

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜM HAVUZLARININ SONUNDAKİ EŞİK YÜKSEKLİKLERİNİN OYULMAYA ETKİSİ

Türkan Senem SAKIN

Tez Yöneticisi
Prof. Ahmet TUNA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ,2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜM HAVUZLARININ SONUNDAKİ EŞİK YÜKSEKLİKLERİNİN OYULMAYA ETKİSİ

Türkan Senem SAKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Ahmet TUNA

Üye :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... Tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince yaptığı öneriler ve yardımlarından dolayı tez yöneticim Sayın Prof. Ahmet TUNA' ya teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
SİMGELER LİSTESİ	X
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ	1
2. BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR	2
2.1 Genel Bilgiler	2
2.2 Basamaklı Dolusavakların Projelendirilmesi	3
2.2.1 Ön Plan Hazırlanması	3
2.2.2 Savak Genişliğinin Seçimi	4
2.2.3 Savak Kretinin Tayini	4
2.2.4 Maksimum Çıkış Debinin Meydana Gelmesi	5
2.2.5 Optimum Basamak Yüksekliğinin Seçimi	5
2.2.6 Basamak Uzunluğu ve Kanal Eğim Açısının Seçimi	5
2.2.7 Mansapta Açığa Çıkan Çözünmüş Gaz Miktarının Hesabı	6
2.2.8 Hava Girişi	6
2.2.9 Yapısal Dizayn Dahil Son Şeklin Tespiti	6
2.3 Dünyadan Örnekler	7
3. OYULMA	10
3.1. Bir Platformun Mansabındaki Oyulmalar	10
3.1.1 Bir Enerji Kırıcı Havuz Mansabındaki Oyulmalar	14
3.2 Su Yastığına Dalan Su Jeti İle Oluşan Oyulmalar	15
3.2.1 Oyulma Oluşumunun Mekanizması	16
3.2.2 Kaya Tabanındaki Oyulma Oluşumu	17
3.2.2.1 Kaya Tabanda Oyulmanın Gelişimi	20
3.3.Genel Uygulamalar İçin Deneysel Formüller	22
3.3.1.Kotulas Formülü	22
3.3.2.Studenichikov Formülü	23
3.3.3.Martins A Formülü	24
3.3.4.Machado Formülü	25

3.3.5. Veronese Formülü.....	25
3.3.6. Martins Formülü	26
3.4. Jet Enerjisinin Sönümüne Bağlı Olarak Oyulma Derinliği	28
3.5 Genel Uygulamalarda Kullanılan Yarı Deneysel Formüller.....	29
3.5.1 Mirtskhulava Formülü.....	29
3.5.2 Mikhalev Formülü.....	31
3.6 Sıçratma Eşikli Dolu Savaklar İçin Deneysel Formüller	32
3.6.1 Rubinstein Formülü.....	32
3.6.2 Aksoy Formülü	33
3.6.3 Taraimovich Formülü.....	35
3.6.4 Martins B Formülü.....	36
3.6.5 Chian Formülü	37
3.6.6 Mpiri Formülü.....	38
3.6.7 Mason ve Arumugan Formülü	39
3.6.8 Wang Shixia Formülü	39
3.6.9 Schoklitsch Formülü	40
3.6.10 Mason Formülü	40
3.6.11 Gunko ve Soleva Formülü	42
3.7 Sıçratma Eşikleri	43
3.7.1 Sıçratma Eşiklerinin Yararları.....	43
3.7.2 Sıçratma Eşiklerinin Zararları	43
3.7.3 Basit Sıçratma Uçlarının Projelendirilmesi.....	44
3.8 Düşüm Yataklarının Sonundaki Oyulmalarla İlgili Uygulanmış Örnekler.....	49
3.8.1 Tarbela Barajı Dolusavağı Düşüm Yatağında Meydana Gelen Oyulmalar	49
3.8.2 Mansabın Korunması İçin Yapılan Çalışmalar	50
3.8.3 Keban Barajı	52
3.9 Literatür Özeti	55
4. DENEY DÜZENEGİ.....	58
4.1 Yürütülen Deney Düzenegi.....	60
4.2 Boşaltım Kanalı.....	62
4.3 Düşü Havuzu Eşik Tipi	62
4.4 Malzeme Granülometrisi.....	62
4.5 Mansap Kanalı (Kuyruk Suyu)	63
4.6 Deneylerin Yapılışı	63
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	65

5.1 Eşik Yüksekliğinin 0 cm Olması Alternatifi	65
5.2 Eşik Yüksekliğinin t=1 cm Olması Alternatifi	67
5.3 Eşik Yüksekliğinin t=2 cm Olması Alternatifi.....	70
5.4 Eşik Yüksekliğinin t=3 cm Olması Alternatifi	73
5.5 Eşik Yüksekliğinin t=4 cm Olması Alternatifi	75
5.6 Eşik Yüksekliğinin t=5 cm Olması Alternatifi.....	78
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
6.1 Sonuçlar	81
6.2 Öneriler	82
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Les Olivettes Barajı- Fransa.....	8
Şekil 2.2	Choctaw Barajı – ABD.....	8
Şekil 2.3	Gold Creek Barajı.....	8
Şekil 2.4	Stagecoach Barajı-ABD.....	8
Şekil 2.5	Knellport Barajı.....	9
Şekil 2.6	Tache Barajı.....	9
Şekil 2.7	Goulburn barajı – Avustralya.....	9
Şekil 3.1	Batıklığın jetin formu üzerine etkisi	11
Şekil 3.2	Valentin tarafından tespit edilen oyulmalar [22].....	12
Şekil 3.3	Bir platformdan sonraki oyulma. [8].....	13
Şekil 3.4	Düşük bir platformdan sonraki oyulma. [8].....	14
Şekil 3.5	Dinamik jet basıncının oluşturduğu kuvvetler.....	17
Şekil 3.6	Dinamik basıncın çatlaklar boyunca etkisi	18
Şekil 3.7	Jetin kaya bloklarını sürüklemesi	19
Şekil 3.8	Bir kaya zeminde çatlak ve yarıkların çeşitli durumları için su jeti tarafından oluşturulan hidrodinamik basınç dağılımı.	21
Şekil 3.9	Oyulmanın zamana bağlı olarak değişimi.....	22
Şekil 3.10	Serbest düşülü jet oyulması.....	23
Şekil 3.11	Maksimum oyulma derinliği [15].....	28
Şekil 3.12	Mirtskhulava formülündeki oyulma parametreleri [16].....	30
Şekil 3.13	η_1 düzeltme katsayısı.....	30
Şekil 3.14	Yüksek düşülü barajın dolusavağı mansabındaki oyulmayla ilgili semboller...32	
Şekil 3.15	Oyulma ile ilgili semboller.....	34
Şekil 3.16	Prototipteki oyulma derinlikleri.....	37
Şekil 3.17	Prototip oyulmaları.....	38
Şekil 3.18	Mason formülü kullanılarak hesaplanan oyulma derinliklerinin ölçülen değerleri karşılaştırılması.....	42
Şekil 3.19	Su napının düştüğü noktanın matematiksel tanımlanması.....	44
Şekil 3.20	Dolusavak mansap kanalında akım.....	45
Şekil 3.21	St Etienne Cantales barajı mansap kanalında akış.....	46
Şekil 3.22	Chastang barajı mansap kanalında akım.....	47
Şekil 3.23	Sıçratma ucunun tertibi.....	47
Şekil 3.24	Tarbela barajı dolusavak mansabı topografik haritası.....	50

Şekil 3.25	Tarbela barajı dalma havuzunda koruma çalışmalarından sonraki durum.....51
Şekil 3.26	Tarbela barajı dolusavak dalma havuzunda modelde ve prototipte oluşan oyulma derinlikleri karşılaştırılması.....51
Şekil 3.27	Keban barajı dolusavağı sıçratma eşiği mansabının oyulmalardan sonraki görünüşü.....53
Şekil 3.28	Keban barajı dolusavağı sıçratma eşiği mansabının jeolojik yapısı.....53
Şekil 3.29	Keban barajı dolusavak sıçratma eşiği mansabında oluşan oyulma.....54
Şekil 3.30	Keban barajı dolusavak sıçratma eşiği mansabında inşa edilen koruma yapısı.54
Şekil 4.1	Deney düzeneğinin kesiti.....59
Şekil 4.2	Deney düzeneği.....59
Şekil 4.3	Debimetre.....60
Şekil 4.4	Deney düzeneğinin şematik görünümü.....61
Şekil 4.5	Eşik tipleri.....62
Şekil 4.6	Elek Analizi.....63
Şekil 4.7	Deney düzeneği.....64
Şekil 5.1	$t=0$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $h_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.....66
Şekil 5.2	$t=0$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $L_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.67
Şekil 5.3	$t=1$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $h_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.69
Şekil 5.4	$t=1$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $L_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.69
Şekil 5.5	$t=2$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $h_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.72
Şekil 5.6	$t=2$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $L_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.72
Şekil 5.7	$t=3$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $h_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.74
Şekil 5.8	$t=3$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $L_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.75
Şekil 5.9	$t=4$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $h_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.77
Şekil 6.0	$t=4$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $L_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.77
Şekil 6.1	$t=5$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $h_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.....79
Şekil 6.2	$t=5$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde $L_0/H1$ değerinin birim debi ile değişimleri.80

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1	Oyulma formüllerinin sınıflandırılması.....	16
Tablo 3.2	Dikdörtgen ve daire kesitli jetlerin karakteristikleri.....	29
Tablo 3.3	Rubinstein eşitliğindeki katsayılar.....	33
Tablo 3.4	Prototipteki oyulma derinlikleri.....	38
Tablo 3.5	Chastang barajının dolusavağında ölçülmüş olan hızlar.....	45
Tablo 3.6	Saint-Etienne Cantales barajının dolusavağında ölçülmüş olan hızlar.....	46
Tablo 4.1	Elek analizi tablosu.....	62
Tablo 5.1	$t=0$ cm ve $z=25$ cm için oyulma değerleri.....	65
Tablo 5.2	$t=0$ cm ve $z=26$ cm için oyulma değerleri.....	65
Tablo 5.3	$t=0$ cm ve $z=27$ cm için oyulma değerleri.....	65
Tablo 5.4	$t=0$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.....	66
Tablo 5.5	$t=0$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.....	66
Tablo 5.6	$t=0$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.....	66
Tablo 5.7	$t=1$ cm ve $z=25$ cm için oyulma değerleri.....	68
Tablo 5.8	$t=1$ cm ve $z=26$ cm için oyulma değerleri.....	68
Tablo 5.9	$t=1$ cm ve $z=27$ cm için oyulma değerleri.....	68
Tablo 5.10	$t=1$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.....	68
Tablo 5.11	$t=1$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.....	68
Tablo 5.12	$t=1$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.....	69
Tablo 5.13	$t=2$ cm ve $z=25$ cm için oyulma değerleri.....	70
Tablo 5.14	$t=2$ cm ve $z=26$ cm için oyulma değerleri.....	70
Tablo 5.15	$t=2$ cm ve $z=27$ cm için oyulma değerleri.....	71
Tablo 5.16	$t=2$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.....	71
Tablo 5.17	$t=2$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.....	71
Tablo 5.18	$t=2$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.....	71
Tablo 5.19	$t=3$ cm ve $z=25$ cm için oyulma değerleri.....	73
Tablo 5.20	$t=3$ cm ve $z=26$ cm için oyulma değerleri.....	73
Tablo 5.21	$t=3$ cm ve $z=27$ cm için oyulma değerleri.....	73
Tablo 5.22	$t=3$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.....	73
Tablo 5.23	$t=3$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.....	74
Tablo 5.24	$t=3$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.....	74
Tablo 5.25	$t=4$ cm ve $z=25$ cm için oyulma değerleri.....	76
Tablo 5.26	$t=4$ cm ve $z=26$ cm için oyulma değerleri.....	76
Tablo 5.27	$t=4$ cm ve $z=27$ cm için oyulma değerleri.....	76

