

Üçgen basamaklı dolusavakların enerji sönmleme performansının incelenmesi

Investigation of energy dissipation performance of triangular stepped spillways

Eyyüp Ensar YALÇIN^{1*}, Erdinç İKİNCİOĞULLARI¹, Nihat KAYA²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye.

eeyalcin@bingol.edu.tr, erdincikinciogullari@gmail.com

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.

nkaya@firat.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 17.04.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 13.09.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.95902

Kabul Tarihi/Accepted: 20.09.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Basamaklı dolusavaklar, tahliye kanalı boyunca bulunan basamaklarla akım enerjisinin büyük kısmını tahliye kanalında sönmleyebilmektedir. Basamakların enerji sönmlemedeki katkısı sebebiyle yüzyıllardır yaygın olarak kullanılan bu dolusavaklar, birçok akademik çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışma kapsamında, üçgen basamaklı dolusavakların enerji sönmleme performansları Flow-3D yazılımı kullanılarak incelenmiştir. 3 farklı model ve 3 farklı debi kullanılarak toplam 9 adet analiz yürütülmüştür. Yürütülen analizler neticesinde, üçgen basamaklı dolusavaklarda basamak derinliğinin (h_c) artışıyla birlikte enerji sönmleme oranının arttığı, üçgen basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavaklara göre yaklaşık %78'e varan oranlarda daha fazla enerji sönmleyebildiği ve bu oranın geçiş akım rejimine doğru gidildikçe azaldığı sonuçlarına varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Üçgen basamaklı dolusavak, Enerji sönmleme, Flow3D, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).

Abstract

Stepped spillway can dissipate most of the flow energy in the discharge channel with the steps along the discharge channel. These spillways, which have been widely used for centuries due to the contribution of the steps in energy dissipation, have been the subject of many academic studies. In this study, the energy dissipation performance of triangular stepped spillways are investigated using Flow-3D software. A total of nine analyzes were carried out using three different models and three different discharges. As a result of the analyzes carried out, it was concluded that the energy dissipation ratio increases with the increase of the step depth (h_c), the triangular stepped spillways can dissipate up to 78% more energy than the conventional stepped spillways, and this rate decreases as the transition flow regime is passed.

Keywords: Triangular stepped spillway, Energy dissipation, Flow3D, Computational fluid dynamics (CFD).

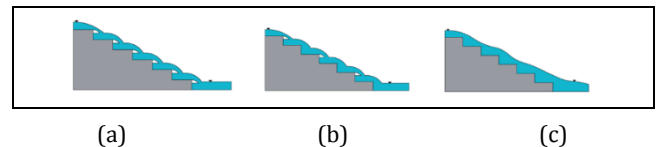
1 Giriş

Dolusavaklar, baraj rezervuarlarında biriken fazla suların veya feyzan debisinin, baraj gövdesine zarar vermeden mambadan mansaba aktarılmasını sağlayan yapılardır. Bu yapılar, baraj mambasındaki suyu mansaba aktarırken üzerinde konumlandırılan basamaklar sayesinde akım enerjisinin % 70-80 oranında sönmleyebilmektedir [1]. İlk örneklerinin yaklaşık 3500 yıl öncesine dayandığı basamaklı dolusavaklar, son 45 yılda gelişen yeni inşa teknikleri ve yapı malzemelerinin üretimiyle birlikte oldukça popüler hale gelmiştir [2].

Basamaklı dolusavaklar, tahliye kanalı boyunca yerleştirilen basamaklar sayesinde enerji sönmleme oranını önemli ölçüde arttırdığından, mansap havuzundaki enerji kırıcı yapıların boyutu ve maliyeti azalmaktadır. Ayrıca, dolusavak boyunca kavitasyon oluşum riski de önemli ölçüde azalmaktadır [3].

Basamaklı dolusavaklar yüksek enerji sönmleme performansına sahip olması ve inşasının ekonomik ve pratik olması sebebiyle geçmişten günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Basamaklı dolusavaklar ile ilgili yürütülen ilk çalışmalarda; akım rejimlerinin belirlenmesi, temel eşitliklerin oluşturulması, tasarım kriterlerinin belirlenmesi gibi konular araştırılmıştır [4]-[10].

DeneySEL çalışmalara [4],[7],[11] göre basamaklı dolusavak üzerindeki akım; debi değerine, dolusavak eğimine ve basamak geometrisine bağlı olup nap rejimi, sıçramalı rejim ve geçiş rejimi olmak üzere üçe ayrılır [12]. Nap rejimi, her bir basamakta oluşan nap şeklindeki akımın art arda düştüğü serbest naplar dizisidir ve düşük debi değerlerinde görülmektedir (Şekil 1(a)). Debi arttıkça basamaklı dolusavak üzerindeki akım kararlı hale geçerek sıçramalı rejimi oluşturur (Şekil 1(c)), [6]. Hidrolik mühendisliğinde, basamaklı dolusavak tasarımları genellikle en kararlı yapıya sahip olan sıçramalı akım rejimine göre tasarlanır [12]. Bu iki akım tipinin arasında ise geçiş rejimi meydana gelir (Şekil 1(b)). Ancak, düzensiz akım koşullarının görülmesi sebebiyle tasarımlarda geçiş rejiminin kullanılması tavsiye edilmemektedir [6].



Şekil 1. Basamaklı dolusavaklarda oluşan akım rejimleri. (a): Nap akım rejimi. (b): Geçiş akım rejimi. (c): Sıçramalı akım rejimi [13].

Figure 1. Stepped spillway flow regimes. (a): Nappe flow regime. (b): Transition flow regime. (c): Skimming flow regime [13].

