$$

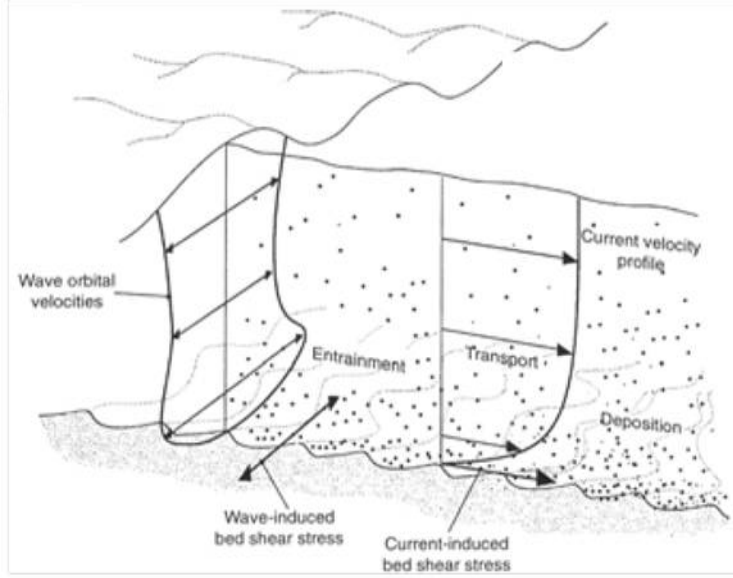
Burada $c(z, t)$ zamana bağlı katı madde konsantrasyonu profili $u(z, t)$ zamana bağlı ise hız profilidir.

Dalgaların simetrik olduğu durumlarda eğer akıntı da yok ise net katı madde debisi 0 olacaktır. Ancak deniz ortamında büyük çoğunlukla zayıf da olsa bir net akıntı bulunacak, bu yüzden akıntının yönünde 0'dan farklı bir net katı madde debisi ortaya çıkacaktır. Dalga ve akıntının sürepoze etkisi altında askıda katı madde taşınımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Toplam katı madde debisi dalga ve akıntının birlikte etkimesi durumunda da denklem (3.2)'de verildiği gibi olacaktır.

3.2.1 Dalga Sınır Tabakası

Deniz ortamında etkili bir lineer dalga altında taban üzerinde oluşan orbital hız (U_0) bir sinüs fonksiyonu olarak verilebilir:



Şekil 3.1: Dalga ve akıntının süperpoze etkisi altında askıda katı madde taşınımı [Soulsby, 1997]

$$U_0(x, t) = U_m \sin(\omega t - kx) \quad (3.14)$$

Burada $\omega = \frac{2\pi}{T}$ açısal hız, $k = \frac{2\pi}{L}$ dalga sayısı ve U_m ise tabandaki orbital hızın maksimum değeridir. Zamanın yanında mesafeye bağlılık ihmal edilebilir mertebede olacağından, denklem (3.14) aşağıdaki biçimde salınımlı akım olarak kabul edilebilir.

$$U_0(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (3.15)$$

Bu hız lineer dalga teorisi kullanılarak;

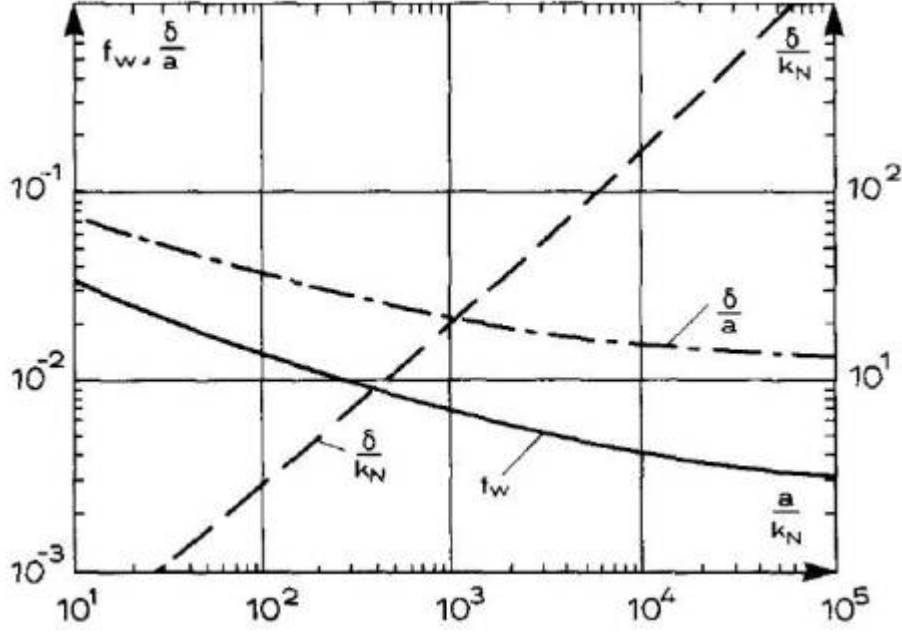
$$U_m = \frac{H\omega}{2 \sinh(kh)} \quad (3.16)$$

olarak ifade edilir⁴.

