



Trapez Labirent Savakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Kullanılarak Analizi

Mehmet Cihan AYDIN*

Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bitlis
mcaydin@gmail.com ORCID: 0000-0002-5477-1033, Tel: (532) 676 86 78

Ömer BİLHAN

Nevşehir H.B.V. Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Nevşehir.
omer.bilhan@gmail.com ORCID: 0000-0002-8661-6097

M. Emin EMİROĞLU

Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ
memin.emiroglu@gmail.com ORCID: 0000-0002-3603-0274

Geliş: 19.04.2018, Kabul Tarihi: 19.06.2018

Öz

Labirent tipi dolusavaklar, etkili kret uzunluklarının artırılması sayesinde klasik dolusavaklara nazaran daha yüksek savaklama kapasitesine sahiptirler. Bu tür savakların hidrolik performanslarını araştırmak için son yıllarda birçok deneysel çalışma yürütülmüştür. Günümüzdeki gelişmiş sayısal yöntemlerin deneysel çalışmalarla birlikte kullanılmasıyla araştırmacılar bu tür sistemlerin davranışları hakkında daha fazla bilgiye sahip olabilmekte ve daha iyi tasarımlar elde edebilmektedirler. Bu çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak, dört farklı savak yan duvar açısına sahip trapez labirent savakların farklı hidrolik koşullar altında analizleri yapılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada incelenen modelin üç farklı savak yan duvar açısı ile 3-B sayısal modeli hazırlanmış uygun sınır şartları altında FLOW-3D yazılımı kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. HAD analizlerinde türbülanslı akım modeli ve VOF (Volume of Fluid) metodu kullanılmıştır. HAD tekniği yardımıyla labirent savakların farklı akım koşullarındaki su yüzü ve hız profilleri elde edilerek detaylı analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda savağın hidrodinamik davranışı ortaya konmaya çalışılmıştır. Daha sonra sayısal simülasyonlardan elde edilen debi katsayıları deneysel bazı sonuçlarla karşılaştırılarak sayısal modelin doğrulaması yapılmış ve savaklama performansı belirlenmiştir. Sayısal simülasyon çıktıları incelenerek tasarımları hakkında detaylı sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Analiz sonuçlarından savak yan duvar açının düşmesiyle (dolayısıyla kret uzunluğunun artmasıyla) savaklama veriminin arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Trapez Labirent Savak; HAD; Debi Katsayısı; Kret Şekli;

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Labirent savaklar, verilen sınırlı bir dolusavak açıklığında ve aynı nap yükünde debi kapasitesini arttırmak için etkili hidrolik yapılardır. Bu tür savaklar genel olarak barajlar üzerinde dolusavak yapısı olarak kullanıldığı gibi, akım kontrolü amacıyla da kullanılabilir. Labirent savaklarla ilgili literatürde yapılan önemli bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Tulis vd. (1995), labirent savakların toplam özgül enerji, savak yüksekliği ve kalınlığı, kret şekli, tepe konfigürasyonu ve yan duvar açılarını dikkate alan kapsamlı bir tasarım prosedürü geliştirmiştir. Bununla birlikte düşük savak yüklerindeki havalandırma faktörleri gibi sıra dışı akım durumlarını da dikkate almışlardır. Paxon ve Savage (2006), labirent savaklar konusunda Amerika Birleşik Devletleri'nde yaygın olarak kullanılan ve Lux ve Tullis olarak adlandırılan iki yöntemi karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmalarında, aynı labirent savak konfigürasyonu için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanmışlardır. Flow 3D yazılımıyla elde edilen sonuçlar, deneysel ve sayısal metotların yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Crookston ve Tullis (2012a), yarım yuvarlatılmış kretli dairesel labirent savakların hidrolik karakteristikleri belirlenmiş ve plandaki farklı tasarımları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, debi katsayısının savak membasındaki akımın boyutsuz özgül enerjisinin (H_T/P , H_T toplam memba özgül enerji, P savak yüksekliği) bir fonksiyonu olarak dikkate almışlardır. Plandaki farklı tasarımlar karşılaştırıldığında, dairesel planlı labirent savakların diğerlerinden yaklaşık olarak %5-30 daha verimli çalıştığını göstermişlerdir. Crookston ve Tullis (2012b), labirent savakların memba ucuna yakın nap girişimi sonucu yerel batık akım durumlarını ve bunun savaklama verimliliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Yazarlar çalışmalarında, savak geometrisi ve akım koşullarının bir fonksiyonu olarak girişim bölgesinin boyutlarını tahmin etmek için parametrik bir yaklaşım sunmuşlardır. Khode vd. (2012), deşarj kapasitesi ile ilgili bir dizi

önemli değişken kullanarak labirent savaklar üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında araştırmacılar, bazı tasarım eğrilerinin yanında labirent savakların debi katsayısının tahmini için yan duvar açısının 8-30° aralığında ampirik bir denklem önermişlerdir. Crookston ve Tullis (2013), labirent savakların hidrolik tasarımı için, yan duvar açını 6-35° arasında değiştirerek yaptığı fiziksel deney testlerine dayalı bir metod sunmuşlardır. Dabbling vd. (2013), aşamalı (farklı kret yüksekliğine sahip) labirent dolusavakların hidrolik özelliklerini deneysel olarak çalışmışlar ve bu dolusavakların geometrisinin karmaşıklığından dolayı debinin düşük savak segmentlerinin yerine duyarlı olduğunu bulmuşlardır. Savage vd. (2016), büyük savak yüklerinde 15°'lik labirent savakları deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bilhan vd. (2016) dairesel labirent savaklar ve trapez labirent savaklar üzerine nap kırıcılar yerleştirilerek savak mansap yüzeyinde meydana gelen basınç dalgalanmalarını ve böylece titreşimleri azaltmaya çalışmışlardır.

Son yıllarda HAD yöntemleri kullanılarak birçok başarılı çalışma yapılmıştır. Aydın (2012), Aydın ve Emiroğlu (2013 ve 2016) labirent yan savaklar üzerinde RANS Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kullanarak yeterli doğrulukta çalışmalar yapmışlardır. Crookston vd. (2012), labirent savakların performansını belirlemek için deneysel çalışmaların yanında HAD analizleri de gerçekleştirmiştir. Bilhan vd. (2018) dairesel labirent savaklardan elde ettikleri deneysel sonuçları, HAD analizi kullanarak bu tip savaklar üzerindeki nap ayırıcıların, debi katsayıları üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları Flow-3D ile deneysel olarak elde edilmesi güç sonuçlar elde edilmiştir. Debi katsayılarını tespiti için kullandıkları tek fazlı akım modeliyle elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.

