

Akarsu Yatağındaki Bitki Örtüsünün Akım Şartlarına Etkisinin Sayısal Yöntemle İncelenmesi

Selcan Sovukluk

D.S.İ. Genel Müdürlüğü, Devlet Mah., İnönü Bulv., No:16, Ankara

Tel: (312) 454 52 21

E-Posta: selcansovukluk@hotmail.com

Önder Koçyiğit

Gazi Üniv. Mühendislik Fak. İnşaat Müh. Böl. 06570 Maltepe-Ankara

Tel: (312) 582 32 12

E-Posta: konder@gazi.edu.tr

Bahadır Alyavuz

Gazi Üniv. Mühendislik Fak. İnşaat Müh. Böl. 06570 Maltepe-Ankara

Tel: (312) 582 32 13

E-Posta: balyavuz@gazi.edu.tr

Öz

Doğal akarsuların ana yatağında ve/veya taşkın yataklarında bulunan bitki örtüsü, akım yapısını ve dolayısıyla hidrolik direnci önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle bu tür fiziksel koşulların özel olarak incelenmesi gerekir. Literatürde bu konuda yapılmış birçok deneysel araştırma çalışmasının yanı sıra bazı özel durumlar için sınırlı sayıda analitik çözüm öneren çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalar incelendiğinde akarsu içerisindeki akım yapısının daha genel koşulları dikkate alarak belirlenebilmesi için deneysel çalışmaları destekleyici sayısal modellere ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, bitki örtüsü içeren açık kanal akımı, akışkanlar dinamiği uygulamalarına yönelik bir bilgisayar programı (ANSYS-CFX) ile modellenmiştir. Modelden elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan laboratuvar koşullarında oluşturulmuş bitki örtülü kanal modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlar, oldukça karmaşık engel yapısına sahip akarsu kesitlerinde hidrodinamik özelliklerin bilgisayar programı kullanılarak belirlenebileceğini göstermiştir.

Anahtar sözcükler: Bitki örtüsü, Modelleme, Akım, Sonlu Elemanlar, ANSYS-CFX.

Giriş

Nehirlerde hidrolik açıdan habitat koşullarının tanımlanabilmesi için akım hızlarının tahmini gerekmektedir. Nehir içerisinde yer alan bitkilerin akım hızını oldukça önemli miktarda etkilemesi nedeniyle konu ile ilgili çok sayıda fiziksel ve matematiksel modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Günümüzde deneysel ve analitik çözüm yaklaşımı içeren matematiksel yöntemlere ek olarak sayısal yöntemlerin kullanımının arttığı literatür incelemesinden görülmektedir.

Bu çalışmaların çoğunluğunun ortak özelliği laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deney verileri ile akımı tanımlayan diferansiyel denklemlerden oluşan matematiksel modelin sayısal çözümünden elde edilen sonuçların karşılaştırılması şeklindedir. İlk deneysel çalışmalar rijit gövdeli bitki örtüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örneğin Nepf (1999), Bennett ve diğ. (2002), Ghisalberti ve Nepf (2004), Wilson ve diğ. (2008), Yagci ve Kabdasli (2008), Tanino ve Nepf (2008) rijit bitki gövdesini temsil eden elamanlar kullanarak kanal içerisinde akıma karşı oluşan direnci ve bu durumun akım şartlarına etkilerini deneysel çalışmaları ile araştırmışlardır. Bu çalışmalar incelendiğinde, bitkinin akım içerisinde batmış veya batmamış durumu için farklı hız profilleri elde edildiği görülmektedir. Özellikle Nepf'in literatürde konu ile ilgili çok sayıda çalışması mevcuttur.