Tabanda bu tip bir hız bulunması nedeniyle tabanın hemen üzerinde bir sınır tabakası oluşacak ve tabana bir kayma gerilmesi etkiyecektir. Bu kayma gerilmesinin de zamanla periyodik olarak değişmesi beklenecektir. Hidrolik tam pürüzlü⁵ tabanlar için söz konusu sınır tabakasının boyutsuz kalınlığı ($\frac{\delta}{a}$) ve kayma gerilmesinin sürtünme faktörü ($f_w = \frac{2\tau_{max}}{\rho U_m^2}$ veya $\frac{U_f}{U_m} = \sqrt{\frac{f_w}{2}}$) Şekil 2'de gösterilmiştir [Fredsoe and Deigaard, 1992]. Bu şekilde verilen ilişki aşağıdaki

⁴Düzensiz dalgalar için temsili değerler $H = H_{rms}$, $T = T_p$ ve $L = L_p$ şeklindedir.

⁵Taban şartlarının tam pürüzlü olması için $k_N \geq \frac{100\nu}{U_f}$ şartı sağlanmalıdır.



Şekil 3.2: Boyutsuz sınır tabakası kalınlığı ve sürtünme faktörü.

bağıntılarla da ifade edilebilir.

$$f_w = \begin{cases} 0.04 \left(\frac{a}{k_N}\right)^{-0.25} & , \frac{a}{k_N} > 50 \\ 0.4 \left(\frac{a}{k_N}\right)^{-0.75} & , \frac{a}{k_N} < 50 \end{cases} \quad (3.17)$$

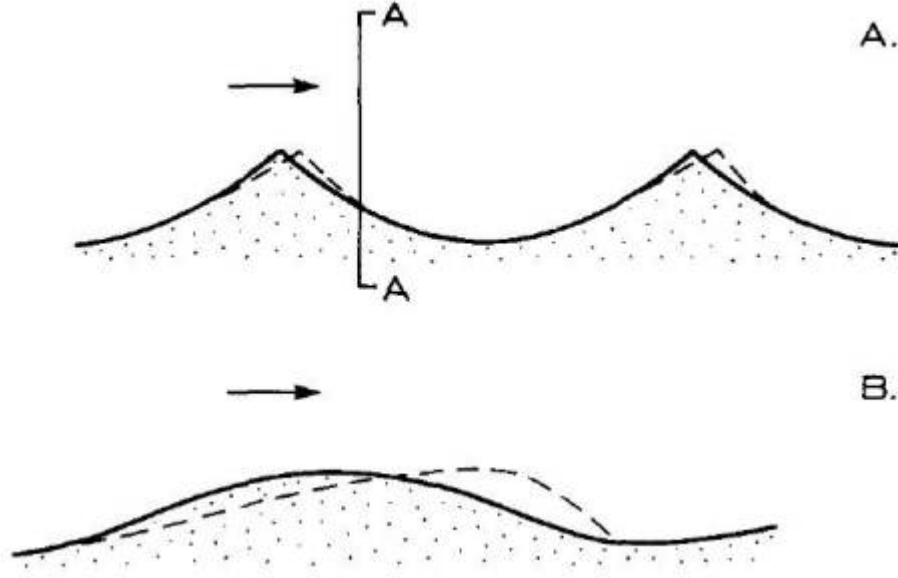
Burada a tabandaki bir akışkan parçacığının yapacağı salınım hareketinin ortalama konumuna referansla genişliği ($a = \frac{U_m}{\omega}$) ve k_N de taban pürüzlülüğüdür.

3.2.2 Dalga Etkisi Altında Hareketli Taban ve Taban Şekli Rejimleri

Bu tip bir değişken akımda tabandaki tane üzerine etkiyen kuvvetler de zamana göre değişecektir. Denklem (3.17)'te verilen boyutsuz taban kayma gerilmesi (Shields parametresi) θ , dalga etkisi altında da türetilir:

$$\theta = \frac{\tau_{max}}{(s-1)\gamma d} = \frac{U_f^2}{(s-1)gd} \quad (3.18)$$

Burada τ_{max} periyot boyunca en yüksek taban kayma gerilmesi (denklem (3.17) ile hesap edilebilir), $s = \frac{\rho_k}{\rho}$ katı maddenin özgül ağırlığı, g yerçekimi ivmesi ve d tabandaki katı maddenin çapı olarak verilmektedir.



Şekil 3.3: Dalga etkisiyle oluşan kum tepeciği rejimleri A: sivri tepelikler. B: yuvarlak tepelikler.

Dalga etkisi altında tabandaki hareketin başlangıç koşulu, permanan akım durumundaki gibi Şekil 2.2'de verilen θ_c kritik değeri ile ortaya konur. Buradaki tane Reynolds sayısı ($Re_* = \frac{U_f d}{\nu}$) da taban kayma gerilmesinin en yüksek değeri (τ_{max}) kullanılarak hesaplanacaktır.

