

ISSN: 1012 - 0726 (Baskı)
ISSN: 1308 - 2477 (Online)



SAYI: 140
YIL : TEMMUZ 2022

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ

TEKNİK

BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adına Genel Müdür
Lütfi AKCA

Sorumlu Müdür

Aydın SAĞLIK

Yayın Kurulu (DSİ)

Murat Ali HATİPOĞLU
İsmail KAYA
Gökтуğ İLTER
Oğuzhan BEKTAŞ
Harun MEYDAN
Fatih YILDIZ
Vehbi ÖZAYDIN
Hakkı KILAVUZ
Menderes LALE
Deniz VAROL

Editörler

Figen ÖZYURT KUŞ
Özgür KÜÇÜKALİ

Yönetim Yeri Adresi

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yücetepe - Ankara

Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 454 38 05
bulten@dsi.gov.tr

Basıldığı Yer

Destek Hizmetleri Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik - Ankara

SAYI : 140

YIL : TEMMUZ 2022

Yayın Türü

Yaygın süreli yayın
Alti ayda bir yayınlanır
(Ocak, Temmuz)

ISSN 1012 - 0726 (Baskı)
1308 - 2477 (Online)

İÇİNDEKİLER

TÜRKİYE KAYRAKTEPE SEDİMENT BYPASS TÜNELİNDE AŞINMA TAHMİNİ Ayşe YEŞİL ÖZDEN	1
KARSU EŞDEĞERİNİN BELİRLENMESİNDE YENİ YÖNTEMLER Semih YILDIZ, Mustafa ÖZKAYA, Zuhal AKYÜREK	21
ENERJİ KIRICI HAVUZLARDA FARKLI TİP ENERJİ KIRICI BLOKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEME ORANLARININ FİZİKSEL ve SAYISAL MODELLERLE BELİRLENMESİ Şerife Yurdağül KUMCU, Kamil İSPİR	29

DSİ Teknik Bülteni TÜBİTAK ULAKBİM (Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi) ve uluslararası veritabanı EBSCO (Elton B. Stephens Company) tarafından taranmaktadır.

DSI TECHNICAL BULLETIN

Publisher

On behalf of GENERAL
DIRECTORATE OF
STATE HYDRAULIC
WORKS
Lütfi AKCA
General Director

Director in charge

Aydın SAĞLIK

Editorial Board (DSI)

Murat Ali HATİPOĞLU
İsmail KAYA
Göktuğ İLTER
Oğuzhan BEKTAŞ
Harun MEYDAN
Fatih YILDIZ
Vehbi ÖZAYDIN
Hakkı KILAVUZ
Menderes LALE
Deniz VAROL

Editors

Figen ÖZYURT KUŞ
Özgür KÜÇÜKALİ

Management Address

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yücetepe – Ankara /
TURKEY

Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 454 38 05
bulten@dsi.gov.tr

Place of Publication

Destek Hizmetleri Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik – Ankara / TURKEY

ISSUE: 140

YEAR : JULY 2022

Publication Type

Widely distributed
periodical
Published semi-annual
(January, July)

ISSN

1012 - 0726 (Press)
1308 - 2477 (Online)

CONTENTS

ABRASION PREDICTION at KAYRAKTEPE SEDIMENT BYPASS TUNNEL in TURKEY Ayşe YEŞİL ÖZDEN	1
NEW METHODS IN DETERMINATION OF SNOWWATER EQUIVALENT Semih YILDIZ, Mustafa ÖZKAYA, Zuhar AKYÜREK	21
DETERMINATION OF ENERGY DISSIPATION PERFORMANCE OF VARIOUS TYPES OF ENERGY DISSIPATOR BLOCKS IN STILLING BASIN BY PHYSICAL AND NUMERICAL MODELS Şerife Yurdağül KUMCU, Kamil İSPİR	29

DSI Technical Bulletin is indexed by TUBITAK ULAKBİM (Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi) and international database EBSCO (Elton B. Stephens Company).

DSİ TEKNİK BÜLTENİ'NİN AMACI

DSİ Teknik Bülteni'nde, su ile ilgili konularda, temel ve uygulamalı mühendislik alanlarında gönderilen makaleler yayınlanır. Makaleler, ilk önce konunun uzmanı tarafından incelenir ve değerlendirilir. Daha sonra, Hakem Kurulu uzman görüşünü de esas alarak makalenin yayınlanıp yayınlanmamasına karar verir. Makalelerin tamamı veya büyük bir kısmı diğer yayın organlarında yayınlanmamış olması gereklidir. DSİ Teknik Bülteni TÜBİTAK ULAKBİM (Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi) ve Eylül 2016 tarihi itibarı ile uluslararası veritabanı kuruluşu EBSCO (Elton B. Stephens Company) tarafından taranmaya başlamıştır.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ BİLDİRİ YAZIM KURALLARI


1. Gönderilen yazılar kolay anlaşılır dilde ve Türkçe kurallarına uygun şekilde yazılmış olmalıdır.
2. Yazıların teknik sorumluluğu yazarına aittir (yazılardaki verilerin kullanılması sonucu oluşabilecek maddi ve manevi problemlerde muhatap yazardır).
3. Yayın Kurulu, makaleler üzerinde gerekli gördüğü düzeltme ve kısaltmaları yapar.
4. Makaleler bilgisayarda Microsoft Word olarak bir satır aralıkla yazılmalı ve Arial 10 fontu kullanılmalıdır. Makaleler A4 normundaki kâğıdın her kenarından 25 mm boşluk bırakılarak yazılmalıdır.
5. Sadece ilk sayfada, yazı alanı başlangıcından sola dayalı olarak, italik 10 fontunda Arial kullanılarak ilk satıra "*DSİ Teknik Bülteni*" yazılmalıdır.
6. Konu başlığı: Yazı alanı ortalanarak, "*DSİ Teknik Bülteni*" yazısından sonra dört satır boş bırakıldıktan sonra Arial 12 fontu kullanılarak büyük harflerle koyu yazılmalıdır.
7. Yazar ile ilgili bilgiler: Adı (küçük harf), soyadı (büyük harf), yazarın unvanı ile bağlı olduğu kuruluş (alt satıra) ve elektronik posta adresi (alt satıra) yazarın ORCID ID'si (ORCID ID'si olmayan yazarlar <https://orcid.org/signin> linkinden alabilirler.) (alt satıra) başlıktan iki boş satır sonra ilk yazardan başlamak üzere Arial 10 fontu ile yazı alanı ortalanarak yazılmalıdır. Diğer yazarlar da ilk yazar gibi bilgileri bir boşluk bırakıldıktan sonra yazılmalıdır.
8. Türkçe özet, elektronik posta adresinden dört boş satır sonra, özetten bir boş satır sonra ise anahtar kelimeler verilmelidir. Aynı şekilde, Türkçe anahtar kelimelerden iki boş satır sonra İngilizce özet, bir boş satır sonra ise İngilizce anahtar kelimeler verilmelidir.
9. Bölüm başlıkları yazı alanı sol kenarına dayandırılarak Arial 10 fontu kullanılarak koyu ve büyük harfle yazılmalı. Bölüm başlığının üzerinde bir boş satır bulunmalıdır.
10. Ara başlıklar satır başında başlamalı, üstlerinde bir boş satır bulunmalıdır. Birinci derecedeki ara başlıktaki bütün kelimelerin sadece ilk harfi büyük olmalı ve koyu harflerle Arial 10 fontunda yazılmalıdır. İkinci ve daha alt başlıklar normal harflerle Arial 10 fontu ile koyu yazılmalıdır.
11. Yazılar kâğıda iki sütün olarak yazılmalı ve sütün aralarındaki boşluk 10 mm olmalıdır.
12. Paragraf sola dayalı olarak başlamalı ve paragraflar arasında bir boş satır bırakılmalıdır.
13. Eşitlikler bilgisayarda yazılmalı ve numaralandırılmalıdır. Eşitlik numaraları sayfanın sağına oturmali ve parantez içinde yazılmalıdır. Her eşitlik alttaki ve üstteki yazılardan bir boş satır ile ayrılmalıdır. Eşitliklerde kullanılan bütün semboller eşitlikten hemen sonraki metinde tanımlanmalıdır.
14. Sayısal örnekler verildiği durumlarda SI veya Metrik sistem kullanılmalıdır. Rakamların ondalık kısımları virgöl ile ayrılmalıdır.
15. Yararlanılan kaynaklar metinde kaynağın kullanıldığı yerde köşeli parantez içerisinde numaralı veya [Yazarın soyadı, basım yılı] olarak belirtilmelidir. Örneğin: "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [1]" veya basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [Aktan, 1999]" gibi.
16. Kaynaklar yazar soyadlarına göre sıralanmalı, listelenirken yazar (veya yazarların) soyadı, adının baş harfi, yayın yılı, kaynağın ismi, yayımlandığı yer ve yararlanılan sayfa numaraları belirtilerek, köşeli parantez içerisinde numaralandırılmalı ve yazarken soldan itibaren 0,75 cm asılı paragraf şeklinde yazılmalıdır. Makale başlıkları çift tırnak içine alınmalı, kitap isimlerinin altı çizilmelidir. Bütün kaynaklara metin içinde atıf yapılmalıdır.
17. Çizelgeler, şekiller, grafikler ve resimler yazı içerisine en uygun yere gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Fotoğraflar net çekilmiş olmalıdır. Şekil ve grafikler üzerine el yazısı ile ekleme yapılmamalıdır.
18. Makalenin tamamı 20 sayfayı geçmemeli, şekil, çizelge, grafik ve fotoğraflar yazının 1/3'ünden az olmalıdır.
19. Sayfa numarası, sayfaların karışmaması için sayfa arkalarına kurşun kalem ile hafifçe verilmelidir.
20. Yazım kurallarına uygun olarak yazılmış makalenin tam metni eğer e-posta ortamında gönderilebilecek kadar küçük boyutta ise e-posta adresine, değilse; hem A4 kâğıda baskı şeklinde (2 adet) hem de dijital ortamda (CD veya DVD) yazışma adresine gönderilmelidir.
21. Yayınlanan bütün yazılar için "Kamu Kurum ve kuruluşlarınca ödenecek telif ve işleme ücretleri hakkındaki yönetmelik" hükümleri uygulanır.
22. Makaleyi gönderen yazarlar yukarıda belirtilenleri kabul etmiş sayılırlar.
23. Yazışma adresi aşağıda verilmiştir:

Yasal Uyarı

Bu Teknik Bülten yalnızca genel bilgilendirme amacıyla yayımlanmaktadır ve içeriğinde yer alan malzemelerin, prosedürlerin veya yöntemlerin tek mevcut ve uygun malzeme, prosedür veya yöntem olduğunu ima etmemektedir. Malzemeler, prosedürler veya yöntemler özel koşullara, yerel imar kanunlarına, tasarım şartlarına veya tüzel ve yasal şartlara göre değişebilir. Bu Teknik Bülten'deki bilgilerin doğru ve güvenilir olduğuna inanılmakla beraber, yayımlayıcı olarak Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü bu Teknik Bülten'in içeriğinde bulunan yöntemlerin, malzemelerin, talimatların veya fikirlerin herhangi bir şekilde kullanılması kaynaklı mal veya can kaybından veya oluşabilecek zararlardan sorumlu değildir.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı Saray Osmangazi Mah. Alparslan Türkeş Cad. No:6/5 Pursaklar / ANKARA
Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 454 38 05
E-posta bulten@dsi.gov.tr, dsiteknikbulten@gmail.com
Web <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/766>

TÜRKİYE KAYRAKTEPE SEDİMENT BYPASS TÜNELİNDE AŞINMA TAHMİNİ

Ayşe YEŞİL ÖZDEN 
DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı 06100 Yüce-tepe ANKARA
ayseyesil@dsi.gov.tr

(Makalenin geliş tarihi: 10.08.2020, Makalenin kabul tarihi: 06.12.2021)

ÖZ

Rezervuarlarda oluşan sediment birikimi dünya çapında bir sorun haline gelmiştir. Sediment tünellerin kullanılması birikimin önlenmesi için tercih edilen çözüm yöntemlerinden bir tanesidir. Bu tünellerin kullanılmasında karşılaşılan sorunlar arasında tünellerin iç yüzeyinde sediment taşınımı sırasında oluşan aşınımlardır. Mevcut üç aşınım hesaplama modelleri bu çalışmada ele alınmış ve Türkiye'de yapılması planlanan Kayraktepe sediment tünellerinde oluşabilecek aşınımları tahmin etmek için kullanılmıştır. Ishibashi modelinden elde edilen sonuçlar laboratuvar sonuçlarıyla karşılaştırıldığında sürtünme etkisinden kaynaklı aşınımın sediment parçalarının oluşturduğu etkiden çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeden kaynaklı aşınımı göz ardı edildiğinde sonuçların daha tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir hesap yöntemi olan Auel model kullanılarak yapılan hesaplamaların kalibrasyon katsayıları da kullanılmak şartıyla tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Sklar and Dietrich tahmin yöntemi subkritik akım koşulları için geliştirildiğinden dolayı elde edilen sonuçların diğer iki yöntemle göre en düşük aşınım değerlerini verdiği görülmüştür. Kayraktepe barajında oluşan akım koşulları süperkritik akım koşulu olduğundan dolayı Sklar and Dietrich yöntemi geliştirilerek gerekli değişiklikler yapılmış ve sonuçların tutarlı olması sağlanmıştır. Sediment taşınım oranı genelde teorik ve ampirik formüller kullanılarak hesaplandığı için gerçek değerlerin üzerinde bir değer elde edildiğinden aşınım hesaplarında bundan kaynaklı aşınım değerleri yüksek çıkmaktadır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanıldığında değerlerin gerçek değerlere yakınlığı artmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aşınım Tahmin Yöntemi, Sediment Tünel, Sediment Taşınım Oranı

ABRASION PREDICTION at KAYRAKTEPE SEDIMENT BYPASS TUNNEL in TURKEY

ABSTRACT

Sediment accumulation in reservoirs is a challenging issue that concerns most of the reservoirs worldwide. Use of sediment bypass tunnels is one of the potential solutions to reduce sediments deposited in reservoirs. However, the sediment bypass tunnels could face major invert abrasion problems due to intense bedload sediment transportation. Three existing abrasion prediction models are introduced. Those models are applied to estimate the abrasion of the Kayraktepe sediment bypass tunnels in Turkey. The Ishibashi model results reveal some discrepancies when compared to laboratory data, which reflects that its grinding stress term gives much higher values than its particle impact term does. However, when examining the effect of particle impact term by neglecting the grinding stress, the model predicts consistent results. The model by Auel et al. demonstrates reasonable predictions in case of regulated abrasion coefficient values are used. The model of Sklar and Dietrich predicts the lowest abrasion value due to its development according to the subcritical flow conditions. In Kayraktepe dam, the flow condition in sediment bypass tunnels are supercritical flow, thus the Sklar and Dietrich model does not fit for abrasion estimation. Modifications are made to the Sklar and Dietrich model as the revised model shows great improvement on the abrasion prediction. It is concluded that the estimation of sediment transport rate using commonly adapted theoretical or empirical formulations tends to be predicted more than the real transport rate and results in the over-estimation of the abrasion rate. It is

recommended to modify the formulations and equation coefficients with the inputs of the field data on laboratory measurements for bettering the abrasion prediction.

Keywords: Abrasion Prediction Model, Sediment Bypass Tunnel, Sediment Transport Rate

1 INTRODUCTION

Sedimentation in reservoir is major issue affecting many reservoirs around worldwide [Auel et al., 2015]. Nowadays, this issue causes more serious concerns for dams which are 50 years- age. Sedimentation in reservoirs leads to multiple serious problems such as decline of the active reservoir volume causing loss of water supply for irrigation and energy generation. The increase of sedimentation in reservoirs is a result of climate change, thus in near future the situation can be more and more threatening [Auel et al., 2015]. The prevention plans must be developed to overcome this threat. There are three basic approaches can be considered, such as sediment removal, sediment routing, and sediment yield reduction. One of the effective sediment routing methods is through sediment bypass tunnel to decrease the accumulation of sediments in reservoirs. Bypassing the sediments from the reservoir into tailwater leads the considerable decrease in sediment deposition. However, because of high maintenance cost and investment, the number of sediment bypass tunnels is delimited in worldwide. To reduce the maintainance cost, the tunnel design and the invert material have to be developed. High sediment transportation and high velocity inside the sediment bypass tunnel cause invert abrasion as a main problem. There are many cases observed in Switzerland, Japan, Nepal, Taiwan, South America, and Ecuador suffering invert abrasion [Auel and Boes, 2012]. As a flashy example the sediment bypass tunnel Palagnedra in the canton of Ticino, Switzerland where a serious flood event occurred in 1978 leading an about 2 m deep cut-off channel annihilating the invert on the entire tunnel length and risking the tunnel foundation.

The goal of this paper is to predict abrasion at Kayraktepe Dam in Turkey using three existing predictive models that are extended in this study

to better the predicted values when compared to real data in abrasion. In order to improve prediction models, the flow characteristics are analyzed deeply and measured their effects on the abrasion.

2 STUDY AREA-KAYRAKTEPE DAM

Kayraktepe Dam project was designed for flood control, irrigation, and energy supply on Goksu River in Mersin/Mut, Turkey. The project was planned approximately 40 years ago and has been redesigned several times to improve feasibility of dam except that has not been built yet. One of the reasons is that there are many valuable fertile lands at the upstream of dam and, at the downstream, Goksu Delta is located that is considered these areas are most probably affected by the dam [Tigrek et al., 2012]. In Figure 1 coastal area, Goksu River, and Kayraktepe Dam locations are shown.

Last version of project had been changed in November 2014. Dam body was designed as roller compacted concrete type. Dam is at 100 m height from thalweg, and 160 m height from foundation. Upstream slope is 1 Vertical / 0.10 Horizontal and Downstream slope is 1 vertical / 0.75 horizontal. Dam body volume is 2,145,000 m³ and crest length is 435.00 m. Spillway and energy structures were constructed on dam body and energy is generated with powerhouse located at the toe of dam body [Becerik et al., nd]. To prevent erosion in Goksu Delta, three sediment spillways which have clapet valves are in 2.5 m × 4 m and, radial gate of radius is in 6 m, were designed on dam body to transport the sediment which is collected in Kayraktepe reservoir [Koyuncu and Poyraz, 2017]. Detailed project characteristics are given in Table 1, Table 2, Table 3 and Table 4. In addition general location plan view and cross section of sediment bypass tunnel are shown in Figure 2, Figure 3, Figure 4.