Tablo 5.28	t= 4 cm ve z=28 cm için oyulma değerleri.	76
Tablo 5.29	t= 4 cm ve z=29 cm için oyulma değerleri.	76
Tablo 5.30	t= 4 cm ve z=30 cm için oyulma değerleri.	77
Tablo 5.31	t= 5 cm ve z=25 cm için oyulma değerleri.	78
Tablo 5.32	t= 5 cm ve z=26 cm için oyulma değerleri.	78
Tablo 5.33	t= 5 cm ve z=27 cm için oyulma değerleri.	78
Tablo 5.34	t= 5 cm ve z=28 cm için oyulma değerleri.	79
Tablo 5.35	t= 5 cm ve z=29 cm için oyulma değerleri.	79
Tablo 5.36	t= 5 cm ve z=30 cm için oyulma değerleri.	79

SİMGELER LİSTESİ

a	Küp blokların kenar uzunluğu
B_0	Jetin dolusavak çıkışındaki genişliği
B_2	Nehir yatağı genişliği
$B_{\max}$	Jetin kuyruk suyu üzerine çarptığı noktadaki genişliği
C_v	Jetin yörüngesi boyunca havalanması ile ilgili bir katsayı
D	Küp blok boyutu
d	Yatak malzemesi boyutu
d_m	Taban malzemesinin ortalama dane çapı
d_{50}	Taban malzemesinin ağırlık yüzdesi olarak %50'sinin elekten geçtiği dane çapı
d_{90}	Taban malzemesinin ağırlık yüzdesi olarak %90'ının elekten geçtiği dane çapı
d_{95}	Taban malzemesinin ağırlık yüzdesi olarak %95'inin elekten geçtiği dane çapı
e	Mansap su yastığı derinliği
f	Tabanın başlangıç konumundan itibaren ölçülen oyulma derinliği
Fr	Froude sayısı
g	Yerçekimi ivmesi
G	Kaya parçacığının sudaki ağırlığı
h	Mansap kuyruk suyu ile rezervuar arasındaki fark
h_c	Kritik akım derinliği
h_0	Deneydeki maksimum oyulma derinliği
h_1	Memba su derinliği
h_2	Mansap kuyruk suyu derinliği
h_e	Eşik yüksekliği
H	Mansap su derinliği
H_1	Mansap yüksekliği
K	Kayanın yapısıyla ilgili katsayı
k_r	Kayanın gerilme katsayısı
L_0	Oyulma uzunluğu
n	Jetin yayılmasını ve hava girişini karakterize eden katsayı
P	Akımın hidrodinamik yükü

P_c	Parçacık ve masif kütle arasındaki kohezyon kuvveti
q	Birim debi
Q	Toplam debi
S	Basamak yüksekliği
t	Oyulma derinliği
t	Eşik yüksekliği
X	Oyma etkisi parametresi
V_0	Jetin mansap suyuna dalış hızı
z	Mansap yüksekliği
α	Jetin mansap suyuna çarptığı bölgede yatayla yaptığı açı
θ	Jetin sıçratma ucundan çıkış açısı
ϕ	Oyulma çukuru malzemesinin içsel sürtünme açısı
ϕ_u	Oyulma çukurunun memba yüzü açısı
η'	Ortalama ve maksimum taban hızlarından sıçratma eşiği üzerindeki hızlara geçiş katsayısı
γ	Hava su karışımının özgül ağırlığı
γ_s	Malzemenin özgül ağırlığı
ρ	Suyun yoğunluğu
ρ_0	Kaya malzemenin yoğunluğu
ρ_s	Blokların birim kütlesi

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜM HAVUZLARININ SONUNDAKİ EŞİK YÜKSEKLİKLERİNİN OYULMAYA ETKİSİ

Türkan Senem SAKIN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

2009, Sayfa 98

Yüksek düşülü barajların dolusavaklarından bırakılan suyun enerjisi oldukça yüksektir. Barajların mansabındaki nehir tabanı, dolusavaktan bırakılan bu yüksek enerjiye sahip suyun etkisiyle oyulur. Barajın ve çevre yapıların güvenliği için suyun enerjisi sönmülenerek oyulma kontrol altına alınmalıdır. Bu enerjinin sönmülenmesi için barajların düşüm havuzlarının sonuna bir eşik inşa edilmektedir. Bu eşiklerin yüksekliği oyulmanın derinliğine ve yerine etki etmektedir.

Bu çalışmada, oyulmanın en aza indirilmesi için gerekli eşik yükseklikleri araştırılmıştır. Bu çalışma, yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; giriş kısmı sunulmuş, çalışmanın amacı ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde; literatür özeti sunulmuştur. Üçüncü bölümde; su jetleri ile oyulma anlatılmıştır. Dördüncü bölümde; sıçratma eşikleriyle ilgili bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde; düşüm yataklarının sonundaki oyulmalarla ilgili örnekler verilmiştir. Altıncı bölümde; deney düzeneği ve deneylerin yapılışı anlatılmış, elde edilen sonuçlara ait grafikler çizilerek yorumlanmış ve tartışılmıştır. Yedinci bölümde; sonuçlar verilmiştir. Bu çalışmada yapılan deney sonuçlarına göre, eşik yüksekliğindeki artışın oyulmayı azalttığı görülmüştür. Aynı zamanda debi arttıkça oyulma artmaktadır, mansap kuyruksuyu arttıkça oyulma azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Oyulma, Eşik yüksekliği, Düşüm havuzu, Enerji sönmüleme

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF THE SILL HEIGHTS AT THE END OF THE STILLING BASINS TO THE SCOUR

Türkan Senem SAKIN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

2009, Page 98

Energy of the water which is leaved from the spillway of the dams which have high head, is quite big. The river bed which is near the downstream of the dams, is scoured with the effect of this water which is leaved from the spillway, has big energy. For the security of the dams and near buildings, the scour must be controlled with the energy dissipation of the water. To dissipate this energy, a sill is built at the end of the stilling basins of the dams. Height of these sills effect the depth and place of the scour.

In this study, the sill heights which we need to get lower of the scour to the least, was researched. This study includes seven sections. In the first section; introduction was presented. In this section, especially, the aim of this study was given. In the second section; summary of literature was presented. In the third section; scouring with water jets was told. In the fourth section; informations about sills were given. In the fifth section; the samples about the scours at the end of the stilling basins were given. In the sixth section; experimental setup and the making of experiments were told. The results about graphics were explained and discussed by drawings. In the seventh section; the results were given. According to the results of the experiments that were made in this study, increasing the height of the sill decreases the scouring. Also increasing the flow increases the scouring, increasing the water height of the end of stilling basins decreases the scouring.

Keywords: Scour, Sill height, Stilling basin, Energy dissipation.

1. GİRİŞ

Son yıllarda yurdumuzda ve diğer ülkelerde düşü yüksekliği gittikçe artan barajlar inşa edilmektedir. Bilindiği gibi, baraj rezervuarında depolanması mümkün olmayan fazla sular (özellikle taşkın suları) dolusavak yardımıyla barajın mansap tarafına aktarılır. Dolusavakların bir kısmı çoğunlukla kemer barajlarda olduğu gibi suyu serbest jet halinde, bir kısmı ise bir düşü kanalı ile ve sonundaki bir deflektör yardımı ile sıçratarak meyilli bir jet halinde akarsu yatağı üzerine düşürürler.

Büyük bir yükseklikten düşen suyun kinetik enerjisi, jetin çarptığı bölgede dinamik basınca dönüşmektedir. Çatlaklar arasına etkiyen basınç, bir hidrolik kama gibi blokları birbirinden ayırabilmektedir. Yüksek düşülerin ve büyük debilerin söz konusu olması halinde, suyun enerjisinin enerji kırma havuzu veya benzeri bir yapı ile kırılması hem hidrolik hem de yapı tekniği yönünden güç problemler ortaya çıkarır. Düşen su, yatak üzerindeki alüviyal malzemeyi kısa zamanda sürükler ve arkasından kaya tabanını oymaya başlar. Oyulmanın gelişmesi ile birlikte doğal bir enerji kırma havuzu oluşur ve suyun enerjisi oyulma hacmi ile orantılı olarak kırılır. Bu sırada oyulmanın baraj gövdesine mesafesi ve derinliği, gövdenin ve diğer ek yapıların stabilitesini tehlikeye düşürebilir.

Oyulma çukurunun boyutları eşik yüksekliğine bağlı olduğundan, bir formül verebilmek için laboratuvar ve arazide geniş ölçüde teorik ve deneysel incelemelerin yapılması gerekir.

Bu çalışmada, oyulmanın en aza indirilmesi için gerekli eşik yükseklikleri araştırılmıştır.

2. BASAMAKLI DOLUSAVAKLAR

2.1 Genel Bilgiler

Basamaklı dolusavaklar gerçek mühendislik kurallarına uygun olmasa da yaklaşık 3500 yıldır kullanılmaktadır. İnsanoğlu bu yapıyı da doğadan esinlenerek yapmaya başlamıştır. Gold Creek ve New Croton barajlarının dolusavakları profesyonel manada ilk olarak inşa edildiğı düşünülen basamaklı dolusavaklardır. 19. yüzyılda Avrupa, Kuzey Amerika ve Avustralya’da tasarım tekniğı çok yaygın idi. 19. yüzyılın sonlarına doğru artık iyice anlaşıldı ki basamaklı dolu savaklar akım enerjisinin önemli bir kısmının kırılmasına yardımcı olmaktadırlar. Akım enerjisinin sönümlenmesi amacıyla inşa edilen dolusavaklar, akım enerjisinin dolusavak boyunca tedricen kırılmasını sağlamaktadırlar. Basamaklar, dolusavak boyunca çok büyük oranda enerjiyi sönümler ve mansap tarafta ihtiyaç duyulan enerji kırıcı yapıların boyutlarını ve maliyetini önemli derecede azaltır. Klasik dolusavaklar ile kıyaslandığında basamaklı dolusavaklarda toplam enerjinin ortalama %70-%80’inin sönümlenebileceğı ve kalan enerjinin kırılması için mansapta küçük bir hidrolik yapıya ihtiyaç duyulacağı görülür.