Tıpkı permanan akım koşullarında olduğu gibi hareket başladığı andan itibaren taban artık düz olmayacak ve hareket halindeki taneler tabanda farklı boyutlarda tepeler ve çukurlar oluşturacaktır. Shields parametresinin sürtünme bileşeni θ' arttıkça oluşan bu tepe ve çukurlar dikleşerek akımla etkileşime girecekler ve daha fazla katı maddeyi akıma katacaklardır. Bu itibarla dalga etkisi altındaki kum tepeliklerini (ripple) iki ana rejime ayırmak mümkündür: *yuvarlak tepelikler* (rolling grain ripples) ve *sivri tepelikler* (vortex ripples) [Bagnold, 1946].

Şekil 3.2.2'te gösterilen bu iki rejim arasında önemli farklar vardır. Yuvarlak tepelik rejiminde askıya kalkan taneler nispeten az iken sivri tepelik rejiminde akımın tabanla etkileşimi önemli miktarda katı maddenin askıya kalmasına neden olmaktadır. Bagnold [1946] bu iki rejim arasındaki sınırı $2\theta_c$ olarak ifade etmiştir. Başka bir deyişle $\theta_c \leq \theta' < 2\theta_c$ iken yuvarlak tepelik rejimi, $2\theta_c \leq \theta' \lesssim 0.8$ iken ise sivri tepelik rejimi görülmektedir. Kayma gerilmesi daha da yükselirse ($\theta' \gtrsim 0.8$) taban şekilleri tamamen yıkanarak *tabaka halinde hareket* rejimine geçilmektedir. Bu tepeliklerin diklikleri, yani yüksekliklerinin uzunluklarına oranı (H_r/L_r) Nielsen [1979] tarafından düzenli ve düzensiz dalgalar için

sırasıyla denklem (3.19) ve (3.20)'de aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$\frac{H_r}{L_r} = 0.182 - 0.24 (\theta')^{1.5} \quad (3.19)$$

$$\frac{H_r}{L_r} = 0.342 - 0.34 (\theta')^{0.25} \quad (3.20)$$

Burada θ' sürtünme direnci bileşenini temsil etmektedir ve $k_N = 2.5d_{50}$ olacak şekilde denklem (3.17) ve (3.18) kullanılarak bulunabilir. Öte yandan tepelik boyu için birçok farklı yaklaşım ortaya atılmış olsa da, en basiti ve en çok kullanılanı şudur:

$$L_r = 1.2a \quad (3.21)$$

Dalgalar asimetric olur ise, bu taban şekilleri dalga yüzünün daha dik olduğu yöne doğru hareket ederek net bir taban malzemesi debisi (q_{Bw}) ortaya çıkaracaklardır [Fredsoe and Deigaard, 1992]. Bu ilave taban malzemesi debisinin akıntı kaynaklı taban malzemesi debisine eklenmesi gerekecektir (bknz. Tablo 1).

3.2.3 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Askıda Katı Madde Konsantrasyonu

Dalga etkisi altındaki katı madde konsantrasyonunun derinlik boyunca değişiminin de Vanoni dağılımı gibi genel itibarı ile üssel (eksponansiyel) bir fonksiyon olması beklenecektir. Bu fonksiyonu tahmin etmek için geliştirilen birçok farklı metot mevcuttur.

Vanoni dağılımından bir miktar farklı biçimde van Rijn and Walstra [2004] tarafından dalga ve dalga-akıntı etkisi altındaki konsantrasyon profili aşağıdaki şekilde önerilmiştir.

$$c(z) = c_0 \left[\frac{z(h - z_0)}{z_0(h - z)} \right]^{-p_m} \quad (3.22)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{m}{\kappa(1+2m^2)} + 2.5m^{0.8} \left(\frac{c_0}{0.65} \right)^{0.4} & m < 1 \text{ için} \\ \frac{m}{2\kappa} & m > 1 \text{ için} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$m = \frac{w_s}{U_f} \quad (3.24)$$

$$c_0 = \frac{0.015d_{50}}{z_0 d_*^{0.3}} \left(\frac{\theta' - \theta_c}{\theta_c} \right)^{1.5} \quad (3.25)$$

$$d_* = d_{50} \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (3.26)$$

$$z_0 = \max \{0.5k_{sr}, 0.01\} \text{ (birimi m)} \quad (3.27)$$

$$k_{sr} = 8 \frac{H_r^2}{L_r} + 5\theta' d \quad (3.28)$$

Burada p_m modifiye edilmiş Rouse parametresi, m boyutsuz çökme hızı, d_* boyutsuz tane çapı ve k_{sr} tabandaki tepeciklerin eşdeğer Nikuradze pürüzlülüğüdür [Nielsen, 1992]. Tepeciklerin olmadığı durumlarda otomatik olarak $k_{sr} = 0$ olacaktır. Buradaki ikinci terim ise hareketli taban için Wilson [1988] tarafından önerilen pürüzlülük bileşenidir.

