

## RİJİT CİDARLI DAİRESEL KANALLARDA KATI MADDE HAREKETİNİN VE ÇÖKELMESİNİN BAŞLANGICI

*Necati Erdem ÜNAL\**

Alınma: 24.07.2018; düzeltme: 30.10.2018; kabul: 30.07.2019

**Öz:** Kanalizasyon ve yağmur suyu drenaj kanalları ile sulama kanallarında sıklıkla katı madde birikmekte, bunun sonucunda kanalların çalışma performansı düşmektedir. Bu anlamda pratikte en çok karşılaşılan problem drenaj kanalı tıkanmalarıdır. Bu problemlerin en aza indirilmesine hizmet etmek üzere deneysel veri esaslı model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Laboratuvarda yapılan fiziksel deneylere dayanan bu çalışmada rijit cidarlı kanallarda katı madde taşınımı problemi incelenmiş, akım ortamında hareket halinde bulunan katı maddenin çökmesi ve hareketsiz halde duran katı maddenin harekete başlaması ile ilgili veri toplanmıştır. Bunun için dairesel bir kanalda katı madde hareket döngüsü esas alınarak dört farklı çaptaki katı madde ve dokuz farklı kanal eğimi için gözlem ve ölçümler yapılmıştır. Deneylerde, çökmenin ve hareketin başlangıcının akım koşulları kaydedilmiştir. Literatürde, katı madde hareketi ile ilgili kayma gerilmesi ve hızı dayanan iki temel yaklaşım mevcuttur. Burada katı madde taşınımı için kayma gerilmesi yaklaşımı kullanılarak analiz yapılmış, bu yaklaşım altında Shields yöntemi kullanılmış ve hareketin başlangıcı ve çökmenin başlangıcı için modeller önerilmiştir. Bu modeller kullanılarak çökme engelleyen kayma gerilmesi belirlenebilir ve kanal eğimleri buna göre hesaplanabilir. Geliştirilen modellerin drenaj kanalı ve kanalizasyon sistemlerinin tasarımında kullanılabileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çökmenin başlangıcı, Drenaj sistemi, Hareketin başlangıcı, Katı madde hareketi, Rijit cidarlı kanal

### **Incipient Motion and Incipient Deposition of Sediment in Rigid Boundary Circular Channels**

**Abstract:** Performance of hydraulic systems such as sewer and urban drainage systems as well as irrigation canals decreases frequently and tremendously due to deposition of sediment transported within flow which causes blockages. A laboratory experimental study is performed in this study to have a deeper look at the incipient motion and incipient deposition of sediment particles. A rigid boundary cylindrical canal is built. Four different-size sediments are used, nine different longitudinal slopes are tested. Flow characteristics are observed from the experiments at the moment when sediment particles are at the beginning of incipient motion and incipient deposition. Shear stress approach, one of the two approaches, the other being velocity approach, is used. As the method, the Shields curve is considered for comparison. Results of the study are important for self-cleansing urban drainage system design with which the channel slope is determined such that it provides a shear stress preventing incipient deposition. It is thought that the models proposed in this study could be used by municipalities as a method to use in the design of urban drainage and sewer systems.

**Keywords:** Drainage system, Incipient deposition, Incipient motion, Rigid boundary channel, Sediment transport

\* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469 Maslak, İstanbul  
neu@itu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Hidrolojik havzalarda ve akarsu yataklarında katı madde hareketi su kaynakları ile ilgili en önemli araştırma ve uygulama konularından birisidir Graf ve Acaroglu (1968); Yalin (1972); Bogardi (1974); Yalin ve Karahan (1979). Katı madde hareketi kanalizasyon ve yağmur suyu drenajı gibi kentsel altyapı sistemlerinin tasarımında göz önünde bulundurulmaktadır. Bunun için akım ortamındaki hız veya kayma gerilmesi kullanılmaktadır CIRIA (1986); Mayerle (1988); Nalluri ve Ab Ghani (1996); Vongvisessomjai ve diğ. (2010). Bu ikisinden özellikle hız yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Kendiliğinden temizlenen bir kanal tasarımı için bu yaklaşımda hesaba katılan minimum hız değeri ülkeden ülkeye ve drenaj sistemi türüne göre (yağmur suyu, atık su veya birleşik) değişiklik göstermektedir. Minimum hız değeri ABD, Fransa, Almanya, İngiltere ve Türkiye gibi çok sayıda ülkede 0.3-1 m/s aralığında değişmektedir İSKİ (1987); Mayerle (1988); Nalluri ve Ab Ghani (1996); Vongvisessomjai ve diğ. (2010). Benzer şekilde ABD, İngiltere, Norveç, Almanya ve İsveç'te 1.0-12.6 Pa aralığında değişen kayma gerilmesi kullanılmaktadır Mayerle (1988); Nalluri ve Ab Ghani (1996); Vongvisessomjai ve diğ. (2010).