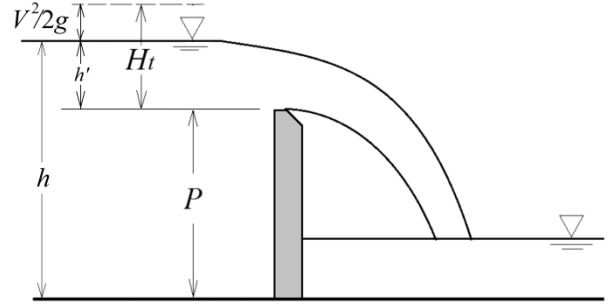
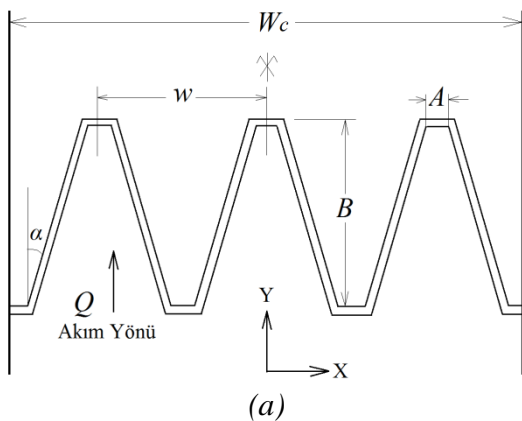
Literatür araştırmalarından anlaşılacağı gibi, günümüzde geleneksel fiziksel deneylerin yanında artık daha detaylı sonuçlar alabilmek için, gelişmiş bilgisayar ve sayısal tekniklerin kullanıldığı HAD analizleri de araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Bu çalışmada, daha önce Bilhan vd. (2016) tarafından yapılmış deneysel çalışmalara ek olarak, HAD analizleri yardımıyla trapez labirent savakların savaklama verimi ve hidrodinamik özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalara karşılaştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Aynı dolusavak genişliği dikkate alınır, labirent tipi dolusavakların etkili kret uzunluklarının klasik dolusavaklara nazaran daha büyük olması nedeniyle, daha fazla debiyi daha küçük nap yüklerinde geçirirler. Çalışmada kullanılacak labirent savağın şematik gösterimi ve parametreleri Şekil 1'deki plan ve kesitte verilmiştir. Bu savakların debi kapasiteleri klasik savak formülüne benzer olarak Denklem (1) ile hesaplanabilir.

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H_t^{3/2} \quad (1)$$

Burada Q : Savaklanan debi, C_d : debi katsayısı, L : etkin savak kret uzunluğu, H_t : kret üzerindeki toplam enerji, g : yerçekimi ivmesidir.



(b)

Şekil 1. Trapez labirent savağın görünümü:

a) Plan b) Kesit

Sayısal Model Teorisi

Flow 3D momentum denklemi olarak Navier-Stokes denklemlerini kullanan genel amaçlı bir HAD programıdır. Bu çalışmada tek fazlı, sıkışmaz akım kabulü türbülanslı akım modeliyle birlikte uygulanmıştır. Tek fazlı akım modeli kullanıldığından hava-su etkileşimi ihmal edilmiş ve türbülans modeli olarak k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Program, akımda doğru bir serbest yüzey tahmini yapabilmek için akışkan hacmi (VOF=Volume of Fluid) metodu kullanır. VOF metot öncelikle, her bir sonlu hacim için hücre içindeki hacim oranlarını belirler ve taşınım denklemlerini çözer. Daha sonra buna göre serbest su yüzünün sınır şartlarını ayarlar. Akımın kütleli süreklilik denklemi Kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (2)$$

Buradaki, ρ : suyun yoğunluğu; A_x , A_y , ve A_z : x , y ve z yönlerindeki akıma açılan kısmi alanlar, u , v ve w : x , y , ve z yönlerindeki hız bileşenleridir. Üç boyutlu akımın hareketini belirlemek için Momentum denklemi olarak kullanılacak Navier-Stokes Denklemleri hız bileşenleriyle birlikte Kartezyen koordinat sistemine göre aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (3)$$

Bu denklemlerdeki, V_F : akıma açılan hacimsel oran; G_x, G_y, G_z : kütsel ivmelerin bileşenleri, f_x, f_y, f_z : viskoz ivmelerin bileşenleridir. Birim hacimdeki birincil akışkanın hacmini belirlemek

etmek için Hirt ve Nichols (1981) tarafından tanımlanan VOF fonksiyonu aşağıdaki denklemlerle verilmiştir:

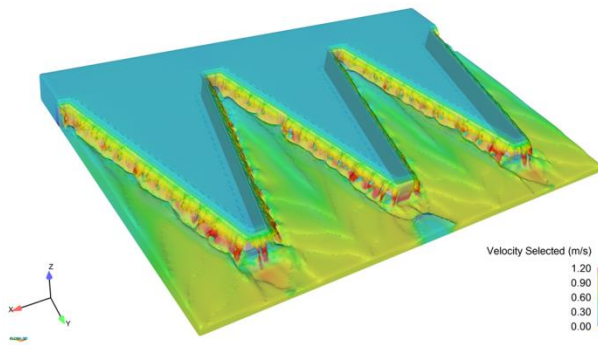
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial 1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + \varphi \frac{FA_x u}{x} \right] = F_D + F_S \quad (4)$$

F_D : yalnızca iki fazlı akımlardaki türbülans karışımı için difüzyon terimi, F_S : yoğunluk kaynak terimi (FLOW-3D 2014).