Diğer taraftan Nielsen [1992] de özellikle tepecikli taban rejimi üzerinde dalga etkisi altındaki katı madde konsantrasyonunu hesaplayabilmek için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir:

$$c(z) = c_0 \exp\left(-\frac{z}{L_s}\right) \quad (3.29)$$

$$L_s = \begin{cases} 0.075 \frac{a\omega}{w_s} H_r & , \frac{a\omega}{w_s} < 18 \text{ için} \\ 1.4 H_r & , \frac{a\omega}{w_s} > 18 \text{ için} \end{cases} \quad (3.30)$$

$$c_0 = 0.005 \theta_r^3 \quad (3.31)$$

$$\theta_r = \frac{\theta'}{\left(1 - \frac{\pi H_r}{L_r}\right)^2} \quad (3.32)$$

Burada L_s sönmülme mesafesi olarak adlandırılmaktadır. θ_r ise hem tane sürtünmesini hem de kum tepeciklerinden kaynaklı direnci hesaba katan bir boyutsuz kayma gerilmesidir.

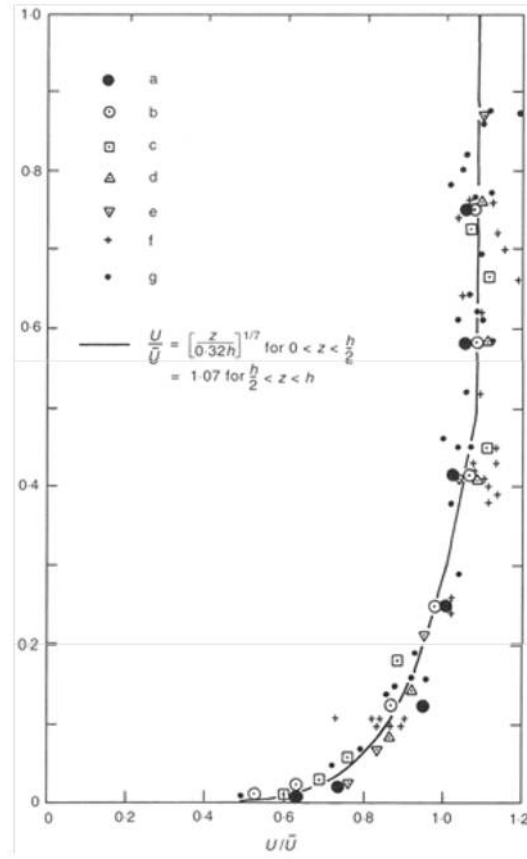
3.2.4 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Hız Profili

Dalga ve akıntının birlikte etkidiği durumlarda genellikle denklem (3.3) ile verilen dağılım farklılaşacaktır. Dalga sınır tabakasının etkili olduğu bölgede hız yavaşlayacak, daha yukarıda ise hızlanacaktır. başka bir deyişle dalga taban üzerinde ilave bir *pürüzlülük* yaratacaktır. Bu tip süperpoze durumlarda zamansal ortalama hız profilinin nasıl çözülebileceği Fredsoe and Deigaard [1992] veya Grant and Madsen [1982] gibi çalışmalar ile ayrıntılandırılmıştır. Hassas bir çözüm için sayısal modelleme gerekmektedir.

Diğer taraftan, pratik uygulamalarda çok kullanılan ve hesaplamada oldukça kolaylık sağlayan deniz ortamındaki tipik bir hız profili tarifini Soulsby [1997] vermiştir.

$$\frac{u(z)}{V} = \begin{cases} \left(\frac{z}{0.32h}\right)^{1/7} & , 0 < z < \frac{h}{2} \text{ için} \\ 1.07 & , \frac{h}{2} < z < h \text{ için} \end{cases} \quad (3.33)$$

Bu denklem Şekil 3.2.4'te de görülebileceği gibi arazi verilerini oldukça uygun biçimde temsil edebilmektedir.



Şekil 3.4: Deniz ortamındaki tipik hız profili [Soulsby, 1997].

Tablo 3.1: Deniz ortamında dalga ve akıntı durumunda toplam katı madde debisi.

Shields parametresi, θ'	Taban malzemesi debisi, q_B	Askıda katı madde debisi, q_S	Toplam katı madde debisi, q_T
$\theta' \leq \theta_c$	0 (hareket yok)	0	0
$\theta_c < \theta' \leq 2\theta_c$? veya Engelund and Fredsoe [1976] (bkzn. Ödev 1) + varsa dalga asimetrisi kaynaklı (q_{Bw})	≈ 0 (çok küçük)	$q_T \approx q_B$
$2\theta_c < \theta' \lesssim 0.5$ (dalga mevcut ise $2\theta_c < \theta' \lesssim 0.8$)	? veya [Engelund and Fredsoe, 1976] (bkzn. Ödev 1) + varsa dalga asimetrisi kaynaklı (q_{Bw})	denklem (3.1)	$q_T = q_B + q_S$
$\theta' \gtrsim 0.5$ (dalga mevcut ise $\theta' \gtrsim 0.8$)	Tabaka halinde katı madde taşınımı (<i>sheet-flow transport</i>) (örneğin akıntı için Wilson, 1988, dalga ve akıntı için Soulsby and Damgaard [2005])	denklem (3.36)	$q_T = q_{sheet} + q_S$

3.3 Toplam Katı Madde Debisi

Deniz ortamında kırılma bölgesi dışındaki toplam katı madde debisi hesapları için izlenecek genel strateji Tablo 3.1'de verilmiştir.