Table 1 - General information about Kayraktepe Dam [Koyuncu and Poyraz, 2017]

Place	Mersin/Mut, TURKEY
Stream	Goksu
Purpose	Energy + Flood control + Irrigation



Figure 1 - Satellite view of Goksu Delta (1- Cape Incekum, 2-Paradeniz lagoon Coast 3-Goksu river mouth, 4- Altinkum Coast)

Table 2 - The characteristic of Kayraktepe Dam [Koyuncu and Poyraz, 2017]

Type	Roller Compacted Concrete Dam
Thalweg Elevation	25.00 m
Base Elevation	-35.00 m
Crest Elevation	125.00 m
The Elevation from Thalweg	100.00
The Elevation from Base	165.00
Crest Length	435.00
Crest Width	10 m
Upstream Slope of Body	1.00 H : 0.10 V
Downstream Slope of Body	1.00 H : 0.75 V
Minimum Operating Water Elevation	90.00 m
Normal Operating Water Elevation	120.00 m
Maximum Operating Water Elevation	124.00
Sediment Level	55.45 m
Total Storage Volume	1,596.48 hm ³

Table 3 - The spillway characteristic of Kayraktepe Dam [Koyuncu and Poyraz, 2017]

Place	Body
Type	Radial Gate (5 gate)
Gate Dimension	12.00 m × 18.00 m
Catastrophical Flood Discharge	9,892.70 m ³ /s
Threshold Elevation	105.00 m
Access Channel Elevation	100.00 m
Spillway Threshold Elevation	60.00 m clear - 72.00 m gross
Offtake Channel Width	72.00 m
Offtake Channel Length	41.44 m

Table 4 - Sediment spillway characteristic of Kayraktepe Dam [Koyuncu and Poyraz, 2017]

Type	Radial Gate
Number	3
Input Elevation	33.00 m
Input Dimension	2.50 m × 4.00 m
Project Discharge	3 × 400 m ³ /s

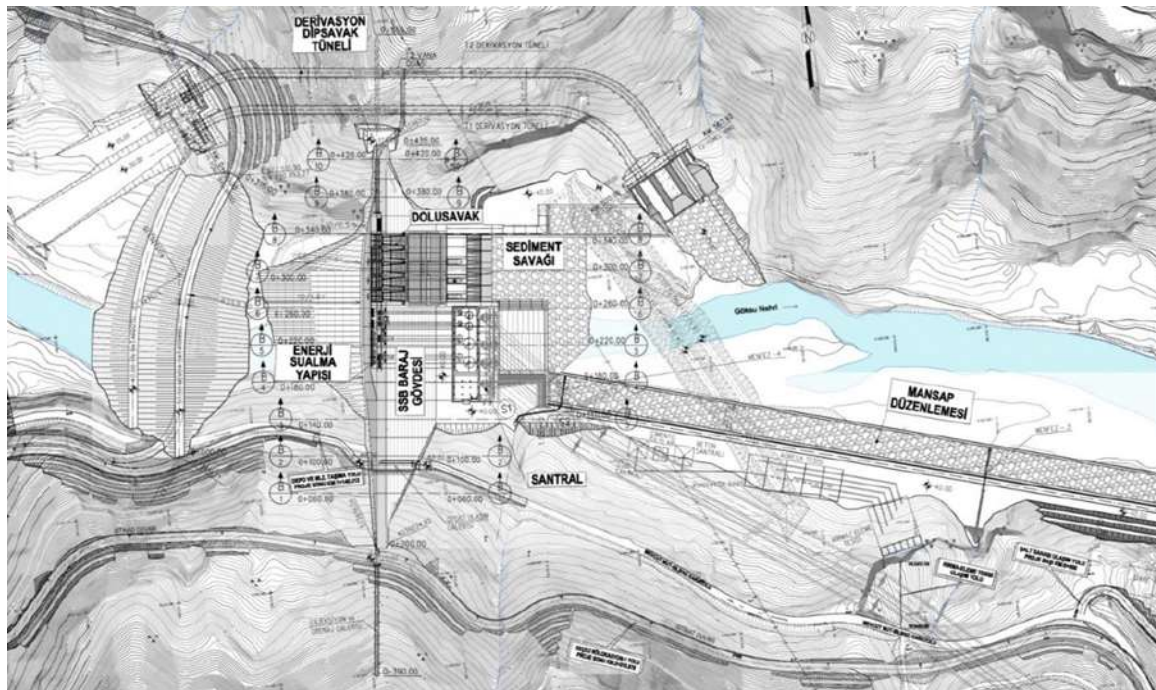


Figure 2 - General Layout of Kayraktepe Dam Facilities [Koyuncu and Poyraz, 2017]

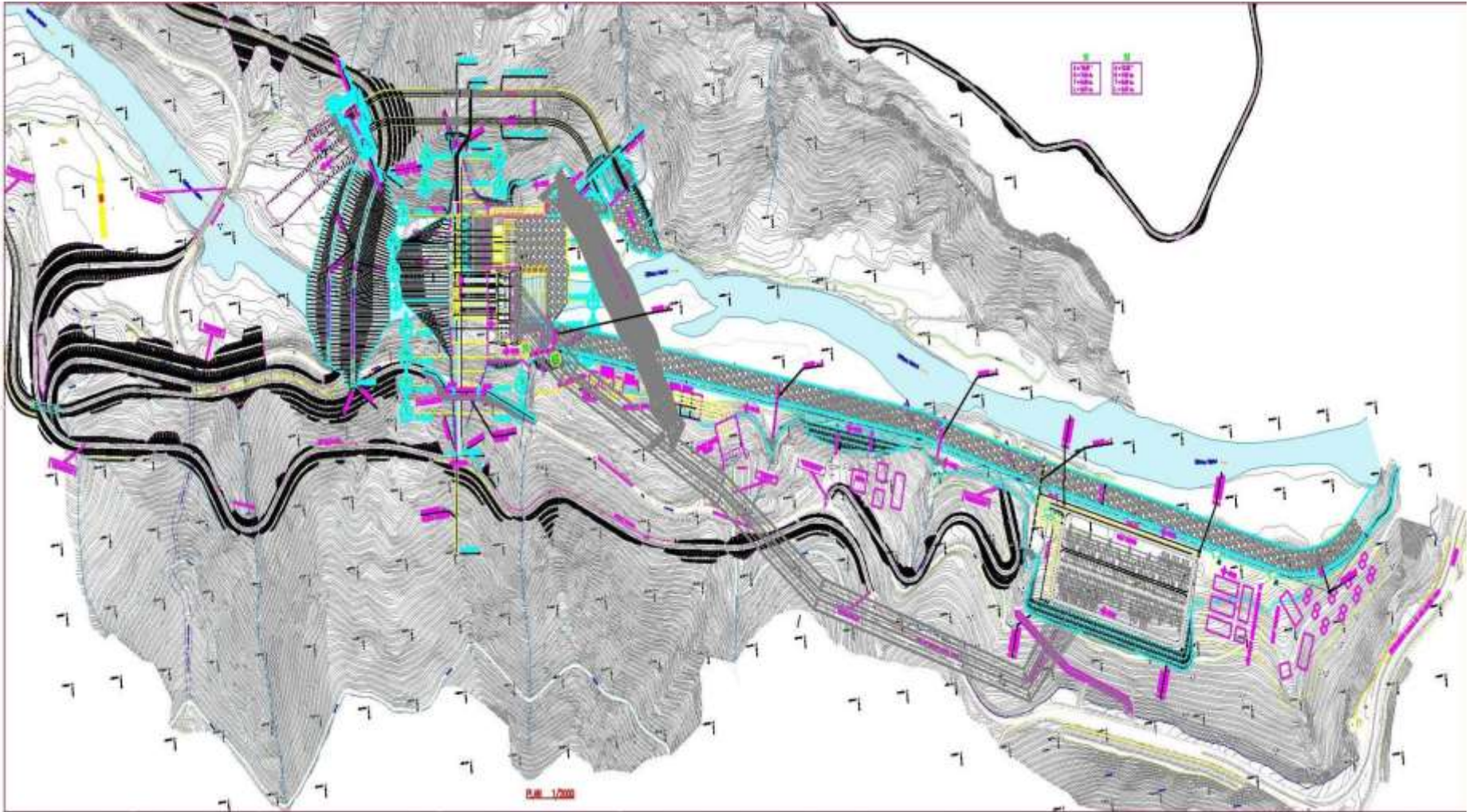


Figure 3 - General Layout of Kayraktepe Dam Facilities [Koyuncu and Poyraz, 2017]

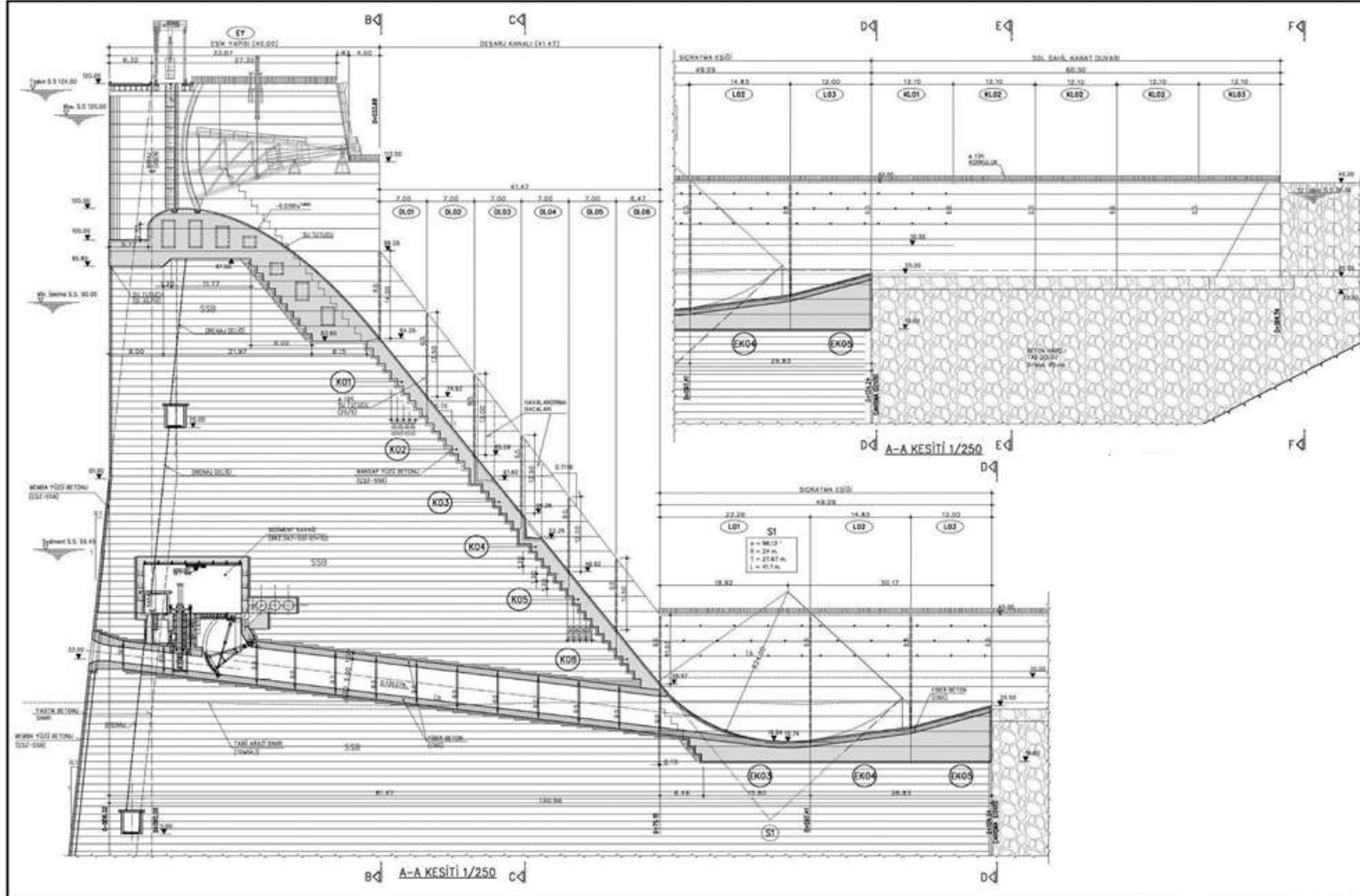


Figure 4 - Cross-section and details of sediment Outlets [Koyuncu and Poyraz, 2017]

The hydraulic model scaled in 1/70 of Kayraktepe Dam was designed to investigate sediment spillways performance by Dams and Department of Hydroelectric Power Plant (HEPP). The model built according to the prototype of Kayraktepe Dam [Koyuncu and Poyraz, 2017].

While the prototype was built, the project features was used such as:

- General location plan of Kayraktepe and HEPP Dam
- The plan of spillway and its longitudinal section
- Kayraktepe and HEPP Dam cross section
- Kayraktepe and HEPP Dam sediment spillway section
- Kayraktepe and HEPP Dam work scope report.

3 ABRASION PREDICTION METHODS MODEL EQUATIONS

Several mechanistic models have been developed to estimate abrasion rates. Whereas the models for the estimation of bedrock incision, (for example Sklar and Dietrich (2004); Lamp et al. (2008)) upon low, sub and supercritical flow conditions in river systems, the others focus on depth of abrasion on concrete invert lining. Ishibashi (1983); Heilberg and Hans (2007) and Novak and Nallurici (1975) accounted for the conditions of highly supercritical flows. All methods depend on the movements of particles and their impacts on physical operations which are obtained from experimental studies on particle motion characteristics such as saltation

trajectories, particle impacts, and velocities. Ishibashi (1983) is probably the first researcher to propose mechanistic model to determine concrete and steel abrasion depth on hydraulic structure surfaces.

3.1 Ishibashi Model

Ishibashi (1983) formula has been widely applied to predict abrasion in Japan. The formula, which covers both deformation and cutting wear based on ductile materials such as steel, is analyzed likewise the brittle material concrete. The definition of the developed equations is explained hereupon. Ishibashi (1983) calculates the abraded invert volume V_a as

$$V_a = C_1 E_k + C_2 W_f \quad [m^3] \quad (1)$$

where E_k = total particle kinetic energy by saltating particles, C_1 and C_2 = material property constants (m^2/kgf) given in **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**, for concrete and different steel types, respectively, and W_f =total friction work by grinding particles. Note that the unit kilogram force corresponds to Newton as 1 kgf = 9.806 N. The total kinetic energy E_k is given by

$$E_k = 1.5V_{ts} \sum E_i N_i n_i \quad [kgfm=9.806Nm] \quad (1)$$

and the total friction work W_f by

$$W_f = 5.513\mu_s V_{ts} \sum \gamma_{im} E_i N_i n_i \quad [kgf m], \quad (2)$$

Table 5 - Material Property Constants [Ishibashi, 1983]

Material	C_1 ($m^2/(kgf)$)	C_2 ($m^2/(kgf)$)
Concrete	1.189×10^{-7}	1.135×10^{-8}
Steel (SM41)	3.73×10^{-11}	6.59×10^{-11}
Steel (HT 80)	2.53×10^{-11}	4.78×10^{-11}
Steel (SUS 304)	2.04×10^{-11}	3.25×10^{-11}
Steel (SCMnH 11)	1.18×10^{-11}	1.33×10^{-11}

according to the parameters defined in Equation (3) V_{ts} =amount of transported sediment [m^3], $\mu_s=0.3$ =dynamic friction coefficient, E_i = kinetic

energy of a single particle, γ_{im} = particle impact angle, N_i =impact frequency calculated as

$$N_i = L/L_p \quad (3)$$

L_p = particle saltation length, L = total invert length, and n_i = amount of particles per volume. The n_i is calculated as

$$n_i = \frac{(1 - \lambda_p)\rho_s}{M_p} \quad [1/m^3], \quad (4)$$

where $\lambda_p = 0.4$ air porosity, ρ_s = particle density, and M_p = particle mass calculated as:

$$M_p = 1/6\pi\rho_s D^3 \quad [\text{kg}] \quad (5)$$

with D = mean particle diameter. The single impact energy E_i is estimated as

$$E_i = \beta F_i^{5/3} \quad [\text{kgf m}], \quad (6)$$

where F_i = impact force, and β = auxiliary parameter given as

$$\beta = [2.5n_1^{2/3}(D/2)^{1/3}]^{-1} \quad [\text{m}/(\text{kgf})^{2/3}], \quad (7)$$

where n_1 = auxiliary parameter expressed as

$$n_1 = \frac{4}{3(k_1 + k_2)} \quad [\text{kgf}/\text{m}^2], \quad (8)$$

$$\frac{L_p}{D} = 100(\theta - \theta_c)^{1.21} \quad (9)$$

where k_1 and k_2 = auxiliary parameters accounting for the Young's modulus and Poisson's ratio of both the particle and invert materials, respectively. Ishibashi (1983) suggested a constant value of $n_1 = 2.41 \times 10^9$ kgf/m² for sediment gravel transported over concrete. Ishibashi and Isobe (1968) suggested abrasion prediction model to depend on

laboratory research data. To analyze the impact forces and saltation trajectories under the super critical flow conditions, a 9-m long, 0.2-m wide and 0.2-m high laboratory flume was used to carry out open channel flow experiments. Correlations for the particle saltation length L_p , impact force F_i and impact angle γ_{im} were suggested by Ishibashi (1983) based on Ishibashi and Isobe's (1968) experimental study. L_p follows with θ = shields parameters calculated as

$$\theta = U_*^2 / [(s - 1)gD]. \quad (10)$$

U_* = friction velocity, $s = \rho_s/\rho$ with ρ =fluid density, and θ_c = critical shields parameter. θ_c for fixed beds with low relative roughness heights is suggested by Ishibashi (1983) according to Novak and Nalluri (1975) as

$$\theta_c = 0.0907D_*^{-2/5}, \quad (11)$$

where $D_* = [(s - 1)gD^3]^{0.5}/\nu$ = dimensionless grain size with ν = kinematic viscosity. The impact force F_i is given as

$$F_i = 1.95 \times 10^3 M_p^*(\theta - \theta_c) \quad [\text{kgf}], \quad (12)$$

where M_p^* = submerged particle weight in [kg] and

$$M_p^* = 1/6\pi(\rho_s - 1000)D^3 \quad [\text{kg}]. \quad (13)$$

The impact angle shown in Figure is

$$\gamma_{im} \approx \frac{U_p}{V_s} = 19.2(\theta - \theta_c)^{-0.13} \quad [-], \quad (14)$$

where V_s = vertical particle velocity in still water, and U_p =horizontal partial velocity

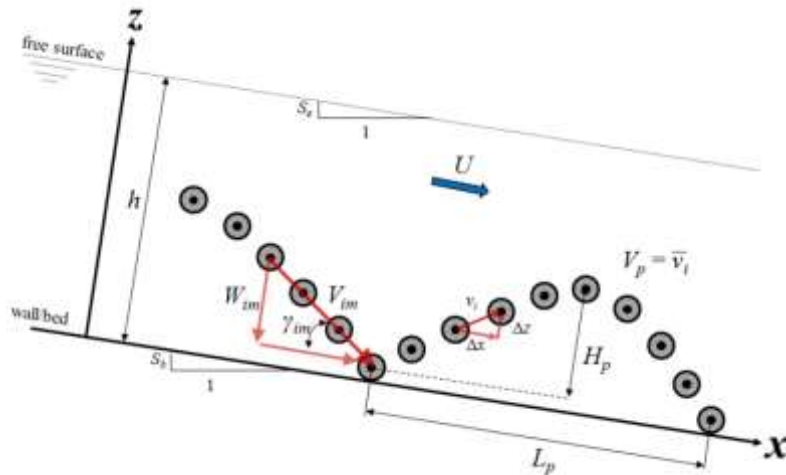


Figure 5 - Parameter definitions of saltating particle in a fluid [Ishibashi, 1983]

3.2 Sklar And Dietrich Model

Sklar and Dietrich (2004) carried out an outstanding work by analyzing a wide range of research data sets on particle motion and abrasion and proposed a saltation-abrasion

$$A_r = \frac{q_s W_{im}^2 Y_M}{L_p k_v f_t^2} \left(1 - \frac{q_s}{q_s^*}\right) \quad [\text{m/s}], \quad (15)$$

where W_{im} = mean vertical particle impact velocity [m/s], Y_M = Young's Modulus of elasticity [Pa], L_p = particle saltation length, k_v = rock resistance coefficient [-], q_s = specific gravimetric

$$q_s^* = 7.35q \frac{\rho_s}{(s-1)} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} S^{1.6} \left(\frac{1.5\theta - \theta_c}{1.5\theta}\right) \quad [\text{kg/sm}]. \quad (16)$$

Note that the term $\left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2}$ is typically taken as 1.05 (Smart and Jaeggi, 1983). Since the bedload transport capacity q_s^* of sediment bypass tunnels is typically significantly larger than the effective bedload transport rate q_s of the inflowing river, the term $\left(1 - \frac{q_s}{q_s^*}\right)$ in Equations (15), and Equation (18), the so-called cover effect, tends to unity and therefore is sometimes neglected. Note that all parameters have to be applied in SI units, thus the units of Y_M and f_t

$$A_r = \frac{0.08(s-1)gY_M}{k_v f_t^2} q_s \left(\frac{\theta}{\theta_c} - 1\right)^{-0.5} \left(1 - \frac{q_s}{q_s^*}\right) \left(1 - \left(\frac{U_*}{V_s}\right)^2\right)^{1.5} \quad [\text{m/s}], \quad (18)$$

where θ = Shield parameter given as:

$$\theta = U_*^2 / [(s-1)gD], \quad (19)$$

and s is defined as

$$s = \rho_s / \rho \quad (20)$$

Here, ρ_s = particle density, ρ = fluid density, D = particle diameter, and U_* = friction velocity, which is expressed as

$$Y_M = k_1 k_2 33500 \left(\frac{f_c}{60}\right)^{(1/3)} \left(\frac{\rho_c}{2400}\right)^2 \quad [\text{MPa}], \quad (22)$$

where k_1 and k_2 are correction factors varying from 0.95 to 1.20 and are regards as sorting of coarse aggregates and admixtures, respectively.

model to predict bedrock abrasion in river systems. The magnitude of abrasion was state as a vertical abrasion rate in the following form:

bedload rate [kg/(sm)], and q_s^* = specific bedload transport capacity [kg/(sm)]. The specific gravimetric bed load transport capacity per unit width was determined according to Smart and Jaeggi (1983) as:

are in [Pa], not in [MPa]. The coefficient k_v describes the correlation between bed material and sediment properties and abrasion rate [Albayrak et al., 2017].

Sklar and Dietrich (2004) applied correlations obtained for the hop length, hop height, and particle impact velocity to Equation (15) and suggested the saltation abrasion model for bedrock river abrasion in the following form:

$$U_* = (gR_h S)^{0.5}, \quad [\text{m/s}] \quad (21)$$

g = gravitational acceleration, R_h = hydraulic radius, S = energy line slope, θ_c = critical shields parameter, and V_s = particle settling velocity. Young's modulus was estimated by applying a formulation proposed by Noguchi et al. (2009).