Minimum hız veya kayma gerilmesine dayanan kendiliğinden temizlenen kanal tasarımı kriterinde çok sayıda eksiklik bulunmaktadır. Katı maddenin türü ve miktarı, kanalın büyüklüğü ve enkesit şekli gibi birçok faktör hesaba katılmamaktadır. Bu nedenle adı geçen faktörleri de göz önüne alarak elde edilen kendiliğinden temizlenen kanal tasarım modellerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

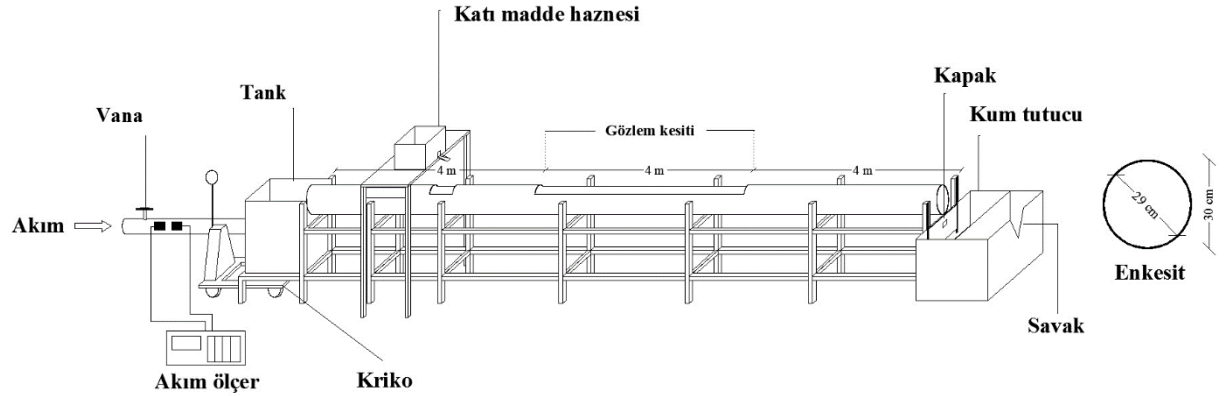
Katı madde taşınımı göz önüne alınarak bir kanalın hidrolik tasarımı kendiliğinden temizlenen kanal kavramı ile ilişkilendirilebilir. Bu kavram Butler ve diğ. (2003) tarafından şu şekilde tanımlanmıştır: "Kendiliğinden temizlenen bir kanal öyle bir katı madde taşıma kapasitesine sahiptir ki katı maddenin akım ortamında çökmesi ile hareketi arasında bir denge sağlanmaktadır ve bu da kanalın inşaat, işletme ve bakım masraflarını en aza indirir." Bu tanıma göre kendiliğinden temizlenen bir kanalın aşağıdaki iki koşuldaki birini sağlaması gerekmektedir: (1) Akım kanal tabanındaki katı maddeyi yerinden kaldırıp temizleyecek. (2) Akım ortamında hareket eden katı madde çökmeden hareketine devam edecektir.

Çökmenin başlangıç noktası, hareketin başlangıç noktası yani hareket eşiği ile ilgili olmalıdır ASCE Task Force Committee (1966); Loveless (1992). Ancak hareketin başlangıcı için geliştirilen modellerin çökme başlangıcı için kullanılmasından kaçınılmalıdır. Rijit cidarlı kanallarda hareketin başlangıç noktası modelleri de hareketli tabanlı kanal modellerinden farklıdır. Hareketli tabanlı kanallarda hareketin başlangıç noktasındaki kritik hız rijit cidarlı kanallardaki kritik hıza göre genellikle daha büyüktür Novak ve Nalluri (1984). Loveless (1992) rijit cidarlı kanallarda katı madde çökmesinin başlangıç noktasını incelemiştir. Safari ve diğ. (2015) rijit cidarlı kanallarda katı maddenin çökmesinin başlangıç noktasını literatürden temin ettiği deneysel verileri kritik hız yöntemini kullanarak incelemiş ve kanal enkesit şeklinin çökmenin başlangıç noktası üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Aksoy ve Safari (2014) trapez enkesitli bir kanalda hareketin başlangıç ve çökmenin başlangıç noktalarını incelemiş ve aynı sonuçları elde etmiştir. Ünal ve diğ. (2016) ayını çalışmayı beş farklı kanal enkesiti için yinelemiştir. Loveless (1992)'nin verilerini kullanarak Safari ve diğ. (2015) çökmenin başlangıç noktası modellerini geliştirmiştir.