Yüksek kayma gerilmelerinde gerçekleşen tabaka halinde katı madde taşınımı rejiminde (akıntı için $\theta' \gtrsim 0.5$ veya dalga için $\theta' \gtrsim 0.8$) taban malzemesi ile askı malzemesi net olarak ayrılmamaktadır. Bu taşınım durumu için geliştirilen birçok farklı hesap yöntemi olmakla birlikte Wilson [1988] yaklaşımı en basit olanıdır:

$$q_{sheet} \approx 12 (\theta_{akıntı})^{1.5} \sqrt{(s-1)gd^3} \quad (3.34)$$

Denklem Soulsby and Damgaard [2005] tarafından dalga ve akıntı durumu için bir miktar değiştirilerek uygulanmıştır.

$$q_{sheet} \approx 12 (\theta_{akıntı})^{0.5} (\theta_{akıntı} - \theta_c) \sqrt{(s-1)gd^3} \quad (3.35)$$

Burada $\theta_{akıntı}$, denklem (3.4) kullanılarak bulunacak sürtünme hızı ile hesaplanan “akıntı Shields sayısı”dır. Tabaka halinde katı madde taşınımı dikkate alınmış ise, askıda katı madde hesabı katı madde tabakasının (*sheet-layer*) üstünden itibaren su yüzeyine kadar yapılmalıdır:

$$q_S = \int_{\max\{\delta_s, 0.01\}}^h c(z) u(z) dz \quad (\theta' \gtrsim 0.5 \text{ ise}) \quad (3.36)$$

Burada δ_s katı madde tabakası kalınlığıdır. Wilson and Nnadi [1990] bu değeri $\delta_s = 10 \theta d$ olarak bildirmektedir. 0.01 değerinin birimi metre'dir.

Bölüm 4

Örnek Uygulamalar

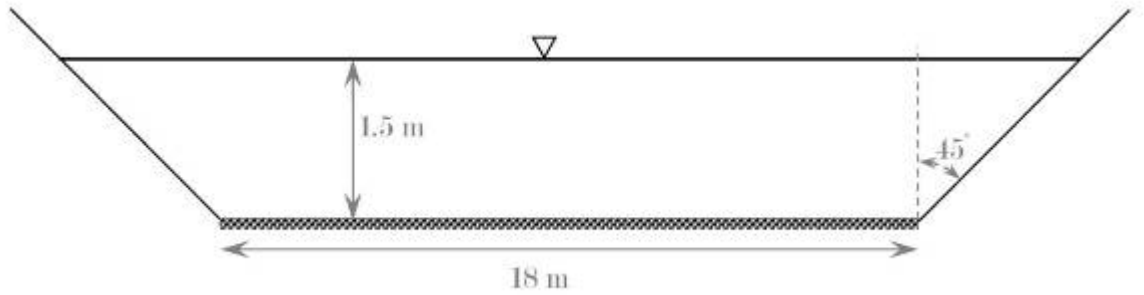
4.1 Permanan Akımda Taban Malzemesi Debisi Hesabı

Şekil 4.1’de enkesiti gösterilen kanal, $J = 0.0003$ olarak verilen eğimde üniform ve permanan olarak akmaktadır. Kanalın tabanındaki malzemenin boyutsuz özgül ağırlığı $s = 2.65$, medyan tane çapı $d_{50} = 1.0 \text{ mm}$ ve standart geometrik tane çapı dağılımı $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{86}}{d_{14}}} = 1.4$ olarak bildirilmektedir. Taban kayma gerilmesinin sürtünme direnci bileşeni (τ'_b) ile toplam cidar kayma gerilmesi (τ_0) oranının:

$$\frac{\tau'_b}{\tau_0} = 0.40$$

ve

$$\frac{\tau'_b}{\tau_0} = 0.50$$



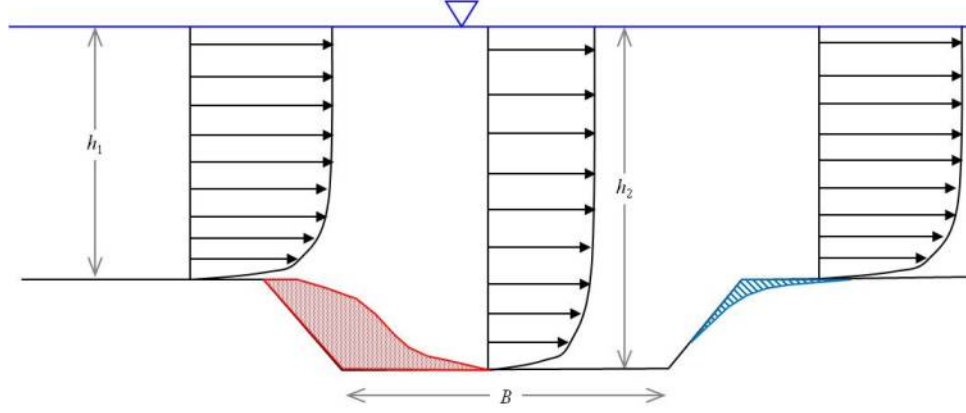
Şekil 4.1: Açık kanal akımın enkesiti.

olarak verilmesi durumları için ayrı ayrı aşağıdaki soruları cevaplayarak gerekli hesaplamaları gerçekleştiriniz.