3.3 Auel Model

Auel et al. (2017) presented a study to analyze particle dynamics and their impacts on the bed for improving abrasion estimation models that can be feasible for bedrock and man-made

hydraulic structures. To succeed these goals, the flow turbulence characteristics, particle dynamics and impact characteristics in high-speed flows were constantly investigated

$$A_r = \frac{Y_M}{k_v f_c^2} \cdot \frac{(0.1(T^*)^{0.39}[(s-1)gD]^{0.5})^2}{2.3(T^*)^{0.8D}} q_s \left(1 - \frac{q_s}{q_s^*}\right) \text{ and} \quad (23)$$

$$A_r = \frac{Y_M}{k_v f_c^2} \cdot \frac{(s-1)g}{230} q_s \left(1 - \frac{q_s}{q_s^*}\right) \quad (24)$$

The relation between W_i = vertical velocity and T^* is calculated as

$$\left(\frac{W_{im}}{[(s-1)gD]^{0.5}}\right) = 0.1(T^*)^{0.39} \quad (25)$$

$$T^* = \left(\frac{U_*}{U_{*c}}\right)^2 - 1 = \frac{\theta}{\theta_c} - 1 \quad (26)$$

where θ = Shield parameter calculated as $\theta = U_*^2/[(s-1)gD]$, θ_c = critical shields parameter and U_{*c} = critical shear velocity at the onset of motion.

through laboratory experiments by Auel (2014). Submitting the relations for vertical particle velocity W_{im} and hop length L_p in Equation(16) leads to:

The Young's modulus Y_M for concrete might be designated with Noguchi et al. (2009):

$$Y_M = k_1 k_2 33500 \left(\frac{f_c}{60}\right)^{(1/3)} \left(\frac{\rho_c}{2400}\right)^2 \quad [\text{MPa}] \quad \text{and} \quad (27)$$

$$40 < f_c < 160 \quad [\text{MPa}] \quad (28)$$

where Y_M and the compression strength f_c are in [MPa], ρ_c = material density in [kg/m³], k_1 and k_2 are correction factors varying from 0.95 to 1.20. A correlation between the splitting tensile and

cylindrical compression strength of concrete follows (Arioglu et al., 2006):

$$f_t = 0.387 f_c^{0.63} \quad 4 < f_c < 120 \text{ MPa} \quad (29)$$

with f_t and f_c in [MPa].

3.4 A Previous Study Calculation Results at Mud Mountain Sediment Bypass Tunnel

Mud Mountain sediment bypass tunnel abrasion was calculated based on three models which are Auel, Sklar and Dietrich and Ishibashi by Auel et al. (2017) and the Pfaffenspurg field data calibration was used. The data used in that study was taken from Czuba et al. (2012), USACE (2016) and VAW (2016).

The general data used in calculations is given below and Table 6 shows the results of abrasion prediction. Those data and results were compared to investigate consistence of abrasion rate and bed load mass transport rate at Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel. More detailed information about data is given in Auel et al. (2017).

$$Q_s = 49,500 \text{ tons/year}, D_{50} = 62 \text{ mm}, S_b = 0.0194, f_c = 223 \text{ MPa}, f_t = 11.7 \text{ MPa}, Y_M = 6.49 \times 10^4 \text{ MPa}.$$

4 MODEL CALCULATIONS at KAYRAKTEPE DAM

The hydraulic, geometric, morphologic and material parameters are:

$$Q_{\text{total}} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{tunnel}} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\text{sediment}} = 16 \cdot 10^5 \text{ m}^3$$

$$L = 100 \text{ m}^3$$

$$b = 4 \text{ m}$$

$$h = 2.5 \text{ m}$$

$$D_{50} = 14 \text{ mm}$$

$$S = 0.130378$$

$$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$f_c = 60 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$k_v = 10^6$$

$$k_1 \text{ and } k_2 = 1$$

$$V_{ts} = 3.73 \cdot 10^5 \text{ m}^3$$

$$C_1 = 1.189 \cdot 10^{-7} \text{ and } C_2 = 1.135 \cdot 10^{-8}$$

(from

Table 5)

$$\theta_c = 0.06$$

$$\lambda_p = 0.4$$

Based on Ishibashi Model:

$$\text{Equation (27) leads to } Y_M = 3.35 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\text{Equation (29) leads to } f_t = 5.10 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{Equation (20) leads to } s = 2.6$$

$$\text{Equation (16) leads to } q_s^* = 46992 \text{ kg/(sm)}$$

$$\text{Equation (8) leads to } n_1 = 2.41 \cdot 10^9 \text{ kgf/m}^2$$

$$\text{Equation (7) leads to } \beta = 1.20 \cdot 10^{-6} \text{ m/ kgf}^{2/3}$$

$$\text{Equation (12) leads to } F_i = 19.80 \text{ kgf}$$

$$A_r = \frac{0.08(s-1)gY_M}{k_v f_t^2} q_s \left(\frac{\theta}{\theta_c} - 1 \right)^{-0.5} \left(1 - \frac{q_s}{q_s^*} \right) \left(1 - \left(\frac{U_*}{V_s} \right)^2 \right)^{1.5} \quad [\text{m/s}] \quad (30)$$

That model is applied for bedrock incision in river and the flow condition is subcritical. Therefore V_s =particle settling velocity is always higher than the U_* = friction velocity. In Kayraktepe

$$\text{Equation (5) leads to } M_p = 2.30 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\text{Equation (6) leads to } E_i = 16.86 \cdot 10^{-5} \text{ kgf}$$

$$\text{Equation (10) leads to } \theta = 4.48$$

$$\text{Equation (13) leads to } M_p^* = 34.5 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

$$\text{Equation (4) leads to } n_i = 4.52 \cdot 10^6 \text{ 1/m}^3$$

$$\text{Equation (3) leads to } N_i = 11.84$$

$$\text{Equation (9) leads to } L_p = 8.45$$

$$\text{Equation (14) leads to } \gamma_{im} = 15.83$$

$$\text{Equation (2) leads to } W_f = 8.82 \cdot 10^9 \text{ kgfm}$$

$$\text{Equation (1) leads to } E_k = 5.06 \cdot 10^8 \text{ kgfm}$$

$$\text{Equation (1) leads to } V_a = 60.11 \text{ m}^3$$

$$\text{Equation (1) leads to } A_r = 150.28 \text{ mm/year}$$

According to Auel Model:

$$\text{Equation (27) leads to } Y_M = 3.35 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\text{Equation (29) leads to } f_t = 5.10 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{Equation (20) leads to } s = 2.6$$

$$\text{Equation (16) leads to } q_s^* = 46992 \text{ kg/(sm)}$$

$$\text{Equation (24) leads to } A_r = 178.17 \text{ mm/year}$$

4.1 Revised Sklar and Dietrich Model

The abrasion prediction calculation according to Sklar and Dietrich Model depends on the equation which is

Dam the S=energy slope line is high because of this $V_s < U_*$. To apply the model, last part of the Equation (30) was revised as:

$$A_r = \frac{0.08(s-1)gY_M}{k_v f_t^2} q_s \left(\frac{\theta}{\theta_c} - 1 \right)^{-0.5} \left(1 - \frac{q_s}{q_s^*} \right) \left(1 - \left(\frac{V_s}{U_*} \right)^2 \right)^{-1.5} \quad [\text{m/s}] \quad (31)$$

$$\text{Equation (27) leads to } Y_M = 3.35 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\text{Equation (29) leads to } f_t = 5.10 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{Equation (20) leads to } s = 2.6$$

$$\text{Equation (16) leads to } q_s^* = 46992 \text{ kg/(sm)}$$

$$\text{Equation (10) leads to } \theta = 4.48$$

$$\text{Equation (21) leads to } U_* = 0.99 \text{ m/s}$$

$$\text{Equation (31) leads to } A_r = 75.70 \text{ mm/year}$$

4.2 Proposed Bed Load Mass Transport Formula

Bed load transport rate = q_s can be calculated by Einstein (1944) and Graf's (1968) as:

$$q_s = \Phi_A \rho_s \sqrt{g(s-1)D^3} \quad [\text{kg}/(\text{sm})], \quad (32)$$

where Φ_A = transport parameter given as

$$\Phi_A = 10.39 (\Psi_A)^{-2.52}. \quad (33)$$

$$q_s = 10.39 \left(\frac{(s-1)D}{SR_h} \right)^{-2.52} \rho_s \sqrt{g(s-1)D^3} \quad [\text{kg}/(\text{sm})] \quad (35)$$

The bed load transport rate in Equation (35) was established according to Einstein (1944) and Graf's (1968) experimental results and gauging stations' data. Moreover, Mud Mountain sediment bypass tunnel bed load transport rate is also calculated using Equation (35) (Einstein, 1944; Graf, 1968) for comparison with measurements.

$$q_s = 3.01 \left(\frac{(s-1)D}{SR_h} \right)^{-2.52} \rho_s \sqrt{g(s-1)D^3} \quad \text{kg}/(\text{sm}) \quad (36)$$

Additionally, due to the highly steep slope condition in Kayraktepe Dam, where $V_s < U_*$, the

$$q_s = 3.01 \left(\frac{(s-1)D}{SR_h} \right)^{-1/2.52} \rho_s \sqrt{g(s-1)D^3} \quad [\text{kg}/(\text{sm})] \quad (37)$$

Ψ_A = shear intensity parameter which can be formulated as:

$$\Psi_A = \frac{(s-1)D}{SR_h} \quad (34)$$

s = specific density expressed as $s = \rho_s/\rho$, ρ_s = particle density, ρ = fluid density, D = particle diameter, g = gravitational acceleration, R_h = hydraulic radius, and S = slope of energy grade line. Then,

Based on the results shown in Table 7 for both Kayraktepe Dam and Mud Mountain Sediment Bypass tunnels, Einstein (1944) and Graf's (1968) equation suggested approximately 3.46 times higher amount when the coefficient of 10.39 in Equation (35) is used. Therefore, the equation is revised for abrasion estimation as

exponent of Ψ_A term in Equation (35) is also modified from -2.52 to -1/2.52.

Table 6 - Bed Load transport rate amount based on three methods

Bed Load Transport Rate [kg/ (sm)]	Einstein (1944) and Graf's (1968) Equation	Experiment (Hydraulic Lab Data)	Gauging Station (Field Data)
Kayraktepe SBT	97.78	30.19	31.24
Mud Mountain SBT	9.26	—	2.52

5 RESULTS and DISCUSSION

Annual abrasion depths of Kayraktepe sediment bypass tunnel estimated based on three models **Figure 6**.

Pfaffensprung sediment bypass tunnel calibration numbers were used for severe and average conditions to obtain reasonable results shown in Figure 7, Figure 8, Table 8 Table 9, respectively. In Table 10, estimation results were compared and calibration numbers were mentioned.

Making consistent abrasion prediction for those three models, average calibration numbers are used for Auel and Ishibashi, and severe

which are Ishibashi, Sklar and Dietrich, and Auel are shown in Table 7 and

calibration numbers are used for Sklar and Dietrich in Figure 9. Bed load mass transport rate change was investigated due to particle density and particle diameter for Kayraktepe sediment bypass tunnel in Figure 10 and Figure 11. In addition, the gradient of annual abrasion depths based on particle diameter and abrasion coefficient was observed for Kayraktepe sediment bypass tunnel in Figure 12, and Figure 13, respectively.

Table 7 - Annual abrasion depths of Kayraktepe SBT in mm predicted using three different models without any calibration versus years

Years	Auel (mm)	Sklar and Dietrich (mm)	Ishibashi (mm)
1	178.17	75.70	150.28
5	890.84	378.48	751.42
10	1781.67	756.96	1502.83
15	2672.51	1135.43	2254.25
20	3563.34	1513.91	3005.67
25	4454.18	1892.39	3757.08
30	5345.02	2270.87	4508.50
35	6235.85	2649.34	5259.91
40	7126.69	3027.82	6011.33
45	8017.52	3406.30	6762.75
50	8908.36	3784.78	7514.16

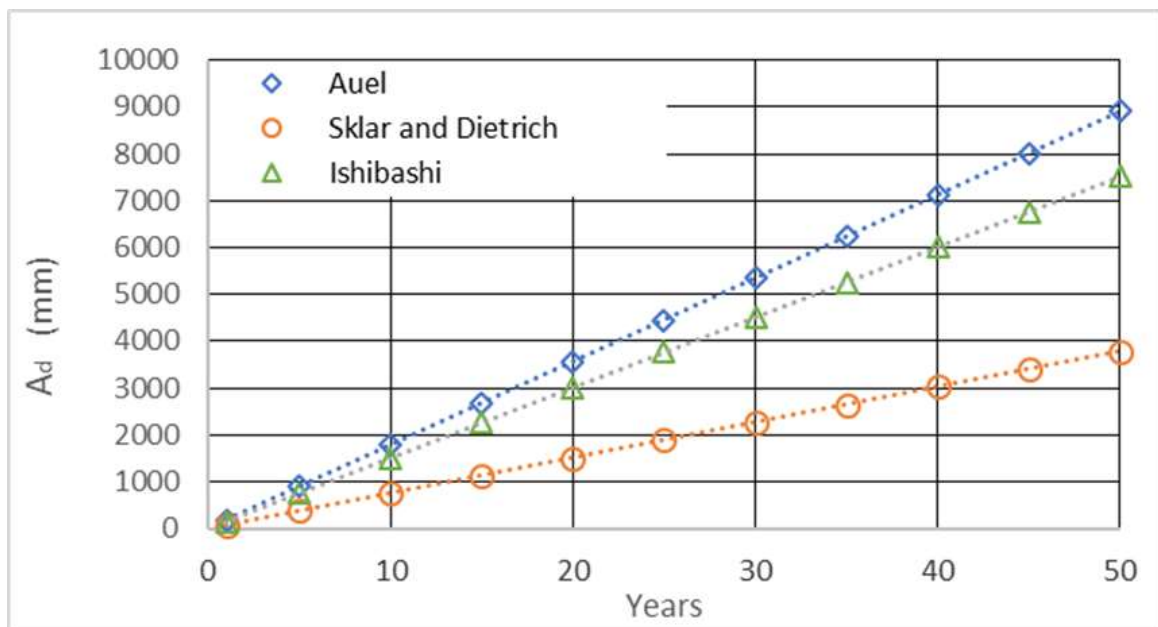


Figure 6 - Abrasion depths of Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel versus years obtained from three different models without any calibration.

Table 8 - Annual abrasion depths of Kayraktepe SBT in mm predicted using three different models based on severe abrasion condition calibration versus years

Years	Auel (mm)	Sklar and Dietrich (mm)	Ishibashi (mm)
1	14.85	10.81	12.53
5	74.24	54.07	62.63
10	148.47	108.14	125.26
15	222.71	162.20	187.89
20	296.95	216.27	250.51
25	371.18	270.34	313.14
30	445.42	324.41	375.77
35	519.65	378.48	438.40
40	593.89	432.55	501.03
45	668.13	486.61	563.66
50	742.36	540.68	626.29

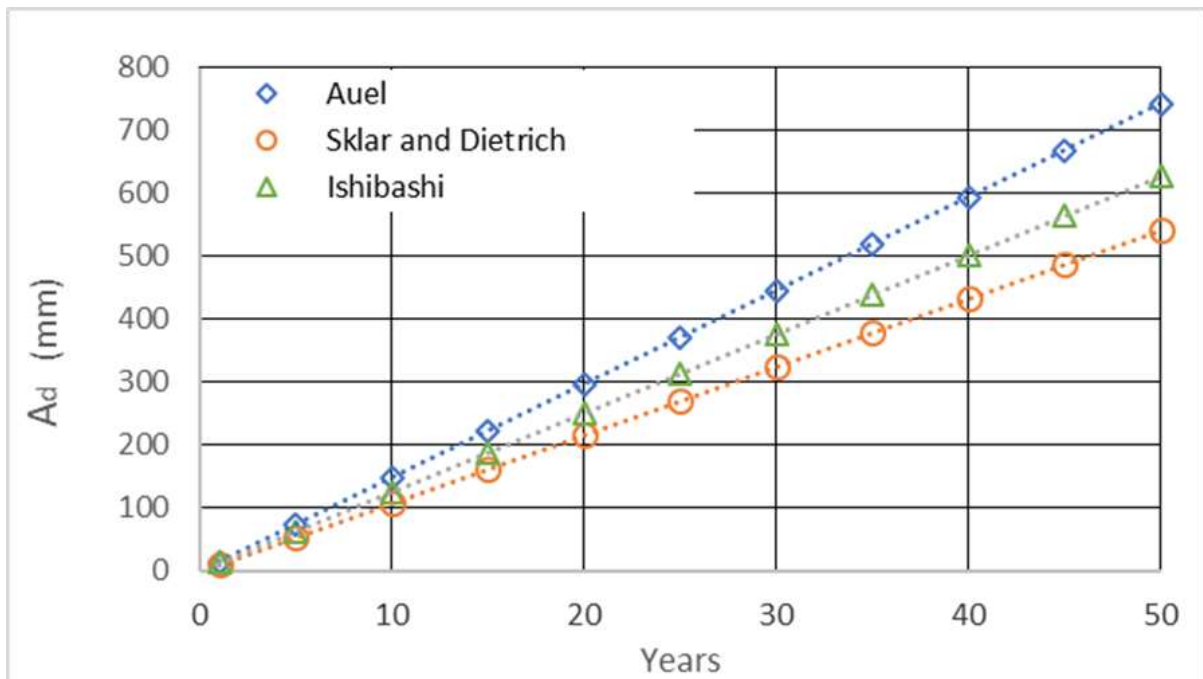


Figure 7 - Abrasion depths of Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel versus years obtained from three different models based on severe abrasion condition calibration

Table 9 - Annual abrasion depths of Kayraktepe SBT in mm predicted using three different models based on averaged abrasion condition calibration versus years

Year	Auel (mm)	Sklar and Dietrich (mm)	Ishibashi (mm)
1	10.80	6.06	12.53
5	53.99	30.28	62.63
10	107.98	60.56	125.26
15	161.97	90.83	187.89
20	215.96	121.11	250.51
25	269.95	151.39	313.14
30	323.94	181.67	375.77
35	377.93	211.95	438.40
40	431.92	242.23	501.03
45	485.91	272.50	563.66
50	539.90	302.78	626.29

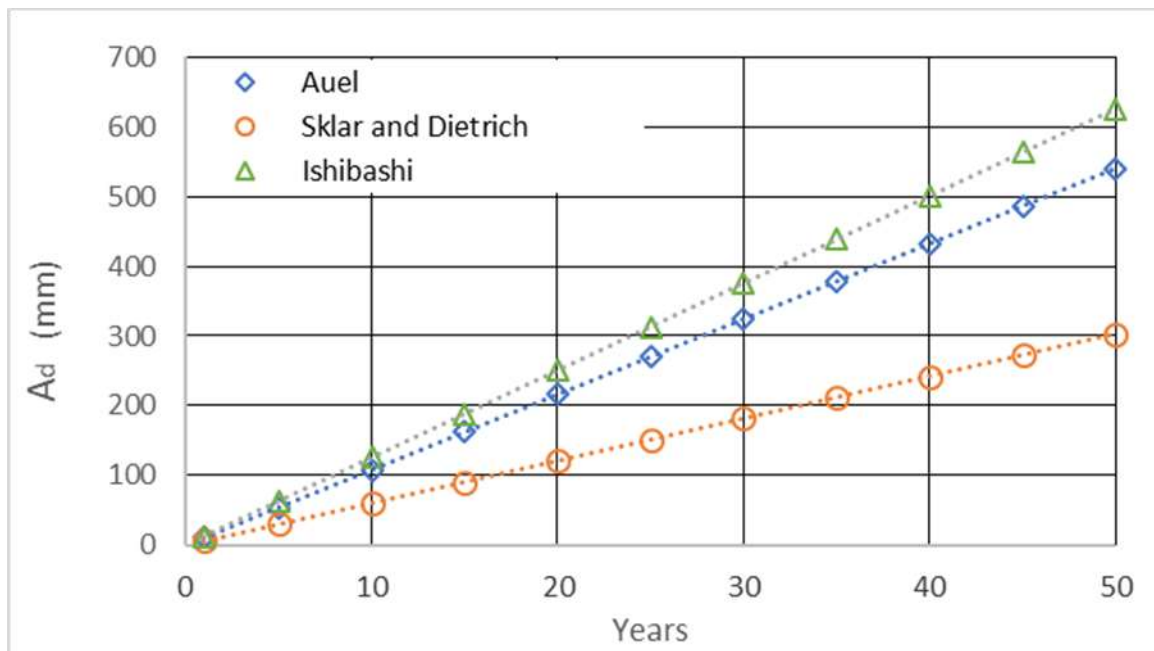


Figure 8 - Abrasion depths of Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel versus years obtained from three different models based on averaged abrasion condition calibration.