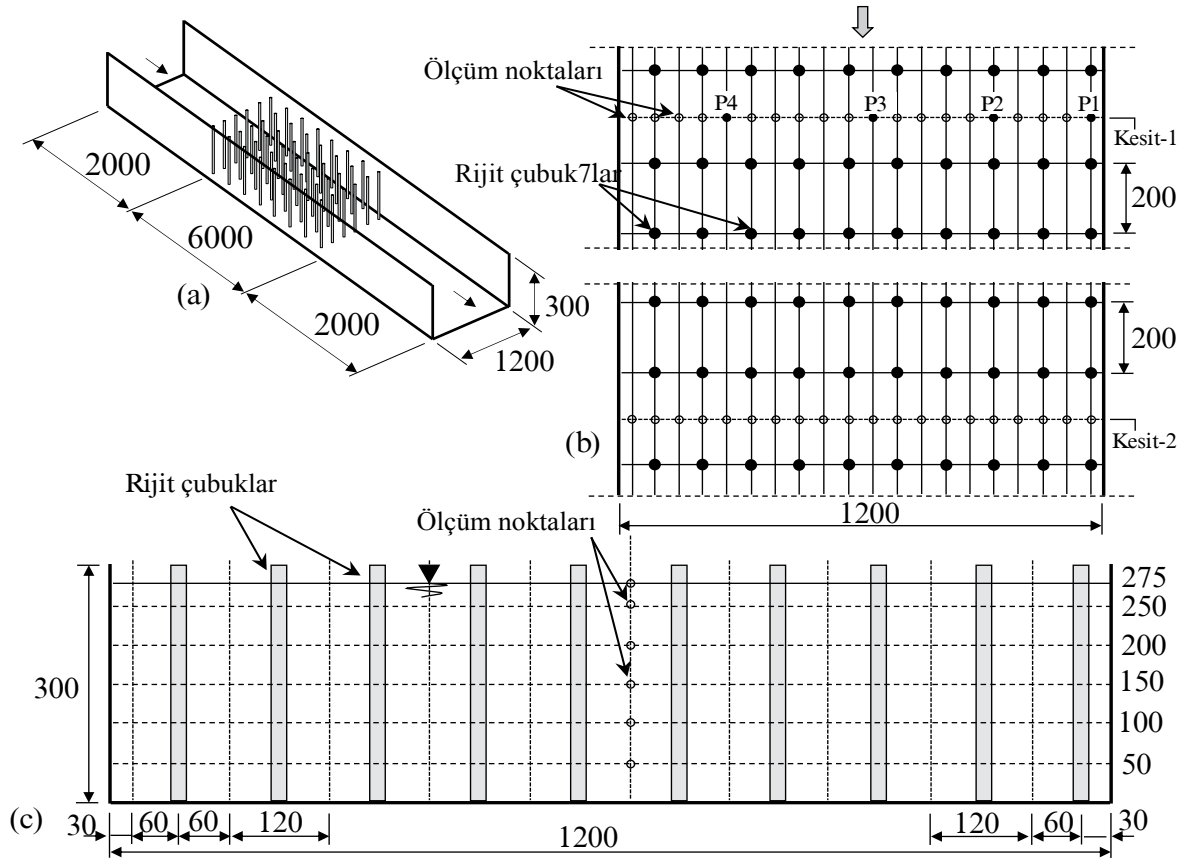
Yapılan deneylerde bitki örtüsünün fiziksel olarak modellenmesi amacıyla genellikle bitki gövdesi için silindirik ahşap malzeme kullanılmıştır (Nepf (1999), Dorcheh (2007)). Bununla birlikte Wilson ve diğ. (2006) ve Luhar ve Nepf (2011) çalışmalarında doğal bitkilerden yararlanmışlardır. Wilson ve diğ. (2006) yaprak etkisinin toplam bitki direnci içerisindeki etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda, akıma engel teşkil eden bitki gövdelerinin planda dizilişleri ve kullanılan gövde çapları araştırma açısından düşünülmesi gereken bir diğer konudur. Birçok çalışmada düzenli bitki dizilişi ve sabit bitki gövdesi çapı kullanılmakla birlikte Tanino ve Nepf (2008) rastgele çapa sahip ve oldukça düzensiz bitki dizilişleri denemişlerdir. Bennett ve diğ. (2002) ise kanal içerisinde farklı bölgelerde ve özellikle kanal kenarlarında kümelenmiş bitki dağılımı şekli kullanmışlardır. Bu bitki dağılımı ile özellikle menderesli nehirlerde oluşan akım yapısına benzer bir durumu incelemiştirlerdir.

Bitki örtüsünün rijit veya esnek olması durumları için yapılan deneysel çalışmalara ek olarak sayısal çözüm yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Wilson ve diğ. (2006), Fischer ve diğ. (2010), Erduran ve Kutija (2003), Kim (2011) gibi araştırmacılar bitki örtüsü etkisini, akışkanlar dinamiği prensipleri ile oluşturdukları matematiksel modelleri, sayısal çözüm yöntemleri kullanarak tespit etmeye çalışmışlardır. Fakat bu tür modeller ve çözüm yöntemleri genellikle özel akım koşullarının araştırılması amaçlı olup, farklı araştırmacı ve mühendislerin kullanımı açısından oldukça sınırlıdır. Bu nedenle hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümünü amaçlayan, genel kullanıma uygun, sınır koşullarının kullanıcı tarafından kolay tanımlanabildiği ve sonuçların hem sayısal hem de görsel olarak sağlandığı yazılımlar geliştirilmektedir. Benzer durum akarsu içerisindeki akım yapısının incelenmesi için geçerlidir. Koçyiğit ve Alyavuz (2014), Stamou ve diğ. (2011), Gümüş ve diğ. (2010), Najmeddin (2012), Dewangan ve diğ. (2008) konu ile ilgili çalışmalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarına yönelik bir yazılım olan ANSYS-CFX'i kullanmışlardır.

Bu çalışmada, Dorcheh (2007) tarafından yapılmış geniş dikdörtgen kanal içerisine düşük yoğunlukta yerleştirilmiş, kısmi batık bitkileri temsil eden rijit silindirik çubukların kullanılmış olduğu deney verilerinden yararlanılarak sayısal çözümler yapılmıştır. Sayısal çözümden elde edilen serbest su yüzeyi, boyuna ve enine doğrultudaki eş hız eğrileri ile karşılaştırmalı hız profilleri sunulmaktadır.