Bu çalışmada kayma gerilmesi yaklaşımı kullanılarak hareketin ve çökmenin başlangıcını esas alan bir tasarım modeli çalışması anlatılmaktadır. Bunun için yapılan deneyler ve Shields kayma gerilmesi yöntem kullanılarak elde edilen bulgu ve varılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

## 2. DENEYLER

Deneyle, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda kurulan düzenekte yapılmıştır. Şekil 1'de kanal için deney düzeneğinin şematik görüntüsü verilmiştir. Deney düzeneğindeki daire enkesitli kanal 5 mm kalınlığında pleksiglastan üretilmiştir. Kanalın uzunluğu 12 m, kanal dış çapı 300 mm ve iç çapı 290 mm'dir. Kanal yatağı, boyuna doğrultuda eğim verilebilir bir çelik iskelet üzerine kurulmuştur. Deneylede katı madde olarak kohezyonsuz granüler kum kullanılmıştır. Bunun için dört farklı çapta üniform kum temin edilmiştir. Katı madde olarak medyan çapı 0.15 mm olan ince kum ile 0.58, 1.08 ve 1.52 mm olan orta kum seçilmiştir.



Şekil 1:

Deney düzeneğinin şematik durumu ve silindirik kanal enkesiti

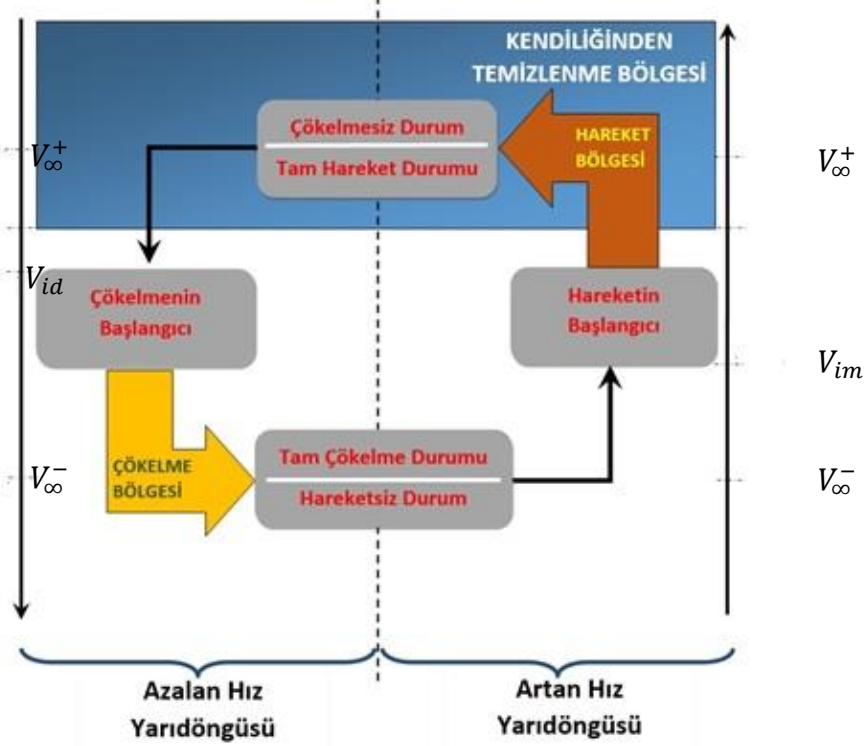
Deney matrisinin oluşturulması ve deneyin kurgulanması için katı madde hareketine ait Şekil 2'deki hareket döngüsü esas alınmıştır. Buna göre deneylede katı madde hareketinin dört durumu değerlendirilmiş, bunun için akım ortamındaki katı maddenin çökmesiz (tam hareket), çökmenin başlangıcı, tam çökme (hareketsiz) ve hareketin başlangıcı durumları tanımlanmıştır.