Table 10 - Averaged abrasion rates A_r and annual abrasion depths A_d predicted using three different prediction models at Kayraktepe SBT

MODEL	LITERATURE			PFAFFENSPRUNG FIELD DATA CALIBRATION				
	Auel	Sklar and Dietrich	Ishibashi	Auel	Sklar and Dietrich	Ishibashi		
EQUATION	(24)	(18)	(1)					
ABRASION SCENARIO				severe	average	severe	average	average
k_v VALUE [10^6]	0.1	1		1.2	1.65	7	12.5	-
C_1 [$10^{-7} M^2/(KGF)$]			1.189					0.0991
A_r [$10^{-8} M/S$]	2.48	1.06	2.10	0.21	0.15	0.15	0.08	0.17
A_d [MM/YEAR]	178.17	75.70	150.28	14.85	10.80	10.81	6.06	12.53

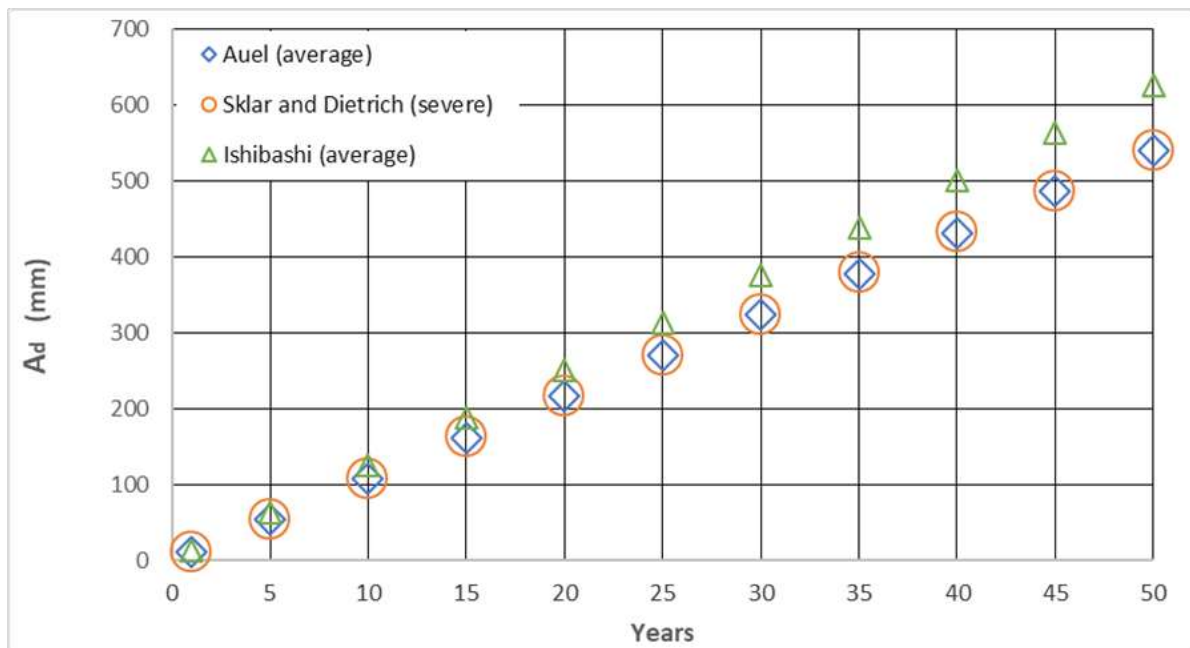


Figure 9 - Estimated averaged abrasion depths of Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel versus years

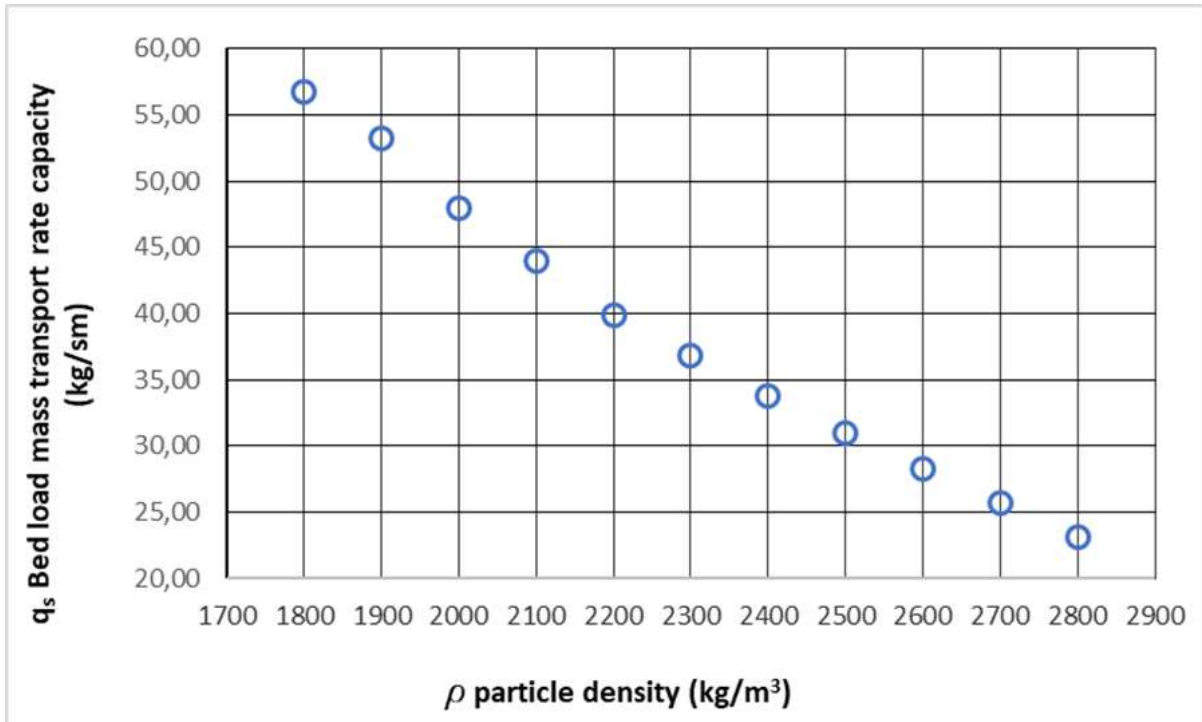


Figure 10 - Bed load mass transport rate gradient due to particle density in Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel

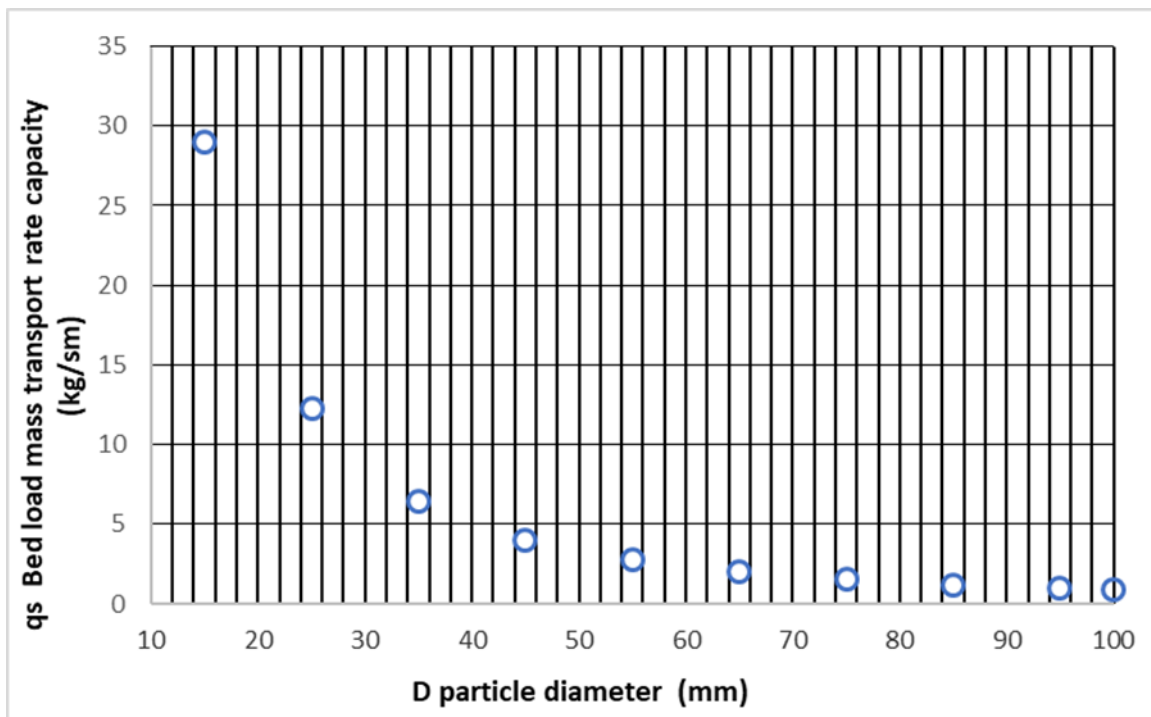


Figure 11 - Bed load mass transport rate gradient due to particle diameter in Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel

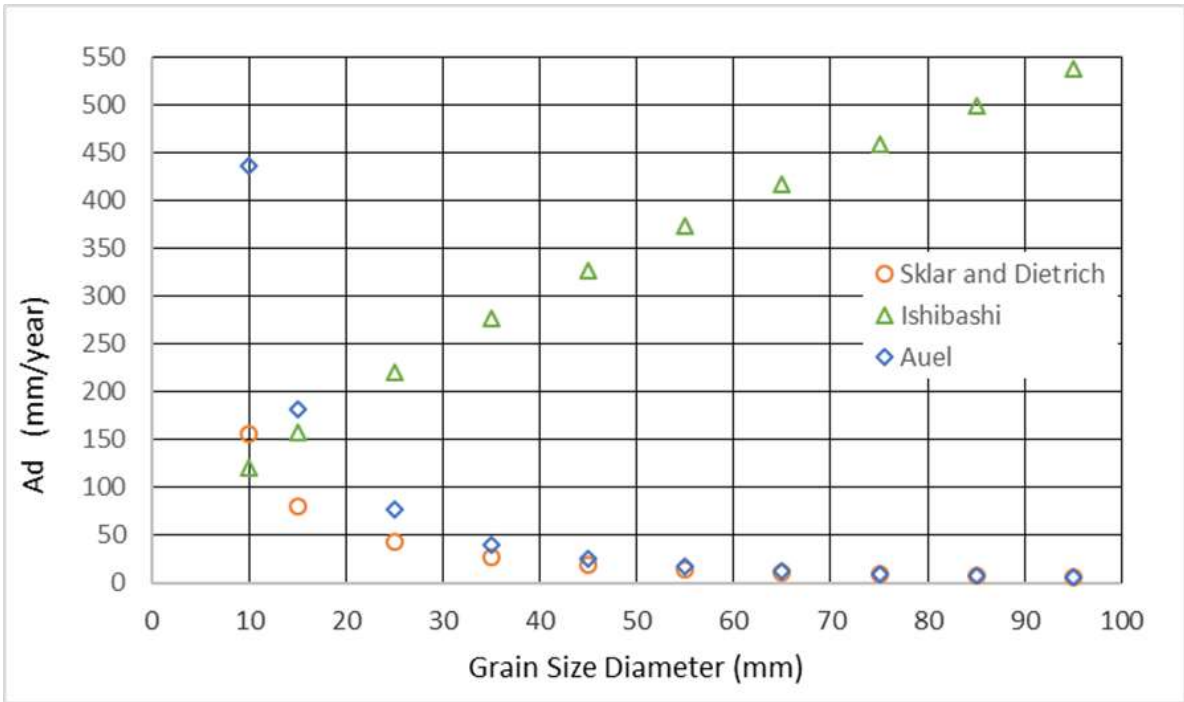


Figure 12 - Annual abrasion depths gradient due to particle diameter in Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel

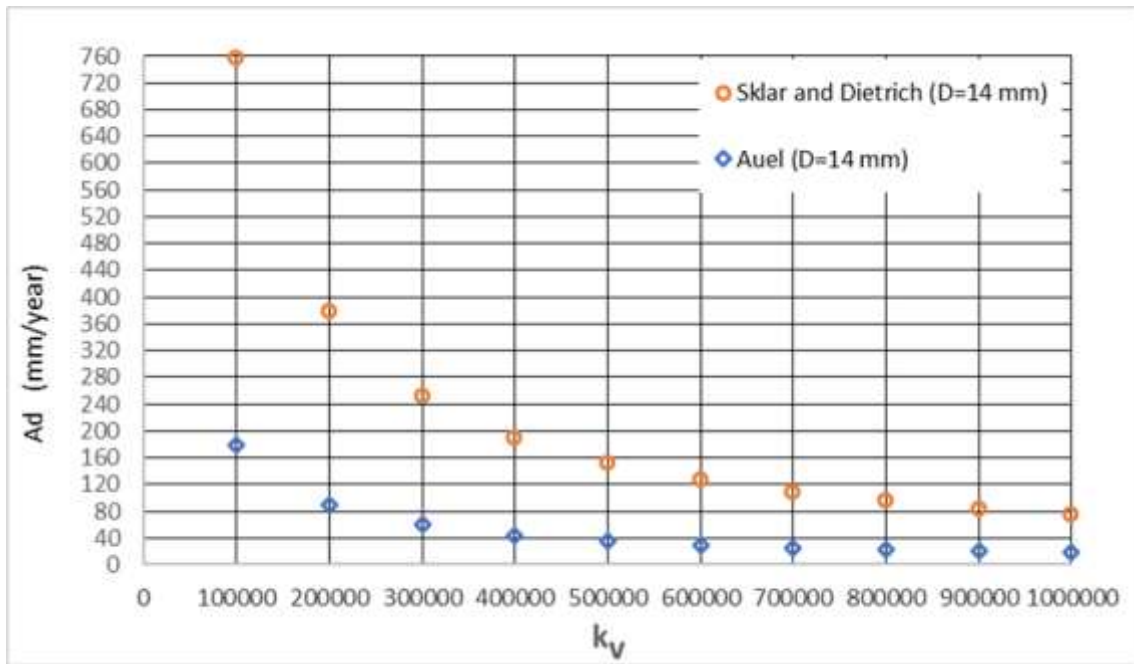


Figure 13 - Annual abrasion depths gradient due to abrasion coefficient in Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel

6 CONCLUSION

In this study, the abrasion of sediment bypass tunnels of Kayraktepe Dam in Turkey is calculated and compared using three prediction models of Auel, Sklar and Dietrich, and Ishibashi. A new formulation by revising Einstein and Graf's formula according to the data from

Kayraktepe sediment bypass tunnel experiments and field gauging measurements is proposed to estimate the annual bed load transport rate for the improvement of its abrasion predictions. The field data from Mud Mountain sediment bypass tunnels are also used for model validation. Additionally, Sklar and Dietrich model

is modified to extend its calculation of abrasion under the highly supercritical flow conditions. Subject to this research, the following conclusions are drawn:


1. Three prediction models reveal high abrasion depths based on measured abrasion data at Pfaffensprung sediment bypass tunnel and model calibrations are needed to give reasonable abrasion estimations.
2. The original Einstein and Graf's bed-load transport rate formula is found to overestimate approximately 3.46 time of the bed load mass transport rate for the Kayraktepe sediment bypass tunnel and Mud Mountain sediment bypass tunnel when compared to the data from physical model tests and field measurements. The formula is therefore modified to improve the overall abrasion predictions.
3. The prediction model by Ishibashi reflects inconsistencies in its grinding term. The model gives reasonable abrasion estimations when the grinding stress term is omitted.
4. The results from Sklar and Dietrich model show the lowest abrasion depths since this model was developed for bedrock incision in rivers where the flow is subcritical and the bed is rough.
5. The Auel model is applied for both subcritical and highly supercritical flow conditions. Reasonable prediction on the abrasion of sediment bypass tunnels is obtained if the value of abrasion coefficient is adjusted properly.
6. Based on the results calculated for the case of Kayraktepe sediment bypass tunnel, both Auel and Ishibashi models predicts similar estimations in abrasion depth. However, the Sklar and Dietrich model shows lower values in abrasion calculation.
7. According to the Auel's model predictions for the case of Kayraktepe Sediment Bypass Tunnel, the annual abrasion depth can vary from 10.80 mm/year under the average sediment transport rate condition to 14.85 mm/year when severe condition is occurred.


7 KAYNAKLAR


- [1] Albayrak, Ismail; Muller-Hagmann, Michelle; Boes, Robert M.; (2017). Field calibration of abrasion prediction models for concrete and granite invert linings. *2 nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnel*
- [2] Albayrak, Ismail; Tetsuya, Sumi; Boes, Robert M.; Auel, Christian; (2017). Sediment transport in high-speed flows over a fixed bed: 1. Particle dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms*
- [3] [Arioglu, Nihal; Girgin, Canan Z; Arioglu, Ergin; (2006). Evaluation of Ratio between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength for Concretes up to 120 MPa and its Application in Strength Criterion. *ACI Materials Journal*, 18-24
- [4] Auel, C. (2014). *Flow characteristics, particle motion and invert abrasion in sediment bypass tunnels*. PHD Thesis.
- [5] Auel, C., & Boes, R. M.; (2012). Sustainable reservoir management using sediment bypass tunnel., (pp. 224-241)
- [6] Auel, Christian; Albayrak, Ismail; Sumi, Tetsuya; Boes, Robert M.; (2017). Sediment transport in high-speed flows over a fixed bed: 2. Particle impacts and abrasion prediction. *Earth Surface Processes and Landforms*
- [7] Auel, Christian; Boes, Robert M.; (2011). Sediment bypass tunnel design - review and outlook. *Proc. 79th ICOLD Annual Meeting*, (pp. 403-412). Lucerne, Switzerland
- [8] Auel, Christian; Boes, Robert M.; Sumi, Tetsuya; (2015). Abrasion Damage Estimation of Sediment Bypass Tunnels: Validation and Comparison of Two Prediction Models. *Annuals Disas. Prev. Rest Ins*
- [9] Auel, Christian; Boes, Robert M. ; Sumi, Tetsuya; (2016). Abrasion prediction at Asahi sediment bypass tunnel based on Ishibashi's formula. *Journal of Applied Water Engineering and Research*
- [10] Auel, Christian; Boes, Robert Michael; Muller-Hagmann, Michelle; (2014). Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. *Taylor & Francis Group*, 221-228
- [11] Auel, Christian; Thene, John R.; Muller-Hagmann, Michelle; Albayrak, Ismail; Boes, Robert M.; (2017). Abrasion prediction at Mud Mountain sediment bypass tunnel. *2nd*

- International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*. Kyoto
- [12] Becerik, M. Ugur; Nergiz, Cengiz; Yavuz, Oguzhan;. (n.d.). *Sediment Outlet Design On Kayraktepe Dam Against Coastal Erosion*. Ankara: DSI
- [13] Beer, Alexander R; Turowski, J M; (2015). Bedload transport controls bedrock erosion under sediment-starved conditions. *Earth Surface Dynamics*
- [14] Chatanantavet, Phairot; Parker, Gary; (2009). Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*
- [15] Clark, S. P. (1966). *Handbook of Physical Constants*. The Geological Society of America, Inc
- [16] Dietrich, William E; Sklar, Leonard S;. (2004). *A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load*. Water Resources Research 40(W06301)
- [17] Graf, W. H. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport*. McGraw-Hill, Inc
- [18] Helbig, Ulf; Horlacher, Hans; (2007). Ein Approximationsverfahren zur rechnerischen Bestimmung des Hydroabrasionsverschleißes an überströmten Betonoberflächen (A approximation method for the determination of hydroabrasive wear on overflowed concrete surface). *Bautechnik*, 854-861
- [19] Huda, Shahan A; Small, Eric E;. (2014). Modeling the effects of bed topography on fluvial bedrock erosion by saltating bed load. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 1222-1239
- [20] ICOLD. (2009). *Sedimentation and sustainable use of reservoirs and river systems*. Paris, France: Bulletin 147, International Commission on Large Dams
- [21] Inoue, Takuya; Izumi, Norihiro; Shimizu, Yasuyuki; Parker, Gary; (2014). Interaction among alluvial cover, bed roughness, and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*
- [22] Ishibashi, T. (1983). Hydraulic study on protection for erosion of sediment flush equipments of dam. *Civil Society Proceeding 334(6)*, 103-112
- [23] Jacobsen, T. (1999). *Sediment problems in reservoirs – control of sediment deposits*. Trondheim, Norway: PHD Thesis
- [24] Koyuncu, Serhat; Poyraz, Huseyin; (2017). *Physical Modeling Test Report*. Ankara: DSI Genel Mudurlugu Laboratuvarlari Teknik Arastirma ve Kalite Kontrol Baskanligi Hidrolik Model Laboratuvari Sube Mudurlugu
- [25] Lai, Jih-Sung; Shen, Hsieh W.; (2010). Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 237-255
- [26] Lamp, Michael P; Dietrich, William E; Sklar, Leonard S.; (2008). A model for fluvial bedrock incision by impacting suspended and bed load sediment. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*
- [27] Noguchi, Takafumi; Tomosawa, Fuminori; Chiaia, Bernardino; Fantilli, Alessandro P; Nemati, Kamran M.; (2009). A particle equation for elastic modulus of concrete. *ACI Struct J*, 106(5):690-696
- [28] Novak, P.; Nallurici, C.; (1975). Sediment transport in smooth fixed bed channels. *J. Hydraul Div. ASCE*, 1139-1154
- [29] Smart, Graeme M.; Jaeggi, Martin N.R.; (1983). Sedimenttransport in steilen Gerinnen ('Sediment transport in steep channels. *Thesis*. Zurich: VAW-Mitteilung 64
- [30] Sumi, Tetsuya; Okano, Masahisa; Takata, Yasufumi; (2004). Reservoir sedimentation management with bypass tunnels in Japan. *Proc. 9th International Symposium on River Sedimentation*, (pp. 1036-1043). Yichang, China
- [31] Tigrek, Sahnaz; Sever, Ozgur; Sarlak, Nermin; (2012). *Balancing energy and environmental concerns: the case of the Kayraktepe dam, Turkey*. Hydrology and Earth System Sciences Discussion

KARSU EŞDEĞERİNİN BELİRLENMESİNDE YENİ YÖNTEMLER

Semih YILDIZ 
ODTÜ Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri
semih.yildiz@metu.edu.tr

Mustafa ÖZKAYA 
DSİ Etüt Plan Daire Başkanlığı, Rasatlar Şube Müdürlüğü
mozkaya@dsi.gov.tr

Zuhal AKYÜREK 
ODTÜ İnşaat Müh. Su Kaynakları Lab. Ankara
zakyurek@metu.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 27.04.2021, Makalenin kabul tarihi: 18.04.2022)