Deneysel Yöntem

Dorcheh, yaptığı deneylerde rijit bitki örtüsü içeren farklı açık kanal tiplerinde akımın hız ve türbülans karakteristiklerini incelemiştir. Deneylerde kullanılan kanal tipleri dar ve geniş dikdörtgen kanal ile birleşik kesitli bir kanaldır. Birleşik kesitli kanal durumunda taşkın yataklarına tamamen batık bitkilerden oluşan durum incelenmiştir. Dikdörtgen kesitli kanalda iki farklı kanal genişliği kullanılmıştır. Bunlar dar ve geniş olarak adlandırılmıştır. Her iki kanalda da tamamen veya kısmen suya batmış bitkilerden oluşan durumlar için deneyler yapılmıştır. Düşük, orta ve yüksek yoğunluklu bitki örtüsü durumları ele alınmıştır. Geniş dikdörtgen kanal deneylerinde hız bütün kanal en kesiti boyunca ölçülmüştür.



Şekil 1. a) Kanal geometrisi, b) çubukların ve ölçüm alınan noktaların planı c) en kesit görünüşü (tüm ölçüler mm'dir).

Deneyler, laboratuvar ortamında, genişliği 1,2 m, boyu 10 m, derinliği 0,3 m, en yüksek akım derinliği 0,275 m ve boyuna yatak eğimi 0,001 olan çevrimli, dikdörtgen kesitli bir deney kanalında gerçekleştirilmiştir (Şekil 1-a). Bitki örtüsünü temsil eden çubukların çapları sabit ve 24 mm'dir. Çubuk boyları ise 300 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Akım doğrultusunda çubuklar arasındaki mesafe 200 mm, akım en kesiti yönünde çubuklar arasındaki mesafe ise 120 mm'dir. Tüm deneylerde debi, 15 l/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Hız ölçümleri, kesit 1 ve kesit 2 olarak belirtilen iki farklı en kesitte gerçekleştirilmiştir (Şekil 1-b). Bu iki ölçüm kesiti, giriş ve çıkış etkilerini en aza indirmek için kanal boyunca orta uzunluğa yakın bir bölgede seçilmiştir. Kesit-1, bitki örtüsü bitiş bölgesine 4,4m ve kesit-2 ise 1,4m mesafede bulunmaktadır. Kanal

genelinde ölçüm noktaları, çubuk aralarında ve arkalarında yer almaktadır. Düşey yönde alınan hız verileri, kanal tabanının 50 mm üzerinden başlayarak 50 mm aralıklarla 50, 100, 150, 200, 250, 275 mm’de gerçekleştirilmiştir. Tüm kanal en kesiti boyunca nokta hızlarının ölçümü için üç boyutlu hız ölçüm cihazı kullanılmış, her bir noktada ölçüm süresi üç dakika ve ölçüm frekansı 25 Hz olarak ayarlandığı belirtilmiştir.

Sayısal Model

Bu çalışmada bitki örtüsü içeren açık kanal akımı ANSYS-CFX yazılımı ile modellenmiştir. Bu yazılım ile birden fazla akışkanın bulunduğu çok fazlı akım modeli oluşturulabilmektedir. Açık kanal akımı da çok fazlı akım problemi olarak ele alınabilir. Burada su (sıvı fazı) ve havanın (gaz fazı) bulunduğu bir hacim ve iki faz arasında serbest hareket edebilen bir ara yüzey bulunmaktadır. Bu ara yüzey, genellikle şekli belirlenmek istenen problem özelliklerinden biridir. ANSYS-CFX çok fazlı akım probleminin çözümünde homojen ve homojen olmayan çoklu akım modeli kullanır (ANSYS Documentation). Burada açık kanal akımı için homojen çoklu akım modeli kullanılmıştır. Bu model ayrıca bir çeşit “*Volume of Fluid, VOF*” yöntemi olarak değerlendirilir (Stenmark, 2013). Homojen modelde, fazlar arasındaki ara yüzey sürekliliğini korur. Homojen olmayan modelde ise fazlardan biri parçalanıp diğer fazın içinde yer alabilir.

Sayısal modelde kullanılan ve akımı tanımlayan ana denklemler,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

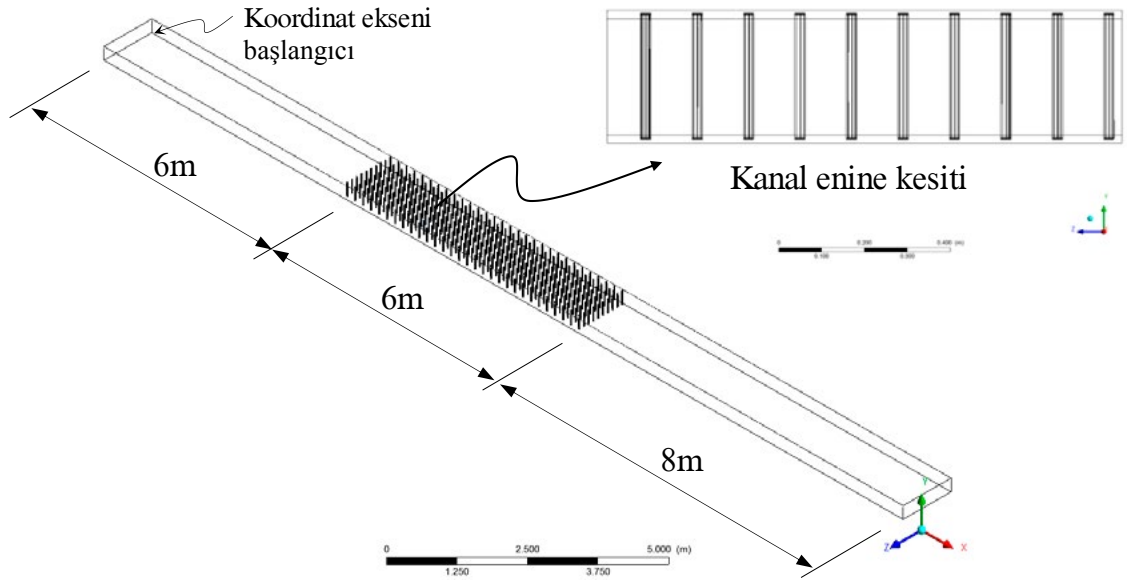
$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \boldsymbol{\delta} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \right), \quad (3)$$