Şekil 2'deki katı madde hareketi döngüsü akım hızının azaldığı ve arttığı iki yarı döngüden oluşmaktadır. Deneylede akım hızının katı madde taneciklerinin çökmesini engelleyecek kadar yüksek ( $V = V_{\infty}^+$ ) olduğu koşullarda başlanması ile akım ortamında çökmesiz durum sağlanır. Katı madde hareketinde azalan hız yarı döngüsünde akım hızının azaltılması ile çökmenin başlangıcına ulaşılabilir. Bu durumda akım hızı çökme için yeterli düzeyde düşük bir değerdedir ( $V = V_{id}$ ). Akım hızının azalmaya devam etmesiyle ( $V = V_{\infty}^-$  olduğunda) tam çökme durumu sağlanır. Aynı zamanda hareketsiz durum olarak da adlandırılan bu andan itibaren artan hız yarı döngüsüne geçilir ve akım hızının artmasıyla ulaşılan belli bir eşik değerinde ( $V = V_{im}$ ) katı madde taneciklerinin harekete başlangıç noktası elde edilir. Hızın artmaya devam etmesi ile  $V = V_{\infty}^+$  sağlandığında tam hareket durumuna ulaşılır. Bu aynı zamanda deneyin başlangıcındaki çökmesiz durumdur.

Deneylede, dört farklı çaptaki katı madde ve dokuz farklı kanal eğimi için Şekil 2'deki katı madde hareket döngüsünde geçen dört farklı hareket durumuna karşı gelen gözlem ve ölçümler yapılmıştır. Her bir deneyde belli bir eğimdeki kanalın belli bir katı madde çapı için oluşturulan farklı akım ve katı madde koşulları (debi, hız, katı madde konsantrasyonu vb.) altında katı madde hareketi gözlenmiştir. Deney matrisi, kanal taban eğimi 0.001466 ile 0.01106 arasında dokuz kez değiştirilerek dört kum için Şekil 2'deki dört hareket durumunun gözlemlendiği akım koşulları sağlanacak şekilde oluşturulmuştur.

Şekil 3'teki deney akış şemasına göre seçilen her bir katı madde için boyuna doğrultuda kanala belli bir eğim verilmiş; seçilen katı maddenin belli bir konsantrasyonda akıma karışması için katı madde haznesinin çıkışı ve titreştirici ayarlanmıştır. Akımın debisi katı

madde akım ortamında çökelmeyecek şekilde yüksek alınmıştır. Bu katı maddenin çökmesiz durumudur (Şekil 3'te 1 yolu). Çökmenin başlangıcını gözlemek için debi yavaş yavaş azaltılmış, çökmenin başlangıcının gözlendiği andaki akım koşulları kaydedilmiştir (Şekil 3'te 2 yolu). Debi azaltılmaya devam edilerek çökme durumu (hareketsiz durum) sağlanmıştır (Şekil 3'te 3 yolu). Yine bu andaki akım koşulları gözlenmiş ve kaydedilmiştir. Bu kez çökme durumundaki katı maddenin harekete geçmesi için debi yavaş yavaş artırılmıştır. Katı madde taneciklerinin harekete başladıkları an hareketin başlangıç noktası olarak kaydedilmiştir (Şekil 3'te 4 yolu).