20. yüzyılın ilk yarısındaki hidrolik sıçramaların enerji kırılım karakteristikleri hakkındaki yeni gelişmeler basamaklı dolusavaklar hakkında ilgi uyandırmıştır. Düşüm havuzlarının tasarımı da enerji kırılımını desteklemektedir. Basamaklı dolusavaklar çok büyük enerjiyi alıp sönümler ve inşa maliyetleri ucuzdur. 1970’lerde yeni inşa materyallerinin gelişmesiyle birlikte basamaklı dolusavakların kullanımı yeniden gündeme gelmiştir. Bu yeni gelişmelere silindire sıkıştırılmış beton barajları (RCC) örnek gösterilebilir. Yeni inşa tekniklerinin gelişmesiyle basamaklı dolusavakların hidrolik özelliklerinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Basamaklı dolusavaklar ağırlık barajlarının mansap yüzü içine oldukça ekonomik ve pratik olarak teşkil edilebilir. Özellikle RCC barajlar için mükemmel bir dolusavak tipidir. RCC barajların dış tarafı klasik beton ile inşa edilmektedir. Mamba ve mansap yüzü bu şekilde inşa edildiğı için mansap yüzüne basamaklı dolusavak yapmak oldukça ucuz olmaktadır. Günümüzde basamaklı dolusavak denilince akla ilk önce RCC barajlar gelmektedir. Diğer yaygın uygulama kullanımı ise dolgu barajlarda ve acil durum dolusavaklarındadır. Her iki durumda da dikkatli bir yapısal ve hidrolik tasarımın yapılması şarttır. Baraj yapısının hizmet ömrü boyunca güvenliğinin sağlanması mühendislik hizmetlerinin birincil görevidir. Bu nedenle bunların tasarımında oldukça dikkatli olunması zorunludur. Bunların tasarımında deneysel

olarak hidrolik laboratuvarlarında ve bilgisayarlarda nümerik olarak basamaklı dolusavakların hidroliği araştırılmış ve projelendirilmesiyle ilgili kriterler sunulmuştur.

2.2 Basamaklı Dolusavakların Projelendirilmesi

Bir hidrolik yapısının projelendirilmesi; ekonomi, çevre, jeoloji, hidrolik, hidroloji, politika, sosyoloji vb. gibi birçok dış faktörün göz önüne alınmasını gerektiren çalışmaları ve uzun bir planlama sürecini içerir.

Bir dolusavağın projelendirilmesinde öncelikle yanıt aranacak sorular şunlardır:

- a) Yapının amacı nedir? (örneğin enerji sönmülmesi, suyun arıtılması, acil durum dolusavağı, taşkın önleme vb. gibi)
- b) Projelendirmedeki sınırlamalar nelerdir? (örneğin morfoloji, hidroloji, malzeme durumu, topoğrafya, jeoloji vb. gibi)
- c) Yapının maliyeti ne kadardır? (Hangi tip dolusavak daha ucuza maledilebilir?)

Eğer basamaklı bir dolusavak yapılmasına karar verilmişse, proje debisi ile maksimum ve minumum debilerde nap veya sıçramalı akımdan hangisinin tercih edilebilir olduğuna karar verebilmek için bütün bu parametreler dikkate alınmalıdır.

Bunun yanı sıra nap akımı ve sıçramalı akım rejimleri arasındaki geçiş akımı koşullarına engel olunmasına önem gösterilmelidir. Nap ve sıçramalı akım arasındaki geçiş akım koşullarında oluşan salınımlar istenmeyen ve hatta tehlikeli akım koşulları olup yapıda titreşimler meydana getirirler. Bu açıdan basamaklı dolusavakları boyutlandırırken tüm parametreleri göz önüne alarak, projelendirmenin yapılması gerekmektedir.

Nap akımından sıçramalı akıma geçiş için;

$$26^{\circ} < \theta < 55^{\circ} \text{ için } \frac{h_c}{s} = 0.91 - 0.14 \tan \theta \quad (2.1)$$

formülü en çok kullanılan parametredir.

2.2.1. Ön plan hazırlanması

Basamaklı dolusavakların planı birçok durumda geleneksel dolu savak yöntemleri ile aynıdır. En büyük debileri bulmak için taşkın analizi ve bu taşkın hacimlerinin değişimini ve yeniden meydana gelme olasılığını, dizayn debisinin seçimi, taşkın güvenlik kontrolü ve savak

yapısının kapaklı olup olmayacağına göre karar vermek basamaklı dolu savaklar için başlangıç planı hazırlanması amacıyla yaygın olarak yapılan işlemlerdendir.

2.2.2. Savak genişliğinin seçimi

Savak genişliğinin seçimi, barajın kret uzunluğu dikkate alınarak yapılır. Mansap nehir yatağı genişliği ve ayaklardan dolayı savak genişliğinin etkin azaltılma imkânı ve kenar duvar girişleri genişlik seçimi için etkili olan kriterlerden bazılarıdır. Bütün dolusavaklar için çok önemli bir değerde göz önüne alınan ve taşkın olayının sebep olduğu baraj gölü normal su seviyesinin üzerinde su seviyesinin yükselmesidir. Büyük debilerin bir sonucu olarak baraj su gölü seviyesi çok etkili bir şekilde artar. Kret de oluşan bu büyük yük spesifik debiyi tetikler. Şimdiye kadar geniş kretli basamaklı dolusavaklar da spesifik debi $q=25-30 \text{ m}^2/\text{s}$ civarında alınarak dizayn işlemleri yapılmıştır. Bu sınırlamanın en önemli nedeni kavitasyon zararlarından kaçınmaktır.

Üniform akım dikkate alındığında ve taban hava konsantrasyonu yeteri kadar büyük olarak sağlandığında $q_{\max}=140 \text{ m}^2/\text{s}$ nin üzerinde alınabilir. Fakat bu değer büyük basamak ve büyük yükseklik değerleri için sakıncalı olabilir. Yapılan araştırmalarda türbülansın yüksek bir derecesinde havalanma eğiliminin daha etkili olduğuna karar verilmiştir.

Dolusavak eğim açısı bazı durumlarda bir proje değişkeni olabilir. Dik olarak belirlenen bir eğimde yapı hacmi en aza indirilebilir fakat daha düşük eğim açılarında daha etkili enerji sönmülmesi sağlanabilir.

2.2.3. Savak kretinin tayini

Hidrolik tasarım kriterleri kret şeklinin kullanımına göre bütün dolusavakların projelendirilmesini kapsar. Basamaklı dolusavaklarda genellikle sabit yükseklikli basamaklardan küçük yükseklikli basamaklardan tedricen artan büyük yükseklikli basamaklar kullanılır. Amaç kret ile dolusavak arasında güvenli bir iletim elde etmektir.

Dolgu barajlarda kret oldukça geniştir bunun için geniş kret üzerinde sık sık ilave duvarlar inşa edilir. Bununla savaklama meydana getirilmiş olur. Akım zaten kenarlardan hava girişi sayesinde yeteri miktarda havalanmaktadır.

Eğer spesifik debi yeteri kadar büyük seçilirse dolusavak üzerinden akım havalandırılmış olur. Eğer bu pürüzsüz beton yüzey gibi geleneksel bir savak şekli seçilerek

yapılırsa ve bir havalandırıcı teğet noktasının yanında konumlandırılırsa havalandırma işlemi yapılmış olur.

Diğer mümkün bir çözüm ise kret üstünde düz kapak kullanımıdır. Böyle bir çözümün avantajı akımın havalandırılması ve baraj gölündeki su seviyesinin kontrol altında tutulabilmesidir.

2.2.4. Maksimum çıkış debisinin meydana gelmesi

Kret tasarımı tespitinden önce anahtar eğriler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapılabilir. Kapaklı yapılarda işletme kuralları raporlarla tespit edilir. Anahtar eğrisi, giriş hidroğrafi ve rezervuar hacim eğrisi, maksimum debinin çıkış hidroğrafının hesabı için gereklidir. Ve sonuç olarak elde edilen veriler spesifik debi ile karşılaştırılır.

2.2.5. Optimum basamak yüksekliğinin seçimi

Basamak yüksekliği, boşaltım kanalı üzerinde oluşması istenen akım rejimi ve sönümlenmesi beklenen enerji miktarına ulaşabilmek için debinin ve kanal eğim açısının bir fonksiyonu olarak seçilir. Seçilen basamak yüksekliği inşa prosedür raporları içersine alınır. RCC barajlarda çok sık olarak inşa edilen basamakların yükseklikleri 30 cm ve 120 cm arasında değişmektedir. Zaten dünyada yapılan basamaklı dolu savaklarda elverişli yüksekliğin de 60 – 120 cm olduğu görülmüştür. Model çalışmalarının sonuçları da göstermiştir ki büyük basamaklar hidrolik koşullar bakımından küçük basamaklara oranla daha avantajlıdır. Fakat büyük spesifik debilerde kavitasyon riski küçük basamaklara göre daha fazladır. Kaviteasyona göre zarar yönetimi eğimin küçük veya büyük olması ve tabandaki üniform hava konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak yapılır.

Ayrıca büyük basamaklar daha fazla enerji kırılımı sağlamak bakımından küçük basamaklara nispeten daha uygundur. Zaten 60 cm den daha küçük basamaklar tavsiye edilmemektedir.

2.2.6. Basamak uzunluğu ve kanal eğim açısının seçimi

Basamakların yerleştirileceği kanalın eğim açısı arazinin topoğrafyası veya kullanılacak inşaat metodu tarafından belirlenmediyse, kanal eğim açısı optimum akım koşullarını ve enerji sönümlenmesini sağlayacak şekilde seçilmelidir.

2.2.7. Mansapta açığa çıkan çözölmüş gaz miktarının hesabı

Bölgenin iklim koşulları ve suyun kimyasal bileşimi göz önüne alınarak yapının havalandırma etkinliği tahmin edilmelidir. Göz önüne alınması gereken en genel parametrelerden biriside budur.

2.2.8. Hava girişi

Serbest yüzeyin türbölans sınır tabakasına ulaştığı noktada, türbölansın derecesi yeteri kadar büyükse su akışının içine hava girmeye başlar. Bu nokta havalanma noktasının başlangıcı olarak isimlendirilir.

$$Z_i = L_i \cdot \sin \theta \quad 26^\circ < \theta < 55^\circ \text{ için} \quad \frac{Z_i}{s} = 4,93 * F_r^{0,84} \quad (2.2)$$

Burada; $F_r = \frac{q}{(g * \sin \theta * s^3)^{1/2}}$ olmak üzere froude sayısı

q: Birim debi (m²/s)

s: Basamak yüksekliği (m)

Ø: Dolusavak eğimi

Havalanmayan bölgenin uzunluğu için ise;

$$26^\circ < \theta < 55^\circ \text{ için} \quad L_i = \frac{q^{0,84}}{g^{0,42} * (\sin \theta)^{1,42} * s^{0,26}} \quad (2.3)$$

2.2.9. Yapısal dizayn dahil son şeklin tespiti

İlk önce dolusavağın temel boyutları ve şekline karar verilir. Detaylı yapısal dizayn daha sonradan ilave edilir. İnşa ve yapım aşamasında doğru pozisyonda karar verilmektedir. Donatılar hakkında kararlar alınmalıdır. RCC barajlar takviyesizdir ve basamak düşüşlerindeki donatının yerleştirme işlemi komplikedir. Bazen prefabrike takviye elemanları da kullanılır. Basamaklı dolusavaklar da yapılan deneyler gösterdi ki spesifik debinin uygulandığı akıma göre savaklanmanın meydana getirdiği gerilme basamaklar tarafından karşılanmaktadır. Bu kuralın

doğruluğunu ispatlamak amacıyla başka araştırmalarda yapıldı ve bunun büyük basamaklarda ve büyük debilerde daha geçerli olduğu görüldü.