1. Harekete geçebilecek en büyük tanenin çapı hangi karakteristik elek çapına tekabül etmektedir? ($d_?$) Bu soruyu cevaplamadan önce *log-normal* kabul edeceğiniz tane çapı dağılımını yarı logaritmik bir eksen takımında (elekten geçen malzeme yüzdesini tane çapının bir fonksiyonu olarak) çiziniz.
2. Meyer-Peter ve Müller [?] yöntemine göre boyutsuz taban malzemesi debisini (Φ_B), birim genişlikten geçen taban malzemesi debisini (q_B) ve toplam taban malzemesi debisini (Q_B) hesaplayınız.
3. Luque ve Beek'in [1976] yüzeydeki bir tanenin hareket etme olasılığı (hareket halindeki tanelerin yüzeydeki tanelere oranı) olan p için önerdiği ampirik ifadeyi dikkate alarak:
 - (a) d_{50} için harekete başlama olasılığını hesaplayınız
 - (b) d_{50} , d_{14} , d_{25} , d_{75} ve d_{86} için harekete başlama olasılıklarını *tanelerin eş-boyutlu olduğu kabulü* ile ayrı ayrı hesaplayınız.
 - (c) Taban yüzeyinin birim alanındaki tane sayısının $\frac{1}{d_{50}^2}$ olacağını, ancak tanelerin eşboyutlu olmayıp yukarıda hesapladığımız dağılıma uyacaklarını göz önünde bulundurarak tabandaki tüm tanelerin *ağırlıklı* harekete başlama olasılıklarını hesaplayınız.
 - (d) (a)'da ve (c)'de bulduğunuz değer ile (b)'de bulduğunuz değerlerin ortalamalarını karşılaştırıp sonuçları tartışınız. Bu üç değer merite olarak yakın mıdır? Hangisi bilimsel veya mühendislik uygulamaları açılarından en doğru seçenektir?
4. Yukarıda bulduğunuz p olasılığını kullanarak Engelund ve Fredsøe [1976] yöntemine göre boyutsuz taban malzemesi debisini (Φ_B), birim genişlikten geçen taban malzemesi debisini (q_B) ve toplam taban malzemesi debisini (Q_B) hesaplayınız. Bu hesaplamaları tane ile taban arasındaki dinamik sürtünme katsayısının 0.65 ve 1.0 değerleri için yaparak sonuçları karşılaştırmamız.
5. Meyer-Peter ve Müller metodu ile Engelund ve Fredsøe metoduna göre hesapladığınız katı madde taşınım debilerini karşılaştırınız ve ortaya çıkan farkı yorumlayınız. Engelund ve Fredsøe metodunda kullanılan parametrelerin hangi değerleri seçilirse farkı daha da azaltmaktadır?

4.2 Dalga ve Akıntı Etkisi Altında Toplam Katı Madde Debisi Hesabı

Şekil 4.2'de bir limanın yaklaşım kanalı en kesiti görülmektedir. Bölgedeki tabii derinlik h_1 , gemilerin limana rahatça yaklaşabilmesi için bir hat boyunca



Şekil 4.2: Navigasyon kanalı en kesiti. Oklar hız profillerini, kırmızı bölge birikmeyi ve mavi bölge de oyulmayı göstermektedir.

taranarak h_2 'ye indirilmiştir. Bölgedeki hakim akıntı ve hakim dalganın yaklaşık olarak yaklaşım kanalı eksenine dik ve verilen şekil üzerinde SOLDAN SAĞA DOĞRU geldiği kabul edilmektedir.