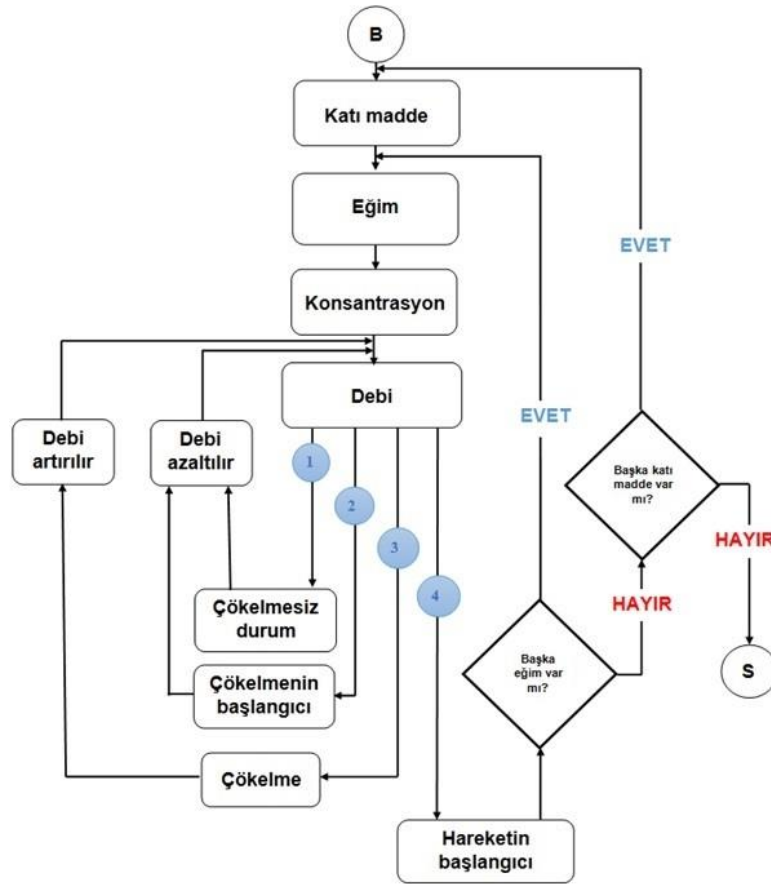
Şekil 2:  
Katı madde hareket döngüsü

Ayarlanan eğim için hareketin başlangıcının gözlenmesi ile katı madde değiştirilmeksizin bir sonraki eğim için deneyler tekrar edilmiştir. Ayarlanan eğim için deneylerin tamamlanmasının ardından katı madde çapı değiştirilmiştir. Her bir hareket durumu tüm eğimlerde her dört katı madde için gözlenecek şekilde deneyler tekrar edilmiş, böylece deneysel çalışma tamamlanmıştır.

Deneylerde akım ortamındaki katı madde hareketi ile ilgili aşağıdaki tanımlar esas alınarak gözlemler yapılmıştır. Gözlemlerin yapıldığı anlarda akım koşullarına ait veriler de kaydedilmiştir.

Deneylere katı madde hareketinin çökmesiz durumu sağlanacak şekilde yüksek debi koşullarında başlanmıştır. Bu durumda akım ortamında katı maddenin çökmesi önlenmiş, çökmesiz durum sağlanmıştır. Çökmesiz durum akım ortamındaki katı maddenin çökme durumuna geçtiği an, katı madde hareketinin çökmesinin başlangıç noktasıdır. Deneylerde katı madde tanelerinin birikmeye başlama anı gözle izlenmektedir. Katı madde tanelerinin kanal tabanında belli bölgelerde gözle görülecek şekilde kümelenmiş olarak birikmesiyle çökmenin başladığı kabul edilebilir.

Çökelmenin başlangıç noktası elde edildikten sonra akım hızının azaltılması ile tam çökme durumu sağlanmıştır. Debi ve hız azaldıkça, kanalda biriken katı madde miktarı artmaktadır. Tam çökme durumunda katı madde tanecikleri akım içerisinde kanal tabanında hareketsiz kalmakta ve kanal tabanını kaplamaktadır. Tam çökme durumu elde edildikten sonra, bu kez hareketin başlangıç noktasına ulaşmak için katı madde hareketinin artan hız yarı döngüsü sağlanmalıdır. Bunun için bu kez akımın debisi artırılmak suretiyle tabandaki katı madde parçacıkları harekete başlamaya zorlanmıştır. Katı madde parçacıklarının harekete başlamasını sağlayan durum katı maddenin harekete başlangıç koşulu olarak tanımlanır. Çökelmesiz durum (tam hareket durumu), çökelmenin başlangıcı ve tam çökme durumu (hareketsiz durum) gibi hareket başlangıç noktasının belirlenmesi de gözle yapılmış, bunun için Kramer (1935) tarafından katı madde hareketinin başlangıç noktası için verilen aşağıdaki tanımlar göz önünde bulundurulmuştur: 1) Hiçbir parçacık hareket etmez (hareketsiz durum), 2) Birkaç parçacık harekete başlar (zayıf taşınım), 3) Birçok parçacık harekete başlar (orta taşınım), 4) Tabanda genel hareket durumu vardır (genel taşınım). Deneysel çalışmalarda tek bir parçacığın harekete başlamasını belirlemek çok zordur, hatta pratik olarak mümkün değildir. Bu nedenle genellikle tabanda genel hareket durumu (genel taşınım) hareketin başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada bu yol izlenmiş, deneylerde akım ortamındaki katı madde parçacıklarının gözle tespit edilen harekete başlama anı hareketin başlangıcı olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3:  
Deney akış şeması