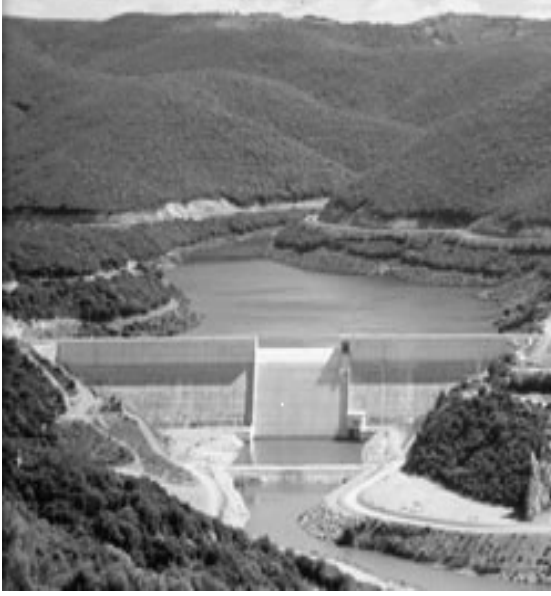
Basamak kenarları daima kritik öneme haiz noktalardır. Basamak kenarları savaklanmanın ardından hasar görebilir ve oldukça kötü bir görüntü ile karşılaşılır. Ayrıca bu zayıf nokta diğer olası zararların da başlangıç noktasıdır. Bunun önlenmesi amacıyla kenar üzerlerinde 2-3 cm lik takviye aşamaları yapılmaktadır.

Mansap kısmı kenar duvarları ve ayakların seçimi için giriş debisi azaltılmasının minimize olma karakteri oldukça büyük öneme haizdir.

2.3. Dünyadan Örnekler

Basamaklı dolusavaklar RCC ve dolgu barajlar üzerinden taşkın debilerini oldukça güvenli bir şekilde geçirebilirler. Maksimum spesifik debi günümüzde $25-30 \text{ m}^3/\text{s}$ civarında uygulanmaktadır. Eğer basamaklardaki havalandırmanın değeri artırılabilirse bu değerin artırılması muhtemeldir. Büyük basamaklar hidrolik performans açısından ele alındığında pozitif bir etkiye sahip oldukları söylenebilir.

Yapılan bazı yayınlarda basamak boyunca enerji kırılımının reel değeri abartılmaktadır. Verilen bu üst değerler kullanımı beğendirmek amacıyla. Her ne kadar yüksek oranda bir enerji sönümlenmesi mevcutsa da baraj ayakucuna bir düşüm havuzu yapılması esastır. Baraj gölü seviye eğrileri yeterince hassas olarak hazırlanmalıdır. Maksimum debinin varlığı enerji sönümlenmesi bakımından hassas bir durum ve bir tehlike başlangıcı olmayacak şekilde gerekli boyutlandırma işlemleri yeter derecede sağlıklı olarak hazırlanmalıdır. Rezervuar alanına gelecek su ile bağlantılı olan bütün yükseklik eğrilerinin tayininde azami gayret ve dikkat sarf edilmelidir. Çünkü bu kapasite ve baraj performansını doğrudan etkileyecek olan bir faktördür. Basamaklı dolusavaklar ile yapılmış barajlara örnek olarak aşağıda fotoğrafları da verilmiş olan Les Olivettes Barajı-Fransa, Choctaw Barajı-ABD, Gold Creek Barajı, Knellport Barajı, Stagecoach Barajı-ABD, Tache Barajı, Goulburn barajı-Avustralya gösterilebilir.



Şekil 2.1. Les Olivettes Barajı- Fransa



Şekil 2.2. Choctaw Barajı - ABD



Şekil 2.3. Gold Creek Barajı



Şekil 2.4. Stagecoach Barajı-ABD



Şekil 2.5. Knellport Barajı



Şekil 2.6. Tache Barajı



Şekil 2.7. Goulburn barajı – Avustralya

3. OYULMA

3.1. Bir Platformun Mansabındaki Oyulmalar

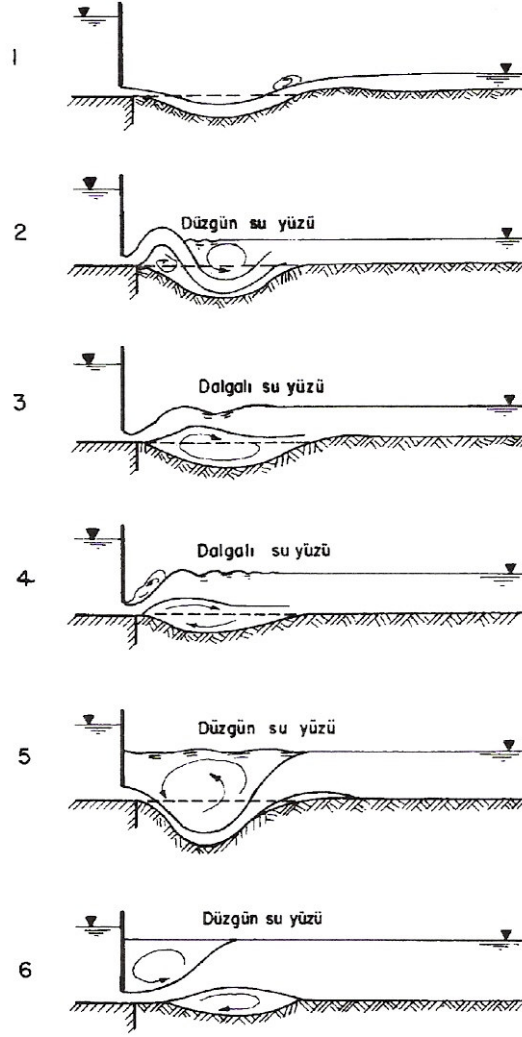
Bu bölümde, üzerinde batık veya serbest yüzeyli bir sıçramanın olduğu platformun oyulabilir nehir yatağına kadar uzandığı ve bu bölgede süper kritik akımın bulunduğu kabul edilerek oyulmalar incelenmiştir. Süper kritik akım koşullarını, dolusavak eşiğinden sonra deşarj kanalı üzerinde veya belirli bir su yükü altında çalışan kapak altı akımında da görmek olasıdır.

Süper kritik akımın bulunduğu yatay bir platformun mansabında oluşan oyulmanın formu batıklık, jetin enerjisinin sönümlenme katsayısı, platform ile talveg arasındaki kot farkı gibi faktörlere bağlıdır. Böyle bir platformun mansabındaki oyulma, bir kapak altı akımının oluşturacağı oyulma ile modellenenir. Kapak altı akımın batıklığının çıkıştaki jetin formu üzerine olan etkisi Şekil 3.1’de verilmiştir[1].

Serbest yüzeyli hidrolik sıçrama halinde oyulmanın nihai statik derinliği ise Şekil 3.2’deki grafik ile verilmiştir. Şekil 3.2’de verilen grafiğin denklemi ise;

$$\text{Log}\left(\frac{t}{h_1}\right) = \frac{Fr_1 - 2}{4,7} - 0,55 \cdot \text{Log}\left(\frac{d_{90}}{h_1}\right) \quad (3.1)$$

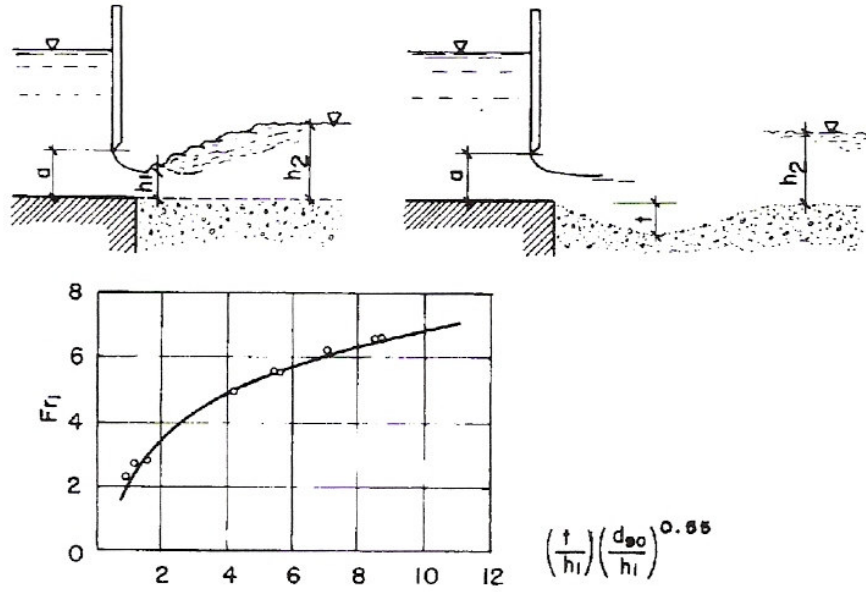
Bu oyulmalar genellikle platform üzerindeki düşük kuyruk suyu seviyesinde oluşur. Ancak yüksek kuyruk suyu seviyeleri, batık bir jetin enerjisinin platform sonuna kadar büyük oranda sönümleneceğinin garantisi olarak da alınmamalıdır. Oyulabilir bir yatak üzerinde batık su jetleri ile oluşan oyulmalar birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bunlardan Eggenberger [14] kapak altı akım koşulları için deneysel çalışmalar yapmış ve batık bir kapak altı akım jetinin oluşturduğu oyulma derinliği için;



Şekil 3.1 Batıklığın jetin formu üzerine etkisi

$$t + h_2 = 7,255 \cdot \frac{h^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \quad (3.2)$$

eşitliğini elde etmiştir.



Şekil 3.2 Valentin tarafından tespit edilen oyulmalar [22].

Bu eşitlik oyulma çukuru mansabında oluşan yığılmanın akım ile taşındığı koşullardaki nihai statik oyulma derinliğini vermektedir. Araştırmacılardan Müller [] ise Şekil 3.1’de görülen mansap su yüzü formlarından form 3 ve form 4 için oyulma derinliklerini aşağıdaki formüller ile tanımlamıştır. Burada H_o savak membasındaki su yükünü ifade etmektedir.

$$t + h_2 = w \cdot \frac{H_o^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{50}^{0,4}} \quad (3.3)$$

Burada nihai statik oyulma için

$w = 10,2$ (Tip3) (nihai statik limit)

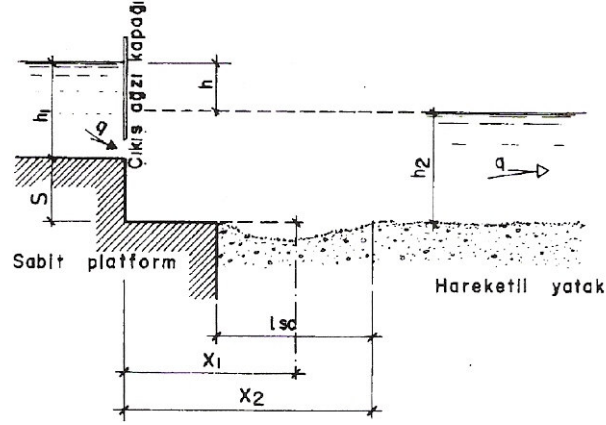
$w = 6,7$ (Tip 4) olarak belirlenmiştir.