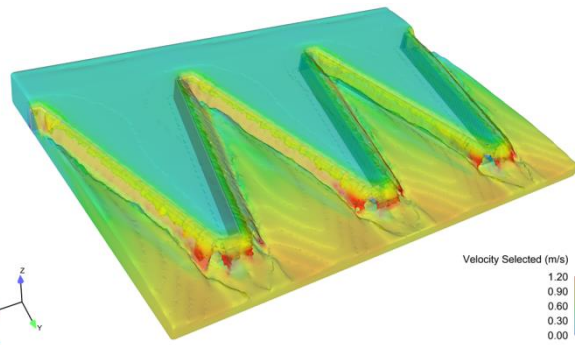
gözlerinde nap çarpışmasından dolayı mansap akımında kabarma meydana gelmekte ve debi arttırıldıkça serbest nap durumundan batık akım durumu gelişmektedir. Ara gözlerde karşılıklı düşen nap akımları tabanda çarpışarak enerjilerinin sönmelenmesi sonucu hidrolik sıçramaya neden olur. Bu da labirent savağın ara gözlerindeki kabarmanın asıl nedenidir. Bu olaylar labirent yan duvar açısı küçüldükçe daha da belirginleşmektedir. Labirent savak yan duvar açısı azaldıkça kret uzunlukları arttığından özellikle küçük nap yüklerinde savaklama kapasitesini arttırmaktadır. Fakat daha büyük nap yüklerinde labirentin memba tepe noktası üzerindeki nap girişimleri nedeniyle savaklama performansı göreceli olarak azalmaktadır

Sonuçlar ve Tartışma

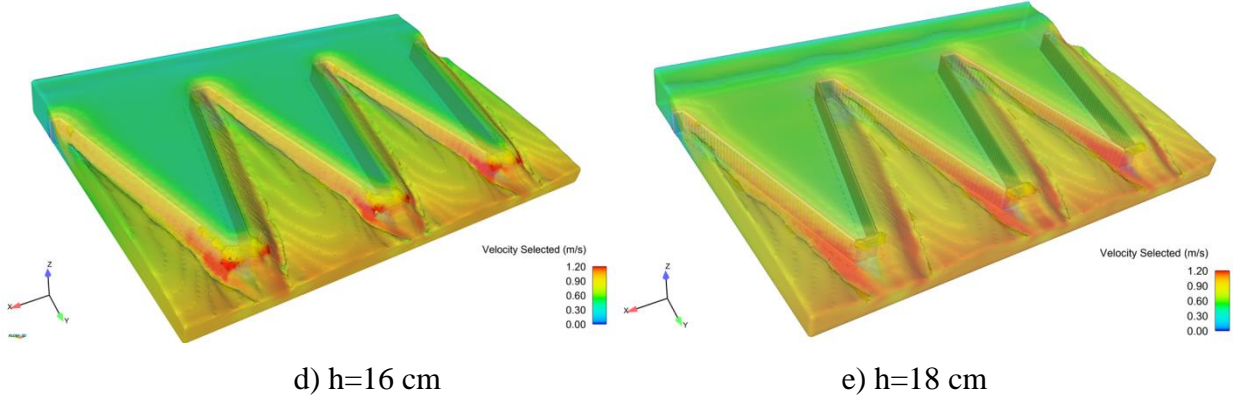
Labirent savaklarda farklı nap yükleri için su yüzü profilleri ve hız kontörleri Şekil 2 ve 3'te verilmiştir. Nap yükü ve dolayısıyla debi miktarı arttıkça serbest nap durumu gittikçe batık akım duruma geçmektedir. Şekilde verilen analiz çıktıları, labirent savak kenar duvar açısının azaldıkça debinin arttığını ve buna bağlı olarak da mansap hızlarının arttığını göstermektedir. Küçük debilerde her açı için serbest düşülü savaklanma gerçekleşirken yüksek debilerde ise içte kalan labirent savak



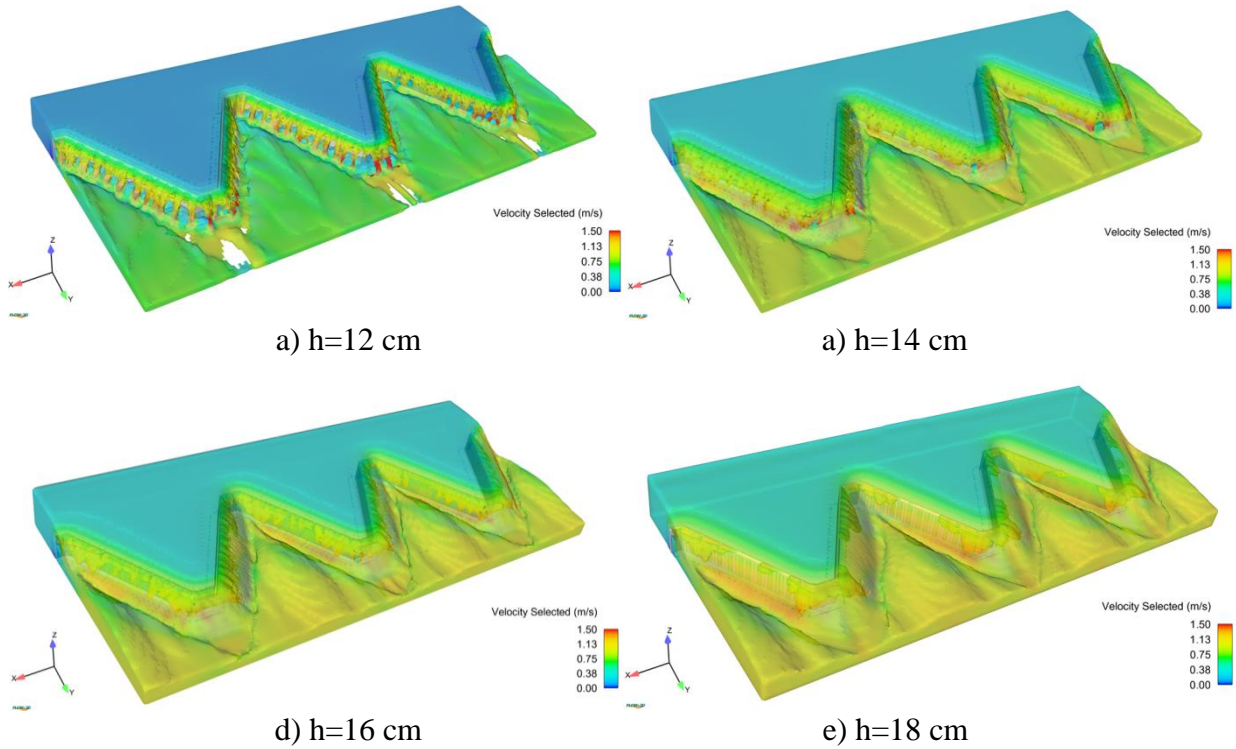
a) h=12 cm



a) h=14 cm



Şekil 2. Farklı nap yükü altında labirent savağın su yüzü profilleri ($P=10$ cm, $\alpha=15^\circ$)