*Yazışılan yazar/Corresponding author

Chanson [2], nap akım rejiminin üst sınırını (nap ile geçiş akım rejimi arasındaki sınırı) Eşitlik (1) ile tanımlarken yine aynı çalışmada sıçramalı akım rejiminin alt sınırını (geçiş ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınırı) ise Eşitlik (2) ile belirlemiştir. Boes ve Hager [9] sıçramalı akım rejiminin alt sınırını (geçiş ile sıçramalı akım rejimi arasındaki sınırı) Eşitlik (3) ile belirlemiştirlerdir.

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.89 - 0.4 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \quad (1)$$

$$\frac{y_c}{h_s} = 1.2 - 0.325 \left(\frac{h_s}{l_s} \right) \quad (2)$$

$$\frac{y_c}{h_s} = 0.91 - 0.14 \tan(\alpha) \quad (3)$$

Burada, h_s = basamak yüksekliği (m), l_s = basamak uzunluğu (m), y_c = kritik akım derinliği ve α = şüt açısını ifade etmektedir.

Son yıllarda bilgisayar teknolojilerinde meydana gelen hızlı gelişmelerle birlikte birçok HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımlar birçok bilim dalında olduğu gibi hidrolik mühendisliğinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. HAD yazılımları kullanılarak basamaklı dolusavaklarda yürütülen çalışmalarda farklı basamak sayıları ve geometrileri, basamak uçlarında farklı geometride eşikler ve farklı şüt açıları gibi çeşitli parametreler kullanılarak enerji sönümlenme oranları sayısal olarak incelenmiştir [13]-[26].

Bu çalışmada, literatürdeki bir klasik basamaklı dolusavak modelinin [27] deney sonuçları kullanılarak sayısal doğrulama işlemi yapılmış ve üçgen geometriye sahip basamaklı dolusavakların enerji sönümlenme oranı HAD yazılımlarından biri olan Flow-3D ile sayısal olarak incelenmiştir.

2 Materyal ve yöntem

2.1 Sayısal model

Flow-3D, akışkanların dinamik hareketlerini sayısal olarak inceleyen ve birçok bilim dalı (hidrolik mühendisliği, havacılık ve uzay, çevre, deniz bilimleri, vd.) için Flow Science Inc. tarafından geliştirilmiş bir yazılımdır. Flow-3D yazılımı, süreklilik ve Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerinin çözümünde sonlu hacimler yöntemini kullanmaktadır. Flow-3D yazılımında sonlu hacimler yönteminin geliştirilmiş bir versiyonu olan ve serbest yüzey akışlarının oldukça hassas bir şekilde modellenmesini sağlayan TruVOF kullanılmaktadır [28],[29]. Bu yazılımda hesaplamalar, dikdörtgen geometriye sahip üniform hücrelerden oluşan çözüm ağı aracılığıyla yürütülmektedir. Bu yapıda olan bir ağ başlangıçta bir kısıtlama veya sorun gibi gözükse de daha az miktarda hafızaya gereksinim duyması, kolay üretimi ve FAVOR (Fractional Area-Volume Obstacle Representation) ile VOF (Volume of fluid) gibi iki kullanışlı yöntemin kullanılması gibi nedenlerle bu çözüm ağı tipinin kullanımı avantaj sağlamaktadır [30]. Çözüm ağlarında bulunan ve kontrol hacmi olarak da adlandırılan hücrelerin her birinin merkezinde akışkana ait basınç, yoğunluk ve viskozite gibi skaler büyüklükler yer alırken, hücre yüzeylerinde ise sadece hızlar (u, v, w) hesaba katılmaktadır [29].

Üç boyutlu, sıkışmaz akışkanlar için kullanılan süreklilik denklemleri, Eşitlik (4) ile ifade edilebilir,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Burada, u ; x yönündeki akım hızını, v ; y yönündeki akım hızını ve w ; z yönündeki akım hızını ifade etmektedir.

Üç boyutlu bir akış için Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri Eşitlik (5) ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) &= \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \\ &\frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'u'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) &= \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \\ &\frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{v'u'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{v'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{v'w'}) \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) &= \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \\ &\frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{w'u'}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{w'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'w'}) \end{aligned} \quad (5)$$

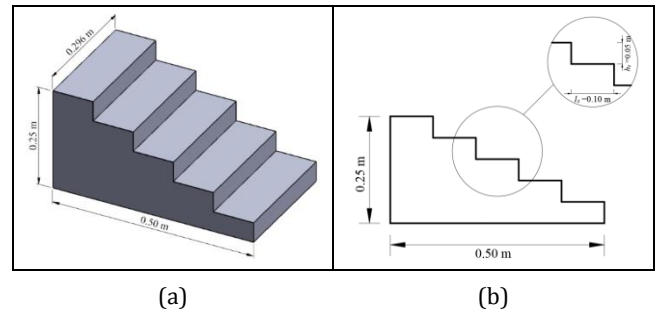
Burada, ρ akışkanın özgül kütlelerini, $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$: x, y, ve z yönündeki zaman ortalamalı hızları, u', v', w' türbülans çalkantı hızlarını, X, Y ve Z ilgili eksenlerdeki kütlelesel ivmeyi, μ dinamik viskoziteyi ve p basıncı ifade etmektedir.