Savak mansabındaki su yükü yerine memba su yüzü ile mansap su seviyesi arasındaki fark (h) kullanılarak nihai statik oyulma için

$$t + h_2 = w \cdot \frac{h_o^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{50}^{0,4}} \quad (3.4)$$

$w = 13,1$ (Tip3) (nihai statik limit)

Shalash'ın araştırmasında, batık veya serbest yüzeyli hidrolik sıçramanın platform üzerinde mi yoksa nehir yatağı üzerinde mi oluştuğu açık olarak belirtilmemiştir. Bu çalışmanın yanı sıra Shalash Şekil 3.4'te görülen koşullar için de çalışmalar yapmış ve aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.



Şekil 3.4 Düşük bir platformdan sonraki oyulma. [8]

$$t + h_2 = 9,65 \cdot \frac{h^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \cdot \left(\frac{l_{\min}}{l} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{S}{S_{\min}} \right)^{0,6} \quad (3.8)$$

Burada $S_{\min} = 0,2 \cdot l_{\min} = 0,3h$ olarak alınırsa

$$t + h_2 = 25,3 \cdot \frac{h^{0,5} \cdot q^{0,6}}{d_{90}^{0,4}} \cdot \left(\frac{S}{l} \right)^{0,6} \quad (3.9)$$

elde edilir.

3.1.1 Bir Enerji Kırıcı Havuz Mansabındaki Oyulmalar

Bu bölümde düşü havuzu içerisinde oluşan bir hidrolik sıçramadan sonraki oyulmalar incelenmiştir. Bu durum için akımın bir dolusavak deşarj kanalından geldiği veya serbest düşen bir su jeti olduğu kabul edilmiştir.

Novak [23]; Veronese [7], Jaeger[24] ve Schoklitsch [2] gibi araştırmacıların deneysel çalışmalar ile elde ettikleri sonuçların ortalamasına göre düşü havuzları, jet oyulmalarını %50

oranında, Eggenberger'in elde ettiği sonuçlara göre de %12 oranında azaltmaktadır. Novak [23] daha sonra yayınladığı makalede enerji kırıcı düşü havuzlarının mansabındaki oyulmayı da [24]

$$t + h_2 = k \cdot \left[6 \cdot h^{0.25} \cdot q^{0.5} \cdot \left(\frac{h}{d_m} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (3.10)$$

eşitliği ile ifade etmiştir. Burada;

Sıçramanın batıklık değeri:1 ise $k = 0,65$

Sıçramanın batıklık değeri:1,6 ise $k = 0,45$ olmaktadır.

Prof. Dr. Çataklı [12] ise düşü havuzu sonundaki oyulmalar için aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.

$$t + h_2 = k \cdot \frac{q^{0.6} \cdot (h + h_2)^{0.2}}{d_{90}^{0.1}} \quad (3.11)$$

Buradaki k katsayısı eşiksiz havuzlar için 1,62; eşikli havuzlar için eşik formuna bağlı olarak 1,42 – 1,53 arasında değerler almaktadır.

Mansaptaki oyulmalara karşı düşü havuzu enkesitine havuz tabanından yukarıya doğru yerleştirilen kirişlerin etkisi de araştırılmıştır. Sonuç olarak bu kirişlerin akımın enerjisinin sönmülenmesinde etkili olmalarına rağmen tabandaki hızları arttırmaları nedeni ile oyulmaları azaltıcı etki göstermedikleri tespit edilmiştir.

Araştırmacılarından Hay ve White [11] ise akıma karışan havanın oyulma derinliğinin azalmasına olan etkisi üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda akıma hacim olarak %15,20 oranında karışan havanın, eşikli bir düşü havuzu mansabındaki oyulmaları %5 ile %10 arasında azalttığı sonucu elde edilmiştir.

3.2 Su Yastığına Dalan Su Jeti İle Oluşan Oyulmalar

Su yastığına dalan bir su jetinin oluşturduğu oyulmalar üzerine yapılan araştırmalar sonunda birçok deneysel ve yarı deneysel formül elde edilmiştir. Bunlardan bazıları genel uygulamalar için diğerleri ise özellikle sıçratma ucu ile sona eren dolusavak deşarj kanalları için önerilmektedir. (Tablo 3.1).

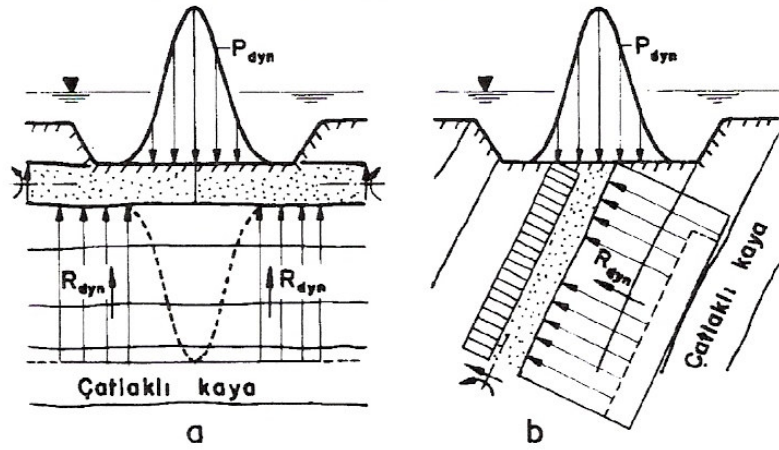
Tablo 3.1 Oyulma formüllerinin sınıflandırılması

Yöntem	Genel Uygulamalar İçin	Sıçratma Uçlu Dolusavaklar İçin
Deneysel	Kotoulas	Martins B
-	Veronese A, B	Chain
-	Schoklitsh	Rubinstein
-	Wysgo	Taraimovich
-	Smoljaninov	Mpiri
-	Patrashew	
-	Jaeger	
-	Tschopp-Bisaz	
-	Studenichikov	
-	Martins A	
-	Machado	
-	Mikhalev	
Yarı Deneysel	Mirtskhulava A, B, C	
-	Zvorykin et al	

3.2.1 Oyulma Oluşumunun Mekanizması

İşletmeye açılan bazı barajlardaki gözlemlerde, ilk taşkında birkaç saat içinde önemli ölçüde oyulmalar olduğu ve mansapta oyulma çukurundan koparılmış ve boyutları metre ile ifade edilebilen çok büyük kaya bloklarının bulunduğu tespit edilmiştir. Kariba barajında iki defa yedişer haftalık savaklanmadan sonra ortaya çıkan 26 metrelik oyulma derinliği sadece yüzeysel erozyondan dolayı oluşmuştur. Bu kadar kısa zamanda oluşan bir oyulma çukurunda su jetinin çatlaklı kaya taban üzerine uyguladığı dinamik basınç çok etkili bir rol oynamıştır. Su yastığı içine dalan bir su jetinin dinamik basınç etkisi, büyük su derinliklerine kadar ulaşabilmektedir.

Su jetinin dinamik basınç etkisi şematik olarak iki ayrı durum için Şekil 3.5'te verilmiştir. Dinamik basınç, şekilde görülen yarıklı ve boşluklu tabakalara bir hidrolik pres gibi etkiyerek parçalanmalara yol açar. Taban kayası kırılır, yapısal özelliklerini ve kohezyonunu kaybeder ise, bundan sonra düşen jetin oyma enerjisine karşı direnci de o ölçüde kaybolur. Kopan kaya parçacıklarının oyulma içerisindeki hareketi dinamik basınç etkisine eklenerek tabana etkiyen yükü daha da arttırır.



Şekil 3.5 Dinamik jet basıncının oluşturduğu kuvvetler

Oyulma derinliği ve şekli, genel olarak nehir tabanına etkiyen hidrolik parametrelere, nehir tabanının karakteristiklerine ve zamana bağlıdır. Akımın hidrolik parametreleri; akımın debisi, hızı, jetin dalma açısı, jetin havalanması, parçalanması ve mansap su derinliği olarak alınabilir. Söz konusu bu akım parametreleri, oyulma çukuru içindeki akımın basınç salınımlarının genlik ve frekanslarını belirler. Bu basınç kayaya etkir ve bu da oyulma şiddetini tayin eder.

3.2.2 Kaya Tabanındaki Oyulma Oluşumu

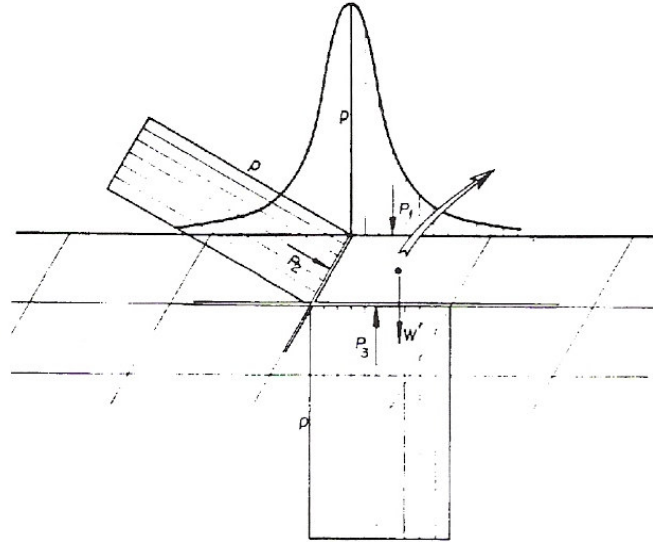
Yüksek düşülü barajların dolusavağından çıkan bir su jeti, mansap taraftaki su yastığına ulaşınca kadar düşü mesafesi boyunca hava ile karışarak parçalanmakta ve su-hava karışımı olarak mansap suyuna dalmaktadır. Su jeti mansap yastığına ulaştığında önemli ölçüde bir kinetik enerjiye sahiptir. Mansap su yastığının derinliği ise genellikle dalan jetin enerjisini sönmüleyecek derinlikte değildir. Jetin enerjisini tümüyle sönmülemek için pratikte sağlanması olanaksız olan büyük bir derinlik gereklidir. Pratikte mansap su yastığı içerisindeki jet çekirdeği genellikle kaybolmamış durumdadır. Jetin çevresinde mansap suyu ile jet arasındaki yüksek sürtünmeden dolayı derinlik boyunca gelişigüzel çevrıntiler oluşur. Bu çevrıntiler jet ile birlikte mansap suyu içinde yol alır. Akımın bu şekilde karışımı jet enerjisinin sönmülenmesini sağlar. Mansap su yastığı içine makro ve mikro ölçüde şiddetli türbülans olur.