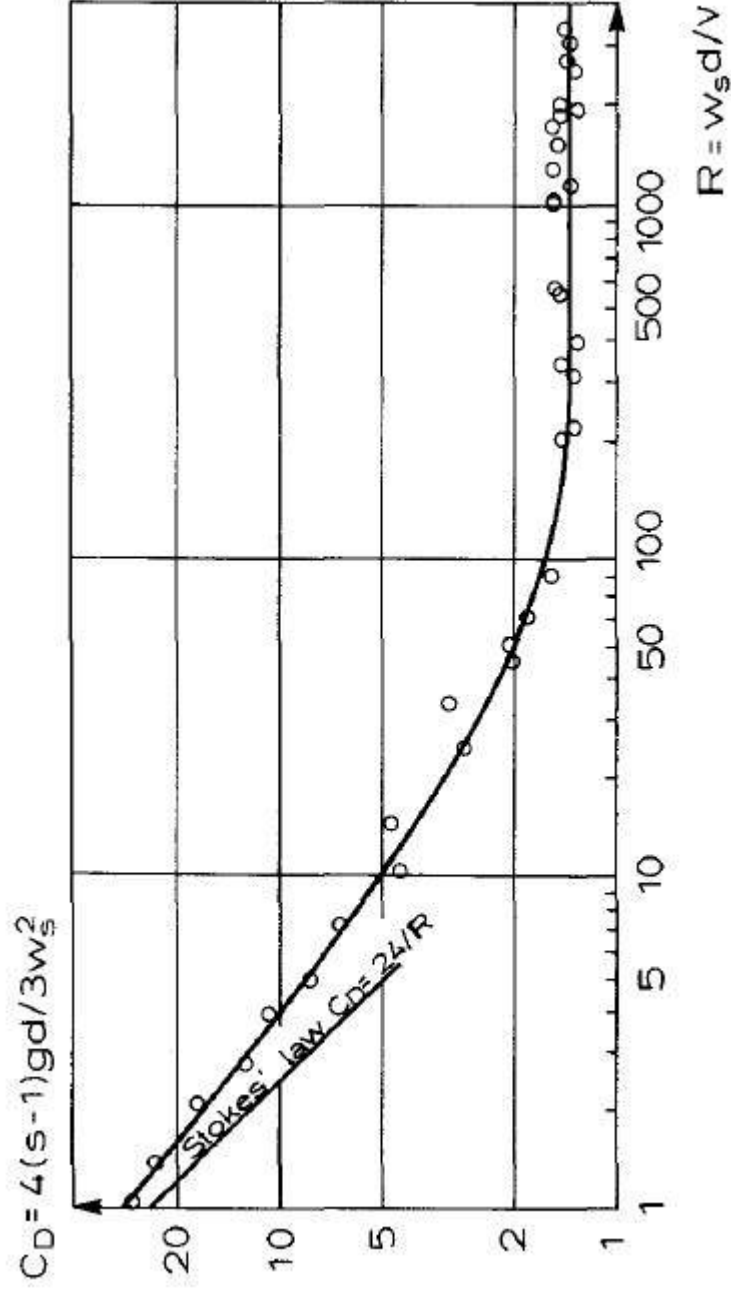
1. Navigasyon kanalının teşkilinden önce bu bölgede ölçülen karakteristik kesitsel ortalama akıntı hızı $V_1 = 20$ cm/s'dir. Ayrıca $h_1 = 13$ m, $h_2 = 18$ m olarak verilmektedir. Süreklilik prensibi uyarınca şekil düzlemine dik birim uzunluktan geçen debi sabit olacağına göre (yani $Q = \int_{z=0}^{h_1} u_1(z)dz = \int_{z=0}^{h_2} u_2(z)dz$) navigasyon kanalı üzerindeki ortalama hızı (V_2) bulunuz.
2. Navigasyon kanalının teşkilinden bir süre sonra şekilde kırmızı ile gösterilen bölgede birikme ve mavi ile gösterilen bölgede oyulma meydana gelmiştir. Bu durumu katı madde hareketinin fizikini kullanarak açıklayınız.
3. Yukarıdaki açıkladığımız katı madde birikmesi mekanizmasını kullanılarak, kırmızı bölgenin hacmini $u_1(z, t)$, $c_1(z, t)$, $u_2(z, t)$, $c_2(z, t)$, h_1 , h_2 ve n_d (yığılan katı maddenin boşluk oranı) cinsinden birim navigasyon kanalı boyu ve birim zaman için bir denklemlerle ifade ediniz.
4. Benzer şekilde açıkladığımız oyulma mekanizmasını kullanılarak, mavi bölgenin hacmini $u_1(z, t)$, $c_1(z, t)$, $u_2(z, t)$, $c_2(z, t)$, h_1 , h_2 ve n (deniz tabanındaki katı maddenin tabii boşluk oranı) cinsinden birim navigasyon kanalı boyu ve birim zaman için bir denklemlerle ifade ediniz.
5. Yukarıdaki 1. ve 2. maddelerinde verilenlerin yanı sıra; $d_{50} = 2$ mm, $\sigma_g = 1.25$, $s = 2.65$, $n = 0.37$, $n_d = 0.45$, $B = 200$ m değerleri de bildirilmiştir. Bölgede ardışık 3 ay boyunca Tablo 4.1'de verilen dalga özellikleri verilen sürelerle görülmüştür. Ayrıca bu 3 ay boyunca sürekli olarak temsili bir

Tablo 4.1: Navigasyon kanalına 3 ay boyunca etkiyen dalga özellikleri ve süreleri.