Türbülanslı akımların sayısal olarak modellenmesinde türbülansın dikkate alınmaması mümkün değildir. İdeal olarak, momentum ve kütle korunum denklemleri ile türbülanslı dalgalanmaların tamamı simüle edilebilse de bu durum, sayısal modelleme gerçekleştirilirken kullanılan ağ çözünürlüğünün bu tür detayları yakalamak için yeterli olması durumunda mümkündür. Ancak, işlem süresi ve bilgisayar belleği gibi sınırlamalar nedeniyle yüksek çözünürlükte modellemeler yapmak genellikle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, türbülansın ortalama akım özellikleri üzerindeki etkilerini tanımlayan basitleştirilmiş bazı modellemeler kullanılmaktadır [31].

Bu çalışma kapsamında literatürde yaygın olarak kullanılan $k - \epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır.

2.2 Geometrik model

Sayısal çalışmanın doğrulanmasında kullanılan fiziksel modelin [27] uzunluğu 0.50 m, yüksekliği 0.25 m, genişliği 0.296 m ve kanal açısı 26.6° olup modelde bulunan basamakların yüksekliği 0.05 m ve uzunluğu 0.10 m'dir (Şekil 2).



Şekil 2. Mero ve Mitchell [27] tarafından tasarlanan fiziksel modelin geometrisi. (a): 3 boyutlu görünüm. (b): 2 boyutlu görünüm.

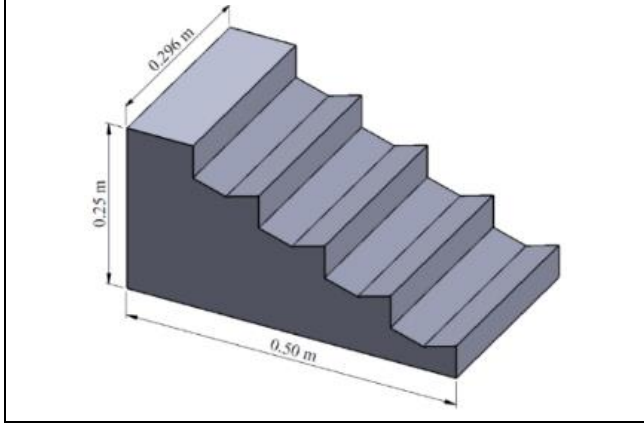
Figure 2. Geometry of the physical model designed by Mero and Mitchell [27]. (a): Three-dimensional view. (b): Two-dimensional view.

Sayısal analizler için üç farklı geometri (üçgen basamak derinliği (h_t)=0.005, 0.010 ve 0.015 m) ve üç debi (0.00684, 0.00831 ve 0.0121 m³/s) kullanılarak toplamda 9 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Solidworks yazılımı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu modeller, .stl (Standard Triangle Language) uzantısında kaydedilerek Flow-3D yazılımına aktarılmıştır (Şekil 3). Çalışma kapsamında yürütülen analizlerin hidrolik karakteristikleri Tablo 1'de

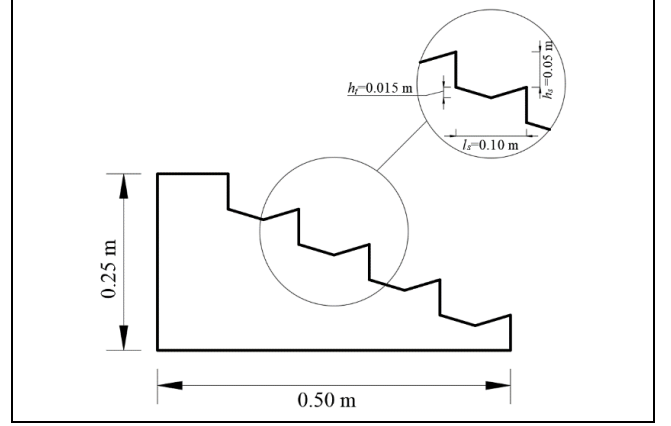
özetlenmiştir. Buradaki akım rejimleri, Boes ve Hager [9] tarafından verilen eşitliklere göre belirlenmiştir.

2.3 Çözüm ağı, sınır şartları ve analiz süresi

Model için en uygun çözüm ağını tespit etmek amacıyla üç farklı çözüm ağı denenmiştir. Oluşturulan çözüm ağlarında geometrinin daha iyi bir şekilde algılanabilmesi için z doğrultusunda dokuz adet ve x doğrultusunda on adet ekstra çözüm katmanı kullanılmıştır (Şekil 4).



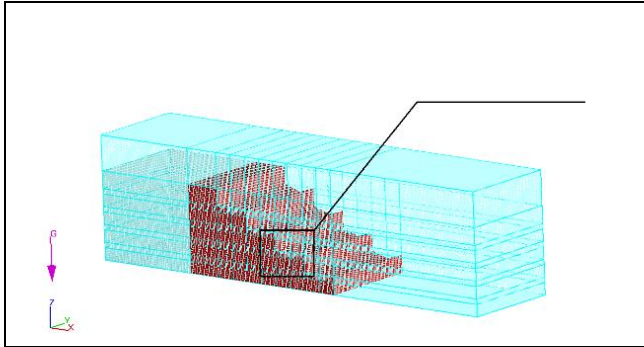
(a)



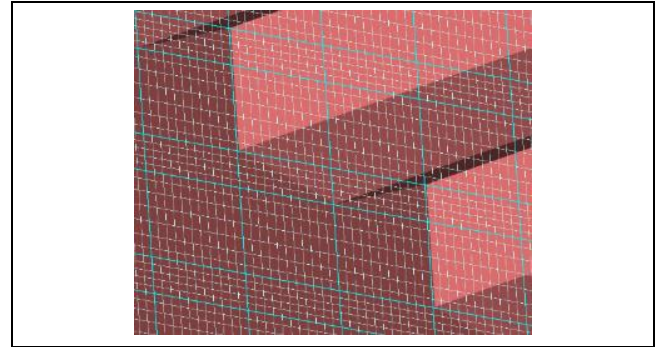
(b)

Şekil 3. Üçgen basamaklı dolusavakların tasarımı (Model-3). (a): 3 boyutlu görünüm. (b): 2 boyutlu görünüm.

