

Köprü Yan Ayaklarının Oluşturduğu Daralmanın Atnalı Vorteks Sistemi ve Oyulmaya Etkisinin DES Modellemesi ile İncelenmesi

Mete Köken

ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidromekanik Laboratuvarı

Tel: (312) 210 54 53

E-Posta: mkoken@metu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada, düz bir kanalın karşılıklı iki duvarına yerleştirilen dökme tip köprü yan ayakları etrafında oluşan atnalı vorteks sisteminin ve zemindeki kayma gerilmelerinin değişimi iki farklı daralma oranı için incelenmiştir. Benzetimler, 45000'lik Reynolds sayısında ayrışan döngü benzetimi (DES) kullanılarak yapılmıştır. Kanal girişinde zamanla değişen hız çalkantılarını içeren bir sınır koşulu uygulanmıştır. Benzetimler oyulmanın başlangıcını temsil eden düz zemin koşullarında yapılmıştır. Köprü yan ayakları etrafında oluşan atnalı vorteks sistemi ayak etrafında oluşan oyulmadaki ana mekanizmadır ve ayaklar sebebiyle kanalda oluşan daralma miktarı arttıkça atnalı vorteks sisteminin yapısında önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Bunun dışında artan daralma miktarı ile kanal merkezinde akım yönünde uzanan bir çift güçlü vorteks oluşmaktadır. Tüm bu farklılıklar, değişik daralma oranlarında zeminde birbirinden oldukça farklı kayma gerilmesi ve basınç çalkantısı dağılımlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden, oyulmanın başlangıç safhasında daralma oranı değiştikçe köprü yan ayakları etrafındaki sediment sürüklenmesi ve oyulma mekanizmasının çok farklılaştığı düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler: Atnalı vorteksi, Daralma, DES, Köprü yan ayağı, Sayısal modelleme, Taban oyulması, Türbülanslı akım.

Giriş

Köprü yan ayağı etrafında oluşan oyulmanın büyüklüğü ve biçiminin tespiti köprünün ekonomik ve güvenli dizayn edilebilmesi açısından hayati önem taşımaktadır. Özellikle dar nehirlerde, nehrin iki yakasındaki köprü yan ayakları nehir kesitini daha da daraltarak oyulmanın şekli ve büyüklüğünü etkilemektedir.

Nehirlerde köprü yan ayaklarının oluşturduğu daralma akım içerisinde önemli değişikliklere yol açmakta ve nihayetinde ayaklar etrafında büyük ölçekli ve enerjik geçici düzenli akım yapıları oluşmaktadır. Bu yapılar tabana yakın bir bölgede ilerlediğinde ya da oluştuğunda zemindeki kayma gerilmesi ve basınç çalkantısı değerleri artmakta ve tabandaki sediment parçacıkları hareketli hale geçmektedir. Bunun sonucunda da ayaklar etrafında bir oyulma çukuru oluşmaya başlamaktadır. Ayakların oluşturduğu daralma sebebiyle ortaya çıkan karmaşık akım fiziği ve oyulma mekanizmasını anlayabilmek yeni oyulma tedbirlerinin geliştirilebilmesi ve köprülerin güvenli inşası açısından çok önemlidir.

Köprü yan ayakları birbirlerine yaklaştıkça; bu yapıların etrafında oluşan atnalı vorteks sistemleri ve ayrışmış kesme tabakası içerisinde akım yönünde ilerleyen vorteks tüpleri

de birbirleriyle etkileşebilmektedir. Bu noktada literatürde tekil bir köprü yan ayağı için elde edilmiş olan bilgiler yetersiz kalmaktadır.

Literatürde konu ile ilgili yapılan çok sayıdaki çalışmada değişik hidrolik koşullar ve farklı yan ayak tipleri için, ayak etrafında oluşan maksimum oyulma derinliği ve oyulma çukurunun şekli incelenmiştir (Melville, 1997). Fakat literatürdeki sınırlı sayıdaki araştırmada, tekil bir köprü yan ayağı/mahmuz etrafında oyulmaya yol açan akımın fiziği incelenmiştir (Baker, 1980; Dargahi, 1989; Koken ve Constantinescu, 2008, 2009, Koken, 2011; Koken ve Gogus, 2015). Bu açıdan bakıldığında yüksek daralma oranlarında köprü yan ayakları etrafında oluşan karmaşık akım fiziği ve bölgedeki türbülans yapılarını inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır.