Tabana ulaşan jet ve çevresindeki makro çevrıntiler, taban üzerindeki dinamik basıncın maksimum ve minimum iki değer arasında gelişigüzel değişmesine yol açar. Tabana çarptıktan

sonra yönü saptırılan jet nedeniyle taban civarında ve tabana paralel yönde yüksek akım hızları oluşur.

Nehir tabanı üzerine genellikle relatif olarak ince bir alüvyon tabakası bulunur. Bu tabaka dolusavağın ilk çalışması sırasında kısa zamanda yıkanır. Jet doğrudan doğruya taban kayasını oyma eylemine geçer. Tabandaki kayanın oyulması iki ayrı şekilde olabilir. Birinci tür oyulma kayanın yüzeysel aşınması biçimindedir. Taba yüzeyini yalayan çok yüksek hızlı akım, kaya yüzeyindeki düzensizliklerin de etkisi ile aşınmaya yol açar. Ancak bu tür bir oyulma çok uzun bir sürede gerçekleşir.

Halbuki gözlemler, dolusavakların kısa süreli çalışmasından sonra dahi kaya taban içinde oyulmaların oluştuğunu göstermiştir. Bu da oyulmanın oluşmasının yüzeysel aşınmanın ötesinde başka bir nedene dayandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 3.6 Dinamik basıncın çatlaklar boyunca etkisi

Kaya kütleleri çatlakların neden olduğu derzlerle bloklu bir yapıya sahiptir. Yüksek düşümlü dolusavaklardan düşerek tabana ulaşan akımın hızı, su altında relatif olarak hafiflemiş olan kaya bloklarını yerinden koparak harekete geçirir. Dolusavak mansabındaki oyulmaların asıl nedeni budur. Dolusavak jetinin çatlaklı kayada oluşan bir tabanda çatlaklar boyunca etkimesi şematik olarak Şekil 3.6'da verilmiştir.

Oyulmanın gelişimi boyunca tabana etkileyen basınç kuvveti zaman içinde salınır. Kaya blokları arasındaki çatlaklar kimyasal bağlayıcılar veya doğal çimento ile dolularak bağlanmış ise

bu bağlantı ortada kalkar. Basınç, bir hidrolik kama gibi derz yüzeylerine etkir. Bloklar su altında $(\gamma_s - \gamma)$ özgül ağırlığı ile relatif olarak hafiflemiştir.

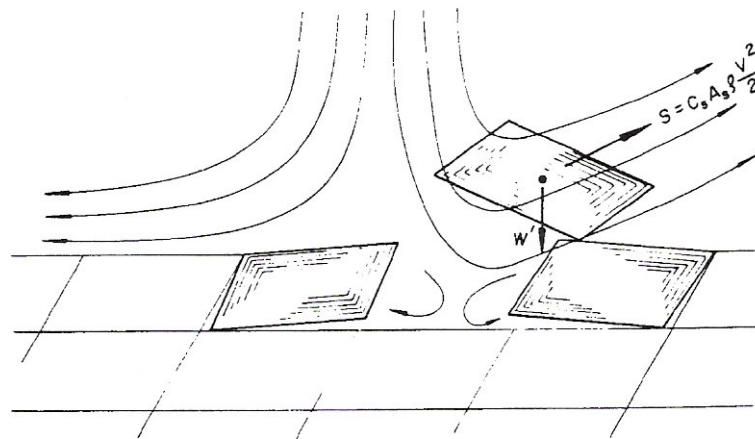
Basınç kuvveti gerekli sıklığa ulaştığında, derzleri boyunca etrafı ile bağlantısı kalmamış olan bloklar yerinden hareket edebilir. Yerinden hareket eden blokların bir kısmı önce oyulma çukuru içerisindeki çevrim hareketine girer ve oyulmaya yardımcı olur. Daha sonra akımın dinamik etkisi ile mansaba taşınır (Şekil 3.7). Bir su jeti etkisi altında tabana etkiyen dinamik kuvvetin büyüklüğü hakkında bir fikir edinebilmek için örneğin $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ 'lük bir blok düşünelim. Jet çekirdeği kolaylıkla tabana kadar ulaşabildiğinden akım hızı olarak $V = V_0$ alınabilir. Bir bloğa etkiyen dinamik kuvvet:

$$S = C_s \cdot A_s \cdot \rho \cdot \frac{V_0^2}{2 \cdot g} \quad (3.12)$$

dir. $C_s \cong 1$, $A_s = 9 \text{ m}^2$ alınırsa $V \cong V_0 = 30 \text{ m/s}$ 'lik hız için $S = 400 \text{ ton}$ olur. Söz konusu bloğun su altındaki ağırlığı

$$W' = (\gamma_s - \gamma) \cdot D^3 \quad (3.13)$$

ve $\gamma_s - \gamma = 1,7 \text{ ton/m}^3$, $D=3 \text{ m}$ değerleri ile $W'=15,3 \text{ ton}$ bulunur. Sürüklenme kuvvetinin direnç kuvvetine olan relatif oranı bir defa herhangi bir şekilde yerinden oynayan iri blokların kolaylıkla taşınabilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.7 Jetin kaya bloklarını sürüklemesi

Bloklar yerlerinden söküldükten sonra oluşan oyulma çukuru içinde, adeta ağırlıksız gibi akımın çevrintisine kapılarak hareket eder. Bu sırada gerek oyulma çukurunun çevresine ve gerekse hareketli olan diğer bloklara çarparak (tıpkı bir konkasör gibi) daha küçük parçalara bölünür. Yeterli küçüklüğe eriştikten sonra da oyulma çukurunu terk ederek bir bölgeye yığılır veya akarsu boyunca taşınırlar.

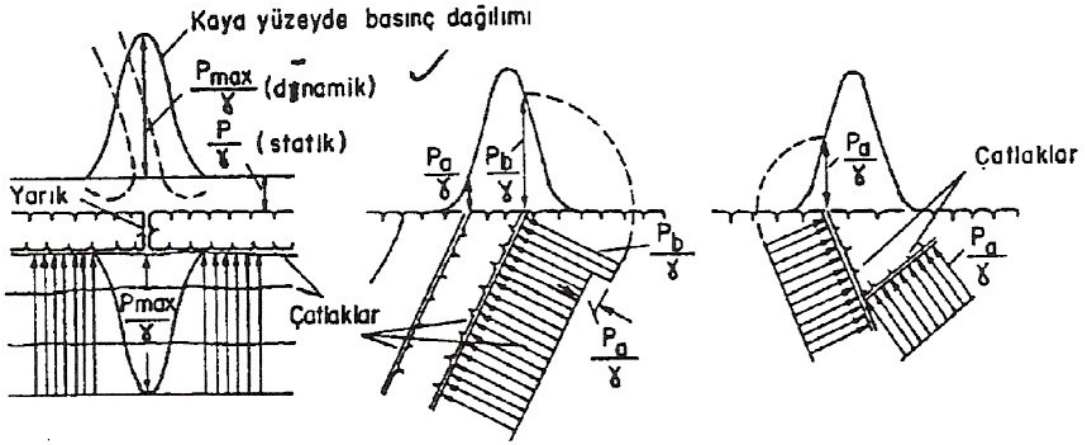
3.2.2.1 Kaya Tabanda Oyulmanın Gelişimi

Kaya tabanların su jeti altındaki oyulmaya karşı direncinin hesabı için kayadaki katmanlaşmanın, derz veya yarıkların olup olmadığının ve çatlakların büyüklük ve doğrultularının bilinmesi gereklidir.

Baraj yerinde yapılan jeolojik araştırmaların dolusavaktan bırakılan akımın mansapta dinamik yükler olarak etkili olduğu bölgeler için de yapılması gereklidir. Su jetinin düştüğü bölgede oluşan hidrodinamik basınçlar bazı durumlarda baraj temeli stabilitesini de etkileyebilir.

Kaya katmanlarının elastisite modülleri, sıkışmaya karşı dirençleri ve deplasmanları en sağlıklı şekilde yerinde yapılan etütler ile tespit edilebilmektedir. Bir kaya taban üzerine etkiyen jet, önce tabandan küçük kaya parçalarını koparmaya başlar. Bu parçacıkların büyüklüğü kayadaki derz ve yarıkların karakteristiklerine bağlıdır. Kaya tabanındaki çatlak ve yarıkların farklı özellikler göstermesi su jetinin oluştuğu basınç dağılımını ve dolayısıyla oyulma oluşumunu da etkilemektedir. (Şekil 3.8).

Oyulma çukurunun oluşması üç ana bölümde incelenebilir. İlk aşama kaya parçacıklarının harekete geçirilmesidir. Bu aşamada kayadaki derzlerin aşınmadaki etkisi çok fazladır ve kayanın mukavemeti fazla önem taşımaz. Kayanın bir parçasını harekete geçirmek için akımın kuvvetinin onun ağırlığından ve etrafındaki masif kohezyondan oluşan kuvvetlerden büyük olması gerekir.



Şekil 3.8 Bir kaya zeminde çatlak ve yarıkların çeşitli durumları için su jeti tarafından oluşturulan hidrodinamik basınç dağılımı.

Bu koşullar $P > G + P_c$ şeklinde ifade edilir.

Burada;

P = Akımın hidrodinamik yükü,

G = Kaya parçacığının sudaki ağırlığı,

P_c = Parçacık ve masif kütle arasındaki kohezyon kuvveti.

Oyulma çukurunun derinliği arttıkça taban akımının enerjisi azalır. Ancak üstteki akımın enerjisi hala hidrodinamik basınç salınımları yaratacak kadar büyüktür. Bu koşullar ise $P \geq G + P_c$ olarak ifade edilir.

Kaya malzeme tabakası üzerinde yer alan küçük parçacıklar, akım hızındaki salınımlar ile harekete geçirilir. Bu hareket çatlakların genişlemesine yüzeyin aşınmasına neden olur. Çatlaklar genişledikçe parçacıkların hareketlenmesi artar ve sonuçta daha çok çatlak oluşur. Küçük parçacıklar akımla süpürülürler. Daha sonra akım, kaya parçacıklarının ulaştıkları denge konumunu bozamaz. ($P > G + P_c$ durumu)

Daha sonra oyulma mekanizması, daha önce kopan, parçalanmış kayaların aşındırma malzemesi olarak kullanılması ile sürer. Oyulma çukuru yan yüzleri de sürekli olarak aşınır. Bu üçüncü aşama oyulmanın en fazla olduğu safhadır.

Oyulmanın ikinci ve üçüncü safhalarında kayanın mukavemeti önemli rol oynar. Yumuşak kayaların oyulması mikro çatlaklar boyunca parçacıkların ayrılması şeklinde oluşur. Bu sağlam ve büyük parçalar aşınmanın daha etkili oluşmasında önemli rol oynarlar.

Oyulmanın yukarıda açıklanan üç değişik aşamasında oyulmanın derinliği ve oluşum hızı değişir. Karakaya, Keban, Frachad, Kariba ve Picote barajlarında oyulma derinliğinin

zamana bağılı olarak değişimi Şekil 3.9’da verilmiştir. Bu grafik aynı zamanda oyulma gelişiminin yukarıda anlatılan değişik safhalarını da karakterize etmektedir.