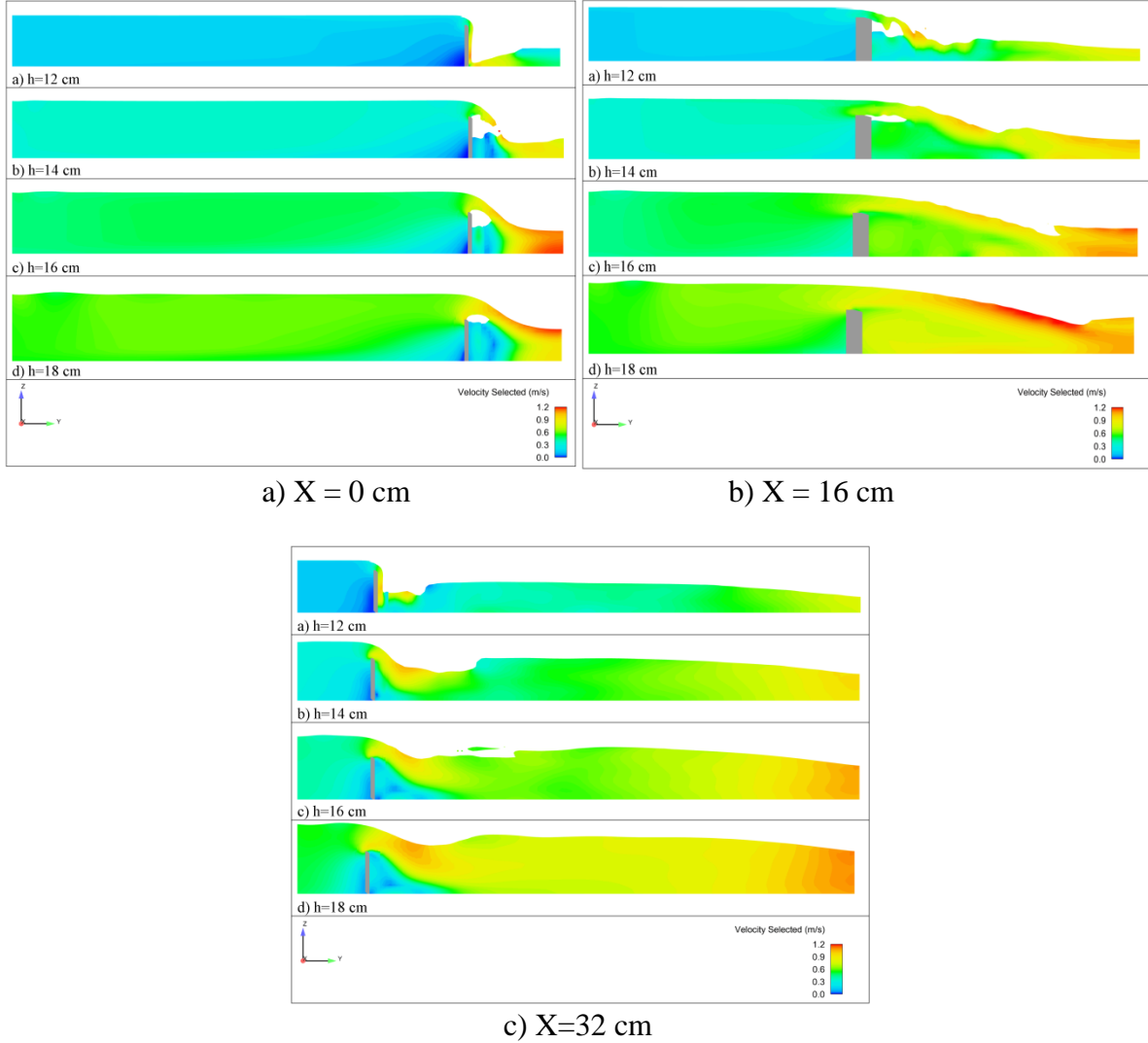
Şekil 3. Farklı nap yükü altında labirent savağın su yüzü profilleri ($P=10$ cm, $\alpha=30^\circ$)

Şekil 4 ve 5'te sırasıyla 15° ve 30° 'lik labirent savak yan duvar açılarında göre farklı boykesit ve farklı nap yüksekliklerindeki akımın su yüzü profilleri hız kontörleriyle birlikte verilmiştir. Buradaki $X=0$ eksenini Şekil 1'de gösterilen simetri ekseninden (mansap tepe noktasından geçen) alınan kesittir. $X=16$ ve $X=32$ cm ise sırasıyla diyagonal kenarın ortasından ve memba tepe noktasından alınan kesitleri göstermektedir. Şekil 4 ($\alpha=15^\circ$) incelendiğinde akım derinliği, $h=12$ cm için memba ve mansap uçlarında savaktan çıkan akım napı savağın mansap yüzeyine birleşmekteyken diğer kesit ve

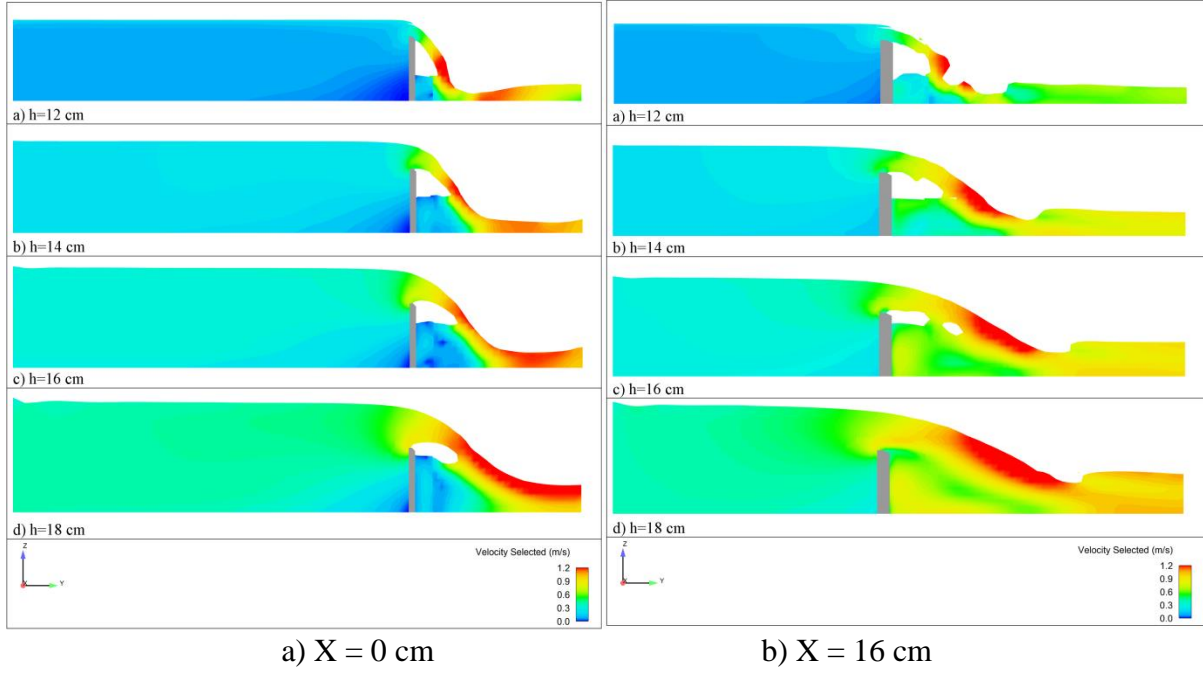
akım durumları için serbest nap durumu söz konusudur. Nap yapışması, Şekil 5'te görüldüğü gibi daha büyük kenar duvar açılarında ($\alpha=30^\circ$) oluşmamaktadır. Batık akım durumu, küçük kenar duvar açılarında ($\alpha=15^\circ$) $h=15-16$ cm akım derinliklerinde ($H/P>0.57$) başlarken, $\alpha=30^\circ$ kenar duvar açısı dikkate alındığında, $h=17-18$ cm akım derinliklerinde ($H/P>0.76$) başlamaktadır. Bu durum küçük yan duvar açılarında daha fazla savaklanma olmasından dolayıdır. Dolayısıyla tasarım sırasında savak kapasitesinin artırılması için, küçük yan duvar açıları kullanılacaksa, batık durumdan kaçınmak