ÖZ

Ülkemizde ilkbahar akımları enerji üretimi, içme suyu temini ve tarımsal sulama gibi suya bağlı faaliyetlere önemli bir su kaynağı olarak katkı sunmaktadır. Bu akımların önemli bir kısmı mevsimsel karın erimesi ile ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kar parametrelerinin (kar derinliği, kar-su eşdeğeri, kar yoğunluğu, kar kaplı alan) izlenmesi ve ölçülmesi, erime sezonundaki akım tahmini için önem taşımaktadır. Geleneksel yöntemler ile nokta bazında elde edilen kar derinliği ve kar-su eşdeğeri ölçümleri, karın katmanlaşmasından ve zorlu arazi koşullarından dolayı zaman alıcı ve kısıtlayıcı olmaktadır. Geniş alanlara ilişkin kar-su eşdeğerleri uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak uygun uydu verilerinden sınırlı hassasiyette sağlanmaktadır. Son yıllarda geleneksel yöntemlerin yanı sıra gama ışın kullanılarak kar-su eşdeğeri ölçümleri yapılabilmektedir. Jeofizik alanında sıkça kullanılan yer radarı (GPR) ile kar derinliği ve kar-su eşdeğeri alansal olarak belirlenebilmektedir. Bu çalışmada MALA GX450 HDR ve GX750 HDR yer radarları Türkiye’de kar parametrelerinin belirlenmesinde ilk kez kullanılmıştır. 5-6 Şubat 2019 ve 28-29 Ocak 2020 tarihlerinde Ilgaz Dağı Milli Parkı bölgesinde DSİ’ye ait kar derinliği ölçüm alanında arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. GPR ile elde edilen kar-su eşdeğeri geleneksel yöntemlerden olan kar tüpü ile yapılan ölçümler ile karşılaştırılmıştır. İkinci arazi çalışmasında kar çukur analizi ile karın katmanlaşma bilgisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ölçüm alanında yer alan gama ışın (CS725) sensörü ile ölçülen kar-su eşdeğeri ile karşılaştırılmıştır. 750 Mhz anten ile elde edilen kar derinlik değerlerinin daha hassas olduğu belirlenmiştir. Kar tüpü ile yapılan ölçümlerde terazi hassasiyetinden kaynaklanan ölçüm hatası tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kar-su eşdeğeri, Kar derinliği, Kar Tüpü, Yer Radarı

NEW METHODS IN DETERMINATION OF SNOWWATER EQUIVALENT

ABSTRACT

Spring flow is an important water resource for energy production, water supply and irrigation water in our country. Spring flow is mainly due to melting of seasonal snow. Monitoring snow parameters (snow depth (SD), density, Snow Water Equivalent (SWE) and snow cover extent) at regional scale is essential for predicting the flow during snow melting season. Traditional methods for measuring snow depth and snow water equivalent may be difficult and time consuming because of inaccessibility to remote locations and layering in the snow pack. Snow water equivalent for large areas can be obtained from appropriate satellite images using remote sensing techniques with limited accuracy. In recent years, besides the traditional methods, probes using gamma ray are started to be used to measure SWE. Areal distribution of SD and SWE can be obtained by ground penetration radar (GPR), which is frequently used in geophysics. In this study MALA GX450 HDR and GX750 HDR ground penetrating radar antennas have been used for the first time in snow parameter determination in Turkey. SWE obtained

by GPR is compared with the traditional methods, namely snow tubes. Two field works on February 5-6, 2019 and January 28-29, 2020 were done within the vicinity of snow observation station operated by DSİ in Ilgaz Mountain. In the second field work the snow layering is analyzed from the snow pits. SWE results were compared with the gamma ray sensor (CS725) measurements. The snow depth measurement obtained by 750 Mhz antenna is found to be more accurate. It is observed that snow tube measurements have error due to balance accuracy.

Keywords: Snow water equivalent, Snow depth, Snow Tube, GPR

1 GİRİŞ

Dünya enerji dengesini doğrudan etkileyen kar örtüsü önemli bir iklim değişkenidir. Kar örtüsü bölgesel enerji, su ve karbon döngülerine etki eden fiziksel özelliklere sahiptir. Hidrolojik döngüde karın birikimi ve erimesi önemli bir etkiye sahiptir ve olası değişkenlik insan aktivitelerini ve çevreyi etkileyebilir. Kar-su eşdeğerinin (KSE) alansal ölçümü hidrolojik uygulamalarda, taşkın öngörüsünde, su kaynakları yönetiminde ve tarımsal üretimde büyük öneme sahiptir. (Goodison vd., 1987).

Kar parametreleri yersel nokta tabanlı ölçümlerden veya havadan/uzaydan elde edilen görüntülerden elde edilebilmektedir. Kar derinliğinin (KD) ölçülmesi diğer parametrelerin ölçümüne göre daha kolaydır. Emek isteyen standart, yersel nokta tabanlı ölçüm yöntemlerinde kar yoğunluğu, sıcaklığı, karın sertliği ve diğer parametreler manuel olarak kar tüpleri ile ve/veya kar çukurları kazılarak ölçülmektedir. Bu teknikler oldukça istikrarlı ve anlaşılır olmakla birlikte, geniş alanlar için maliyetli, zaman alıcı ve insan hatasına daha açıktır. KSE kar tüpleri (gravimetrik yöntem), kar yastıkları ve uzaktan algılama yöntemleri ile ölçülebilmektedir (Pomeroy ve Gray, 1995). Kar tüpü ölçüm yöntemi KSE ölçülmesinde kullanılan en yaygın arazi ölçüm yöntemidir. Kar tüpleri ile yapılan kar ölçümleri oldukça emek isteyen bir yöntem olup ulaşımı zor olan yerlerde yapılması güçtür. KSE'nin kar kütlelerinin durumuna göre daha az veya daha fazla elde edilmesine neden olabilmektedir (Goodison, 1978). ES1404 HARMOSNOW (Haberkorn, 2019) projesi kapsamında gerçekleştirilen ilk arazi çalışmasında Avrupa'nın çeşitli ülkelerinde kullanılan kar-su eşdeğeri ölçüm tüpleri karşılaştırılmıştır. Bu projenin başlıca amacı kar ölçümlerinin standartlaştırılmasıdır ve proje sonucu olarak hazırlanan "European Snow Booklet" kitabında kar parametrelerinin ölçüm detayları verilmektedir. Kar tüplerine ek olarak kar yastıkları da KSE ölçümünde kullanılan yöntemlerdendir, fakat bu ölçüm yöntemi de noktasal bazlı olup 3.5-11.5 m² alan için geçerli olmaktadır (Goodison vd., 1987). Derin olmayan kar kütlelerinin ölçümünde kar yastıkları rüzgârın biriken karı süpürmesi ve kar erimesinden dolayı halen güvenilir sonuçlar vermemektedir (Archer

ve Stewart, 1995). Bir başka emek isteyen yöntem ise kar çukuru analizidir. Kar çukurları araştırma amaçlı kullanılmakta ve araziye bozduğu için arazide bir kez açılmaktadır. Snowpack Analyzer (SPA) adı verilen ölçüm istasyonlarında kar-su eşdeğeri ölçümleri nokta bazında yapılabilmektedir (Şorman ve Ertaş, 2019).

Uzaktan algılama yöntemleri ile mikrodalga radyasyonunun kuru kar ile kaplı dünya yüzeyi salınımından KSE geniş alanlar için elde edilebilmektedir (Dietz vd., 2012). Mekansal çözünürlüğü oldukça düşük olan (~625 km²) pasif mikrodalga uzaktan algılama yöntemlerinin ıslak kar ve ormanla kaplı alanlarda kısıtlamaları bulunmaktadır. Mikrodalga uzaktan algılama yöntemleri kullanılarak elde edilen geniş alan (25km x 25 km mekânsal çözünürlük) KSE ürünlerinin (Globsnow projesi) klasik yersel ölçümleri ile karşılaştırıldığında 24-77 mm arasında hata verdikleri bilinmektedir (Luoju vd., 2010; Dietz vd., 2012). Uydu görüntüleri ile yer verisinin karşılaştırıldığı çalışmada (Şorman ve Ertaş, 2019) en kolay ve başarılı ölçülebilen kar bileşeninin kar derinliği olduğu, kar-su eşdeğeri karşılaştırmasında hata oranının 30 - 314 mm arasında değiştiği ve bu farkın farklı arazi kullanımından, suya yakınlık ve yüksek karderinliğinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Mevcut KSE ölçüm yöntemlerinin aksine, kar ile temas olmadan yerküreden yansıyan kozmik veya gama ışını ölçülerek KSE belirlenebilmektedir. Ortamdaki su molekülünün gama ve kozmik ışınları yavaşlattığı bilinmektedir. Ölçüm alanına kurulan sensörler ile KSE belirlenebilmektedir (Desilets vd., 2010). Gama ışın sensörü (CS725) kar kütlelerinin KSE'ni ölçebilmektedir. KSE pasif olarak yeryüzeyinden saçılan mevcut elektromanyetik radyasyonu ölçerek elde edilmektedir. Bu radyasyon Potassium-40 (40K) ve Thallium-208 (208Tl)'in varlığından dolayı olmaktadır.

Yer radarı (Ground Penetrating Radar) kar kütlelerinin profilinin elde edilmesinde ve KSE'nin mekânsal dağılımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. (Eisen vd., 2003; Harper ve Bradford, 2003; Marshall vd., 2005; Godio, 2009; Bradford vd., 2009, Gustafsson vd., 2012; Forte vd., 2014; Holbrook vd., 2016, Webb, 2017).

GPR oldukça portatif bir sensördür, gerek bir operatör tarafından çekilerek (Bradford vd., 2009), gerekse kar motosikletlerine monte edilerek (Gacitua vd., 2013) kullanılabilir. Son yıllarda helikopterlerde (Sold vd., 2013) veya insansız hava araçlarında da (Jenssen vd., 2018) kullanılmaya başlanmıştır. GPR elektromanyetik enerjiyi kar kütlesi içine göndermektedir. Kar/toprak birleşiminde belirgin bir karşıt direnç oluşmaktadır ve oldukça iyi ayırt edilebilen kar/toprak ayrımı oluşmaktadır (Bradford vd., 2009). GPR verisi elektromanyetik dalganın toprak tarafından geri yansıtılması ile hassas iki yönlü yol alma zamanı vermektedir. Elde edilen yol alma zamanının KSE'ne dönüştürülebilmesi için radar hızının bilinmesi gerekmektedir. Radar hızının ölçülmesi ortak orta nokta (Common MidPoint (CMP)) ölçüm yöntemi (Harper ve Bradford, 2003) ile elde edilebilir. Bu ölçüm yöntemi için ayrı iki anten gerekmektedir. GPR ölçümleri genellikle ortak görelî kaydırma (Common Offset (CO)) ölçüm yöntemini kullanmaktadır. GPR yöntemi ile birlikte kar yastığı ve kar çukuru yöntemlerinin kullanılması radar hızının kar kütlesi içinde belirlenmesinde fayda sağlamaktadır (Webb, 2017).

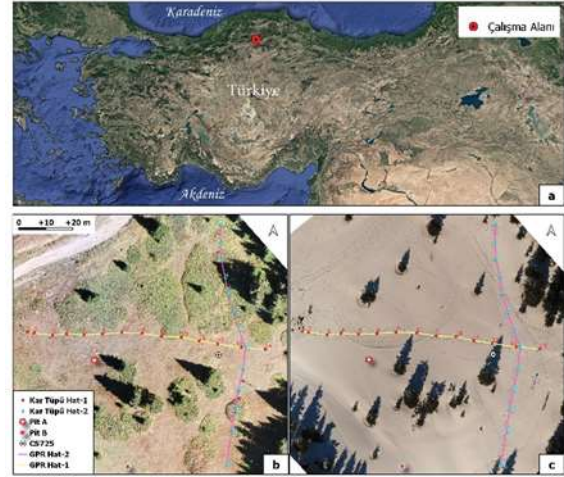
Bu çalışmada GPR yöntemi kullanılarak Türkiye'de ilk kez hassas KSE mekânsal dağılımı elde edilmiştir. Çalışmada GPR 450 Mhz ve 750 Mhz antenlerinin KD ve KSE elde etmedeki başarısı belirlenmiştir. Açılan kar çukurundan elde edilen değerler, kar tütü ile yapılan ölçümler ve DSİ tarafından işletilen istasyondaki SR50A ve CS725 sensörlerinden elde edilen KD ve KSE değerleri, doğrulama çalışmasında kullanılmıştır.

2 ÇALIŞMA ALANI VE METODOLJİ

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma, Ilgaz Dağı Milli Parkı içinde 1 ha alanda gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Havzanın deniz seviyesinden yüksekliği ortalama 1800 metredir. Ortalama sıcaklığı 5.7 °C'dir. Toprak genellikle şistler ve volkanik kayalardan oluşmuştur. Anadolu'nun en uzun ve en dinamik kırılma çizgisi olan kuzey fay hattı Ilgaz Dağı'nın güney eteklerinden geçmektedir. Milli Park içinde farklı özelliklere sahip vadiler, sırtlar ve tepeler vardır. Jeomorfolojik olarak, hafif dalgalı yayla düzlüğü veya zirve düzlüğü olarak ifade edilebilecek bir yapıya sahiptir. Arazi, genel olarak başta saf Gökmar ve Sarıçam meşcereleri olmak üzere orman ile orman içi açıklık niteliğindeki alanlardan oluşmaktadır. Ilgaz Dağı Milli Parkının dağlık ve engebeli bir yapıya ve farklı arazi örtüsüne sahip olması, bu test alanını konuma bağlı uygulamalar açısından önemli

kılmaktadır. Çalışma alanında bulunan ve DSİ tarafından işletilen sensör (SR50A) bu alandaki KD'ni ölçmektedir (Şekil 1). İlk arazi çalışması 5-6 Şubat 2019, ikinci arazi çalışması 28-29 Ocak 2020 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. İlk arazi çalışmasında 450 Mhz anten ve kar motoruna bağlı GPR düzeneği kullanılmıştır. İkinci arazi çalışmasında 450 Mhz ve 750 Mhz antenler ile ölçümler operatör tarafından çekilen GPR düzeneği ile gerçekleştirilmiştir (Yıldız vd., 2021).



Şekil 1. Çalışma alanının genel görünüşü (a), Kartütü ile ölçüm yapılan noktaların konumu, GPR ölçümü yapılan Hat-1 ve Hat-2, DSİ istasyonu çevresinin karsız (b) ve karlı dönemdeki görünüşü (c).

2.2 Ölçüm Yöntemleri ve Elde Edilen Veri

2.2.1 Kar Tütü Ölçümleri

KSE ölçümünde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri kar tütüdür. Mountain Rose model kar tütü 75 cm'lik alüminyum alaşımli borulardan yapılmış olup 3 ila 4 m boyunda kullanılabilecek şekilde hazırlanmıştır. Bu boruların iç çapları 37,7 mm olup 11,16 cm²'lik alandan kar numunesi almaktadır. KD üzerinde işaretli olan metrik sistem ölçümler ile okunabilmektedir. Borular 2 cm lik dilimlerle bölümlendirilmiştir. KSE için tüt üzerinde metrik birimde ölçüm çizelgesi bulunmaktadır. Numune tütü ve içine alınmış olan karı tartmak üzere kar terazisi kullanılır. Tartının gösterge çizelgesi, KSE'ni cm olarak gösterecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Kar tütü yöntemi ulaşımı zor alanlarda mümkün olmamakla birlikte oldukça sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Kar kütlesinin durumuna ve ölçümü yapan kişinin tecrübesine bağlı olarak hata içermektedir (Goodison, 1978; López-Moreno, vd, 2020)). Şekil 2'de DSİ tarafından işletilen ultrasonik kar derinlik sensörü (Campbell SR50A), KSE sensörü

(Campbell CS725), kar tüpü (Mountain Rose) ve bu kar tüpü ile KSE  l me anı gösterilmektedir.



(a) (b)



(c)

Şekil 2 - DSİ  l m istasyonu (Campbell SR50A) (a), Campbell CS725 (b) Kar tüpü ile kar-su eşdeğeri ölümü (c)

2.2.2 GPR  l mleri

Bu  alıŐmada MALA GX HDR model CO GPR kullanılmıştır.  l mler 450 MHz ve 750 MHz anten ile iki Şekilde gerçekleştirilmiştir. 5-6 Şubat 2019'da yapılan ölümlerde yalnızca 450 Mhz GPR anteni kullanılmıştır. İlk olarak belirlenen iki hat boyunca kızak sistemi üstüne monte edilmiş GPR anteni ve operatör boynuna asılı kontrol  nitesi ile beraber insan gücü ile çekilerek ölümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 1b-c). Daha geniş alanının taranmasında GPR anteni kar motosikletine yandan baĐlanmıŐ olarak motor tarafından çekilerek ölüm gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Mobil GPR uygulamasında kar motosiklet hızının 5 km/sa. geçmemesine dikkat edilmiştir. 28-29 Ocak 2020'de yapılan ölümlerde ise 450 Mhz ve 750 Mhz merkezi frekansa sahip iki farklı GPR anteni kullanılmıştır.  l mler 150 m2' lik bir alan

kapsayacak Şekilde 15'er metrelik uzunluğa sahip, aralarında 1'er metre mesafe bulunan 11 adet paralel hat boyunca yapılmıştır. Aynı alan hem 450 Mhz hem de 750 Mhz anten ile  l lm Őt r.



(a)



(b)

Şekil 3 - Kar  ukuru ve operatör tarafından çekilen GPR (a) ve kar motoruna bağlı GPR  l m düzeneği (b)

2.3 Ölüm Verilerinin Analizi

Arazide belirlenen hatlar boyunca GPR ile ölümler alınmıştır. Bu alanlar bitki etkisinin olmadığı ve farklı eğim ve bakının etken olduğu alanlar olarak belirlenmiştir. GPR verisi 0.5 m/sn hızla yürüyen operatör tarafından çekilerek toplanmıŐtır (Şekil 3). 5 m aralıklarla GNSS anteni kullanılarak konum bilgisi elde edilmiştir. Alansal dağılımın belirlenebilmesi için kar motoruna bağlı GPR düzeneği ile ölüm gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen radar verisi Reflexw (sürüm 8.0.2) yazılımı kullanarak iŐlenmiŐtir. GPR ham verisine birkaç temel veri  niŐleme adımı uygulanmıŐtır. (1) Sinyal baŐlangıç zamanı "statik düzeltme" fonksiyonu kullanılarak manuel olarak elde edilmiştir. (2) Sinyal zayıflamasını telafi etmek için "manuel gain (y)" fonksiyonu

kullanılmıştır. (3) 225 MHz ve 675 MHz bant aralığı dışında kalan ve ilgisiz frekanslara karşılık gelen sinyalleri ortadan kaldırmak için "Butterworth band-pass" filtresi (Dietz, vd., 2012) kullanılmıştır (4). Arka plan gürültüleri, bir arka plan kaldırma filtresi olan "background removal" (Dietz, vd., 2012) kullanılarak giderilmiştir (4). Karın dalga sönümlenmesi düşük olduğu için kar/toprak ayrımı oldukça iyi belirlenmiştir. Auto-pick fonksiyonu kullanılarak kar/toprak sınırı kolaylıkla elde edilmiştir. Radar verisinden elde edilen iki yönlü seyahat zamanı kullanılarak sinyalin hızı belirlenebilmektedir. Sinyal hızı ve kar yoğunluğu arasında bilimsel kaynaklarda sunulan ilişkiler bulunmaktadır. Bu çalışmada kuru kar için Tiuri vd. (1984) tarafından önerilen deneysel denklem (Denklem 1) kullanılmıştır.

$$\epsilon' = 1 + 1.7\rho + 0.7\rho^2 \quad (1)$$

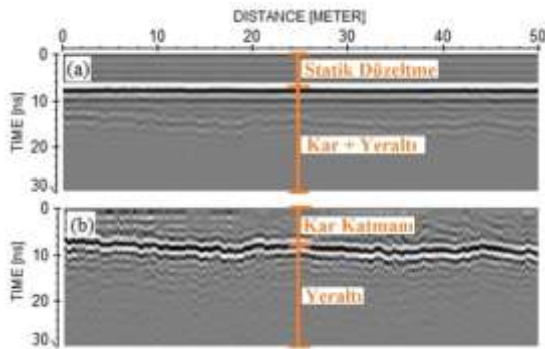
burada ρ kar yoğunluğu (g/cm^3) ve $\epsilon^{(')}$ de karın geçirgenliğinin gerçel kısmıdır. Radar kar hızı (v), ışık hızı (c) ve kar geçirgenliği arasındaki ilişki (Denklem 2) kullanılarak kar hızı elde edilmektedir.

$$v = c/\sqrt{\epsilon} \quad (2)$$

Arazide gerçekleştirilen kar çukuru analizinden elde edilen ortalama kar yoğunluk değeri kullanılarak kar radar hızı elde edilmiştir. Böylece GPR ölçümünden elde edilen iki yönlü seyahat zamanı, KD değerlerinin elde edilmesinde kullanılmış ve kar çukurundan elde edilen ortalama kar yoğunluğu (ρ) kullanılarak KSE hesaplanmıştır (Denklem 3).

$$KSE = KD \times \rho \quad (3)$$

Şekil 4'de görüldüğü gibi statik düzeltme ve gerekli sinyal işleme teknikleri uygulandıktan sonra kar katmanını ile yer ayrımı oldukça net gözükmektedir.