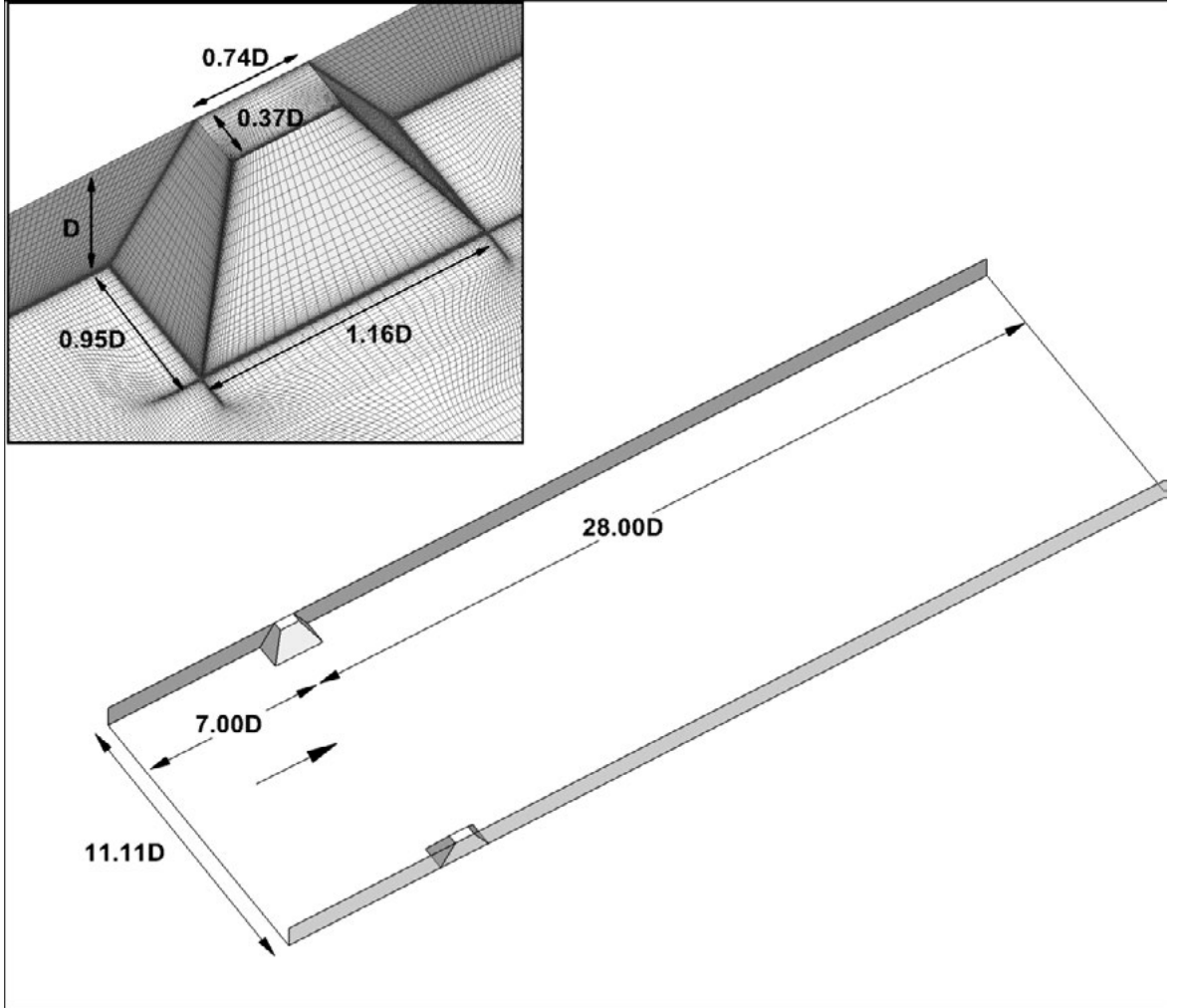
Bu çalışma, düz bir kanalın karşılıklı iki yanına yerleştirilen köprü yan ayakları etrafında oluşan geçici düzenli akım yapılarının farklı daralma oranları için farklı oyulma safhalarında sayısal olarak incelenmesini içermektedir. Çalışma kapsamında ayrışan döngü benzetimi (Detached Eddy Simulation, DES) kullanılarak düz bir kanal içerisinde farklı daralma oranlarında köprü yan ayakları etrafında oluşan akım incelenmiştir. Köprü yan ayakları birbirine yaklaştıkça her iki ayak etrafında oluşan atnalı vorteks sisteminin yapısında önemli değişiklikler meydana gelmektedir. Ayrıca kanal içerisinde akım doğrultusunda uzayan daralma vorteksleri oluşmaktadır. Bu değişiklikler ayak etrafındaki zemin gerilmesi ve basınç çalkantısı değerlerini artırarak oyulmayı etkilemektedir.