için göreceli olarak daha büyük savak yükseklikleri tercih edilmelidir. Fakat bu durumun inşaat maliyetlerini de arttıracığı göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada savak yüksekliği olarak $P=10$ cm alınmıştır. Şekillerde nap yükünün artmasıyla mansapta meydana gelen hidrolik sıçramanın uzunluğunun da arttığı görülmektedir. Büyük yan duvar

açılarında hidrolik sıçramanın oluşması için gerekli uzunluğun daha kısa olduğu görülmektedir. Küçük yan duvar açılarında akım doğrultusunda daha uzun gözler oluşacağından bu durum labirent savağın gözleri arasında sorun olmazken mansap ucundan sonraki düşüm yatağı için tasarımda dikkate alınmalıdır.

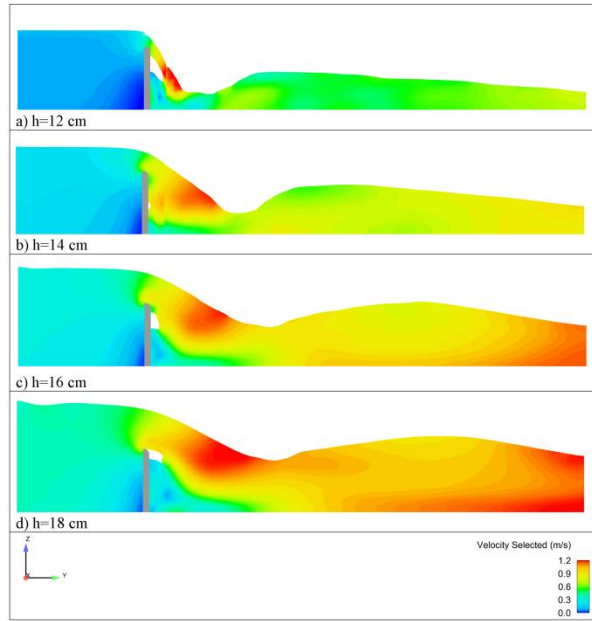


Şekil 4. Farklı boykesitlerdeki farklı nap yükleri için su yüzü profilleri ve hız kontörleri ($\alpha=15^\circ$)



a) X = 0 cm

b) X = 16 cm



c) X=32 cm

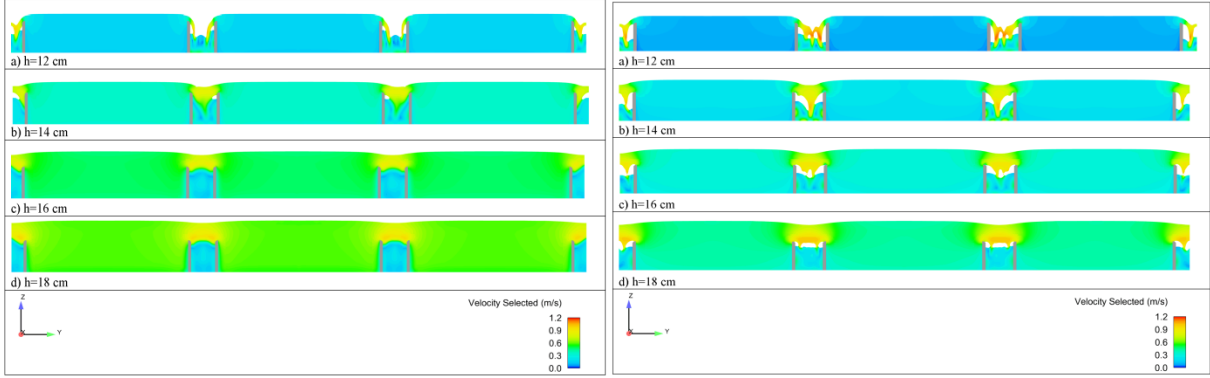
Şekil 5. Farklı boykesitlerdeki farklı nap yükleri için su yüzü profilleri ve hız kontörleri ($\alpha=30^\circ$)

Şekil 6, 7 ve 8'de sırasıyla memba ucu, orta ve mansap uçlarından alınan enkesitler boyunca su yüzü profilleri hız kontörleriyle birlikte verilmiştir. Memba ucu için verilen Şekil 6'daki kesitler incelendiğinde özellikle küçük açılar için (temsilen $\alpha=15^\circ$) savaklama veriminin burada düştüğü görülmektedir. Nap özellikleri incelendiğinde $\alpha=15^\circ$ için $h>14$ cm ($H/P>0.45$)'den sonra akım batık duruma