Figure 3. The design of triangular stepped spillways (Model-3). (a): Three-dimensional view. (b): Two-dimensional view.



(a)



(b)

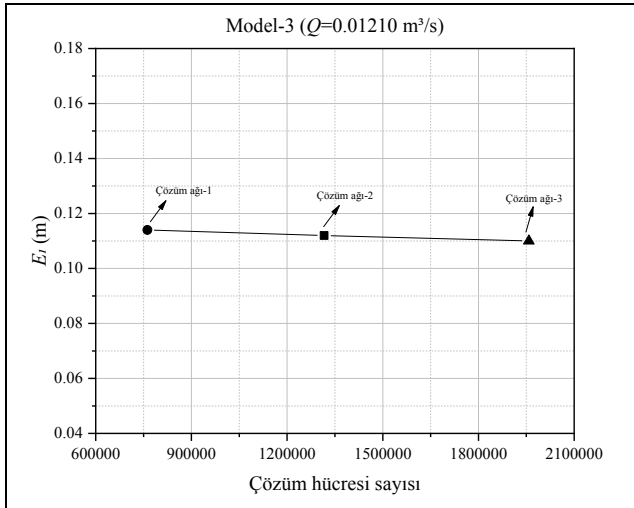
Şekil 4. Çözüm ağı (Mesh) yapısı. (a): Perspektif ve yakınlaştırılmış görünüm. (b): İki boyutlu görünüm.

Figure 4. Mesh structure. (a): Perspective and zoomed view. (b): Two-Dimensional view.

Tablo 1. Analizlere ait hidrolik karakteristikler.
Table.1. Hydraulic characteristics of the analyses.

Analiz Numarası	Model Numarası	Q (m ³ /s)	Basamak Yüksekliği (h_s) (m)	Basamak Genişliği (l_s) (m)	Üçgen basamak derinliği (h_t) (m)	Akım Rejimi [9]
1	Model 1	0.01210	0.05	0.10	0.005	Sıçramalı
2	Model 1	0.00830	0.05	0.10	0.005	Sıçramalı
3	Model 1	0.00684	0.05	0.10	0.005	Geçiş
4	Model 2	0.01210	0.05	0.10	0.010	Sıçramalı
5	Model 2	0.00830	0.05	0.10	0.010	Sıçramalı
6	Model 2	0.00684	0.05	0.10	0.010	Geçiş
7	Model 3	0.01210	0.05	0.10	0.015	Sıçramalı
8	Model 3	0.00830	0.05	0.10	0.015	Sıçramalı
9	Model 3	0.00684	0.05	0.10	0.015	Geçiş

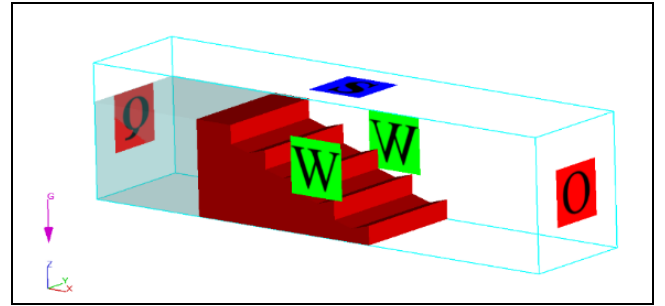
Yürütülen analizlerde ilk etapta 761,985 adet çözüm hücresi kullanılmıştır. Son aşamada ise hücre boyutları küçültülerek toplam hücre sayısı 1,958,040'a kadar artırılmıştır. Tablo 2 ve Şekil 5'te görüldüğü üzere, belli bir değerden sonra toplam hücre sayısını artırmanın mansaptaki enerji yüksekliğini çok fazla etkilememesi sebebiyle en küçük hücre boyutu 0,45 cm ve en büyük hücre boyutu 1,03 cm olan 1,316,250 adet çözüm hücresinden oluşan Çözüm Ağı-2'nin çalışma için kullanılmasının uygun olduğu kanaatine varılmıştır.



Şekil 5. Çözüm hücresi sayısının dolusavak mansabındaki enerjiye etkisi (Model 3, $Q=0.01210$ m³/s).

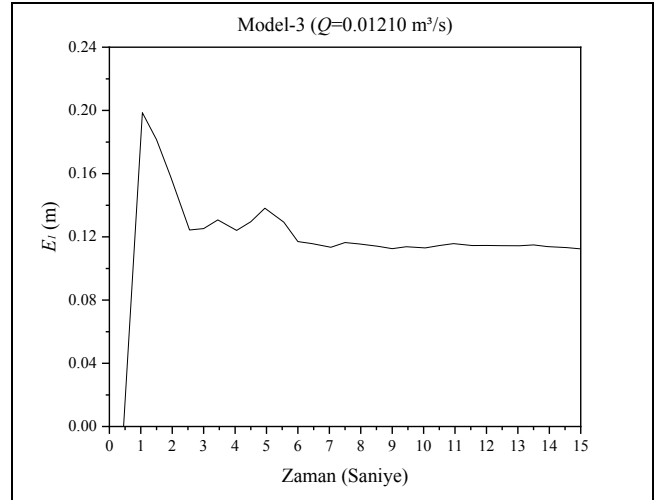
Figure 5. The effect of the total number of cells on the energy downstream of the spillway (Model 3, $Q=0.01210$ m³/s).