Dalga Yüksekliği, H_{rms} (m)	Dalga Periyodu, T_p (s)	Dalga etkime süresi, t_{dalga} (saat)
≈ 0	≈ 0	350
0.25	2.0	182.0
0.5	3.0	96.0
1	4.0	34.0
1.5	5.0	26.0
2.0	5.6	12.0
2.5	6.4	8.0
3.0	6.9	6.0
3.5	7.5	5.3

$V_1 = 20\text{cm/s}$ hızının da dalgalarla eş yönden kanala dik olarak etkideği kabul edilecektir. Buna göre:

- Bu üç aylık süre boyunca taban malzemesinin (h_1 derinliğinde) hareketsiz kaldığı bir dönem olacak mıdır? Böyle bir dönem var ise bu dönemin zamansal yüzdesini hesaplayınız.
- Bu üç aylık süre boyunca (h_1 derinliğinde) taban şekillerinin yuvarlak tepecik ve sivri tepecik olduğu durumların zamansal yüzdesini hesaplayınız.
- Bu üç aylık süre boyunca (h_1 derinliğinde) taban şekillerinin yıkılarak *tabaka halinde katı madde taşımını* gerçekleşen bir dönem olacak mıdır? Böyle bir dönem var ise bu dönemin zamansal yüzdesini hesaplayınız.
- Medyan katı madde çapı (d_{50}) üzerinden hesap yaparak katı madde nin çökme hızı w_s 'yi bulunuz (bkz. Şekil 5d).
- Konsantrasyon dağılımını van Rijn and Walstra [2004] yöntemine göre ve hız dağılımını denklem (3.33)'a göre ifade ederek Tablo 2'de verilen dalga değerlerinden herbiri için askıda katı madde akısının h_1 ve h_2 derinliği boyunca değişimini ($\Delta q_S = c(z) u(z)$) sayısal hesap ile elde ediniz ve bunları tek bir çifte logaritmik eksen takımında çizin.
- Kanalın birim genişliğinde gerçekleşecek birikmenin hacmini hesaplayınız (özellikle tabana yakın noktalarda hesap basamağınız Δz 'yi küçük tutunuz, yukarıya gittikçe hesap kolaylığı açısından arttırabilirsiniz).
- Aynı yaklaşımla kanalın zıt şevinden itibaren birim genişlikte oluşacak oyulmanın hacmini hesaplayınız.



Şekil 4.3: Kum taneleri için sürüklenme katsayısının (C_D) çökme Reynolds sayısına ($\frac{w_s d}{\nu}$) göre değişimi.

- (h) Yukarıdaki (e), (f) ve (g) şıklarında yürüttüğünüz hesaplamaları, konsantrasyon dağılımını tepecikli rejimde Nielsen [1992] ve düz rejimde van Rijn and Walstra [2004] tarafından verilen yöntem dikkate alınacak şekilde tekrarlayınız. Bu sonuçlar ile önceki yöntemle bulduğunuz sonuçları kıyaslayınız ve yorumlayınız.
6. Deniz ortamında hiç dalga olmamış olsa idi (sadece $V = 20$ cm/s akıntı koşulu altında) kanalın birim genişliğinde gerçekleşecek birikmenin hacmi ne olurdu? Bulduğunuz sonucu 5(e) şıkında bulduğunuz sonuç ile kıyaslayarak yorumlayınız.

Bölüm 5

Kaynakça

- R.A. Bagnold. Motion of waves in shallow water: Interaction between waves and sand bottoms. *Proc. Roy. Soc., London*, A 187:1–15, 1946.
- H. A. Einstein. The bed-load function for sediment transport in open channel flows. Technical Bulletin 26, U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D.C., 1950.
- F. Engelund and J. Fredsoe. A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7:293–306, 1976.
- J. Fredsoe and R. Deigaard. *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, volume 3 of *Advanced Series on Ocean Engineering*. World Scientific, New Jersey, 1992.
- W.D. Grant and O.S. Madsen. Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research*, 87(C1):469–481, 1982.
- R.F. Luque and R. Beek. Erosion and transport of bed load sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 14(2):127–144, 1976.
- P. Nielsen. Some basic concepts of wave sediment transport. Series Paper No. 20, ISVA, Techn. Univ. Den., 1979.
- P. Nielsen. *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*. Advanced Series in Ocean Engineering. World Scientific, Singapore, 1992.
- R. Soulsby. *Dynamics of Marine Sands*. Thomas Telford Pub., London., 1997.
- R. L. Soulsby and J. S. Damgaard. Bedload sediment transport in coastal waters. *Coastal Engineering*, 52:673–689, 2005.
- B.M. Sumer. Lecture notes on turbulence. DTU, Mechanical Engineering, Copenhagen, 2007. downloadable from <http://www.external.mek.dtu.dk/personal/bms>.

- L.C. van Rijn. Sediment transport, part ii: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 110(11):1613–1641, 1984.
- L.C. van Rijn and D.J.R. Walstra. Description of transport2004 and implementation in delft3d-online. interim report prepared for dgr. Technical report, Delft Hydraulics Institute, The Netherlands., 2004.
- K.C. Wilson. Frictional behaviour of sheet flow. Progress Report 67, Institution of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, 1988.
- K.C. Wilson and F.N. Nnadi. Behaviour of mobile beds at high shear stress. In *Proceedings of 22th ICCE*, volume 3, pages 25–36, New York, 1990. ASCE.