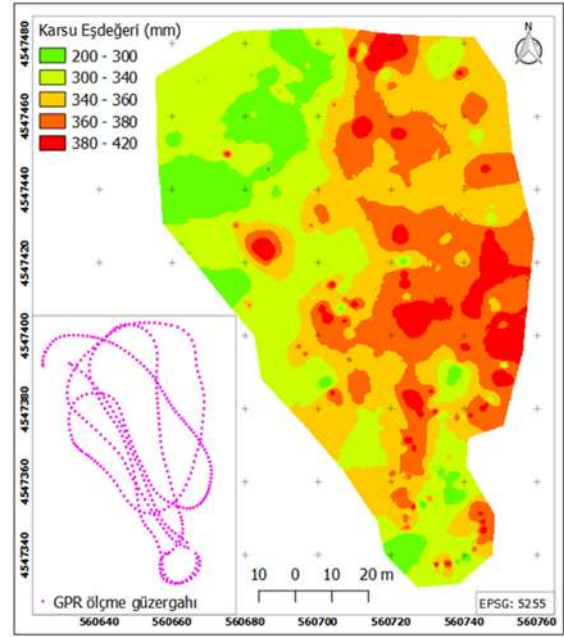
Şekil 4 - Yer radarı (GPR) ile alınan bir kesite ait ham veri (a) ve aynı verinin işlenmiş hali (b)

3 SONUÇLAR

3.1 5-6 Şubat 2019 Arazi Çalışması Sonuçları

Bu arazi çalışmasında 450 Mhz anten ile biri 89 m ve diğeri 99 m olmak üzere iki hat üzerinde

GPR ile ölçümler alınmıştır (Şekil1b-c). Aynı hat üzerinde kar tüpü ile de eşit aralıklarda KD ve KSE ölçümleri yapılmıştır (İlk hatta 14, ikinci hatta 13 noktada KSE ölçümleri yapılmıştır) (Şekil 1b-c). Kar motoruna bağlı GPR düzeneği ile alansal ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 5). Alansal olarak belirlenen karsu eşdeğeri Şekil 5'te sunulmaktadır. Manuel ölçümler ile yapılan karşılaştırma sonuçları Çizelge 1'de sunulmaktadır.



Şekil 5 - GPR ölçüm güzergahı ve alansal ölçümler ile elde edilen kar-su eşdeğeri dağılımı

Çizelge 1 - Hat boyunca ve alansal olarak elde edilen kar parametrelerinin karşılaştırılması

	Manuel Ölçüm	Hat Boyunca GPR (450 Mhz)	Alansal GPR (450 Mhz)
	Ortalama	Ortalama RMSE	Ortalama RMSE
KD (cm)	104	106 ±6	108 ±9
Kar Yoğunluk (g/cm^3)	0.355	0.364 ±0.069	0.365 ±0.074
KSE (mm)	366	384 ±63	391 ±69

Her iki hat boyunca elde edilen değerler karşılaştırıldığında GPR ile elde edilen KD değerlerinin manuel ölçüm ile elde edilenlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sadece bir noktada GPR ile elde edilen KD'nin manuel ölçüm ile elde edilenden 14 cm daha fazla olduğu belirlenmiştir. Kar derinliği ortalama farkı ilk hat için 6 mm, ikinci hat için 9 mm olarak elde edilmiştir. İkinci hat boyunca KD ve kar yoğunluğunun daha fazla değişim gösterdiği görülmektedir. Bu hat kuzey-güney

doğrultusunda olup arazi eğimi güney yönündedir (Şekil 1). Arazi çalışması tarihlerinde KD sensöründen elde edilen ortalama kar derinliği 124 cm'dir. KD sensörü Hat 2'ye yakın yerdedir (Şekil 2c). En yakın noktada manuel ölçüm ile 114 cm, GPR ile 119 cm KD belirlenmiştir. GPR ile elde edilen KD'nin ultrasonik sensör ile elde edilen değere daha yakın olduğu görülmektedir.

Alansal yapılan ölçümlerden elde edilen ortalama KD'nin kar yoğunluğuna göre daha farklı olduğu görülmektedir. Alansal olarak bakıldığında kar yoğunluğundaki değişim çok fazla olmamaktadır.

3.2 28-29 2020 Ocak Arazi Çalışması Sonuçları

Bu arazi çalışmasında arazide açılan iki kar çukurundan kar kütlelerinde 4 katman olduğu ve ortalama kar yoğunluğunun 0.327 g/cm³ olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 450 Mhz ve 750 Mhz antenler ile yapılan ölçümler sonucu hat boyunca elde edilen KD, kar yoğunluğu ve KSE manuel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Arazi çalışmasının yapıldığı zamanda gama ışın (Campbell CS725) sensöründen KD 57 cm ve KSE 187 mm olarak ölçülmüştür. Bu sensör 2020 yılında deneme amacı ile araziye kurulmuştur.

Elde edilen manuel (kar tüpü) ölçümlerden kar yoğunluğunun oldukça düşük ölçüldüğü görülmektedir. Gerek kar çukuru, gerekse gama ışın sensöründen elde edilen kar yoğunluğunun manuel ölçümlerden elde edilen değerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu arazi çalışmasında kullanılan kar tüpünün kalibrasyonunun doğru yapılmadığı ve ölçüm hatası içerdiği tespit edilmiştir. 750 Mhz anten ile yapılan ölçümlerden elde edilen değerlerin daha hassas olduğu belirlenmiştir. Çizelge 2'de belirtilen ortalama hata karelerinin kökü (RMSE) değeri 750 Mhz için daha küçüktür, kar-su eşdeğeri için de bu değer 450 Mhz den elde edilen değerden daha küçüktür. GPR veri analizi aşamalarında kar katmanının 750 Mhz veriden elde edilmesi daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

Çizelge 2 - Hat boyunca elde edilen kar parametrelerinin karşılaştırılması

	Manuel Ölçüm	Hat Boyunca GPR (450 Mhz)	Hat Boyunca GPR (750 Mhz)
	Ortalama	Ortalama RMSE	Ortalama RMSE
KD (cm)	66	66±4	65±3
Kar Yoğunluk (g/cm ³)	0.228	0.327	0.327
KSE (mm)	151	212 ±30	210 ±27

4 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Kar parametrelerinin daha sağlıklı ve güvenilir elde edilmesinde yeni tekniklerin kullanımı önemlidir. Bu nedenle GPR yönteminin gerek operatörlü gerekse mobil olarak uygulanması sonucu KD ve KSE verilerinin güvenilir bir şekilde manuel yöntemlere göre daha kısa zamanda elde edilebildiği belirlenmiştir. 750 Mhz anten ile yapılan ölçümlerden elde edilen kar parametrelerinin daha hassas olduğu görülmüştür. KD ve KSE'nin belirlenmesinde 750 Mhz antenin kullanılması önerilmektedir. Fakat 500 Mhz üzerindeki frekanslarda kar kütlelerinin içindeki su miktarının etkili olduğu bilindiğinden karın kuru olması, kar kütlesi su ihtiva ediyorsa ikinci bir ölçüm ile su kütlelerinin etkisinin giderilmesi gerekmektedir.

Çalışma alanında bulunan gama ışın sensörünün KSE'ni ölçmede oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir. İşletme maliyeti oldukça düşük olan bu tip pasif sensörlerin yaygınlaşması, KSE değerinin kısa sürede belirlenmesini gerektiren çalışmalar için fayda sağlayacaktır.

Kar tüpü ile alansal ölçümler yapılarak KD oldukça doğru elde edilebilmektedir. Fakat kar tüpü terazisinde yaşanacak bir sorun, rüzgâr ile oluşabilecek yanlış ölçümler kar yoğunluğu ve KSE'nin doğru olarak belirlenmesinde sorun oluşturmaktadır. İkinci arazi çalışmasında bu problem yaşanmıştır. Kar tüplerinin kalibrasyonlarının sıklıkla kontrol edilmesi güvenilir manuel ölçüm için önemlidir.

Çalışma alanında ardışık iki sene yapılan arazi çalışması iki yılın birbirinden farklı olduğunu göstermektedir. Sürekli ölçümler ve değişik tekniklerin uygulandığı test alanlarının oluşturulması ve bu alanların sürekliliğinin sağlanması kar hidrolojisi konusunda yapılacak çalışmalara büyük katkı sağlayacaktır.

5 KAYNAKLAR

- [1] Archer, D. and Stewart, D., "The installation and use of a snow pillow to monitor snow water equivalent", Water Environ. J., 9, 221–230, 1995
- [2] Bradford, J. H., Harper, J. T., & Brown, J., "Complex dielectric permittivity measurements from ground-penetrating radar data to estimate snow liquid water content in the pendular regime" Water Resources Research, 2009. doi:10.1029/2008wr007341
- [3] Desilets, D., Zreda, M., and Ferré, T. P. A., "Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic

- rays", *Water Resour. Res.*, 46, 1–7, 2010
- [4] Dietz, A. J., Kuenzer, C., Gessner, U., and Dech, S., "Remote sensing of snow – a review of available methods", *Int. J. Remote Sens.*, 33,4094–4134, 2012
- [5] Eisen, O., Nixdorf, U., Keck, L., & Wagenback, D., "Alpine ice cores and ground penetrating radar: combined investigations for glaciological and climatic interpretations of a cold Alpine ice body", *Tellus B*, 55(5), 1007-1017. doi:10.1034/j.1600-0889, 2003
- [6] Forte, E., Dossi, M., Pipan, M. & Colucci, R.R., "Velocity analysis from common offset GPR data inversion: Theory and application to synthetic and real data", *Geophysical Journal International* 197. 1471-1483. doi:10.1093/gji/ggu103,, 2014
- [7] Gacitua, G., Bay, C., Pedersen, M.R., & Tamstorf, M.P., "Quantifying snow and vegetation interactions in the high arctic based on ground penetrating radar (GPR)", *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 45, 201–210, 2013. doi:10.1657/1938-4246-45.2.201
- [8] Godio, A., "Georadar measurements for snow cover density", *Am. J. Appl. Sci.*, 6, 414-423, 2009. <https://doi:10.3844/ajas.2009.414.423>
- [9] Goodison B, Glynn, J.E., Harvey, K.D., ve Slater, J.E., "Snow surveying in Canada: A perspective", *Canadian Water Resources Journal* 12: 27–42.,1987
- [10] Goodison B. "Accuracy of snow samplers for measuring shallow snowpacks: an update", In *Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Eastern Snow Conference*, Hanover New Hampshire, 1978
- [11] Gustafsson, D., Sundstrom, N., & Lundberg, A., "Estimation of Snow Water Equivalent of Dry Snowpacks Using a Multi-Offset Ground Penetrating Radar System", 69th Eastern Snow Conference, Frost Valley YMCA, Claryville, New York, USA, 5-7 June 2012, 197-206, 2012
- [12] Haberkorn, Anna, *European Snow Booklet – an Inventory of Snow Measurements in Europe*. *EnviDat*. doi:10.16904/envidat.59. <https://www.envidat.ch/dataset/european-snow-booklet>, 2019
- [13] Harper, J. T., & Bradford, J. H. "Snow stratigraphy over a uniform depositional surface: spatial variability and measurement tools", *Cold Reg. Sci. Technol.*, 37(3), 289-298. doi:10.1016/S0165-232X(03)00071-5, 2003
- [14] Holbrook, W.S., Miller, S. N., & Provart, M. A., "Estimating snow water equivalent over long mountain transects using snowmobile-mounted ground-penetrating radar", *Geophysics*, 81(1), WA183-WA193, doi:10.1190/geo2015-0121.1, 2016
- [15] Jenssen, R. O., Eckerstorfer, M., Jacobsen, S., and Storvold, R., "Drone-Mounted Ultrawideband Radar for Retrieval of Snowpack Properties", in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 1, pp. 221-230, Jan. 2020. doi:10.1109/TIM.2019.2893043
- [16] López-Moreno, J.I., Leppänen, L., Luks, B., Holko, L., Picard, G., Sanmiguel-Vallado, A., Alonso-González, E., Finger, D.C., Arslan, A.N., Gillemot, K., Sensoy, A., Sorman, A., Ertaş, M.C., Fassnacht, S.R., Fierz, C., & Marty, C. Intercomparison of measurements of bulk snow density and water equivalent of snow cover with snow core samplers: Instrumental bias and variability induced by observers. *Hydrological Processes*, 2020. 34(14), 1–14. doi.org/10.1002/hyp.13785
- [17] Luoju, K., Pulliainen, J., Takala, M., Derksen, C., Rott, H., Nagler, T., Solberg, R., Wiesmann, A., Metsamaki, S., Malnes, E., and Bojkov, B.: "Investigating the feasibility of the gobsnow snow water equivalent data for climate research purposes", *Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS)*, 2010 IEEE Int., 19, 4851–4853, 2010
- [18] Marshall, H. P., Hoh, G., & Forster, R.R. , "Estimating alpine snowpack properties using FMCW radar", *Ann. Glaciol.*, 40(1), 157– 162, 2005
- [19] Sold, L., Huss, M., Hoelzle, M., Anderegg, H., Joerg, P.C., & Zemp, M., "Methodological approaches to infer end-of-winter snow distribution on alpine glaciers", *Journal of Glaciology*, 59, 1047–1059,2017. doi:10.3189/2013JoG13J015
- [20] ŞORMAN, A.A., & ERTAŞ, M.C. (2019). Otomatik Yeni Yöntemlerle Gözlenen Kar Bileşenlerinin Manuel Ölçümler Ve Uydu Görüntüleriyle Değerlendirilmesi. *DSİ Teknik Bülteni*, (132), 1–11
- [21] Pomeroy, J., ve Gray, D., "Snow cover.

Accumulation, Relocation and Management. NHRI Science Report 7", NHRI: University of Saskatchewan, Canada; 134 pp,1995

- [22] Tiuri, M., Sihvola, A., Nyfors, E. & Hallikaiken, M., "The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 9, no. 5, pp. 377-382, December1984.
doi:10.1109/JOE.1984.1145645

- [23] Webb, R.W., "Using ground penetrating radar to assess the variability of snow water equivalent and melt in a mixed canopy forest, Northern Colorado", Front. Earth Sci. 11,482–495,2017.
<https://doi.org/10.1007/s11707-017-0645->


0

- [24] Yıldız S., Akyurek., Z, & Binley A., "Quantifying snow water equivalent using terrestrial GPR and UAV photogrammetry", Hydrological Processes, 2021. doi: 10.1002/hyp.14190

TEŞEKKÜR

Arazi çalışmaları sağladıkları destek için DSİ Genel Müdürlüğü Rasatlar Şube Müdürü Bekir Ragıp YURTSEVEN, DSİ 23. Bölge Müdürlüğü Havza Yönetimi, İzleme ve Tahsisler Şube Müdürü Mevlüt TUTAR ve Rasat Teknisyeni Hilmi ŞAHİN'e, 2. Arazi çalışmasında kar çukur analizini yapan Dr. Mustafa Cansaran ERTAŞ'a teşekkür ederiz.

ENERJİ KIRICI HAVUZLARDA FARKLI TİP ENERJİ KIRICI BLOKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEME ORANLARININ FİZİKSEL ve SAYISAL MODELLERLE BELİRLENMESİ

Şerife Yurdağül KUMCU 
Necmettin Erbakan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
42090, Meram KONYA
yurdagulkumcu@gmail.com

Kamil İSPİR 
DSİ 4. Bölge Müdürlüğü
Anıt KONYA
kamilispirl@gmail.com

(Makalenin geliş tarihi: 21.04.2022, Makalenin kabul tarihi: 03.06.2022)

ÖZ

Bir su yapısından sonra akarsuya bırakılan ve özellikle yüksekten düşen suyun önemli miktarda hidrolik enerjisi vardır. Bu enerji yüksek hızlara neden olur. Yüksek hız ise akım yatağında oyulma, aşınma ve şüt kanallarında kavitasyona yol açabilir. Bunun sonucu olarak yapıların stabilite bozulur, dolayısıyla yapılar zarar görür ve yıkılabilir. Bir su yapısından yüksek hızla çıkan suyun enerjisini kırarak yapıya ve çevredeki yapılara zarar vermeden suyu mansaba aktaran tesise enerji kırıcı yapı denir. Bu çalışmanın amacı, farklı geometrik şekillerdeki enerji kırıcı blokların enerji sönmleme oranlarının fiziksel ve sayısal modelleme yöntemiyle araştırılmasıdır. Tüm blok tiplerinde blok yükseklikleri ve genişlikleri sabit seçilmiş, toplam enerji kırıcı blok uzunlukları ise enerji kırıcı havuz genişliğinin %50'si olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneysel olarak 4 farklı geometrik şekildeki blokların sönmleme oranları, tek sıra, iki sıra ve iki sıra eşik yapısız olmak üzere 3 farklı yerleşim şekli ile toplamda 12 farklı tasarımda ve 7 farklı debi değerinde test edilmiştir. Bu tasarımlar ayrıca FLOW-3D yazılım programında sayısal olarak modellenmiş, deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda T şekilli enerji kırıcı bloğun en iyi sönmleme oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarla FLOW-3D ile sayısal modellemeye elde edilen sonuçların birbirine benzer olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık kanal hidroliği, Dolusavak yapısı, Enerji kırıcı bloklar, Enerji kırıcı havuz, Enerji sönmleme, FLOW-3D, Hidrolik sıçrama

DETERMINATION OF ENERGY DISSIPATION PERFORMANCE OF VARIOUS TYPES OF ENERGY DISSIPATOR BLOCKS IN STILLING BASIN BY PHYSICAL AND NUMERICAL MODELS

ABSTRACT

Energy dissipator in the stilling basin is a structure designed to protect downstream of the spillway from erosion and scour by reducing flow energy in the energy dissipation pool. Energy dissipation pool is an important element of hydraulic structures as a transition between the high-velocity flow and the sensitive tailwater. The aim of this study is to investigate the energy dissipation ratios of baffle blocks which constructed in Type III stilling basin with different geometric shapes by using physical and numerical modeling methods. In all types of baffle blocks, the block heights and widths are chosen equally, and the total baffle block lengths are designed to be 50% of the stilling basin width. Energy dissipation ratio of the baffle blocks in 4 different geometric shapes were determined in 3 different layouts as single row, two rows and two rows without threshold structure, in a total of 12 different designs and 7 different

discharges are tested. In addition, these experimental studies were tested in the FLOW-3D software program, and the results of experimental and numerical studies were compared. As a result of the study, it was determined that the T-shaped energy dissipating block had the highest energy dissipation ratio, and it was observed that the results obtained from the experimental studies and the FLOW-3D software were similar to each other.

Keywords: Open channel hydraulics, Spillway structures, Stilling basins, Energy dissipation block, Energy dissipaters, FLOW-3D, Hydraulic Jump

1 GİRİŞ

Dolusavak yapılarının inşaatında enerji kırıcılar yapının güvenliği ve maliyeti açısından önemli rol oynamaktadırlar. Baraj yaklaşım kanalından mansaba suyun aktarılması sırasında akım sel rejiminde olduğu için enerjisi yüksektir. Bu enerji akımda çok yüksek hızlar oluşturabilmekte; oyulma, aşınma ve iletim kanallarında kaviteasyona sebep olarak, mansapta yer alan yapıların ve dere yatağının hasar görmesine neden olmaktadır. Enerji kırıcı yapılar, su alma, kabartma veya biriktirme yapılarında suyun alınması ya da mansaba aktarılması sırasında suyun enerjisini kırarak güvenli bir şekilde mansaba aktaran tesislerdir.

Enerji kırıcı yapılar, bir sulama kanalında şütten düşen, bir hareketli bağlamanın kapak altından geçen, bir baraj dip savağından boşalan, bir bağlama ya da baraj dolu savağından dökülen ve benzeri durumlarda suyun enerjisini kırmak için kullanılırlar.

Enerji kırıcı yapılar, esas olarak proje yerine bağlı oldukları için bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Bir enerji kırıcının projelendirilmesi topoğrafyanın yanında ana yapı, akım durumu, jeoloji ve ekonomi gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu bakımdan böyle bir yapının kesin projesi hazırlanmadan önce genellikle model araştırmaları ile hidrolik çalışmasının incelenmesi istenir. Enerji kırmada, suyun çarpma, türbülans oluşturma, dağılma meydana getirme veya su ve hava ile sürtünme sağlama şeklinde ana ilkeler kullanılarak pek çok değişik tipte yapılar yapılabilir [1]. Enerji kırıcı yapı tiplerinden olan enerji kırıcı havuzların temel prensibi akımın sel rejiminden nehir rejimine geçişinde meydana gelen hidrolik sıçrama yardımıyla enerjinin kırılarak azalmasını sağlamaktır.