Analizlerde kullanılan sınır şartları, Mero ve Mitchell [27] tarafından gerçekleştirilen deney setine uygun olacak şekilde seçilmiştir. Çözüm bloğunda $x_{baş}$ yüzeyine, dolusavaktan birim zamanda sabit bir akımın geçebilmesini sağlamak amacıyla debi (Q) sınır şartı ve dolusavak yüksekliği kadar su tanımlanmıştır. Memba kısmındaki akım yüksekliği tanımlanan debiye göre yazılım vasıtasıyla belirlenmektedir. Savaklanan akımın sistemi terk etmesini sağlamak amacıyla x_{son} yüzeyine çıkış (O), kanal tabanı ($z_{baş}$) ile, kanalın sol ve sağ yüzeylerine ($y_{baş}$ ve y_{son}) duvar (W) sınır şartı, çözüm bloğunun üst kısmına ise symmetry (S) tanımlanmıştır (Şekil 6). Kararlı akım şartlarını yakalayabilmek için analizlerin 15 saniye boyunca yürütülmesinin yeterli olduğu gözlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. Sınır şartları.

Figure 6. Boundary conditions.



Şekil 7. Dolusavak mansabındaki enerjinin zamana bağlı değişimi (Model 3, $Q=0.01210$ m³/s).

Figure 7. Variation of energy downstream of the spillway with time (Model 3, $Q=0.01210$ m³/s).

2.4 Enerji sönmüleme oranı

DeneySEL çalışmada [27] membadaki toplam enerji yüksekliği kritik akım derinliği ile hesaplanmıştır. Kanal dikdörtgen olduğu için ile kritik akım derinliği ($y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$) kullanılarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Çözüm hücresi sayısının dolusavak mansabındaki enerjiye etkisi (Model 3, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$)

Table 2. The effect of the total number of cells on the energy downstream of the spillway (Model 3, $Q=0.01210 \text{ m}^3/\text{s}$).

Çözüm Ağı	Çözüm Ağı Hücresi Boyutları (Minimum-Maksimum) (cm)	Çözüm Hücresi Sayısı	Dolusavak Mansabındaki Enerji Yüksekliği (E_1) (m)
1	0.50-1.47	761,985	0.114
2	0.45-1.03	1,316,250	0.112
3	0.38-0.92	1,958,040	0.110

Eşitlik (6) ve (7) kullanılarak Şekil 8'de yerleri belirtilen (0) ve (1) noktalarındaki enerjiler hesaplanmıştır. Ardından Eşitlik (8) kullanılarak (0) ve (1) noktaları arasındaki enerji farkı (E_L) ve son olarak Eşitlik (9) kullanılarak enerji sönümlenme oranı hesaplanmıştır [27].

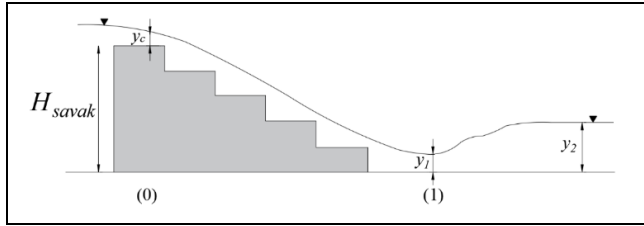
$$E_0 = H_{savak} + y_c + \frac{v_c^2}{2g} = H_{savak} + 1.5y_c \quad (6)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (7)$$

$$E_L = E_0 - E_1 \quad (8)$$

$$\text{Enerji sönümlenme oranı} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = \frac{E_L}{E_0} \quad (9)$$

Burada, E_0 , savak üzerindeki enerjiyi (m); E_1 , dolusavak mansabındaki enerjiyi (m); H_{savak} , Savak yüksekliğini (m); v_c , kritik akım hızını (m/s); v_1 , mansaptaki ortalama akım hızını (m/s) g , yerçekimi ivmesini (m/s^2); ifade etmektedir.



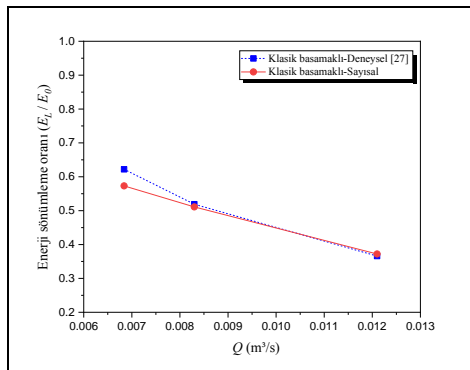
Şekil 8. Basamaklı dolusavak boykesiti.

Figure 8. Stepped spillway longitudinal section.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Sayısal modelin doğrulanması

Yukarıda bahsedildiği üzere, toplam 1,316,250 adet çözüm hücresinin ve $k - \epsilon$ türbülans modelinin kullanıldığı sayısal çalışmanın sonuçlarının deneysel sonuçlar [27] ile yeterince uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 9).

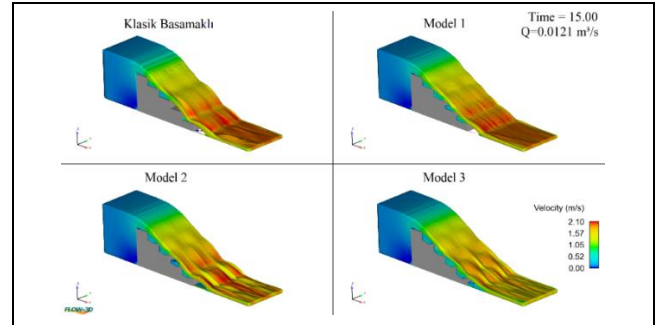


Şekil 9. Sayısal modelin doğrulanması.