### 3. VERİLERİN İNCELENMESİ

Deney sonuçları akım içindeki katı maddenin harekete veya çökmeye başlaması durumları kayma gerilmesi yaklaşımını esas alan Shields (1936) yöntemi ile incelenmiştir. Katı madde taneçiklerinin harekete başlaması için gerekli eşik koşulunu belirlemek üzere (Shields, 1936)

$$\tau_{im}^* = \frac{\tau_{im}}{\rho g d (s - 1)} \quad (1)$$

şeklinde boyutsuz kritik kayma gerilmesini tanımlamıştır. (1) denkleminde  $\tau_{im}$  hareketin başlangıç noktasında akım ortamında yaratılan kritik kayma gerilmesi,  $\tau_{im}^*$  ise bu kayma gerilmesinin boyutsuz olarak verilen değeridir,  $\rho$  suyun özgül kütlesi,  $g$  yerçekimi ivmesi,  $d$  katı madde parçacık çapı ve  $s$  katı maddenin akışkana göre tanımlanan yoğunluğudur. Shields (1936), kayma gerilmesinin, akım, akışkan ve katı maddeye ait diğer karakteristikler ile olan ilişkisini

$$Re^* = \frac{u_* d}{\nu} \quad (2)$$

ile tanımlanan katı madde tane Reynolds sayısı ( $Re^*$ ) ile ifade etmek üzere

$$\tau_{im}^* = f(Re^*) \quad (3)$$

şeklinde bir fonksiyon sunmuştur. Shields eğrisi olarak tanımlanan bu fonksiyonda akım özellikleri (kayma hızı,  $u_*$ ), akışkan özellikleri (viskozite,  $\nu$ ) ve katı madde özellikleri (tane çapı,  $d$ ) ile verilmektedir. (1)-(3) denklemlerinden

$$\frac{\tau_{im}}{\rho g d (s - 1)} = f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \quad (4)$$

elde edilir. Kayma hızının

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{im}}{\rho}} \quad (5)$$

ile verilen tanımı göz önünde bulundurulduğunda (4) denkleminin kapalı çözüm üreten bir fonksiyon olduğu görülür. Boyutlu kritik kayma gerilmesi ( $\tau_{im}$ ) Darcy-Weissbach denkleminde

$$\tau_{im} = \frac{\lambda}{8} \rho V_{im}^2 \quad (6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada  $V_{im}$  ortalama akım hızı ve  $\lambda$  sürtünme katsayısıdır ve rijit cidarlı kanallar için Colebrook-White denklemi ile elde edilmektedir Butler ve diğ. (1996). Colebrook-White denklemi

$$\lambda = \frac{1}{4 \left( \log \left( \frac{k_b}{14.8R} + \frac{0.22\nu}{R\sqrt{gRS}} \right) \right)^2} \quad (7)$$

şeklinde dir. Burada,  $R$  hidrolik yarıçap,  $S$  kanal taban eğimi,  $k_b$  kanal tabanının pürüzlülük yüksekliği olup katı maddenin medyan çapına ( $d$ ) eşit olduğu varsayılmaktadır.

Hareketin başlangıç noktasına ait deney verileri kullanılarak

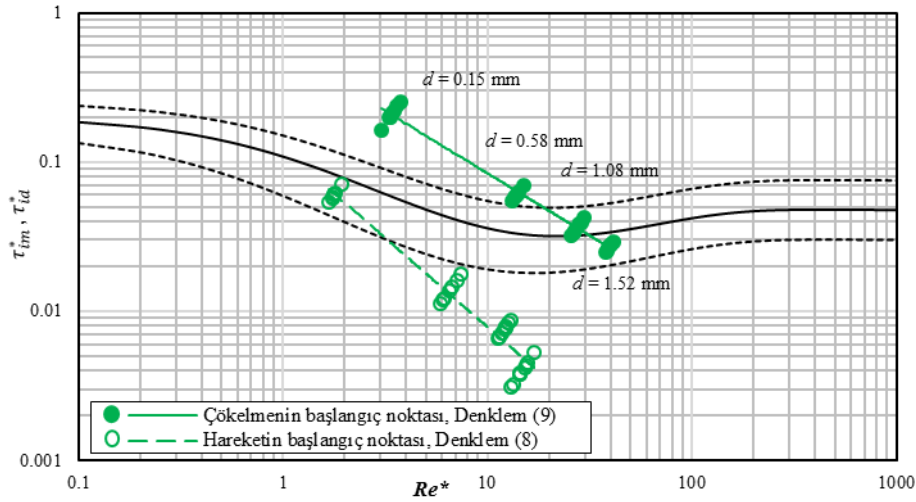
$$\frac{\tau_{im}}{\rho g d (s - 1)} = 0.12 \left( \frac{u_* d}{\nu} \right)^{-1.19} \quad 1.69 < \frac{u_* d}{\nu} < 17.01 \quad (8)$$