Birçok araştırmacı enerji kırıcı havuzlar üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bestawy [2] 2013 yılında enerji kırıcı olarak farklı şekilli enerji kırıcı blokların kullanılması hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada 14 farklı model enerji kırıcı blok tasarlanmış ve tek sıra yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmada yarım daire kesitin en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir. Bradley vd. [3] benzer bir çalışmayı düşük Froude sayılarında ve USBR IV. Tip düşüm havuzunun

kullanılmasını önermişlerdir. Farklı tip enerji kırıcıların enerjisi kırma üzerine etkisi dip savaklarda da çalışılmıştır. Farklı model enerji kırıcılardan, T şekilli ve beşgen tipli blokların enerji kırmada en iyi sonucu verdiği izlenmiştir [4]. Kuttiammu vd. de T şekilli blokların etkisini denemek için, farklı bir düşü havuzu tasarlamış ve enerji kırma performansını artırmaya çalışmışlardır [5]. Sadece enerji kırıcı blokların değil, pürüzlü yüzeylerde de enerji kaybı yaşanacağı için, düşüm havuzlarının pürüzlü hale getirilerek hidrolik sıçrama uzunluğunun azaltılması da literatürde yapılan araştırmalar arasında yer almıştır. Bu çalışmada, kapaktan sonra yüzeyi pürüzlü yapmak için tabana dişler yerleştirilmiştir. Çalışmada farklı kapak açılma miktarları ve Froude sayısı dikkate alınarak en uygun hidrolik sıçrama uzunluğu elde eden ve yapım ekonomikliği de dikkate alınarak uygun yüzey pürüzlülüğü bulunmuştur [6]. Kuzey Kaliforniya'daki Pit Nehri üzerindeki Pit 6 Barajı'nda dolu savaktan fazla miktarda debi deşarj edildiği için, daha fazla enerji kırabilecek, akım şartlarına en uygun enerji kırıcı blok tespit edilmeye çalışılmıştır [7]. Morris 1968 yılında yaptığı çalışmada enerji kırıcı bloklar arasındaki mesafeyi optimum yapmaya çalışmıştır. Bu çalışmada enerji kırıcı dişlerin aralık ve yükseklik oranlarını bulmaya çalışılmıştır [8]. Farklı tip enerji bloklarının kullanılması Özbay, tarafından da denenmiştir [9]. Bu çalışmada 4 farklı enerji kırıcı blok ile çalışılmış, farklı şekilli blokların sönümlenme oranının yakın olduğu fakat basamaklı tip enerji kırıcı bloğun diğer bloklardan biraz daha fazla sönümlenme oranına sahip olduğu belirtilmiştir. Enerji kırmaya hem Fr sayısının ve hem de farklı tip enerji bloklarının etkisi Pillai vd. tarafından da çalışılmıştır [10]. Bu çalışmada, mevcut düşüm havuzlarına karşı yeni bir tip düşüm havuzu önerilmiştir. Bu düşüm havuzunun orta kısmına beşgen şeklindeki enerji kırıcı bloklar yerleştirilerek elde ettikleri tipin daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Yeni enerji kırma yöntemleri arayışları Rajaratnam ve diğerlerin de dikkatini çekmiş ve onlar tarafından da incelenmiştir. Elek tipi (gözenekli) enerji kırıcılar ve farklı gözenek tipleri üzerinde durarak, Froude sayısını da dikkate alarak, elekleri tek sıra ve iki sıra halinde kullanarak en yüksek enerji kıran tasarımı bulmaya çalışmışlardır [11]. Enerji kırıcı

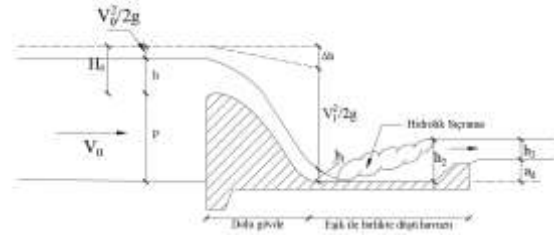
havuzuna yerleştirilen farklı tip bloklar, enerji kırıcı yapıdan sonraki dere yatağında oyulmaları da etkilemektedir. Aydın ve Ulu 2018 yılında yaptıkları sayısal modelleme çalışmasında, farklı tip enerji kırıcı blokların oyulmaya etkisini araştırmışlardır. Düşmede dik yüzeyi akıma doğru yerleştirilmiş üçgen şeklindeki enerji kırıcı blokların enerji kırmada en etkili tip olduğu ve oyulmayı en aza indirdiği izlenmiştir [12]. Enerji kırma yöntemleri arayışı içinde bulunan araştırmacılar farklı tip enerji kırıcı blokları bir arada denemeyi de düşünmüşlerdir [13]. Karma blokların şekil, boyut ve yerleri için Froude sayısı dikkate alınarak en uygun şeklini tespit etmişlerdir. USBR tarafından şut blokları, enerji kırıcı bloklar ve çıkış eşikleri üzerine bir dizi deney yapılmış ve standart enerji kırıcı havuzlar geliştirilmiştir. Froude sayısına göre sıçrama özellikleri ve sıçrama havuzları sınıflandırılmaktadır [14]. Enerji kırıcı bloklar, hidrolik sıçramanın gerçekleşmesini sağlamak, türbülansı artırmak ve enerjinin kırılması amacıyla enerji kırıcı havuza yerleştirilirler. Enerji kırıcı bloklar, enerji kırmak için ihtiyaç duyulan havuz uzunluğunu kısaltmaktadır. Enerji kırıcı bloklar tek sıra veya birden fazla sıra halinde kullanılabilirler. USBR tarafından ikinci ve daha sonraki sırada yer alan blokların şaşırtmalı olarak yerleştirilmesi, ilk bloğun duvardan blok genişliğinin yarısı kadar mesafeye yerleştirilmesi ve aynı sıradaki blokların genişliği ile bloklar arasındaki mesafenin eşit olması önerilmiştir [15].

Bu çalışmada memba yüzü dik ogee savak mansabına yapılan enerji kırıcı havuz içerisine yerleştirilen enerji kırıcı bloklarının, enerji kırmaya katkısı ile enerji sönümlenme oranları fiziksel ve sayısal modelleme yöntemleriyle araştırılmıştır. Çalışmada, dört farklı geometrik şekilde enerji kırıcı blok kullanılmış olup, planda farklı dizilişlerde de deneyler yapılmıştır. Deney düzeneği kanalın anahtar eğrisi çıkartılarak Froude sayısı ve akım hızına göre havuz USBR III. Tip olarak boyutlandırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda blokların enerji sönümlenme oranları ve sayısal modelleme yöntemleriyle elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2 ENERJİ KIRICI HAVUZLAR

Hidrolik sıçrama, akımın sel rejiminden nehir rejimine geçtiğinde meydana gelen su yüzeyindeki ani yükselme olaydır. Hidrolik sıçrama esnasında, kısa bir mesafede önemli miktarda enerji kaybı oluşur. Verimli bir hidrolik sıçrama için yan duvarların düşey veya düşeye yakın olması gerektiği için genellikle dikdörtgen en kesitli havuzlar tercih edilir. Şekil 1' de enerji kırıcı havuzların genel şeması ve havuzda

oluşan hidrolik sıçramanın genel görünümü verilmiştir.



Şekil 1 - Enerji kırıcı havuz içindeki hidrolik sıçramanın şekli

Şekil 1'de verilen parametrelerin tanımları aşağıda verilmektedir.

- h_1 = Hidrolik sıçramadan önceki su derinliği
- h_2 = Hidrolik sıçramadan sonraki su derinliği
- h_3 = Mansaptaki su derinliği
- h = Kabarma yüksekliği
- ρ = Kıyas düzleminde krete kadar su yüksekliği
- a_d = Düşüm havuzu derinliği
- $V^2/2g$ = Hız yüksekliği
- V_0 = Suyun dolu gövdeye yaklaşım hızı
- V_1 = Sıçramadan önceki akımın hızı
- Δh = Enerji kaybı
- H_0 = Kretten itibaren enerji yüksekliği

Hidrolik sıçrama oluşurken, h_1 ve h_2 arasında momentum denklemlerinden faydalanılarak bulunan bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{\sqrt{1+8Fr^2}-1}{2} \quad (1)$$

Düşüm havuzu içinde oluşan hidrolik sıçramalar Froude (Fr) sayısına göre sınıflandırılmaktadır. Froude sayısına bağlı olarak sıçrama çeşitleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır.

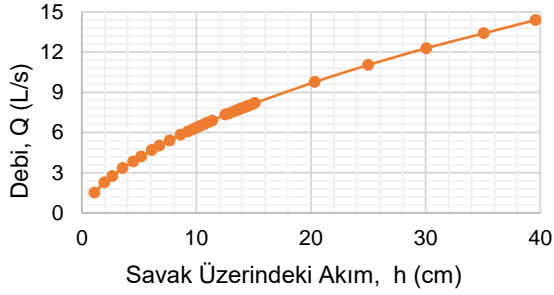
- $1,7 < Fr < 2,5$ hidrolik sıçrama
- $2,5 < Fr < 4,5$ geçiş bölgesi
- $4,5 < Fr < 9$ hidrolik sıçrama
- $9 < Fr$ kuvvetli hidrolik sıçrama

2.1 Enerji kırıcı havuz tipinin seçilmesi

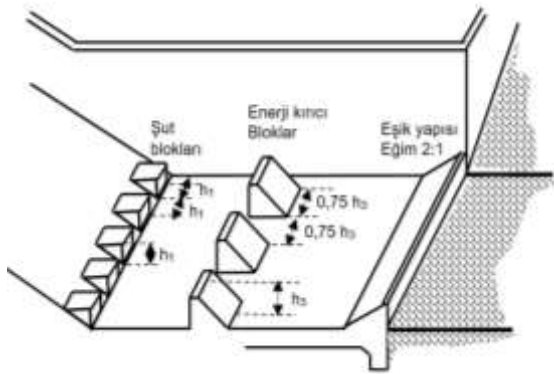
Laboratuvarda açık kanal üzerinde mevcut bulunan memba yüzü dik ogee savak üzerindeki maksimum akım yüksekliği 14.40 cm olup buna karşılık gelen debi 39,62 L/s'dir (Şekil 2). Kanalın anahtar eğrisi için her bir debiye karşılık gelen savak yükü ve hidrolik sıçramadan önceki mansap su yüksekliği limnometre yardımıyla ölçülerek çıkartılmıştır.

Her mansap su yüksekliği için hız ve Froude sayısı hesaplanmış olup en yüksek hız 2,75 m/s en yüksek Froude sayısı ise 8,83 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan Froude sayısı 4.5'dan büyük ve hesaplanan en büyük akım hızının ise 18,3 m/s (60 ft/s)'den küçük olduğu akım şartlarında tasarım için uygun olan USBR

tip III seçilmiş, Şekil 3'de verilen boyutlandırmaya esas grafiğe göre boyutlandırılmıştır.



Şekil 2- Savak anahtar eğrisi



Şekil 3 - Tip III enerji kırıcı havuz [15]

Tasarım debisinde hidrolik sıçramadan önceki mansap su yüksekliği h_1 , 4,80 cm olarak ölçülmüştür. Kanal genişliği 30 cm olup 39,62 L/s debi için yapılan hesaplamalar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 - Tasarım hesapları ($B=30$ cm)

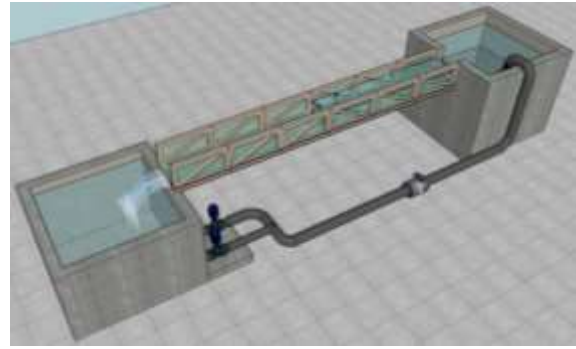
Min / Maks	Q	H	h_1	V_1	$\frac{h_2}{h_1} =$
	(L/s)	(cm)	(cm)	(m/s)	$\frac{\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1}{2}$
Min	1.10	1.52	0.26	1.41	3.12
Maks	39.6	14.4	4.80	2.75	24.92

2.2 Deney düzeneği

Deneyler, boyu 670 cm, genişliği 30 cm ve derinliği 50 cm olan dikdörtgen kesitli açık kanalda yapılmıştır. Deney düzeneğinde iki tank arasına yerleştirilen açık kanala su pompalar ile devri daim yapılmaktadır. Devridaim borusuna yerleştirilen elektromanyetik debimetre ile akımın debisi ölçülmektedir. Akım derinliği, açık kanala yerleştirilen ± 1 mm hassasiyetli limnometre ile ölçülmüştür. Açık kanal, 0,6 cm kalınlığındaki iki temperli cam tabakanın

aralarına yerleştirilen plastik katmanla birleştirilmesiyle elde edilmiş, 1,2 cm kalınlığındaki lamine camdan yapılmıştır. Deneylerde pleksiglastan imal edilmiş olan ogee tipi profil ve şüt ayakları kullanılmıştır. Açık kanal sisteminde akan su iki hazneden sağlanmaktadır. Pompalar suyu 1. hazneden alıp 2. hazneye basmaktadır. 2. hazneye gelip taşan su açık kanaldan geçmekte ve buradan 1. hazneye tekrar dökülmektedir (Şekil 4).

Hidrolik sıçramadaki hava girişinin, yani hava-su karışımı akımının ve kanal genişliğinin ölçek etkisi sonucu olarak önemli olduğu ve deney sonuçları üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir.



a) Şematik görünüm



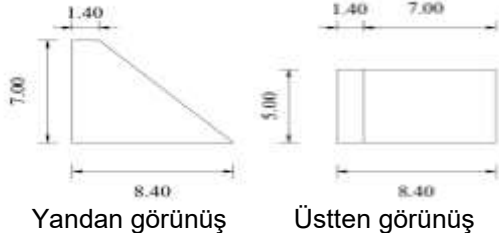
b) Çalışma kanalı

Şekil 4 - Açık kanal düzeneğinin şematik ve laboratuvar gösterimi

2.3 Deneyde Kullanılan Enerji Kırıcı Blok Tipleri

USBK Tip III Enerji kırıcı havuz içerisine yerleştirilen enerji kırıcı blokların sönmüleme oranlarının deneysel yöntemlerle araştırılması laboratuvarında fiziksel modeller üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada 4 farklı geometrik şekilde enerji kırıcı bloklar ile tek sıra, iki sıra ve iki sıra eşiksiz olmak üzere toplamda 12 deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneğinde şüt blokları ile enerji kırıcı blokların yüksekliği ve genişliği sabit tutulmuş

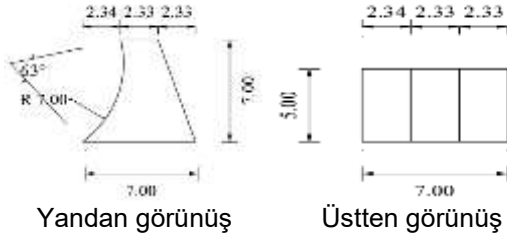
farklı debilerde çalışılmıştır. Deneylerde 7 farklı debide sıçramadan sonraki yükseklik ile mansap su seviyesi ölçümleri yapılarak elde edilen veriler karşılaştırılmış, enerji kırılma miktarları hesaplanmıştır. Deneylerde trapez, dairesel, basamak ve T kesit tipi olmak üzere 4 farklı enerji kırıcı blok tipi kullanılmıştır. Kullanılan enerji blok tipleri enerji kırıcı havuza önce tek sıra, sonra 2 sıra daha sonra da 2 sıra eşiksiz olarak yerleştirilerek akım şartları incelenmiştir. Enerji kırıcı blok tiplerine ait plan ve profil görünüşleri Şekil 5'da verilmektedir.



Yandan görünüş Üstten görünüş



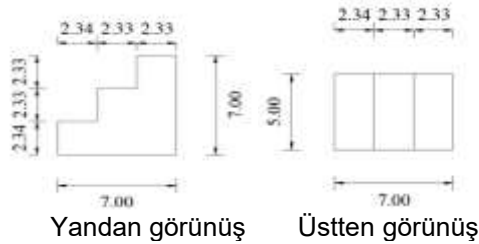
Deneysel çalışma
a) Trapez blok



Yandan görünüş Üstten görünüş



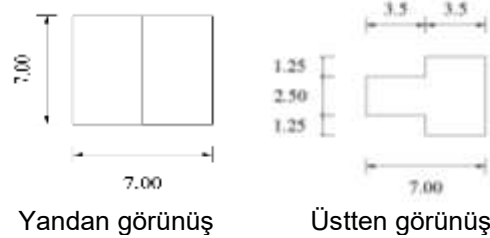
Deneysel çalışma
c) Dairesel blok



Yandan görünüş Üstten görünüş



Deneysel çalışma
d) Basamak blok



Yandan görünüş Üstten görünüş



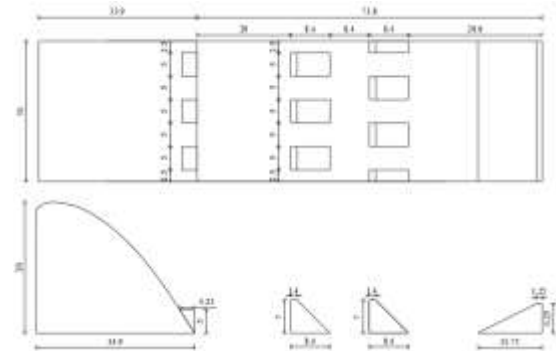
Deneysel çalışma
e) T-blok

Şekil 5 - Enerji kırıcı blok tiplerine ait plan, profil ve deneysel çalışma görünüşleri

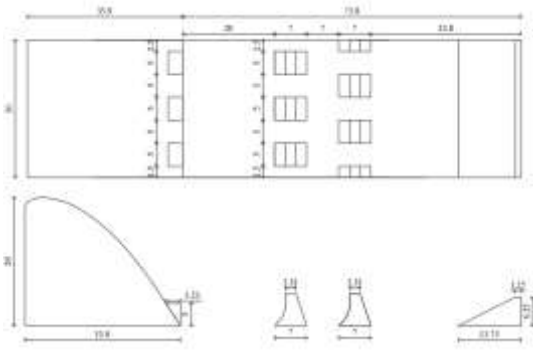
3 METOT

3.1 Deneysel Çalışma

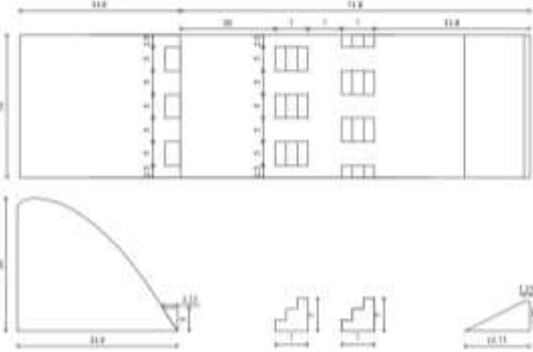
Enerji kırıcı havuz içerisine yerleştirilen enerji kırıcı bloklar ile ilgili yapılan deneyler Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır.



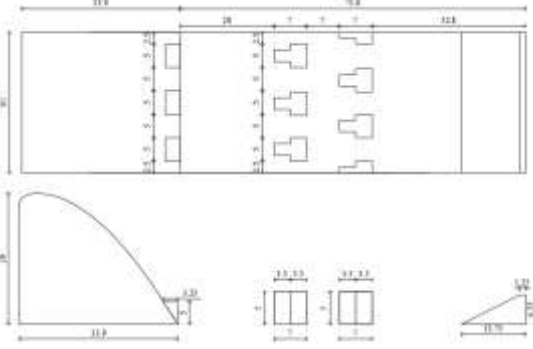
a) Trapez kesitli çift sıra enerji kırıcı blokların yerleşim planı



b) Dairesel kesitli çift sıra enerji kırıcı blokların yerleşim planı



b) Basamak kesitli çift sıra enerji kırıcı blokların yerleşim planı



c) T şekilli çift sıra enerji kırıcı blokların yerleşim planı

Şekil 6 - Deneysel çalışmada kullanılan çift sıra bloklara ait yerleşim planı

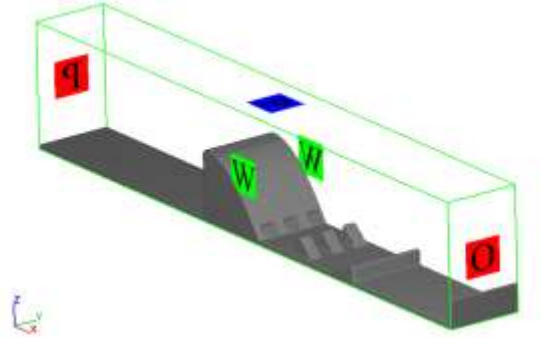
Deneyler 0,30 m genişlik ve 0,50 m yüksekliğe sahip dikdörtgen açık kanalda yürütüldü. Açık kanal sisteminde akım iki hazne ile sağlanmaktadır. Akım 1. hazneden 2. hazneye pompalar yardımı ile devir yapılmaktadır. 2. hazneye gelen akım açık kanaldan geçerek 1. hazneye tekrar dökülmektedir. Pompaların basacağı debi miktarı, pompaların bağlı olduğu panodaki frekans değiştiricileri vasıtasıyla ayarlanmış ve deneylerde 10 L/s, 15 L/s, 20 L/s, 25 L/s, 30 L/s, 35 L/s ve 39,62 L/s olmak üzere 7 farklı debi değerleri kullanılmıştır. Sistemden geçen debi, pompalardan sonra boruların arasına yerleştirilen bir debimetre vasıtasıyla ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan enerji kırıcı

havuz elemanları fleksiglas malzemeden üretilmiştir. Bu enerji kırıcı havuz elemanları USBR tarafından önerilen yöntemler içerisinde silikon yardımıyla yapıştırılmıştır. Sıçramadan sonraki mansap su yükseklikleri limnometre yardımıyla ölçülmüştür [14].