Sayısal Model

Benzetimlerde kullanılan program üç boyutlu sıkıştırılmaz Navier Stokes denklemlerini bütünleştirmek için eğri çizgisel koordinatlarda bölünmüş adım metodunu kullanmaktadır. Momentum denklemindeki konvektif terimler beşinci derece doğruluktaki yanlı rüzgar yönü şeması ile ikinci derece doğruluktaki merkezi farkların bir karışımı kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Momentum ve basınç-Poisson denklemlerindeki tüm diğer terimlerde ikinci derece doğruluktaki merkezi farklar kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak Spalart-Almaras tabanlı DES modeli kullanılmıştır.

Mevcut çalışmada iki farklı köprü yan ayağı uzunluğu ve dolayısıyla iki farklı daralma oranı kullanılmıştır. Benzetimlerde kullanılan tüm değişkenler akım derinliği ($D=0.135$ m) ve ortalama akım hızı ($U=0.335$ m/s) kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Kullanılan hesap ağı ve sayısal modelin boyutları kısa köprü yan ayağı için Şekil-1'de verilmiştir. Her iki benzetimde de kanal genişliği, W , $11.11D$ olarak alınmıştır. Yarı akım derinliğindeki köprü yan ayağının uzunluğu, L , kısa köprü yan ayağı için $0.66D$ uzun köprü yan ayağı için ise $2.51D$ kadardır. Bu uzunluklarla kanaldaki daralma oranı kısa ve uzun ayaklar için sırasıyla $2L/W=0.12$ ve $2L/W=0.45$ 'tir. Her iki benzetimde de hesap ağı büyüklüğü yaklaşık olarak 3 milyondur. Modeldeki tüm katı yüzeylerde kaymayan duvar sınır koşulu; su serbest yüzeyinde ise simetri sınır koşulu uygulanmıştır. Modeldeki katı yüzeylerin yakınındaki ilk hesap ağı noktası her zaman laminer alt tabakanın içerisinde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Serbest yüzeyde simetri sınır koşulunun uygulanması, akımdaki Froude sayısının 0.3 mertebesinde olması ve yüzey deformasyonlarının ihmal edilebilir büyüklükte olması sebebiyle uygundur. Modelin çıkış yüzeyinde vortekslerin model sahasını rahatça terk edebilmesi ve fiziksel olmayan titreşimlere yol açmaması açısından konvektif bir sınır koşulu uygulanmıştır. Modelin giriş yüzeyinde ise zamanla değişen ve türbülans titreşimlerini içeren bir hız profili uygulanmıştır. Benzetimler 24 çekirdeğin kullanıldığı bir küme

bilgisayarda 0.03 D/U zaman adımı kullanılarak koşulmuştur. Benzetimler akım istatistiksel olarak düzenli hale gelinceye kadar koşulmuş ve sonrasında ise 50 D/U zaman boyunca depolanan verinin ortalaması alınarak ortalama akım bilgileri elde edilmiştir.



Şekil 1 Küçük daralma oranı için sayısal model ve hesap ağının görünümü.