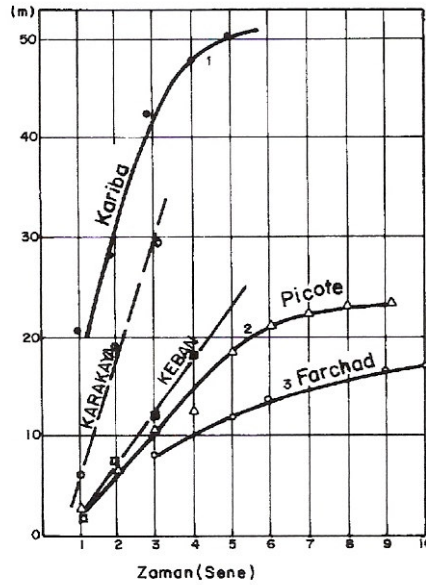
3.3 Genel Uygulamalar İçin Deneysel Formüller

3.3.1 Kotulas Formülü

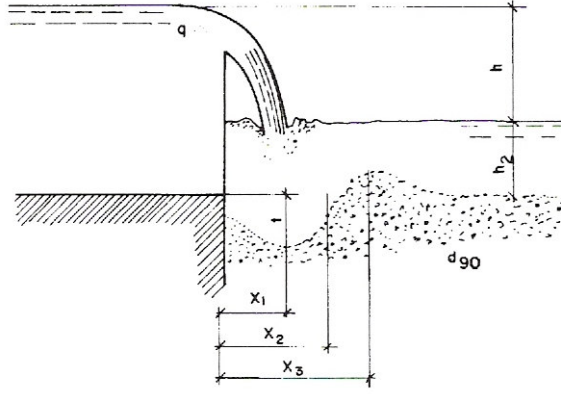
$$t + h_2 = 0,78 \cdot \frac{h^{0,35} \cdot q^{0,7}}{d_{90}^{0,4}} \quad (3.14)$$

Kotulas’ın geliştirdiği bu deneysel eşitlikte d_{90} ’ın birimi m cinsinden alınmış ve ilgili diğer semboller Şekil 3.10’da verilmiştir. Bu eşitlik serbest düşülü su jetinin kohezyonsuz malzemenin bulunduğu nehir yatağında oluşturacağı oyulma derinliği hesabı için geliştirilmiştir. Nihai durumdaki oyulma çukurunun nihai uzunluğu ise aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmiştir.

$$l_{sc} = 2,7 \cdot \frac{h^{0,45} \cdot q^{0,9}}{g^{0,45} \cdot d_{95}^{0,8}} \quad (3.15)$$



Şekil 3.9 Oyulmanın zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 3.10 Serbest düşülü jet oyulması.

Oyulma derinliğinin maksimum olduğu nokta ile serbest düşülü su jeti çıkış noktası arasındaki uzaklık

$$x_1 = 3,9 \cdot \frac{h^{0,27} \cdot q^{0,54}}{g^{0,27} \cdot d_{95}^{0,08}} \quad (3.16)$$

formülü ile verilmiştir. ($d_{95} \approx 1,40 \cdot d_{90}$)

3.3.2 Studenichikov Formülü

Oyulma derinliği ile ilgili olarak Studenichikov [13] tarafından ise aşağıda verilen eşitlik elde edilmiştir.

$$t + h_2 = \left(1,5 + k \cdot \frac{h_c^2 \cdot n}{h_0^2} \right) \cdot \left(\frac{0,8942 \cdot (\xi \cdot q_0)^{0,8}}{q^{0,40} \cdot d_m^{0,200}} \right) \quad (3.17)$$

Burada

B_2 = Nehir yatağı genişliği

B_0 = Dolusavak kretindeki efektif genişlik

$B_2 > 2,5 \cdot B_0$ için $k = 0,1$

$B_2 = B_0$ için $k = 0,2$ alınır

h_c = Su jetinin kritik derinliği

q = Çarpma kesitindeki birim debi

q_0 = Jetin çıkıştaki birim debisi

d_m = Yatak malzemesi ortalama dane çapı

h_0 = Akım derinliği

n = Jetin yayılmasını ve hava girişini karakterize eden katsayı $n > 0,7$ olmalıdır.

Eğer jet oldukça birleşik ve yoğun ise $n = 1$ alınır.

$$\xi = \frac{q}{q_0}$$

Bu formül aşağıdaki sınırlar içinde geçerlidir.

$$t + h_2 < 10^4 \cdot d_m \text{ ve } \left(\frac{h_c}{h_0} \right)^2 > 5$$

Studenichikov formülü özellikle jetin yanal açılımından dolayı oyulma derinliğindeki azalmayı dikkate almaktadır. Ancak Martins [] Studenichikov'un deneysel çalışmalarında kullandığı en büyük ortalama dane çapının (d_m) yaklaşık 16 mm olduğuna, bazı çalışmalarının ise $d_m = 0,2$ mm'lik ortalama dane çapları ile gerçekleştirdiğine dikkati çekmiştir.

3.3.3 Martins A Formülü

Martins, model benzeşimi kaya küplerle yapılan yataktaki oyulmalar için aşağıdaki eşitliği elde etmiştir. Burada a küp malzemenin kenar uzunluğudur.

$$t = 0,14 \cdot N + 0,7 \cdot h_2 - \frac{0,73 \cdot h_2^2}{N} \quad (3.18)$$

$$N = \sqrt[7]{\frac{Q^3 \cdot h^{\frac{3}{2}}}{a^2}} \quad (3.19)$$

t = Oyulma derinliği (m)

h_2 = Mansap su derinliği (m)

h = Mamba ve mansap su seviyeleri arasındaki düşey mesafe (m)

(3.11) nolu denklemin diferansiyeli, $h_2 = 0,48.N$ kuyruksuyu derinliği değerinde oyulmanın maksimuma ulaşacağı sonucunu vermektedir.

3.3.4 Machado Formülü

Su jetinin kaya tabanda oluşturduğu oyulmalar ile ilgili olarak Machado tarafından elde edilen iki eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$t + h_2 = 1,35 \cdot \frac{C_v^{0,5} \cdot q^{0,5} \cdot h^{0,3145}}{d_{90}^{0,0645}} \quad (3.20)$$

Burada;

d_{90} = Yatak malzemesi dane çapı (m)

C_v = Jetin yörüngesi boyunca havalanması ile ilgili bir katsayı

$t + h_2$ = Kuyruksuyu seviyesinden itibaren oyulma derinliği (m)

Aşağıda eşitlik (3.12) nolu eşitliğin nihai oyulma derinliğini veren şeklidir.

$$t + h_2 = 2,98 \cdot C_v^{0,5} \cdot q^{0,5} \cdot h^{0,25} \quad (3.21)$$

3.3.5 Veronese Formülü

Veronese yaptığı çalışmalar sonunda nihai oyulma derinliği hesabı için dikkate alınan birçok parametre arasından en önemlilerini birim debi ve toplam su yükü olarak tespit etmiştir. Bunun yanı sıra oyulmanın rezervuar seviyesi ile kuyruksuyu seviyesi arasındaki farktan daha çok birim debiye bağlı olduğunu ileri sürmüştür.

Veronese formülü, serbest düşümlü düşey doğrultudaki bir jetin mansap su yastığına daldığı koşullar için geliştirilmiş olup nihai oyulma derinliğinin pratik olarak hesabında en çok kullanılan formüllerden birisidir.

$$t + h_2 = 1,9 \cdot h_t^{0,225} \cdot q^{0,54} \quad (3.22)$$

Burada;

$t + h_2 =$ Kuyruksuyu seviyesinden itibaren maksimum oyulma derinliği (m).

h_i = Serbest düşülü dolusavaklarda kuyruksuyu seviyesi ile rezervuar seviyesi arasındaki kot farkı. Sıçratma uçlu dolusavaklar için rezervuar ve sıçratma ucu arasındaki yük kaybı, seviye olarak bu farktan çıkarılmalıdır.

$q =$ Birim debi (m^2 / s)

olarak tanımlanmıştır.

Veronese yaptığı model çalışmalarında giderek daha küçük dane çaplı malzeme kullanmış ve dane çapının küçülmesinin nihai oyulma derinliğini etkilemediğini tespit etmiştir. Veronese, prototipteki büyük kaya blokların, zamanla parçalanarak jet tarafından harekete geçirilebileceğini tespit etmiştir. Bu nedenle Veronese formülü zaman ve malzeme çapı parametrelerini içermemektedir.

Bu formül serbest düşen jetler için elde edilmiştir. Sıçratma ucundan çıkan jetler mansap suyuna genellikle yatay $20 - 40^\circ$ 'lik bir açı yaparak dalar. Model çalışmaları sonucunda bu tip jetlerin yarattığı düşey oyulma derinliğinin Veronese formülü ile hesaplanan değerden daha küçük olduğu belirlenmiştir.

Hesaplanan değerlerin modelde elde edilenden daha büyük olması jetin daldıktan sonra da eğrisel hareketini devam ettirdiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra jet çıkış açısının genellikle sıçratma ucu çıkış açısından küçük olması, maksimum oyulmanın olduğu uzaklığın daha kısa ve oyulma derinliğinin daha az olması sonucunu doğurmaktadır. Veronese formülü bazı araştırmacılar tarafından düzenlenerek sıçratma eşikli jetler için de kullanılabilir duruma getirilmiştir.

3.3.6 Martins Formülü

Martins, serbest düşülü jetlerin kaya zeminlerde oluşturduğu oyulma derinliğini hesaplayabilmek amacıyla laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yapmıştır [15]. Deneyler özellikleri zamana göre değişmeyen ve hava karışimsız kompakt bir jet ile dikdörtgen en kesitli bir kanal içinde yapılmış ve tabana bloklar yerleştirilmiştir. Deney setine elle yerleştirilen blokların sıkışması kontrol edilememiştir. Oyulmanın hemen mansabında oluşan önemli miktardaki yığılma hemen uzaklaştırılmamıştır. Bu çalışmada toplam 90 adet deney yapılmış olup deneylerde 3 ayrı jet çarpma açısı, iki ayrı blok boyutu ve beş ayrı su yastığı derinliği kullanılmıştır.