elde edilmiştir. Aynı yöntem çökmenin başlangıç noktası verilerine uygulandığında

$$\frac{\tau_{id}}{\rho g d (s - 1)} = 0.57 \left( \frac{u_* d}{\nu} \right)^{-0.83} \quad 3.02 < \frac{u_* d}{\nu} < 41.11 \quad (9)$$

elde edilmiştir. Burada  $\tau_{id}$  hareketin başlangıç noktasında akım ortamında yaratılan kritik kayma gerilmesidir. Her bir denklem verildiği tane Reynolds sayısı aralığında geçerlidir. Şekil 4'te hareketin başlangıç noktası ve çökmenin başlangıç deney verileri Shields eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Buna göre, hareketin başlangıcı ile çökmenin başlangıcı birbirinden farklı iki fiziksel süreçtir. Bu nedenle hareketin başlangıcı için geliştirilen modellerin çökmenin başlangıcı için kullanılmayacağı vurgulanmalıdır. Bu arada, Shields eğrisinin Paphitis (2001) tarafından verilen üst ve alt sınırları da verilmiştir.

Şekil 4'te görüldüğü gibi, her dört kum için katı maddenin harekete başlaması ortalama Shields eğrisine göre daha az kayma gerilmesi gerektirmektedir. Burada Shields eğrisinin hareketli tabanlı kanallarda katı madde hareketi için geliştirildiği, buna karşın bu çalışmada rijit cidarlı bir kanal kullanıldığı göz önünde bulundurulmalıdır. Buna göre, hareketli tabanlı kanallarda katı madde parçacıklarının harekete başlaması için daha yüksek kayma gerilmesi gerekmektedir. Çapı 0.15 mm olan katı madde durumunda gereken kayma gerilmesi ortalama ve alt sınır Shields eğrileri arasında kalmış, 0.58, 1.08 ve 1.52 mm çaplı katı maddeler için hesaplanan kayma gerilmesi ise Shields alt sınır eğrinin altında belirlenmiştir. Çökme başlangıcında ise 0.15 ve 0.58 mm çaplı katı maddelerde gerekli kayma gerilmesi Shields üst sınırının üstünde kalmaktadır. Çapı 1.08 mm olan katı madde için kayma gerilmesi değeri üst sınırı ile ortalama Shields eğrisi arasında yer almakta, 1.52 mm çaplı katı madde için ise ortalama eğri ile alt sınır arasında bulunmaktadır. Buna göre, kaba kumlar için rijit cidarlı kanallarda çökmenin başlangıcı için gereken kayma gerilmesi hareketli tabanlı kanallarda gerekli kayma gerilmesinden daha düşüktür.



**Şekil 4:**  
*Shields eğrisi üzerinde hareketin ve çökmenin başlangıç noktaları*

Akım ortamında katı maddenin harekete başlaması için gerekli olan kayma gerilmesi aynı akım koşulları altında hareket halindeki katı maddenin çökmesini sağlayan kayma gerilmesinden düşüktür. Başka bir deyişle, hareket halindeki katı madde, hareketsiz katı maddenin harekete başlaması için gereken kayma gerilmesinden daha yüksek bir gerilme altında çökmeye başlar. Bu gözlem her dört kum için geçerlidir. Sonuçta, hareketin başlangıcındaki kayma gerilmesinin çökmenin başlangıcındaki kayma gerilmesine göre daha düşük olduğu, bu durumun katı madde çapı büyüdükçe belirgin hale geldiği görülmektedir.