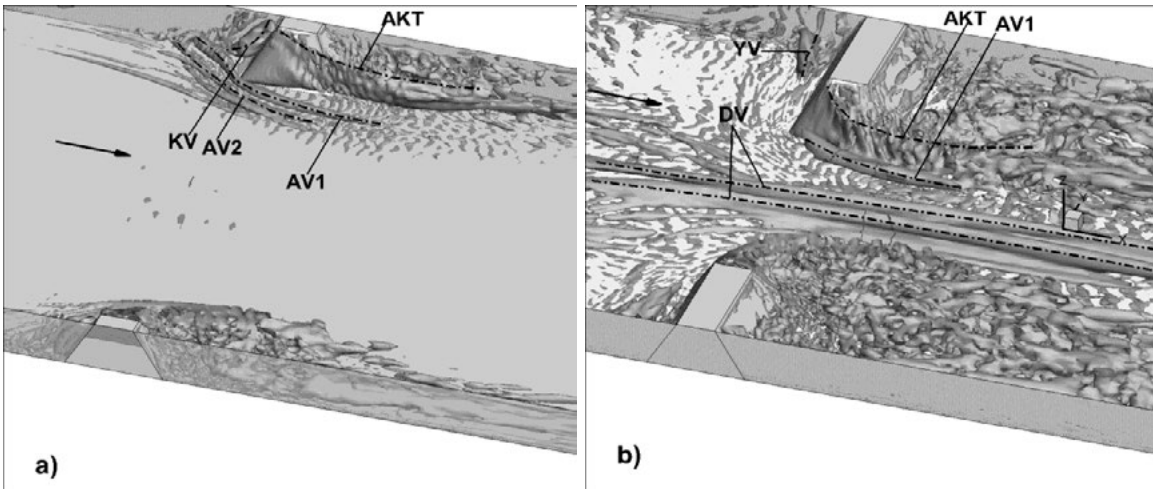
Değerlendirme

Köprü Yan Ayağı Etrafındaki Geçici Düzenli Akım Yapıları

Ayak etrafında oluşan geçici düzenli akım yapıları Şekil-2'de ortalama akım için Q kriteri kullanılarak görselleştirilmiştir. Küçük daralma oranında kanal tabanında ayağı çevreleyen iki adet atnalı vorteksi oluşmaktadır (Şekil 2a). Bunlar birincil ve ikincil atnalı vorteksleri AV1 ve AV2'dir. Bunların dışında ayağın memba tarafında oluşan resirkülasyon bölgesinde su serbest yüzeyinden başlayarak düşey yönde uzanan bir köşe vorteksi KV bulunmaktadır. Bu vorteks düşey yönde ilerleyerek zemine yaklaşıncaya bükülmekte ve birincil atnalı vorteksi AV1 ile birleşmekte ve onu beslemektedir. Şekil 2'de, ayağın memba köşesinden başlayarak akım yönünde ilerleyen ve kanalda oluşan hızlı akım ile ayağın arkasında oluşan resirkülasyon bölgesindeki yavaş akımı birbirinden ayıran, ayrılmış kesme tabakası (AKT) da görülmektedir. Küçük daralma

oranında her iki ayağın etrafında oluşan geçici düzenli akım yapıları birbirleri ile etkileşmemektedir.

Büyük daralma oranında ayaklar etrafında oluşan geçici düzenli akım yapıları küçük daralma oranındakinden çok farklıdır. En önemli fark, kanal merkezinde tabana yakın mesafede, eksenini akım yönünde uzanan ve birbirine ters istikamette dönen iki adet daralma vorteksinin (DV) oluşumudur. Bu vorteksler ayak ekseninin memba tarafında yaklaşık olarak 4.5D mesafesinde oluşmakta ve ayak ekseninin mansap tarafında yaklaşık olarak 20D kadarlık bir mesafe boyunca etkisini korumaktadır. Bu vortekslerin tabandaki kayma gerilmesine olan etkisi ileriki bölümde incelenecektir fakat bunların oyulmanın ilk safhalarında etkin rol alacağı kaçınılmazdır. İki daralma oranında oluşan diğer bir önemli fark birincil atnalı vorteksi AV1 ile ilgilidir. Küçük daralma oranından farklı olarak, büyük daralma oranında atnalı vorteksi, HV1, ortalama akımda sadece kanalın daralan kesitinde ve ayağın mansap kısmında gözlenebilmektedir. Anlık akım verileri incelendiğinde, HV1'in sınırlı sayıda zaman adımlarında ayağın memba tarafında da oluştuğu görülmektedir; fakat HV1 bu bölgede çok kararsız olduğu için ortalama akımda kaybolmaktadır. İki daralma oranı arasındaki bir diğer önemli farklılık ise büyük daralma oranında ayağın membasında köşe vorteksinin artık oluşmamasıdır. Bu kısımda artık bir resirkülasyon bölgesi de gözlemlenmemektedir. Bunun yerine yarım akım derinliği seviyesinde eksenini ayak eksenine paralel olan bir vorteks (YV) oluşmaktadır. Bu vorteks çok güçlü olmayıp ayağın uç bölgesine ulaşmadan akım içerisinde dağılmaktadır.