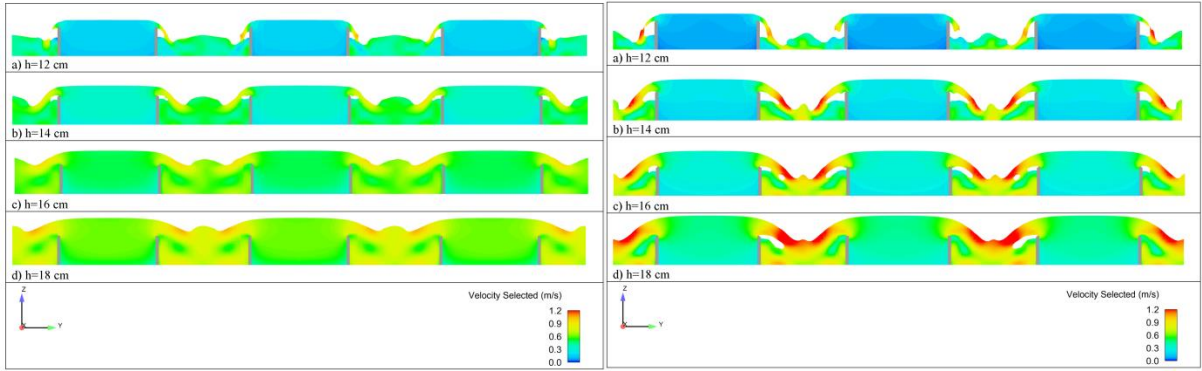
gelirken $\alpha=30^\circ$ 'de tüm akım durumları için serbest nap durumu söz konusudur. Bu kesitler yukarıdaki açıklamalarımızı doğrular niteliktedir. Küçük açı değeri için mansap kesiti için batık akım durumu $h>16$ cm'den ($H/P>0.57$) sonra başlamaktadır. Diğer kesitler incelendiğinde nap yükü arttıkça savaklanma miktarı ve nap üst yüzündeki akım hızlarının da arttığı görülmektedir. Memba ve orta kesitlerde

(Şekil 6 ve 7) hidrolik sıçrama gözlemlenmezken, mansap kesitinde (Şekil 8) ara gözlerdeki nap çarpışmasından dolayı oluşan hidrolik sıçrama net bir şekilde gözlemlenmiştir. Labirent savakların avantajlarından biri de gözler arasındaki

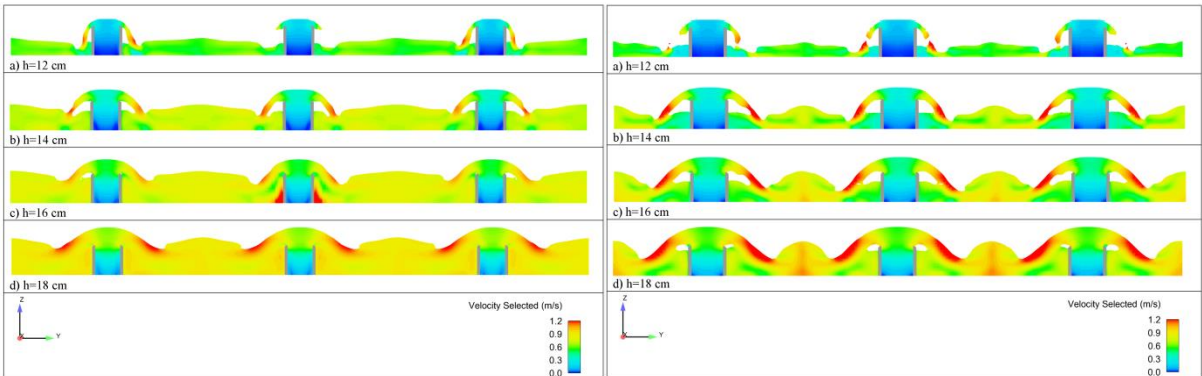
karşılıklı bu nap çarpışmalarının oluşturacağı enerji kırılmasıdır. Bu olay savak mansabındaki enerjinin önemli bir kısmının kırılmasına katkıda bulunur. Yan duvar açısı küçüldükçe bu çarpışma boyu da uzamaktadır.



a) $\alpha=15^\circ$ b) $\alpha=30^\circ$
Şekil 6. Farklı enkesitlerdeki farklı nap yükleri için su yüzü profilleri (Membra ucu)



a) $\alpha=15^\circ$ b) $\alpha=30^\circ$
Şekil 7. Farklı enkesitlerdeki farklı nap yükleri için su yüzü profilleri (orta)



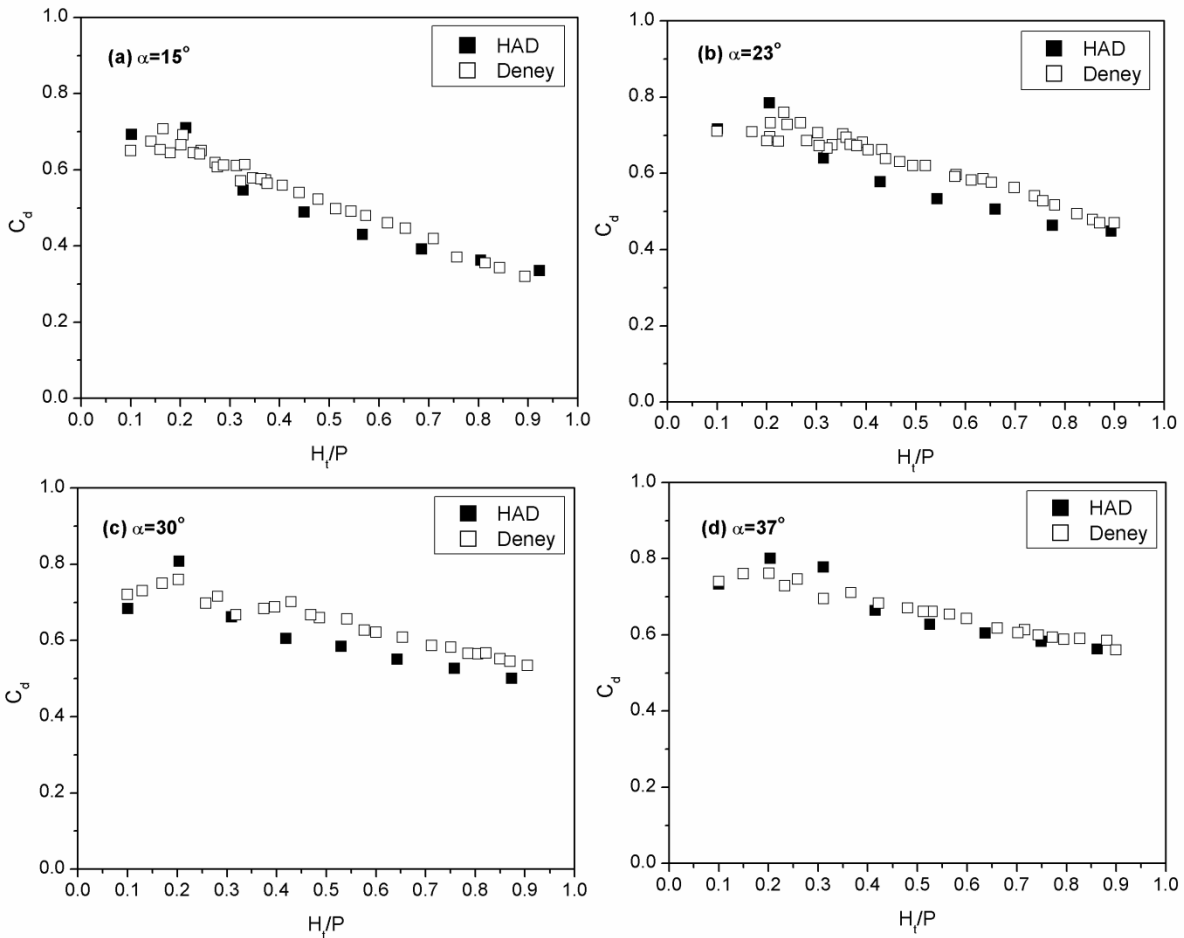
a) $\alpha=15^\circ$ b) $\alpha=30^\circ$
Şekil 8. Farklı enkesitlerdeki farklı nap yükleri için su yüzü profilleri (mansap ucu)