Figure 9. Validation of numerical model.

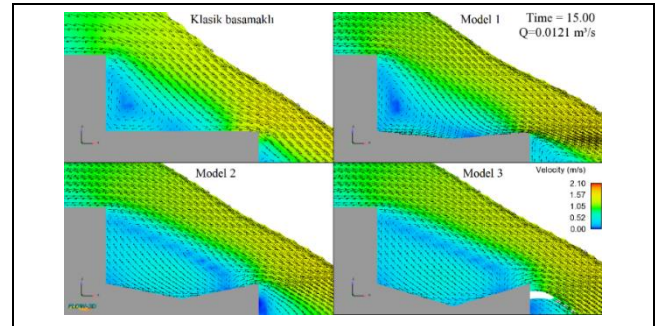
3.2 Akım karakteristikleri

Klasik basamaklı dolusavak modeli ve üçgen basamaklı dolusavak modellerinde $0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi değerinde oluşan hız dağılımları Şekil 10'da verilmiştir. Üçgen basamaklı dolusavak modellerinde, klasik basamaklı dolusavak'a göre mansapta daha düşük hız değerleri gözlenmiştir. Ayrıca, üçgen basamaklı modellerde basamak derinliği (h_t) artışıyla birlikte dolusavak mansabındaki akım hızının azaldığı görülmektedir (Şekil 10). Bu durumun, basamak derinliği artışına bağlı olarak akım içerisinde dahil olan hava miktarının artmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Şekil 11'de klasik basamaklı dolusavak modeli ve üçgen basamaklı dolusavak modellerinde $0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değerinde ikinci basamak üzerinde oluşan hız vektörlerinin dağılımı verilmiştir. Klasik basamaklı model ve üçgen basamaklı modellerin tamamında, en yüksek hız değerleri basamak uçlarında görülürken, basamak tabanına doğru hız değerleri azalmaktadır. Tüm modellerde hız vektörlerinin dağılımı incelendiğinde, izafi taban altında çevrinti bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca üçgen basamaklı dolusavak modellerinin tamamında klasik basamaklı dolusavak modeline kıyasla daha büyük bir bölgede çevrıntilerin oluştuğu görülmektedir (Şekil 11).



Şekil 10. $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debide modellerde oluşan hız dağılımları.

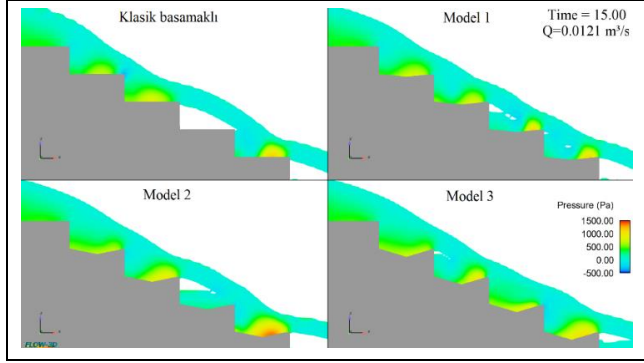
Figure 10. Velocity distributions of the models for $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$.



Şekil 11. $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debide modellerde oluşan hız vektörleri.

Figure 11. Velocity vectors of the models for $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$.

Modellerin kanal eksenı boyunca oluşan basınç dağılımları Şekil 12’de verilmiştir. Test edilen modellerde genel olarak basamak başlangıç bölgelerinde düşük basınç değerleri görülürken, basamak uçlarına doğru ise basınç değerlerinin arttığı görülmektedir. Yapılan analizlerde üçgen basamaklı modellerin hiçbirinde negatif basınç oluşumu görülmediğinden bu modellerde kavitasyon oluşumu da beklenmemektedir.

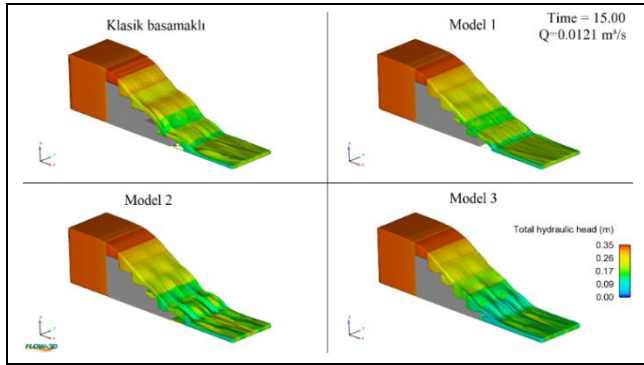


Şekil 12. $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debi de modellerde oluşan basınç dağılımları.

Figure 12. Pressure distributions of the models for $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3 Enerji sönümlenme oranları