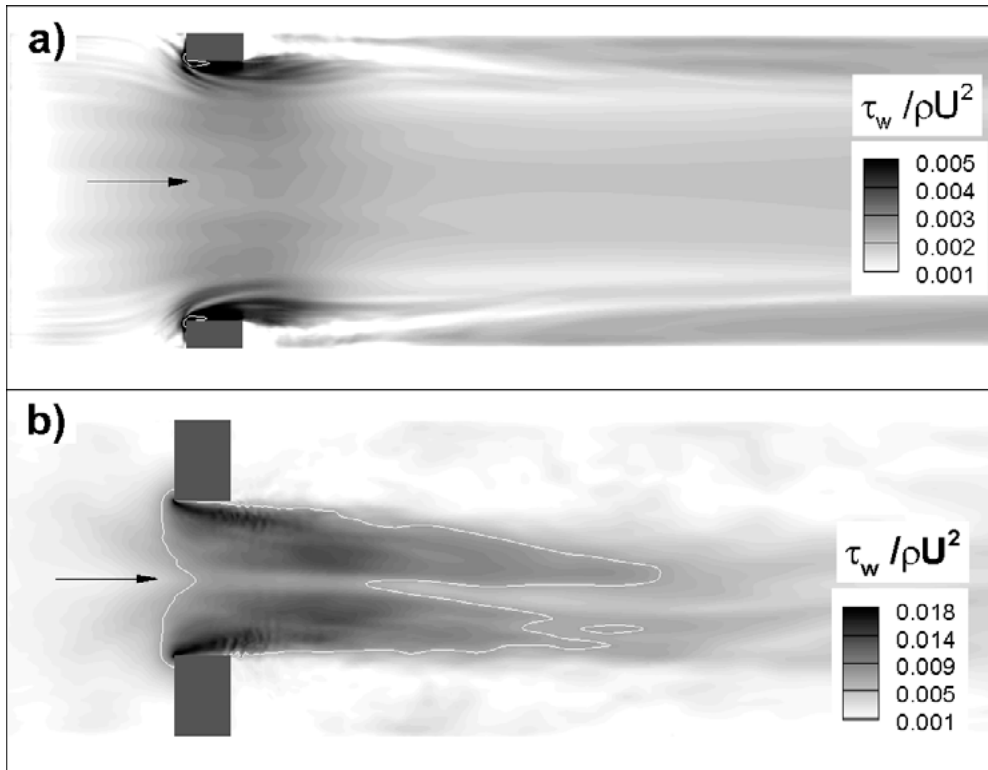


Şekil 2 Ortalama akımda ayaklar etrafında oluşan geçici düzenli akım yapılarının Q kriteri kullanılarak görselleştirilmesi: a) Küçük daralma oranında, b) Büyük daralma oranında.

Tabandaki Kayma Gerilmesi ve Basınç Çalkantısı Değerleri

Ayak etrafındaki oyulmaya etki eden en önemli faktör zemindeki kayma gerilmesidir. Her iki daralma oranı için ortalama akım koşullarında zeminde oluşan boyutsuz kayma gerilmesi değerleri, $\tau_w/\rho U^2$, Şekil 3'te verilmiştir. Her iki daralma oranında da kayma gerilmesi değerleri AKT boyunca ve AV1'in eksenini boyunca artmaktadır. Küçük daralma oranında kanal merkezinde ve ayaklar arasındaki bölgedeki kayma gerilmesi değerleri biraz artmaktadır fakat bu değerler hiçbir zaman Shields Diyagramından ortalama dane çapı $d_{50} = 1.5$ mm olan zemin malzemesi için elde edilen boyutsuz kritik kayma gerilmesi değerinden ($\tau_{wc}/\rho U^2=0.007$) daha büyük değildir. Şekil 3a'da ayak civarında bu kritik değerini aştığı ufak bölge beyaz çizgi ile çevrilmiştir. Bu bölge