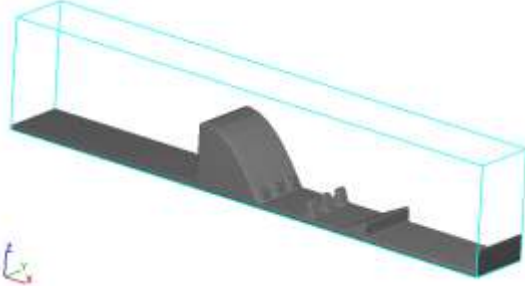
Deneysel çalışmada kullanılan çift sıra blok tiplere ait örneklerin yerleşim planları Şekil 6'de verilmektedir.

3.2 FLOW 3D ile Sayısal Modelleme

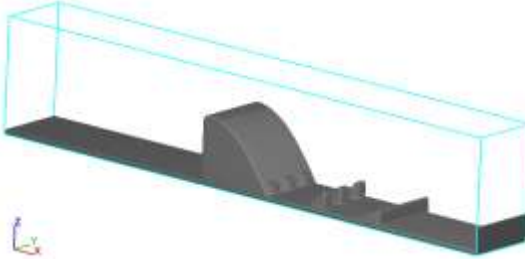
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü olan FLOW-3D, sonlu farklar metodu kullanarak birden fazla akışkan karışımını çözebilen sayısal hesaplama yapan bir programdır Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerini sonlu hacimler yöntemi ile çözer. Hidrolik mühendisliğinde akımların çoğu türbülanslıdır. Flow-3D beş farklı türbülans modeli ile çözüm yapmaktadır. Bu çalışmada mühendislik amaçlı açık kanal akımlarının çözümlerinde uygun olan ve yaygın olarak kullanılan $k-\varepsilon$ modeli kullanılmıştır. Analizlerde tek akışkanlı-serbest yüzeyli akım çözümü kullanılmıştır. VOF (Volume of fluid-akış hacmi) metodu için her bir akım hücrelerinin doluluk veya boşluk oranını tanımlamak ve ön işlem (pre-process) kullanımı ile ön hata ayıklama işlemlerinin yapılması sağlanmıştır. Analizlerde farklı sonlu eleman ağı büyüklükleri kullanılarak denemeler yapılmıştır. Sonlu eleman ağı büyüklükleri en kaba halden en ince hale gelene kadar testler yapılmıştır. Deneysel sonuçlarla, sayısal sonuçlar birbirine yaklaşılarak aradaki fark %1 olana kadar kadar, testler tekrarlanmıştır. Deneysel çalışma ile sayısal modelleme sonuçlarını birbirine en yakın çıkaran ve çözüm süresini en aza indiren, optimum sonucu veren $\Delta X=\Delta Y= \Delta Z =5$ mm büyüklüğünde sonlu eleman ağı hücreleri kullanılmıştır ve sonlu eleman ağı bloğu toplamda 1.536.000 hücre içermektedir. Sisteme suyun girdiği kısım (-X eksen) P, statik su seviyesi olarak tanımlanmıştır. Savak üzerinde istenilen savak yüküne bağlı olarak bu statik su seviyesinin yüksekliği ayarlanmış ve istenilen yükseklikte suyun girmesi sağlanmıştır. Yan yüzeyler ve havuz tabanı duvar olarak, mansap kısmı O, çıkan akım; üst kısım ise açık hava basıncı ile temsil edilmiştir. İstenilen analiz sonuçlarını elde edebilmek için çıkışta, akım doluluk oranı ve hidrolik veri seçenekleri kullanılmıştır. Sayısal modelleme ile ilgili detaylar Kumcu ve Kökpınar tarafından yapılan çalışmada verilmiştir [16]. Analizlerde kullanılan katı model ve akım koşulları Şekil 7'de görülmektedir.



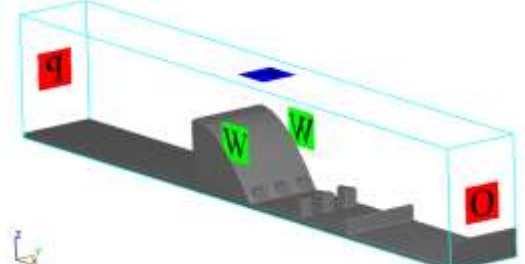
a) Trapez kesitli tek sıra enerji kırıcı blokların modellemesi



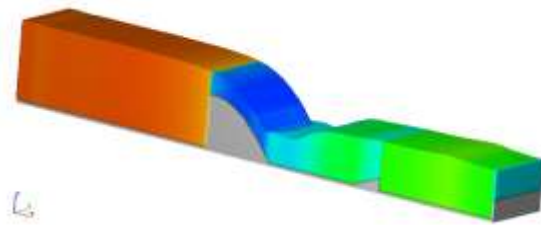
b) Dairesel kesitli tek sıra enerji kırıcı blokların modellemesi



c) Basamak kesitli tek sıra enerji kırıcı blokların modellemesi



d) T Şekli tek sıra enerji kırıcı blokların modellemesi



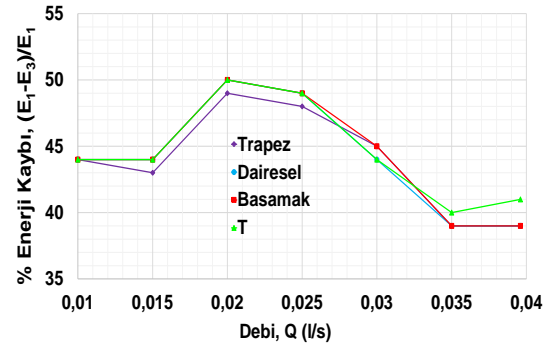
e) Sayısal modelleme ile elde edilen akım şartlarına ait bir görünüş

Şekil 7. Analizlerde kullanılan katı model ve akım koşulları

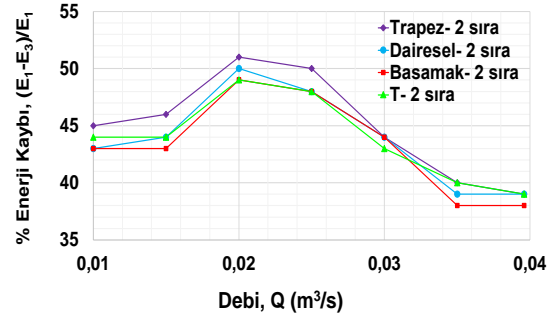
4 BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Fiziksel modelleme

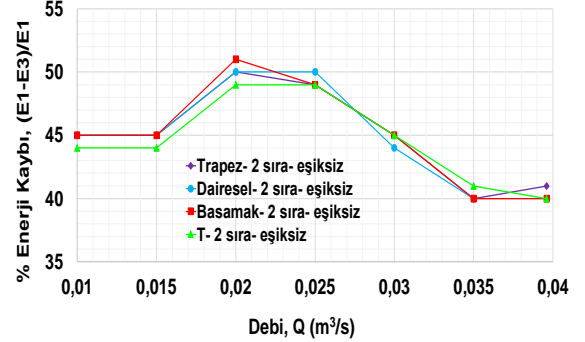
Açık kanal üzerinde yapılan bu deneysel çalışma sırasında akım içinde oluşturulan hidrolik sıçrama yardımıyla akımdaki enerji sönümlenme oranları incelenmiştir. Hidrolik sıçramadan önce ve sonra akımın ölçülen yükseklikleri ve akım hız yükseklikleri bulunarak, enerji yüksekliği formüllerinden, akımdaki enerji yükseklikleri hesaplanarak enerji sönümlenme oranları bulunmuştur. Enerji sönümlenme miktarlarını tespit etmek ve en etkili plan şeklini bulmak amacı ile enerji kırıcı bloklar; tek sıra, çift sıra ve çift sıra eşiksiz dizilişlerine göre kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalara ait grafikler Şekil 8'da verilmiştir.



a) Tek sıra dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönümlenme oranları



b) Çift sıra dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönümlenme oranları



c) Çift sıra eşiksiz dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönümlenme oranları

Şekil 8. Enerji kırıcı blokların enerji kırma oranları

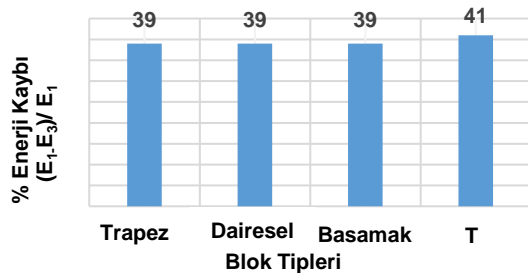
Şekil 8’ da tek sıra dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönmülme oranlarına bakıldığında, en yüksek sönmülme oranının 20 L/s ile tasarım debisinin hemen hemen %50’sine denk gelen debide %50 azaldığı görülmüştür. Tasarım debisinde ise en yüksek enerji kırma oranı T kesitli enerji kırıcı blok planına ait olduğu ve %41 değerine ulaştığı görülmüştür. İki sıra dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönmülme oranlarına bakıldığında, en yüksek sönmülme oranının 20 L/s ile tasarım debisinin hemen hemen %50’sine denk gelen debide %51 azaldığı görülmüştür. Tasarım debisinde ise en yüksek enerji kırma oranı T kesitli enerji kırıcı blok planına ait olduğu ve %39 değerine ulaştığı görülmüştür. İki sıra eşsiz dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönmülme oranlarına bakıldığında, en yüksek sönmülme oranının 20 L/s ile tasarım debisinin hemen hemen %50’ine denk gelen debide %51 azaldığı görülmüştür. Tasarım debisinde ise en yüksek enerji kırma oranı trapez kesitli enerji kırıcı blok planına ait olduğu ve %41 değerine ulaştığı görülmüştür.

4.2 Sayısal modelleme

Deneyel çalışmada kullanılan tek sıra enerji kırıcı blokların deney düzenekleri tasarım debi değerinde FLOW-3D Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile test edilmiş ve elde edilen hidrolik özelliklere ait veriler Tablo 2’de verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde, tasarım debisinde en yüksek enerji kırma oranının T kesitli enerji kırıcı bloğa ait olduğu ve enerji kırma miktarının %41 değerine ulaştığı görülmüştür. Yapılan kıyaslamaya ait grafik Şekil 9’da verilmiştir.

Tablo 2 - Tek sıra enerji kırıcı blokların sayısal modelleme sonuçları

Blok tipi	h_1 (m)	V_1 (m/s)	$(E_1-E_3)/E_1$
Trapez	0,0480	2,75	0,39
Dairesel	0,0480	2,75	0,39
Basamaklı	0,0480	2,75	0,39
T Şekli	0,0480	2,75	0,41



Şekil 9 - Tasarım debisinde tek sıra dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönmülme oranları

Bu grafikten de görülebileceği gibi, Trapez, Basamaklı ve Dairesel kesitlere sahip enerji kırıcı bloklar %39 luk enerji kırma yüzdeleri ile benzer sonuçlar vermiştir.

4.3 Fiziksel ve Sayısal modellemenin karşılaştırılması

Tek sıra enerji kırıcı blokların deney düzenekleri yedi farklı debide fiziksel olarak, tasarım debi değerinde de FLOW-3D sayısal metot yöntemi ile test edilmiştir. Tablo 3’de tek sıra dizilişli enerji kırıcı blokların enerji sönmülme oranlarına bakıldığında, deneysel çalışma sonuçları ile FLOW-3D sonuçları hemen hemen aynı değerlere sahip olmuştur.

Tablo 3 incelendiğinde, aynı akım şartlarında, hem fiziksel modellemede hem de sayısal model çalışmasında h_3 değerleri birbirine çok yakın, enerji kırma yüzdelerinin de birbirine yakın olduğu ve fiziksel modelleme ile sayısal modelleme sonuçları arasında en fazla % 1’lik fark görülmektedir.

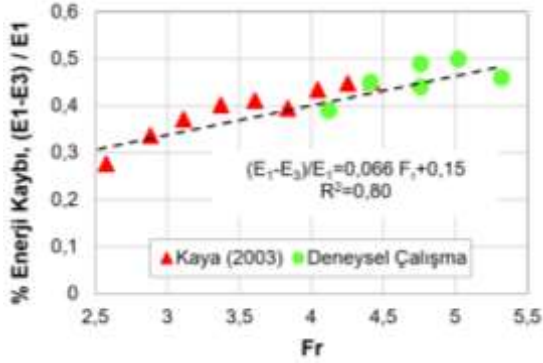
Tablo 3 - Tek sıra enerji kırıcı blokların fiziksel ve sayısal modelleme sonuçları

Blok tipi	Fiziksel Modelleme Sonuçları		Sayısal Modelleme Sonuçları	
	h_3 (m)	$(E_1-E_3)/E_1$	h_3 (m)	$(E_1-E_3)/E_1$
Trapez	0,249	0,39	0,259	0,39
Dairesel	0,252	0,39	0,259	0,39
Basamak	0,251	0,39	0,249	0,39
T	0,243	0,41	0,241	0,41

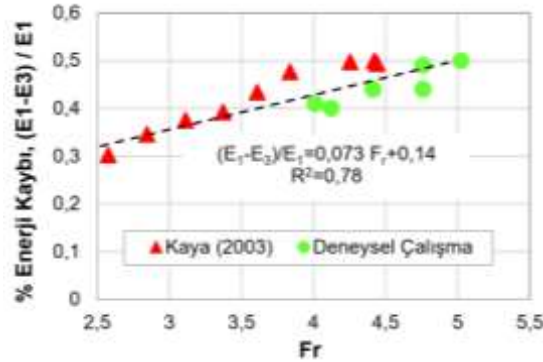
4.4 Literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırma

Deneyel çalışmada kullanılan T şekilli ve basamaklı enerji kırıcı bloklara benzer çalışma 40 cm genişliğinde bir kanalda deneysel olarak Kaya tarafından da yapılmıştır [4]. Bu çalışmada da en yüksek enerji sönmülmesi, T şeklindeki enerji kırıcı bloklarla elde edilmiştir. Benzer şekillerdeki, planda tek sıra olarak yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile mevcut çalışmanın tek sıra deneysel model sonuçları birbiri ile karşılaştırılarak, her iki çalışmanın F_r sayılarının birbirini tamamlar şekilde olduğu görülmüş ve Şekil 10’da verilmiştir. Kaya (2003) tarafından test edilen tek sıra basamaklı enerji kırıcı bloklar ile deneysel çalışması yapılan tek sıra T ve basamak şekilli bloklar karşılaştırıldığında, elde edilen enerji

kayı miktarlarının da birbirini tamamlar şekilde doğrusal değiştiği görülmüştür. Basamak tipli enerji kırıcı bloklarda doğrusal çizginin eğiminin 0,066 ve $R^2=0,80$ iken T şekilli enerji kırıcı bloklarda doğrusal çizginin eğimi 0,073 ve $R^2=0,78$ bulunmuştur.



a) Tek sıra dizilişli Basamak tipi enerji kırıcı bloklar



b) Tek sıra dizilişli T şekilli enerji kırıcı bloklar

Şekil 10 - Literatürde yapılan çalışma ile mevcut çalışmanın karşılaştırılması a) Tek sıra dizilişli Basamak tipi enerji kırıcı bloklar b) Tek sıra dizilişli T şekilli enerji kırıcı bloklar

5 SONUÇLAR

Enerji kırıcı bloklar hidrolik sıçramanın oluşma mesafesini kısaltarak havuz uzunluğunun da kısalmasını sağlamaktadır. USBR Tip III Enerji kırıcı havuz içerisine yerleştirilen farklı geometrik şekilli enerji kırıcı blokların sönümlenme oranları deneysel çalışma ve FLOW-3D sayısal hesaplamaların sonuçlarının benzerlikleri ve farklılıklarını araştırmak üzere bir dizi deney yapılmış, aynı deney şartları sayısal model ile de çalışılmıştır. Sonuçlar birbiri ile kıyaslanmıştır. FrTüm deney düzeneklerinde hidrolik sıçrama meydana gelmiştir. Her ne kadar enerji kırıcı şekilleri farklı olsa da, tüm düzenek ve enerji kırıcı blok tiplerinde enerji sönümlenme oranları birbirine yakın çıkmıştır. Tek sıra enerji kırıcı blok tasarımında, tasarım debisinde en yüksek

sönümlenme oranı T kesitli enerji kırıcı blokta elde edilmiştir. İki sıra enerji kırıcı blok tasarımında, tasarım debisinde en yüksek sönümlenme oranı yine T kesitli enerji kırıcı blokta elde edilmiştir. İki sıra eşsiz enerji kırıcı blok tasarımında ise tasarım debisinde en yüksek sönümlenme oranı trapez kesitli enerji kırıcı blokta elde edilmiştir. Tüm deney düzeneklerinde $Q=20$ L/s debide en yüksek sönümlenme oranı, tasarım debisi, $Q=39,62$ L/s'de ise en düşük sönümlenme oranı elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları ile FLOW-3D sonuçları hemen hemen aynı değerleri vermiştir.

Deneysel çalışmaların daha güvenilir sonuçlar verdiği düşünülse de laboratuvar imkanları, zaman, işçilik ve inşaat maliyeti açısından düşünülürse her zaman deneysel çalışma yapılamayacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Sayısal çalışmaların hesaplamaları sırasında yapılan varsayımlar, ilk yatırım maliyeti ve eğitim zorlukları düşünülse de, kullanım kolaylığı ve program sonuçlarının alınma süresi ve sonuçların deneysel çalışmalara ve gerçek sonuçlara benzerliği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmanın devamında, farklı akım şartlarında, farklı tip enerji bloklarının yükseklik ve mesafeleri değiştirilerek deneysel ve sayısal çalışmaların devamının yapılması planlanmaktadır. Farklı dolusavak şekli ve farklı akım şartlarında çalışmaların yapılması, tasarımın genellenmesi açısından önemlidir.

6 KAYNAKLAR

- [1] Erkek, C. ve Ağralıoğlu, N., "Su Kaynakları Mühendisliği", Beta Basım A.S., İstanbul, 1993
- [2] Bestawy, A., "New Shapes of Baffle Piers Used In Stilling Basins As Energy Dissipator", ATE, 3 (1), 1-7, 2013
- [3] Bradley, J. N. ve Peterka, A. J., "The Hydraulic Design of Stilling Basins", Journal Hydraulic Div., ASCE, 82(5), 1957
- [4] Kaya, N., "Enerji Kırıcı Havuzlarda Farklı Tip Enerji Kırıcı Blokların Enerji Sönümlenme Oranlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2003
- [5] Kuttiammu, T. P. ve Rao, J. V., "Bhavani Type Stilling Basin for Spillways of Large Dams", 12 (44), 4th ICOLD, New Delhi, 1951
- [6] Mohamed Ali, H. S., "Effect of Roughened-Bed Stilling Basin on Length of Rectangular Hydraulic Jump", Journal of Hydraulic

- Engineering, ASCE, 117 (1), Ocak, 83- 93, 1991
- [7] Nakato, T., "Model Tests of Hydraulic Performance of Pit 6 Dam Stilling Basin", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126 (9), Eylül, 638-652, 2000
- [8] Morris, H. M., "Hydraulics of Energy Dissipation In Steep, Rough Channels", Bulletin 19, Research Division; Virginia Polytechnic Institute, USA, Kasım, 1968
- [9] Özbay, Ö., "Şüt Kanallarına Yerleştirilen Farklı Tip Enerji Kırıcı Blokların İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008
- [10] Pillai, N. N., Goel, A., ve Dubey, A.K., "Hydraulic Jump Type Stiling Basin for Low Froude Numbers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115 (7), Temmuz, 989-994, 1989
- [11] Rajaratnam, N. ve Hurting, K. I., , "Screen-Type Energy Dissipator for Hydraulic Structures", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 126 (4), Nisan, pp. 310-312, 2000
- [12] Aydın, M. C. ve Ulu A. E., "Effects of Different Shaped Baffle Blocks On The Energy Dissipation And The Downstream Scour of A Regulator", Bitlis Eren University Journal of Science and Technology, 8 (2), 69-74, 2018
- [13] Verma, D. V.S. ve Arun, G., "Stiling Basins For Pipe Outlets Using Wedge-Shaped Splitter Block", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 126 (3), 179-184, 2000
- [14] Chow, V.T., "Open Channel Hydraulics", Mc Graw-Hill Book, New York, 1959
- [15] Peterka, A. J., "Hydraulic Design of Stilling Basins And Energy Dissipators", United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph, 25, 1984
- [16] Kumcu, Ş. Y. ve Kökpınar, M. A., "Dousavak Yapılarında Sayısal Modellemenin Uygulanması: Kavşakbendi Hidroelektrik Santrali (HES) Örneği" DSİ Teknik Bülten, (132),12-26, 2019