şeklindedir. Burada, ρ yoğunluk, ∇ gradyan operatörü, \mathbf{U} hız vektörü, t zaman, $\boldsymbol{\tau}$ gerilme tensörü, \mathbf{S}_M kaynak terimi, μ viskozite, $\boldsymbol{\delta}$ birim matris olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (1) süreklilik denklemini, Eşitlik (2) ise momentumun korunumunu ifade etmektedir. Bu denklemlerin indis notasyonu ile yazılmış şekli ve diğer açıklamalar ANSYS CFX,- Solver Theory Guide (2009) da yer almaktadır.

Problem geometrisi ve çözüm ağı özellikleri

Deneylerde kullanılan açık kanal geometrisi “*ANSYS Workbench*” ara yüzünde yer alan “*Design Modeler*” bölümünde oluşturulmuştur. Bu kanala ait geometri Şekil 2’de görülmektedir. Bu modelde, akım başlangıcında oluşabilecek düzensizlikleri en aza indirebilmek için kanal boyu 20 m’ye çıkarılmıştır. Bitki örtüsünü temsil eden çubuklar, kanal başlangıcının 6m ilerisinden itibaren yerleştirilmiştir.



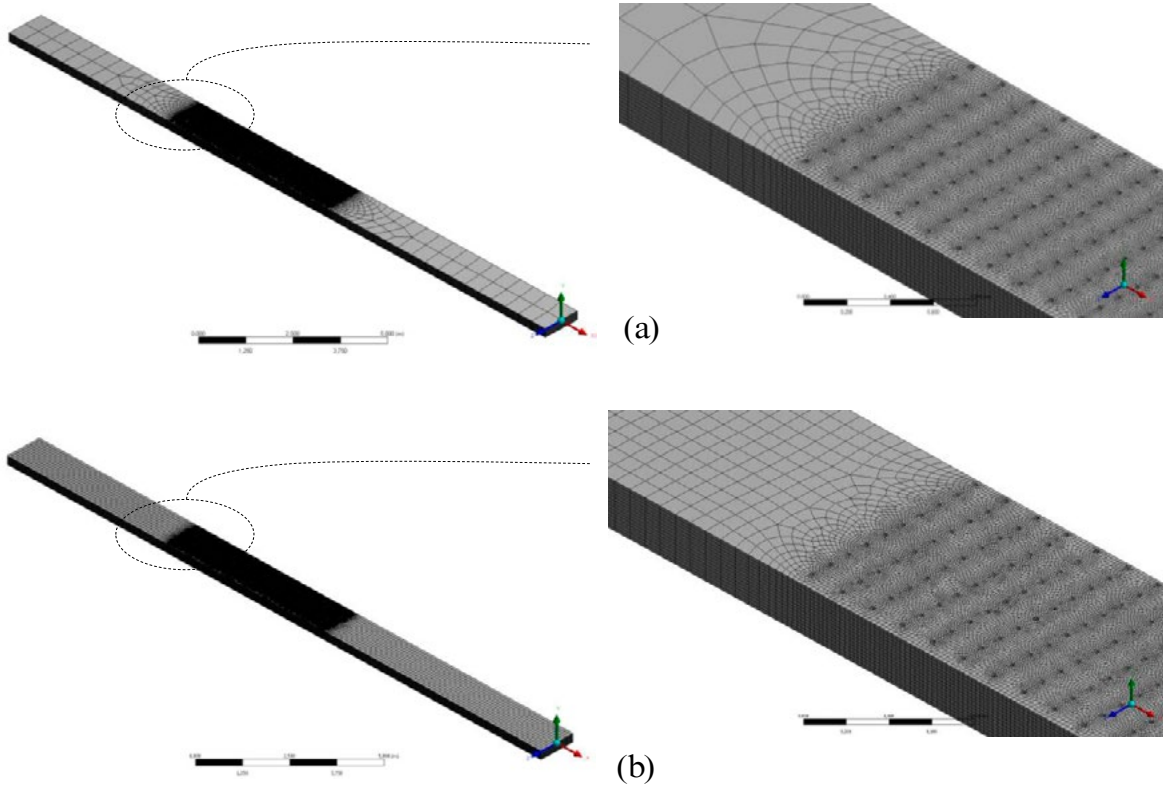
Şekil 2. ANSYS ortamında oluşturulan model geometrisi ve enine kesit

Deneysel çalışmada belirtilen çubuk aralıklarına göre toplamda 300 adet çubuk yerleştirilmiştir. Problem geometrisi düşük yoğunluktaki bitki örtüsü içeren kanal için simetrik olmadığından herhangi bir simetri kolaylaştırılması yapılmamıştır.