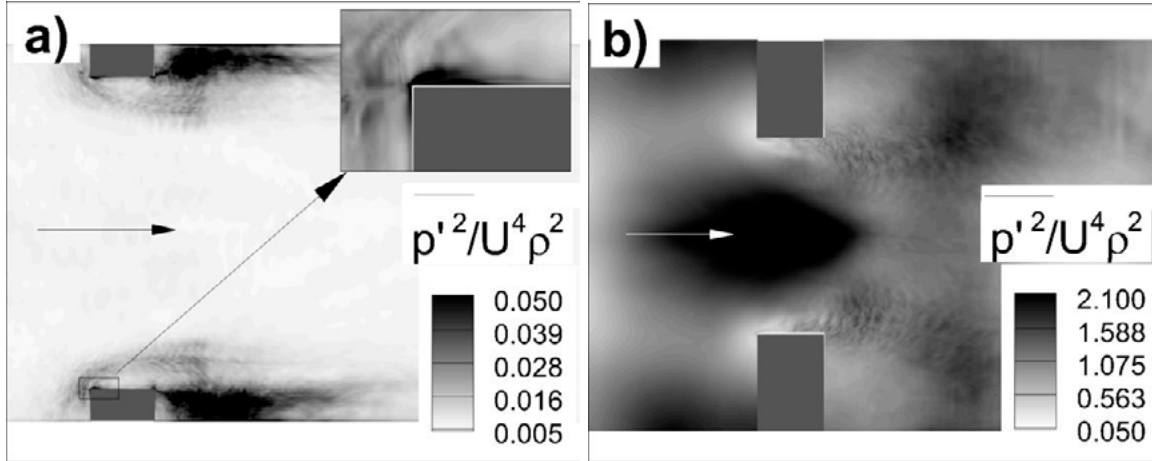
daralan kesitte oyulmanın başladığı bölgedir ve tekil köprü yan ayakları için yapılan çalışmalarda gözlemlerle uyumludur. Büyük daralma oranında, oluşan güçlü akım ivmelenmesi ve DV'lerin mevcudiyeti sebebiyle kanal merkezinde oldukça büyük bir bölgede yüksek kayma gerilmesi değerleri gözlemlenmektedir. Kritik kayma gerilmesinden daha büyük değerlerin gözlemlendiği bu bölge akım yönünde ayak ekseninden yaklaşık 15D mesafeye kadar uzanmaktadır (Şekil 3b'de beyaz çizgi ile çevrelenmiş kısım). Buradan ortaya çıkan sonuç büyük daralma oranında oyulma, daralan kesitin tamamında ve hatta merkezde akım yönünde oldukça uzun bir mesafeyi kapsayacak bir bölgede başlamaktadır. Küçük ve büyük daralma oranlarında sırasıyla zeminde elde edilen en büyük boyutsuz kayma gerilmesi değerleri 0.028 ve 0.037'dir. Her iki durumda da en büyük kayma gerilmesi değerleri ayakların ucunda memba tarafında oluşmaktadır.



Şekil 3 Ortalama akım için zeminde elde edilen boyutsuz kayma gerilmesi değerleri: a) Küçük daralma oranı için; b) Büyük daralma oranı için.

Zeminde türbülanslı akım sebebiyle oluşan basınç çalkantıları sediment hareketi ve oyulmada oldukça önemli bir parametredir. Her iki daralma oranı için ayaklar etrafında oluşan boyutsuz ortalama basınç çalkantısı, $\overline{p'p'}/(U^4\rho^2)$, değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Küçük daralma oranında boyutsuz ortalama basınç çalkantısı değerleri, özellikle ayakların mansabında ve AV1'in eksenini boyunca artış göstermektedir. Ayakların mansabında görülen artış AKT içerisinde ilerleyen düşey eksenli vorteks tüplerinin bu bölgeye ilerlemesiyle oluşmaktadır. Köprü yan ayağının akıma paralel olan duvarının memba tarafında da bir artış görülmektedir (Şekil 4a). Bu artış bu bölgede akım ayrışmasından dolayı oluşan kararlı bir vorteksin sonucudur. Büyük daralma oranında gözlemlenen maksimum boyutsuz ortalama basınç çalkantısı değeri küçük daralma oranındakinin yaklaşık olarak 350 katıdır. Küçük daralma oranında gözlemlendiği gibi büyük daralma oranında da ayakların mansap kısmında yüksek basınç çalkantılarının oluştuğu bir bölge mevcuttur. Daha önce açıklandığı gibi bu bölgenin oluşumuna AKT