#### 4. SONUÇ

Hareketli tabanlı kanallar için literatürde mevcut modeller rijit cidarlı kanallar için geçerli değildir. Çünkü, hareketli tabanlı kanallarda pürüzlülük daha yüksektir. Bu yüzden hareketli tabanlı kanallarda katı madde parçacıklarının harekete başlaması için rijit cidarlı kanallara göre daha büyük hidrodinamik kuvvet gerekmektedir. Dolayısıyla, hareket için gerekli kayma gerilmesi de hareketli tabanlı kanallarda rijit cidarlı kanallara göre daha büyüktür. Gözlemler hareket halindeki katı maddenin çökme başlangıcı ile hareketsiz duran katı maddenin hareket başlangıcındaki kayma gerilmelerinin birbirinden farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Başka bir deyişle, hareket halindeki katı madde parçacığı, hareketsiz bir parçacığın harekete başlaması için gereken kayma gerilmesinden daha yüksek bir kayma gerilmesinde çökmeye başlar.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK MAG tarafından 114M283 no.lu proje ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

1. Aksoy, H., Safari, M. J. S. (2014) Rijit Cidarlı Kanallarda Katı Madde Çökmesinin Başlangıç Noktası, TÜBİTAK MAG Proje No: 113M062
2. ASCE Task Force Committee (1966) Sediment transportation mechanics: Incipient of motion, *Journal of Hydraulic Division*, 92(HY2), 291-314
3. Bogardi, J. (1974) Sediment transport in alluvial streams, *Akademiai Kiado*, Budapest



4. Butler, D., May, R.W.P., Ackers, J.C. (1996) Sediment transport in sewers, Pt. 1: 5 background. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water, Maritime and Energy*, 118(2), 103-112. doi:10.1680/iwtme.1996.28431
5. Butler, D., May, R., Ackers, J. (2003) Self-Cleansing Sewer Design Based on Sediment Transport Principles, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(4), 276-282. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:4(276)
6. CIRIA (1986) Sediment movement in combined sewerage and storm-water drainage systems, Phase 1. *Project report. London: CIRIA research project No. 336*
7. Graf, W.H., Acaroglu, E.R. (1968) Sediment transport in conveyance systems, Part 1, A physical model for sediment transport in conveyance systems, *Hydrological Sciences Journal*, 13(2), 20-39
8. İSKİ, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (1987) *Kanalizasyon Projeleri Teknik Şartnamesi*, No: KPR 01 DEV 06/87 T
9. Kramer, H. (1935) Sand mixtures and sand movement in fluvial levels, *Trans. ASCE*, 100, 798-838.
10. Loveless, J. H. (1992). Sediment transport in rigid boundary channels with particular reference to the condition of incipient deposition, PhD Thesis, University of London.
11. Mayerle, R. (1988). Sediment transport in rigid boundary channels, PhD Thesis, *Department of Civil Engineering*, University of Newcastle Upon Tyne, England.
12. Nalluri, C., Ab Ghani, A. (1996) Design options for self-cleansing storm sewers, *Water Science & Technology*, 33(9), 215-220. doi: 10.1016/0273-1223(96)00389-7
13. Novak P., Nalluri, C. (1984) Incipient motion of sediment particles over fixed beds, *Journal of Hydraulic Research*, 22(3), 181-197. doi: 10.1080/00221688409499405
14. Paphitis, D. (2001) Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves, *Coastal Engineering*, 43(3), 227-245. doi: 10.1016/S0378-3839(01)00015-1
15. Safari, M. J.S., Aksoy, H., Mohammadi, M. (2015) Incipient deposition of sediment in rigid boundary open channels, *Environmental Fluid Mechanics* 15(5), 1053-1068. doi: 10.1007/s10652-015-9401-8
16. Shields, A. (1936) Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement, *Preussischen Research Institute of Hydraulic Engineering*, Berlin, Germany, Issue 26
17. Ünal, N. E., Aksoy, H., Safari, M.J.S. (2016) Hareketin ve Çökelmenin Başlangıcı Esaslı Kendiliğinden Temizlenen Drenaj Sistemi Tasarım Modelleri, *TÜBİTAK MAG* Proje No: 114M283
18. Vongvisessomjai, N., Tingsanchali, T., Babel, M. S. (2010) Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow, *Urban Water Journal*, 7(1), 61-77. doi: 10.1080/15730620903242824
19. Yalin, M.S (1972) *Mechanics of Sediment Transport*, Oxford, New York, Pergamon Press.
20. Yalin, M.S., Karahan, E. (1979) Inception of sediment transport, *Journal of the Hydraulics Division*, 105(11), 1433-1443