Çözüm ağı “ANSYS Workbench” ara yüzü kullanılarak oluşturulmuştur. Bu bölümde yazılım, geometriye uygun bir çözüm ağını otomatik olarak oluşturmaktadır. Çözüm ağının oluşturulması sırasında temel eleman şekli ve boyutu gibi kullanıcı tanımlamaları yapılabilmektedir. Bu çalışmada, iki tip çözüm ağı kullanılmıştır. Şekil 3-a’da gösterilen birinci tip çözüm ağı (*mesh-1*) 459.942 adet elemana sahiptir. İkinci tip (*mesh-2*) çözüm ağında ise 519.045 adet eleman kullanılmıştır. Birinci tip çözüm ağında giriş ve çıkış bölgelerinde kullanılan eleman boyutu ikinci tip çözüm ağına göre daha büyük seçilmiştir. Ayrıca, her iki tip çözüm ağı için ANSYS-CFX, çözüm sırasında sonlu elemanlar ağını sıklaştırarak su ve hava birleşim bölgelerinde daha iyi bir ara yüzey oluşturmaktadır.

Başlangıç ve sınır şartları

Kanal giriş sınır şartı olarak normal hız şartı seçilmiş ve sınırdan geçen akımın hızı 0.045m/s olarak alınmıştır. Kanal çıkış sınır şartı ise statik basınç olarak tanımlanmıştır. ANSYS CFX yazılımı hız ve basınç içeren çeşitli giriş-çıkış sınır şartı tanımlamalarına olanak sağlamaktadır. ANSYS CFX Solver Modeling Guide tarafından giriş sınır şartının hız, çıkış sınır şartının statik basınç olarak tanımlandığı durumun sayısal çözüm açısından en stabil sınır şartı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca aynı referansta statik basınç şartının kullanılacağı sınırın çevrimsel akım olan bir bölgede olması durumunda çözümde yakınsama probleminin de olabileceği belirtilmektedir. Mevcut durumda kanal çıkış bölgesi, kanal içindeki rijit çubuklara belirtilen probleme yol açmayacak uzaklıkta yer almaktadır. Kanal yan duvarı, taban sınır şartı ve silindir duvarları; “*No Slip Wall*” şartı ve duvar pürüzlülüğü için “*Smooth Wall*” şartı kullanılmıştır. k-ε türbülans modelinde kullanılacak “Intensity Length Scale” eddy uzunluk parametresi giriş su yüksekliği olan 0.275m olarak seçilmiştir.