Savaklama Kapasitesi

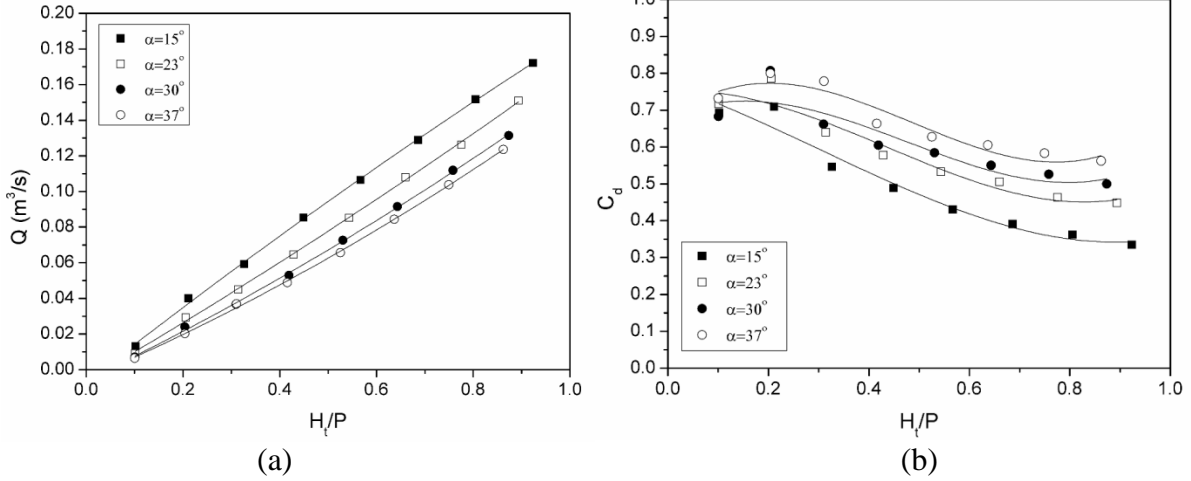
Savaklama veriminin boyutsuz savak yükü (H_t/P) ve yan duvar açısı (α) ya göre değişimini görmek için Şekil 9'daki grafikler çizdirilmiştir. Buradaki savak katsayısı (C_d) sayısal ve deneysel veriler kullanılarak Denklem 1'den hesaplanmıştır. Grafiklerden, sayısal ve deneysel verilerin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar sayısal modellerin doğruluğunu da desteklemektedir. Boyutsuz nap yükünün debi katsayısı üzerine etkisi incelendiğinde; küçük nap yüklerinde (yaklaşık olarak $H_t/P \leq 0.2$ olduğu küçük bir aralıkta) savak katsayısı H_t/P ile artarken, daha büyük nap yüklerinde aksine azalan bir eğilim oluşturmaktadır. Yaklaşık olarak $H_t/P=0.2$ değerinde debi katsayısı maksimum olmaktadır. Genel olarak bakıldığında debi katsayısının H_t/P ile azaldığı söylenebilir. Bununla birlikte Şekil

9'daki grafiklerden bu azalma hızının savak yan duvar açısıyla (α) azaldığı anlaşılmaktadır.

Nap yüküyle debi katsayısı ve savaklama kapasitesinin değişimlerini daha iyi incelemek için yalnızca HAD analizlerinin kullanıldığı Şekil 10'daki grafikler çizdirilmiştir. Bu grafiklerden anlaşılacağı üzere; labirent savak yan duvar açısı küçüldükçe, etkin savak kret uzunluğu arttığından, savaklanan debi artmakta fakat aksine debi katsayıları azalmakta olduğu görülmektedir. Bu azalışın sebebi açı düştükçe memba tarafında trapez gözler arasındaki nap girişimlerinin daha etkili olmasıdır (Şekil 6b). Bu olay Crooston ve Tullis (2012b) tarafından detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 9. Farklı savak yan duvar açıları için deneysel ve sayısal debi katsayısının boyutsuz nap yüküyle değişimlerinin karşılaştırılması



Şekil 10. Farklı savak yan duvar açılarında; a) debilerin b) debi katsayılarının, boyutsuz savak yüküyle karşılaştırılması

Sonuçlar

Bu çalışmada farklı yan duvar açlarına sahip 4 farklı trapez labirent savak farklı hidrolik koşullar altında sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Düşük nap yükleri için küçük yan duvar açılarında nap yapışması meydana gelirken bu durum daha büyük yan duvar açıları için oluşmamaktadır.
2. Küçük kenar duvar açılarında ($\alpha=15^\circ$) batık akım durumu $H/P > 0.57$ için başlarken, daha büyük açılar için ($\alpha > 30^\circ$) batık akım durumu $H/P > 0.76$ için oluşmaktadır. Bu durumda, tasarım sırasında savak kapasitesinin artırılması için, küçük yan duvar açıları kullanılacaksa, batık durumdan kaçınmak için göreceli olarak daha büyük savak yükseklikleri tercih edilmelidir. Fakat bu durumun bir sonucu olarak inşaat maliyetlerinin artması da göz önüne alınmalıdır.
3. Bir dezavantaj olarak, özellikle küçük yan duvar açıları için labirent savakların memba ucuna yakın bölgelerde nap girişimi meydana gelmekte ve bu da savaklama verimini düşürmektedir.
4. Bununla birlikte; daha küçük kenar duvar açıları için ara gözlerde karşılıklı akım çarpışması sonucu meydana gelen hidrolik sıçrama, yüksek enerjili mansap akımının enerjisinin kırılmasında önemli rol

oynamaktadır. Bu durum labirent savakların diğer bir avantajı olarak ortaya çıkmaktadır.