içerisinde ilerleyen vorteks tüpleri yol açmaktadır. Küçük daralma oranındaki farklı olarak ayakların memba tarafında kanal yan duvarına yakın bölgede de yüksek basınç çalkantısı değerleri görülmektedir. Bunun sebebi bu bölgede oldukça yoğun bir döngüsel faaliyetin bulunmasıdır. Her iki daralma oranında zemindeki basınç çalkantısı değerlerinde gözlemlenen farklılıklar hiç şüphesiz bu iki farklı koşulda ayaklar etrafında oluşacak olan oyulmanın şekli ve büyüklüğünü etkileyecektir.



Şekil 4 Ortalama akım için zeminde elde edilen boyutsuz basınç çalkantısı değerleri: a) Küçük daralma oranı için; b) Büyük daralma oranı için.

Sonuçlar

Bu çalışmada DES modeli kullanılarak, bir kanalın her iki yanına yerleştirilen iki özdeş köprü yan ayağının oluşturduğu iki farklı daralma oranında, ayaklar etrafındaki geçici düzenli akım yapılarının değişimi incelenmiştir. Bu yapılarda, daralma oranı ile yoğun değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Küçük daralma oranında, köprü yan ayakları etrafında oluşan yapılar tekil ayaklar etrafında oluşan yapılar ile aynıdır. Büyük daralma oranında ise kanal merkezinde akım yönünde zemine yakın bir pozisyonda uzanan bir çift daralma vorteksi oluşmaktadır. Bu vorteksler eksenleri boyunca tabanda yüksek kayma gerilmesi değerlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun dışında normalde köprü yan ayağını bir yay şeklinde sarmalayan birincil atnalı vorteksi büyük daralma oranında bütünlüğünü yitirmektedir. Bu vorteksin sadece ayağın mansabına doğru uzanan kısmı etkinliğini koruyabilmektedir. Küçük daralma oranından farklı olarak büyük daralma oranında kanalın daralan kesitinin tamamında kayma gerilmesi ve basınç çalkantısı değerleri ciddi bir biçimde artmaktadır. Hiç şüphesiz her iki daralma oranında görülen tüm bu farklılıklar oyulmanın ilk safhalarındaki aşınma ve birikim bölgelerini etkileyecektir.

Teşekkür Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir (Proje no: 111M377). Bu çalışma kapsamında yapılan yüksek başarımlı hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM TR-Grid ve ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü NAR HPC küme bilgisayarları altyapılarında gerçekleştirilmiştir. Bu vesile ile TÜBİTAK, ULAKBİM ve ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümüne teşekkürlerimi sunarım.

Baker, C.J. (1980). The turbulent horseshoe vortex. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 6 (1-2) , 9-23.

Dargahi, B. (1989). The turbulent flow field around a circular cylinder. Experiments in Fluids, 8 (1-2), 1-12.

Koken M., Constantinescu G., 2008a, An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel. Part I. Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process. Water Resources Research, 44, W08406, DOI: 10.1029/2007WR006489

Koken M., Constantinescu G., 2009, An investigation of the dynamics of the coherent structures in a turbulent channel flow with a vertical sidewall obstruction. Physics of Fluids, 21(8), 085104, DOI: 10.1063/1.3207859

Koken M., 2011, Coherent structures around isolated spur dikes at various approach flow angles. Journal of Hydraulic Research, 49(6), 736-743, DOI: 10.1080/00221686.2011.616316

Koken M., Gogus, M. 2015, Effect of spur dike length on the horseshoe vortex system and the bed shear stress distribution. Journal of Hydraulic Research, 53(2), 196-206, DOI: 10.1080/00221686.2014.967819

Melville B., 1997, Pier and Abutment Scour: Integrated Approach. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(123), 125-136.