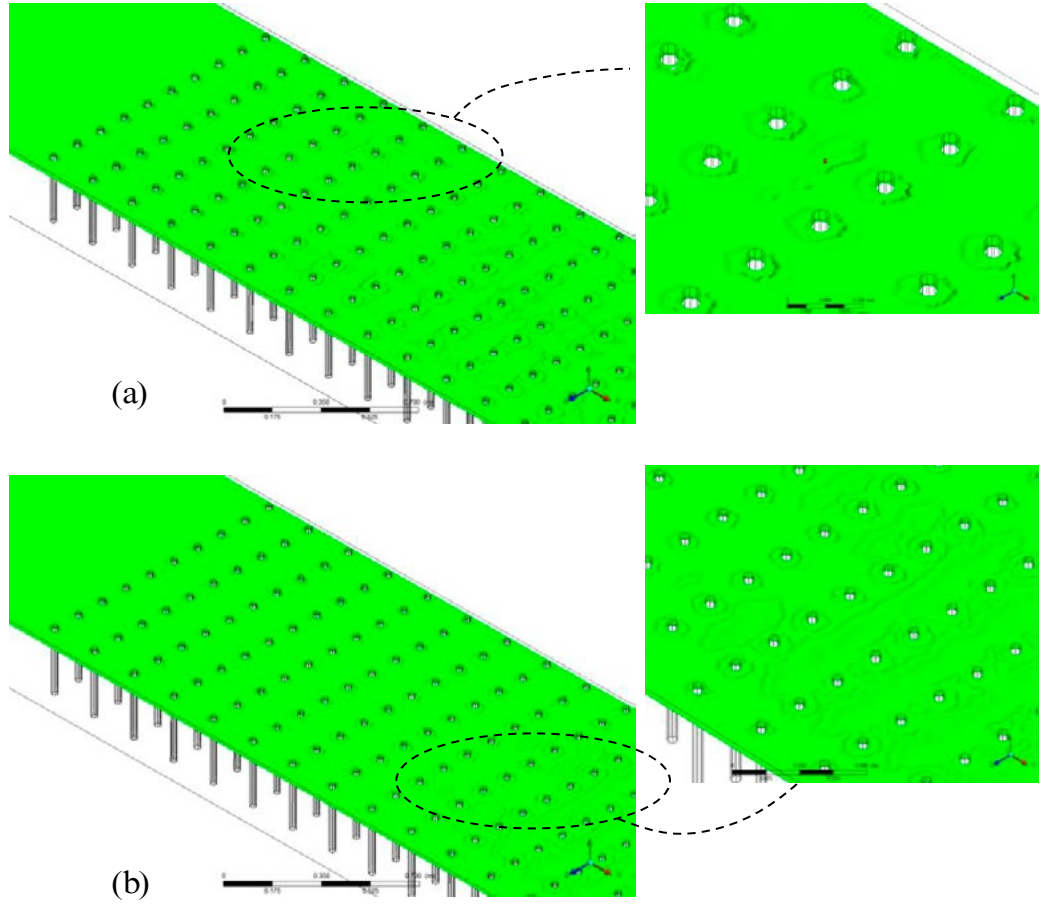


Şekil 3. Workbench çözüm ağı, a) mesh-1 b) mesh-2

SONUÇLAR

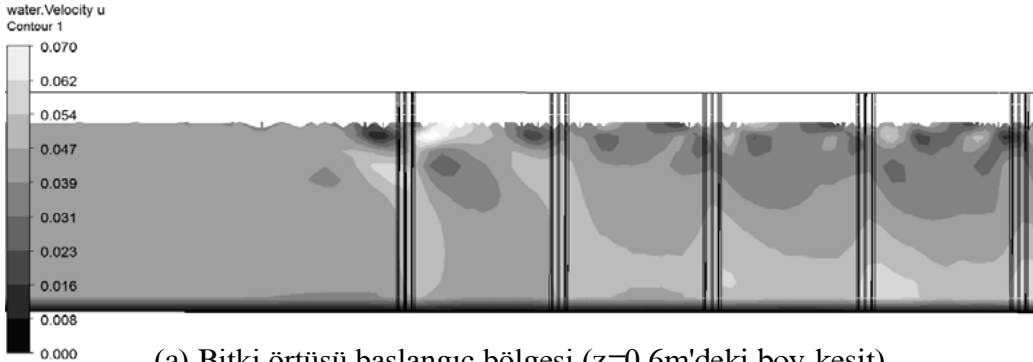
Sınır şartları, geometrik ve hidrolik özellikleri verilen bir deney kanalı için çalıştırılan ANSYS-CFX programından kanal boyunca üç eksende hızlar ve kesitin her noktasında su seviyesi sonuçları elde edilebilmektedir. Model grafik ara yüzü, kullanıcının belirlediği bir noktada veya bir kesitte sonuçları grafik olarak çizebilmektedir. Şekil 4’de, rijit çubukların başlangıç bölgesinde oluşan çalkantılar ve su seviyesi gösterilmiştir.

Sayısal modelden elde edilen kanal boyuna yönündeki hız sonuçları kanal eksenini merkezinden geçen $z=0,6m$ ’deki bir boy kesit üzerinde gösterilmiştir. Boyuna yöndeki profilin uzun olması nedeniyle sonuçlar, üç kısımda; kanalda bitki başlangıç bölgesinde, bitki orta bölgesinde ve bitki örtüsünün bittiği bölgede ayrı olarak çizilmiştir. Şekil 5-a’da görülen bitki örtüsünün başlangıç bölgesinde giriş hızı olan $4,5 \text{ cm/s}$ hızın, ilk çubukta 7 cm/s seviyesine ulaştığı ve su yüzeyine yakın bölgede hızlı bir değişim olduğu gözlenmektedir. Bitki örtüsü orta bölgesinde ise tabana ve rijit silindirlere yakın bölgede hızın artarak 7 cm/s seviyesinde olduğu, su yüzeyine yakın bölgelerde ise hızın $2,5 \text{ cm/s}$ olduğu görülmektedir (Şekil 5-b). Bitki örtüsünün son bölümünün gösterildiği Şekil 5-c’de tabana yakın bölgede $5,5 \text{ cm/s}$, yüzeye yakın bölgelerde ise $2,5 \text{ cm/s}$ mertebesinde hızlarla suyun bu bölgeyi terk ettiği görülmektedir.