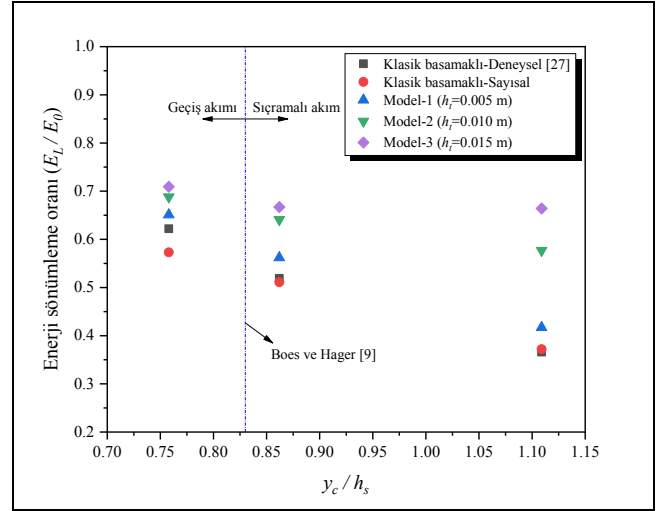
Test edilen modellerin mansabında oluşan enerji değerleri Şekil 13’te karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, üçgen basamaklı dolusavakların mansabındaki enerjinin klasik basamaklı dolusavakın mansabındaki enerjiye kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni üçgen basamaklı dolusavak modellerinde klasik basamaklı dolusavak modeline kıyasla daha büyük bir bölgede çevrıntilerin oluşmasıdır. Ayrıca üçgen basamaklı modellerde h_t arttıkça, mansaptaki enerjinin azaldığı görülmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$ 'lik debide modellerde oluşan enerji dağılımları.

Figure 13. Total hydraulic head of the models for $Q=0.0121 \text{ m}^3/\text{s}$.

Şekil 14’te, çalışma kapsamında kullanılan modellerin enerji sönümlenme oranları ile boyutsuz kritik akım derinliği (y_c/h_s) arasındaki ilişki verilmiştir. Sonuçlara göre, boyutsuz kritik akım derinliğinin yani debi değerinin artışıyla, genellikle enerji sönümlenme oranlarında azalma olduğu ve bu durumun literatürle de uyumlu olduğu görülmektedir [16],[19],[24],[27],[27],[32]. Ayrıca, üçgen basamaklı dolusavakların klasik basamaklı dolusavakla kıyasla daha yüksek oranda enerji sönümlenmediği ve bu oranın basamak derinliğinin (h_t) artmasıyla arttığı gözlenmiştir.



Şekil 14. Modellerin enerji sönümlenme oranlarının kıyaslanması.

Figure 14. Comparison of energy dissipation rates of the models.

En yüksek basamak derinliğine sahip olan Model-3’ün klasik basamaklı dolusavak modeline göre sıçramalı akım rejiminde yaklaşık % 78, geçiş akımı rejiminde ise % 24’e varan oranlarda daha fazla enerji sönümlenmediği görülmektedir. Kullanılan modellerin enerji sönümlenme oranı farkının sıçramalı akım rejiminde daha fazla olduğu ve geçiş akımı rejimine doğru bu farkın azaldığı görülmektedir.

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında üçgen basamaklı dolusavakların enerji sönümlenme performansı Flow-3D yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. 3 farklı model ve 3 debi değeri kullanılarak toplam 9 adet analiz yürütülmüştür. Sayısal çalışmanın doğrulanmasında Mero ve Mitchell [27] tarafından gerçekleştirilen klasik basamaklı dolusavak deney sonuçları kullanılmıştır. Yapılan analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çalışmada kullanılan modellerin tamamında, debi değeri arttıkça enerji sönümlenme oranının azaldığı görülmüştür,
- Çalışmada kullanılan debi değerlerinin tamamında, üçgen basamaklı dolusavak modellerinin klasik basamaklı dolusavaklara göre daha yüksek oranlarda enerji sönümlenmediği ve üçgen basamaklı modellerde basamak derinliğinin (h_t) artmasıyla enerji sönümlenme oranının arttığı gözlenmiştir,
- Basamak derinliğinin en yüksek olduğu Model-3’ün, klasik basamaklı dolusavak modeline kıyasla, sıçramalı akım rejiminde % 78 ve geçiş akım rejiminde % 24 civarında daha fazla enerji sönümlenmediği görülmüştür,
- Üçgen basamaklı dolusavak modelleri ile klasik basamaklı dolusavak modeli arasındaki enerji sönümlenme oranı farkının sıçramalı akım rejiminde daha fazla olduğu ve geçiş akımı rejimine doğru bu farkın azaldığı görülmektedir,
- Üçgen basamaklı dolusavak modellerinde negatif basınç oluşmadığından kavitasyon riski gözlenmemiştir.

5 Conclusions

In this study, the energy dissipation performance of triangular stepped spillways was numerically investigated using Flow-3D software. A total of nine analyzes were carried out using three different models and three discharges. The results of the classical stepped spillways experiments conducted by Mero and Mitchell [27] were used to validate the numerical model. As a result of the analyzes made, the following conclusions were obtained.

- In all of the models used in the study, it was observed that the energy dissipation rate decreased as the discharge increased,
- In all of the discharge used in the study, it was observed that triangular stepped spillway models can dissipate energy at higher rates than classical stepped spillways and the energy dissipation rate increases with the increase of step depth (h_t) in triangular stepped models,
- Model-3, which has the most step depth, can dissipate 78% more energy in the skimming flow regime and up to 24% in the transition flow regime compared to the classical stepped spillway model,
- The difference in energy dissipation rate between the triangular stepped spillway models and the classical stepped spillway model is higher in the skimming flow regime and decreases towards the transitional flow regime,
- None of the triangular stepped spillways showed negative pressure formation and, therefore, no risk of cavitation phenomenon.

6 Teşekkür

Bu çalışma Eyyüp Ensar YALÇIN'ın Yüksek Lisans Tezin'den [33] üretilmiştir. Yazarlar, Flow-3D (v11.2) yazılımının kullanımı için Fırat Üniversitesi'ne teşekkür etmektedir. Eyyüp Ensar YALÇIN, Yüksek Lisans Eğitimini Genel Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı (2210-A) ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür etmektedir.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Nihat KAYA ve Erdinç İKİNCİOĞULLARI fikrin oluşturulmasında; Eyyüp Ensar YALÇIN ve Erdinç İKİNCİOĞULLARI literatür taraması, verilerin toplanması, analizlerin yapılması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazımı kısımlarında katkı sunmuşlardır.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".
"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

[1] Boes RM, Chanson H, Matos J, Ohtsu I, Yasuda Y, Takahasi M, Tatewar SP, Ramesh NI, Prakash DP, Chamani MR, Rajaratnam N. "Characteristics of skimming flow over stepped spillways". *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11), 860-873, 2000.