5. Genel olarak literatürdeki bilgilere uygun olarak toplam nap yükünün artmasıyla birlikte debi kapasitesinin arttığı fakat debi katsayısının küçük bir miktar azaldığı görülmüştür. Benzer olarak, savak yan duvar açıları küçülürken (etkili kret uzunluğu artacağından) savak kapasitesi artar fakat bunun aksine savaklama verimi (debi katsayısı) küçük bir miktar azalmaktadır. Bu azalmaların sebebi özellikle memba ucuna yakın bölgelerdeki yüksek nap yükü ve dar savak açılarındaki nap girişimidir.
6. Elde edilen sayısal simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüş ve sayısal analiz sonuçlarının bu tür çalışmalarda etkin kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmada Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından desteklenen FÜBAP-1610 numaralı projede elde edilen deneysel veriler kullanılmıştır.

Kaynaklar

- Aydin, M.C., (2012). CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir, *Advances in Engineering Software*, 45; 159-166.
- Aydin, M.C., Emiroglu, M.E., (2013). Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29: 1-8.
- Aydin, M.C., Emiroğlu, M.E., (2016). Numerical analysis of subcritical flow over two-cycle trapezoidal labyrinth side weir, *Flow Measurement and Instrumentation*, 48(1): 20-28.
- Bilhan, O., Emiroglu, M.E., Miller, C.J., (2016). Experimental Investigation of Discharge Capacity of Labyrinth Weirs with and without Nappe Breakers. *World Journal of Mechanics*, 6, 207-221.
- Bilhan, O., Aydin, M.C., Emiroglu, M.E., Miller, C.J., (2018) Experimental and CFD Analysis of Circular Labyrinth Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 144(6):04018007-1. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001301
- Bruce, M. Savage, B.M., Brian, M. Crookston, B.M., Paxson, G.S., (2016) Physical and Numerical Modeling of Large Headwater Ratios for a 15° Labyrinth Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(11): 1-7.
- Crookston, B.M., Tullis, B.P., (2012a). Arced Labyrinth Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(6): 555-562.
- Crookston, B.M., Tullis, B.P., (2012b). Labyrinth Weirs: Nappe Interference and Local Submergence. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(8): 757-765.
- Crookston, B.M., Tullis, B.P., (2013). Hydraulic Design and Analysis of Labyrinth Weirs. I: Discharge Relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(5): 363-370.
- Crookston, B.M., Paxson, G.S., Savage, B.M., (2012). Hydraulic Performance of Labyrinth Weirs for High Headwater Ratios. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February 2012, Porto, Portugal.
- Dabling, M.R., Tullis, B.P., Crookston, B.M., (2013). Staged Labyrinth Weir Hydraulics. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(11): 955-960.
- Flow 3D, (2014). Theory. Flow-3D User Manual, v11.0.3. Flow Science, Inc.
- Hirt, C. W., and Nichols, B. D., (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.
- Khode, B.V., Tembhurkar, A.R., Porey, P.D., Ingle, R.N., (2012). Experimental Studies on Flow over Labyrinth Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(6): 548-552.
- Paxon, G., Savage, B., (2006). Labyrinth Spillways: Comparison of Two Popular U.S.A. Design Methods and Consideration of Non-Standard Approach Conditions and Geometries. International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, , J. Matos and H. Chanson (Eds), Report CH61/06, Division of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Tullis, J.P., Amanian, N., Waldron, D. (1995). Design of Labyrinth Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3): 247-255.

Analysis of Trapezoidal Labyrinth Weirs Using Computation Fluid Dynamics (CFD)

Extended Abstract

Labyrinth weirs are effective hydraulics structures to increase the discharge capacity at space-restrictive situations and the same nappe load. This type of weir is generally used as spillway structures on dams as well as for flow control purposes. Therefore, the labyrinth weirs are dam structures that should be carefully examined in terms of dam safety.

The labyrinth weirs have a higher discharge capacity than the conventional weirs due to the increase in effective crest lengths. Several experimental studies have been conducted in recent years to investigate the hydraulic performances of labyrinth weirs. By using advanced numerical methods together with experimental studies, researchers can gain more knowledge about the behavior of hydraulic structures and obtain better designs.

Recent researches have revealed that in addition to experimental studies, the use of advanced computer and numerical techniques is important to obtain more detailed results. In this study, in addition to the experimental studies previously carried out by Bilhan et al. (2016), the discharge capacity and hydrodynamic properties of trapezoidal labyrinth weirs were analyzed in detail with the help of Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes.

The results have compared with the existing experimental studies. In summary, according to the results obtained from this study:

The submerged flow for the low side wall angles ($\alpha=15^\circ$) occurs at $Ht/P > 0.57$ while the submerged flow condition for larger side wall angles ($\alpha > 30^\circ$) occurs at $Ht/P > 0.76$. As a consequence of this evaluation, relatively low weir heights should be preferred to avoid submergence flow if small side wall angles are used to increase the spillway capacity during design. But in this case, it should be taken into account rising construction costs.

As a disadvantage, especially for low sidewall angles, complex nappe flow movements occur in areas near the upstream section end of labyrinth weirs, which in turn reduces the efficiency of discharge.

However, for the low side wall angles, the hydraulic jump, which results in a flow collision in the labyrinth weir cycles, is more important role for the

breakage of the high-energy in the downstream of the labyrinth weir. This is another advantage of the labyrinth weirs.

In general, according to the information in the literature, it is seen that the flow capacity increases with the increase of total nappe heights but the discharge coefficient decreases slightly with the increase of total nappe heights. Similarly, as the value of the side wall angles decreases (effective length increases), the weir capacity increases, but, the weir efficiency (discharge coefficient) decreases slightly. The reason for these decreases is the high nappe load in the areas close to the upstream section and the nappe interference at the low side wall angles.

The numerical simulation results obtained from in this study were found to be consistent with those obtained from experimental studies. It has been show that, the results of CFD analysis can be used successfully in the evaluation of the discharge capacity of trapezoidal labyrinth weirs

Keywords: Trapezoidal Labyrinth Weir, CFD, Discharge Coefficient, Crest Shape