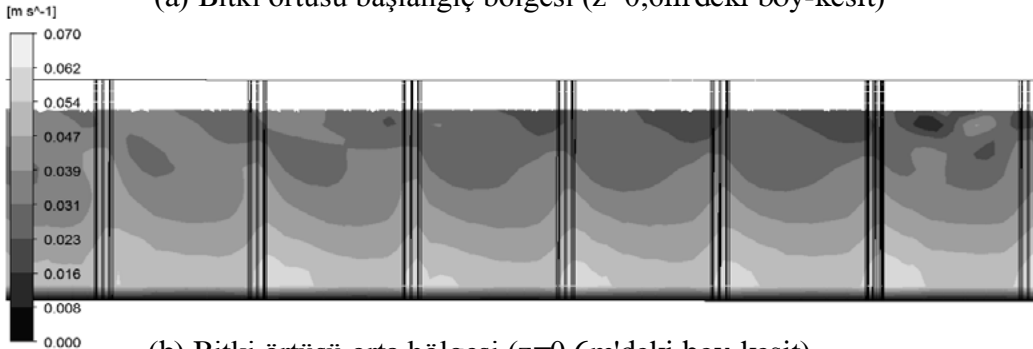


Şekil 4. Su Yüzeyi Profili a) mesh tipi 1, b) mesh tipi 2

$x=9$ m'den geçen kanal en kesitindeki boyuna doğrultudaki hız dağılımı Şekil 6'da görülmektedir. Bu kesit tam olarak çubukların merkezinden geçmektedir. Kanal kenarlarında geometrinin simetrik olmaması nedeniyle simetrik olmayan bir hız dağılımı gözlenirken, iç bölgelerde simetriğe yakın bir hız dağılımı bulunmaktadır. Çubuk aralarında, kanal tabanında sıfır olan hız tabana yakın bölgede 7cm/s mertebesine çıkmakta, derinlik azaldıkça 3 cm/s mertebesine düşmektedir. Çubuk kenarlarında akım, no slip wall sınır şartı nedeniyle sıfır hıza sahiptir. Deneyde ölçüm alınan noktalardaki boyuna doğrultudaki hızların karşılaştırılması Şekil 7'de sunulmaktadır. Bu noktalar bitki örtüsünün başladığı yerden 1,7 m, sayısal modeldeki kanalın giriş bölgesinden ise 7,7 m ilerideki kesit-1 olarak isimlendirilen kesitte yer almaktadır. Kanal duvarına yakın $z=0,03$ m (Şekil 1-b, P1) ve $z=0,27$ m (Şekil 1-b, P2) de deney ve ANSYS CFX sonuçları genel olarak uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu noktalar tam olarak çubuk arkasında yer almaktadır. Diğer iki ölçüm noktası olan $z=0,57$ m (Şekil 1-b, P3) ve $z=0,93$ m'de (Şekil 1-b, P4) kanal tabanına yakın bölgedeki hızlar uyumlu görünürken, su yüzeyi seviyesine yaklaştıkça ANSYS CFX'in deney sonuçlarına göre daha düşük hızlar verdiği görülmektedir. P3 ve P4 noktaları Şekil 1'de görüldüğü gibi tam olarak iki çubuk arasında yer almaktadır. Bu noktaların membaında yer alan çubukların akıma etkileri nedeniyle bu ölçüm noktaları girişim bölgesi içerisinde kalmaktadır. Bu çalışmada kullanılan farklı çözüm ağı yapılarına ek olarak silindirik çubuklar etrafındaki eleman ağı özelliklerinin ve yazılım içerisinde yer alan diğer türbülans modellerinin bu bölgedeki sonuçlara etkisinin araştırılması gerekmektedir.



(a) Bitki örtüsü başlangıç bölgesi ($z=0,6m$ 'deki boy-kesit)

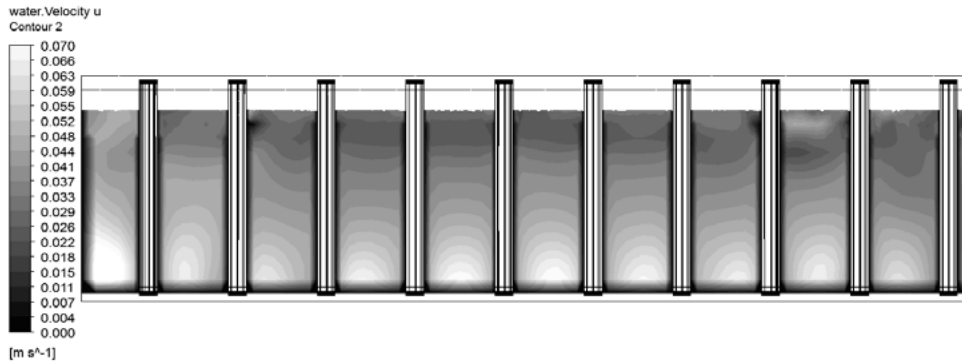


(b) Bitki örtüsü orta bölgesi ($z=0,6m$ 'deki boy-kesit)