- [2] Chanson H. "Hydraulics of stepped spillways: current status". *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), 636-637, 2000.
- [3] Murillo RE. Experimental Study of the Development Flow Region on Stepped Chutes. PhD Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2006.
- [4] Sorensen RM. "Stepped spillway hydraulic model investigation". *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), 461-472, 1985.
- [5] Chanson H. "Stepped spillway flows and air entrainment". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 422-435, 1993.
- [6] Chanson H. "Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel". *Journal of Hydraulic Research*, 34(3), 421-429, 1996.
- [7] Ohtsu I, Yasuda Y. "Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop". *Journal of Hydraulic Research*, 29(2), 309-328, 1991.
- [8] Chanson H. "Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators". *Dam Engineering*, 11(15), 205-242 2001.
- [9] Boes RM, Hager WH. "Hydraulic design of stepped spillways for RCC Dams". *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 671-679, 2003.
- [10] Felder S, Guenther P, Chanson H. "Air-Water Flow Properties and Energy Dissipation on Stepped Spillways: A Physical Study of Several Pooled Stepped Configurations". School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia, Scientific Report, CH87/12, 2012.
- [11] Peyras L, Royet P, Degoutte G. "Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs". *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(5), 707-717, 1992.
- [12] Ma P, Hu Y, Liu H. "Study on energy dissipation characteristics of skimming flow on stepped spillways". *Taiwan Water Conservancy*, 69(2), 89-102, 2021.
- [13] İkinciogulları E. "Energy dissipation performance of the trapezoidal stepped spillway". *Journal of Engineering Research*, 11(2A), 131-142, 2021.
- [14] Tabbara M, Chatila J, Awwad R. "Computational simulation of flow over stepped spillways". *Computers and Structures*, 83(27), 2215-2224, 2005.
- [15] Ghaderi A, Abbasi S, Di Francesco S. "Numerical study on the hydraulic properties of flow over different pooled stepped spillways". *Water*, 13(5), 1-25, 2021.
- [16] Saqib NU, Akbar M, Pan H, Ou G, Mohsin M, Ali A, Amin A. "Numerical analysis of pressure profiles and energy dissipation across stepped spillways having curved risers". *Applied Sciences*, 12(1), 1-18 2022.
- [17] Roushangar K, Akhgar S, Shahnazi S. "The effect of triangular prismatic elements on the hydraulic performance of stepped spillways in the skimming flow regime: an experimental study and numerical modeling". *Journal of Hydroinformatics*, 24(2), 243-258, 2022.
- [18] İkinciogulları E. "Stepped spillway design for energy dissipation". *Water Supply*, 23(2), 749-763, 2023,
- [19] Attarian A, Hosseini K, Abdi H, Hosseini M. "The effect of the step height on energy dissipation in stepped spillways using numerical simulation". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 2587-2594, 2014.
- [20] Mohammad Rezapour Tabari M, Tavakoli S. "Effects of stepped spillway geometry on flow pattern and energy Dissipation". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1215-1224, 2016.

- [21] Hamed A, Hajigholizadeh M, Mansoori A. "Flow simulation and energy loss estimation in the nappe flow regime of stepped spillways with Inclined steps and end sill: A numerical approach". *Civil Engineering Journal*, 2, 426-437, 2016.
- [22] Irzooki RH, Mohammed JR, Ameen AS. "Computational fluid dynamics modeling of flow over stepped spillway". *Tikrit Journal of Engineering Science*, 23, 1-11, 2016.
- [23] Jabbar IN. "Numerical Analysis of Flow over Stepped Spillways". MSc. Thesis, Gaziantep University, Gaziantep, Turkey, 2018.
- [24] Salmasi F, Samadi A. "Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways". *Applied Water Science*, 8, 1-11, 2018.
- [25] Ashoor A, Riazi A. "Stepped spillways and energy dissipation: A non-uniform step length approach". *Applied Sciences*, 9, 1-17, 2019.
- [26] İkinciöğulları, E. "Ters basamaklı eşikler kullanılarak tasarlanan basamaklı savakların enerji sönümleme oranlarının sayısal olarak incelenmesi". *European Journal of Science and Technology*, 23, 189-196, 2021.
- [27] Mero S, Mitchell S. "Investigation of energy dissipation and flow regime over various forms of stepped spillways". *Water and Environment Journal*, 31(1), 127-137, 2017.
- [28] Usta E. Numerical Investigation of Hydraulic Characteristics of Laleli Dam Spillway and Comparison with Physical Model Study. MSc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.
- [29] Kocaman S. Baraj Yıkılması Probleminin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2007.
- [30] Ghasemlouunia R. *Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliğinde FLOW-3D*. 1. Baskı. Ankara, Türkiye, Nobel Yayınevi, 2021.
- [31] Flow Science Inc. *Flow-3D User Manual*. 1st ed. New Mexico, USA, Flow Science Inc., 2022.
- [32] Moghadam MK, Amini A. Moghadam E K. "Numerical study of energy dissipation and block barriers in stepped spillways". *Journal of Hydroinformatics*, 23(2), 284-297, 2021.
- [33] Yalçın E.E. Basamaklı Dolusavakların Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2022.