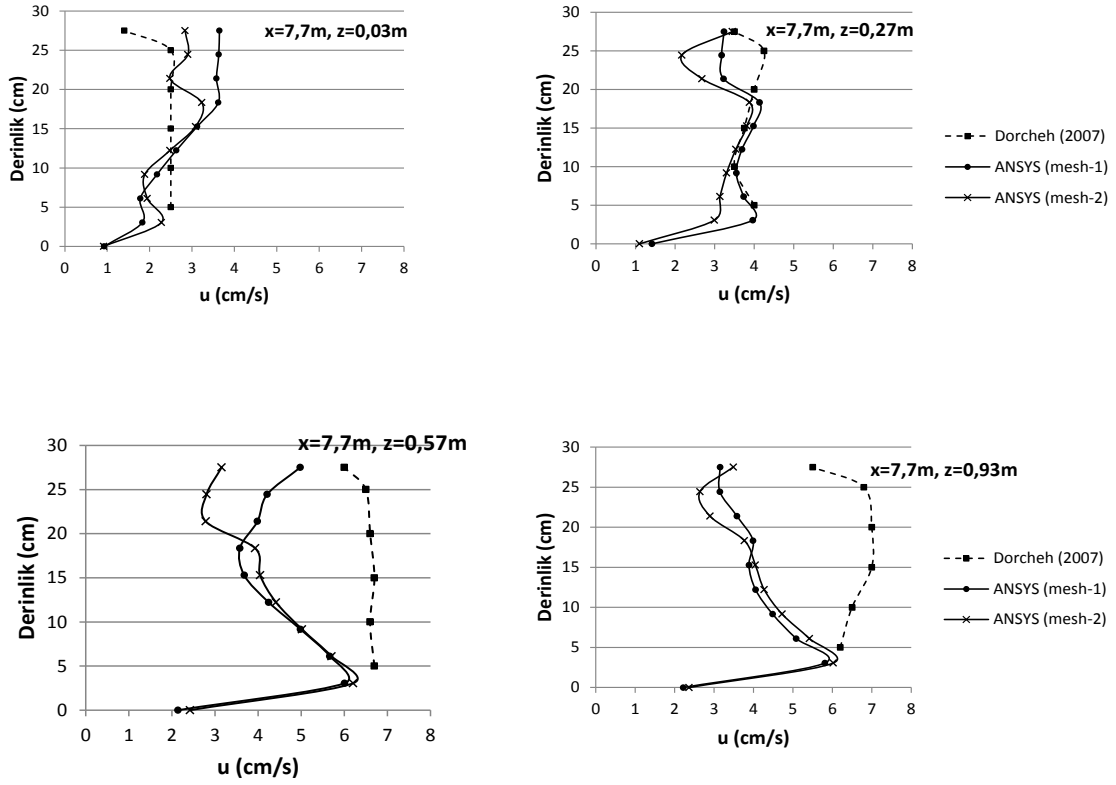


(c) Bitki örtüsü bitiş bölgesi ($z=0,6m$ 'deki boy-kesit)

Şekil 5. Kanal boy-kesitinde boyuna doğrultuda hızın değişimi (Mesh tipi 2)



Şekil 6. Kanal en-kesitinde boyuna doğrultudaki hızın değişimi (Mesh tipi 2, $x=9m$)



Şekil 7. Boyuna doğrultuda hızın derinlik boyunca değişimi

Kaynaklar

ANSYS®, Help System, ANSYS, Inc.

ANSYS CFX-Solver Theory Guide (2009), Release 12.1.

Bennett, S.J., Pirim, T. and Barkdoll, BD (2002) “Using simulated emergent vegetation to alter stream flow direction within a straight experimental channel”, *Geomorphology*, Vol. 44, (1-2), pp.115-126.

Dewangan, N., Das A. K. and Das, P. K. (2008) Free surface flow over a bump with hydraulic jump, *Proceedings of the 4th BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering*, 27-29 December, 2008, Dhaka, Bangladesh.

Dorcheh, S. A. M. (2007) *Effect of rigid vegetation on the velocity, turbulence and wave structure in open channel flows*, PhD Thesis, Cardiff University, Wales, U.K.

Erduran, K.S. and Kutija, V. (2003) Quasi-three-dimensional numerical model for flow through flexible, rigid, submerged and non-submerged vegetation. *Journal of Hydroinformatics*, Vol.5, (3), pp.189–202.

Fischer, A.T., Stoesser, T., Bates, P. and Olsen, N.R.B. (2010) 3D numerical modelling of open channel flow with submerged vegetation, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, (3), pp. 303-310.

Ghisalberti, M. and Nepf, H.M. (2004) The limited growth of vegetated shear layers, Water Resources Research, Vol. 40, (7), pp.1-12.

Gümüş, V., Aköz, M.S. ve Kırkgöz, S. (2013) Kapak mansabında batmış hidrolik sıçramanın deneysel ve sayısal modellenmesi, Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Cilt 24, (2), s. 6379-6397, Ankara.

Kim, S.J. (2011) 3D numerical simulation of turbulent open-channel flow through vegetation, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.

Koçyiğit, Ö. ve Alyavuz, B. (2014) “Dikdörtgen kesitli açık kanal akımında silindirik engel çevresinde akımın incelenmesi”, 3. Su Yapıları Sempozyumu, 7-8 Aralık 2013 TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, Sempozyum Kitabı, s. 133-141, İMO Oda yayın No: E714/02, Ankara.

Luhar, M. and Nepf, H.M. (2011) Flow-induced reconfiguration of buoyant and flexible aquatic vegetation, Limnology and Oceanography, Vol. 56, (6), pp. 2003-2017.

Najmeddin, S. (2012) CFD modelling of turbulent flow in open-channel expansions, MSc. Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.

Nepf, H.M. (1999) Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation, Water Resources Research, Vol. 35 (2), 479-489.

Stamou, A.I., Papadonikolaki, G., Gkesouli, A. and Nikolettopoulos, A. (2011) Modelling the effect of vegetation on river floodplain hydraulics, Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, 8-10 September 2011, pp. 1818-1825, Greece.

Stenmark, E. (2013) On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software MSc. Thesis, Department of Applied Mechanics Division of Fluid Dynamics Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Tanino, Y. and Nepf, H.M. (2008) Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders, Journal Of Hydraulic Engineering, Vol. 134, (1), pp. 34-41.

Wilson, C. A. M. E., Hoyt, J. and Schnauder, I. (2008) “Impact of foliage on the drag force of vegetation in aquatic flows”, Journal Of Hydraulic Engineering, Vol. 134, (7), pp. 885-891.

Wilson, C. A. M. E., Yagci, O., Rauch, H.P. and Olsen, N. R. B. (2006) “3D numerical modelling of a willow vegetated river/floodplain system”, Journal Of Hydrology, Vol. 327, (1-2), pp.13-21.

Yagci, O. and Kabdasli, M.S. (2008) “ The impact of single natural vegetation elements on flow characteristics”, Hydrological Processes, Vol. 22, (21), pp. 4310-4321.