Deneysel oyulma derinliği denklemi:

$$\frac{f}{e} = 0,70 + 0,28.N_e - \frac{0,36}{N_e} \quad (3.23)$$

olarak saptanmıştır.

$$N_e = \left(\frac{\rho.Q}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{7}} \cdot \left(\frac{H}{g} \right)^{\frac{3}{14}} \cdot \frac{1}{e.a^{\frac{2}{7}}} \quad (3.24)$$

f = Tabanın başlangıç konumundan itibaren ölçülen oyulma derinliği

Q = Toplam debi

H = Düşü yüksekliği

α = Jetin mansap suyuna çarptığı bölgede yatayla yaptığı açı

e = Mansap su yastığı derinliği

a = Küp blokların kenar uzunluğu

ρ_s = Blokların birim kütlesi

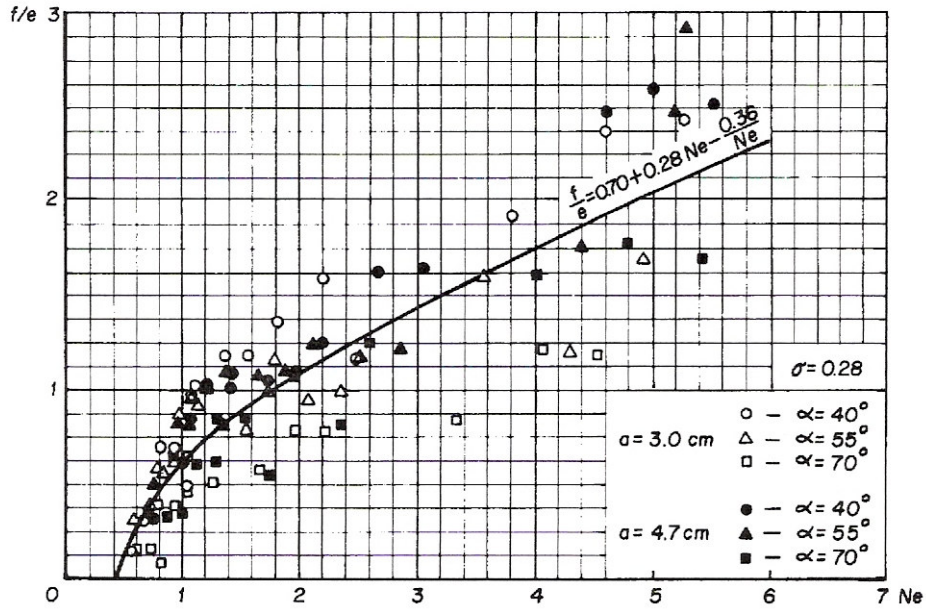
ρ = Suyun birim kütlesi

g = Yerçekimi ivmesi

Elde edilen deney sonuçları (3.15) bağıntısı ile Şekil 3.11’de verilmiştir. (3.23) eşitliğindeki boyutsuz parametrelerin değişim aralığı:

$$N_e = 0,5 - 5,5 \quad ; \quad \frac{f}{e} = 0,1 - 3 \quad ; \quad \alpha = 40^\circ - 70^\circ$$

olup bu eşitlik yukarıda belirtilen sınırlar içinde geçerlidir.



Şekil 3.11 Maksimum oyulma derinliği [15].

3.4 Jet Enerjisinin Sönümüne Bağlı Olarak Oyulma Derinliği

Oluşabilecek en derin oyulmanın sınırı, jetin enerjisinin oyma yapamayacak bir düzeye inişi ile belirlenebilir. Bu düşünceden hareketle enerjinin tamamen sönümlendiği hareket için:

$$\frac{E}{E_0} = 0 \rightarrow y = \infty$$

bulunur. Teori, difüzyon olayının olduğu bütün derinliği kapsadığından enerjinin sönümü için $y = \infty$ derinliğini vermektedir. Ancak bu durumdan difüzyon olayının sona ermesi için sonsuz bir derinliğe gerek olduğu anlamı çıkmamalıdır. Pratik olarak difüzyon belirli bir derinlikte sona erer.

Hartung ve Hausler [5] yapmış oldukları deneylere dayanarak, dairesel en kesitli jetlerin difüzyon olayını kapsayan teoremin $y \cong 20D_0$ derinliğine kadar geçerli olduğunu saptamışlardır. Bundan sonraki derinliklerde, hala mevcut olan hız ve basınçlar önemsiz olup derinlik artışı ile ilişkisi kurulamayacak mertebededir.

Cola [6]'nın yapmış olduğu laboratuvar çalışmalarına göre dikdörtgen enkesitli jet halinde, difüzyon olayının teorik olarak incelenebileceği bölge $y \cong 40B_0$ olarak kabul

edilmektedir. Yukarıdaki bağıntılara dayanılarak, proje mühendisleri için olayın en kısa yoldan belirlenebilmesini sağlayabilecek formüller Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Dikdörtgen ve daire kesitli jetlerin karakteristikleri

Jet Enkesiti	Dikdörtgen jet	Dairesel Kesitli
Jetin çekirdek uzunluğu	$y_k \cong 5.B_0$	$y_k \cong 5.D_0$
Çekirdek sonuna kadar sönmölenen enerji	$\Delta E \cong 0,2.E_0$	$\Delta E \cong 0,3.E_0$
Jetin ulaştığı mesafe	$y_E \cong 40.B_0$	$y_E \cong 20.D_0$
Jetin ulaştığı mesafe sonundaki sönmölenen enerjisi	$\Delta E \cong 0,7.E_0$	$\Delta E \cong 0,85.E_0$

Tablo 3.2’de B_0 ile dikdörtgen en kesitli ve D_0 ile dairesel en kesitli jetlerin mansap suyu seviyesindeki kalınlık ve çapları gösterilmiştir.

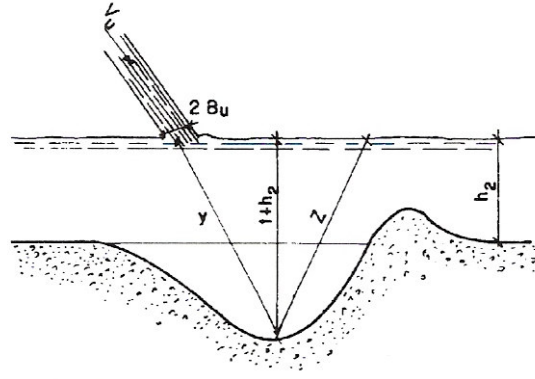
3.5 Genel Uygulamalarda Kullanılan Yarı Deneyisel Formüller

Bu bölümde verilen eşitlikler akımın oyulma çukuru içerisindeki davranışının yarı deneysel analizine dayanmaktadır. Burada yapılan en önemli kabul, akımın malzemeyi oyulma çukurunun mansap ucundaki yığılma bölgesinin daha ötesine taşıyamadığı durumda, oyulma gelişiminin sona ereceğidir. Bu durum, oyulma çukuru içerisindeki yatay hız bileşenine bağlı olarak jetin dalma açısını önemli bir parametre haline getirmektedir.

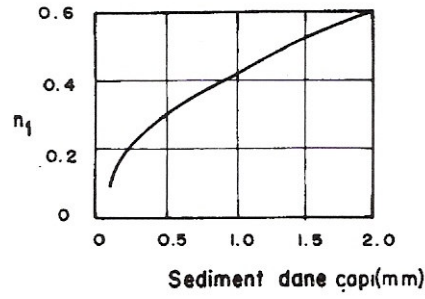
3.5.1 Mirtskhulava Formülü

y ve z eksenleri doğrultusundaki akım hızlarını da göz önüne alan Mirtskhulava [16] kohezyonsuz malzemedeki oyulma derinliği hesabı için aşağıdaki eşitliği geliştirmiştir (Şekil 3.12).

$$t + h_2 = \left(\frac{3\eta.V_u.(2.B_u)}{w} - 7,5(2.B_0) \right) \cdot \frac{\sin \theta'}{1 - 0,175 - \cot \theta'} + 0,25.h_2 \quad (3.25)$$



Şekil 3.12 Mirtskhulava formülündeki oyulma parametreleri [16].



Şekil 3.13 η_1 düzeltme katsayısı.

3.17 eşitliğindeki η ortalama hıza göre anlık maksimum hız katsayısı değeri prototip için $\eta = 2$, modeller için $\eta = 1,5$ alınmaktadır. w ise bir danenin çökelme hızıdır.

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot g (\gamma_s - \gamma) \cdot d_{90}}{1,75 \cdot \gamma}} \quad (3.26)$$

γ_s = Malzemenin özgül ağırlığı

γ = Hava/su karışımının özgül ağırlığı

Mirtskhulava jet giriş genişliğini

$$2 \cdot B_u = \frac{0,8 \cdot q}{V_u} \quad (3.27)$$

olarak vermiştir.

$$V_u = \theta \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.28)$$

Burada θ genellikle 1'e eşit alınır. γ 'nın hesabı için akıma hava karışımı etkisi dikkate alınarak aşağıdaki formül verilmiştir.[16]

$$\gamma = \left(1 - 0,18 \cdot V_0^{\frac{2}{5}} \right) \cdot \gamma_{su} \quad (3.29)$$

Mirtskhulava tarafından verilen (3.17) nolu eşitlik $5 \text{ m/sn} < V_u < 25 \text{ m/sn}$ aralığında ve $d_{90} > 2 \text{ mm}$ olduğu durumda geçerlidir. Daha küçük dane çapları için eşitliğin parantez içindeki bölümü deneysel olarak hesaplanan ve Şekil 3.13'te verilen η_1 düzeltme faktörü ile çarpılmalıdır. Şekil 3.13'de verilen dane çaplarına karşılık gelen η_1 değerleri aşağıda verilen formülle de hesaplanabilir.[16]

$$\eta_1 = 0,42 \sqrt{d_{90}} \quad (3.30)$$

Mirtskhulava kaya zeminler ve kohezyonlu zeminler için de bazı oyulma eşitlikleri elde edilmiştir.

3.5.2 Mikhalev Formülü

Mikhalev de yüksek düşülü barajların mansabındaki taban oyulmalarını ele almış ve aşağıda verilen eşitliği elde etmek için Mirtskhulava'nın yaklaşımına benzer bir yaklaşım kullanmıştır (Şekil 3.13).

$$t + h_2 = \left[\frac{5,65 \cdot q}{\sqrt{g \cdot d_0} \cdot \left(\frac{h_2}{d_{90}} \right)^{\frac{1}{6}}} - 9 \cdot (2 \cdot B_u) \right] \cdot \frac{\sin \theta'}{1 - 0,215 \cdot \cot \theta'} \quad (3.31)$$

D : Derzli blokların hacmine eşdeğer olan bir kürenin çapıdır. 3.23 ve 3.24 nolu eşitliklerdeki ε ve λ katsayıları Tablo 3.3'te verilen katsayıların çarpımından oluşmaktadır.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_4 \quad \lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4$$

Tablo 3.3 Rubinstein eşitliğindeki katsayılar

Koşullar	ε_1	λ_i
30° – 70° Jet giriş açısı	$\varepsilon_1 = 1,0$	$\lambda_1 = 1,8 \cdot \cos \theta$
Havalanmamış Jet	$\varepsilon_2 = 0,8$	$\lambda_2 = 1,0$
Havalanmış Jet	$\varepsilon_2 = 0,5 - 0,7$	$\lambda_2 = 1,0$
Blok Boyutları	$\varepsilon_3 = 1,0$	$\lambda_3 = 1,0$
Kübik	$\varepsilon_3 = 1,0$	$\lambda_3 = 1,0$
1:1,5:2 (N1)	$\varepsilon_3 = 0,8$	$\lambda_3 = 1,1$
1:5:5 (N2)	$\varepsilon_3 = 0,8$	$\lambda_3 = 1,1$
1:2,75:6,5 (N3)	$\varepsilon_3 = 0,8$	$\lambda_3 = 1,1$
Düşük eğimli nehir yatağı	$\varepsilon_4 = 1,0$	$\lambda_4 = 1,0$
Granüler malzeme N1	$\varepsilon_4 = 0,8 - 1,35$	$\lambda_4 = 0,8 - 1,1$
Büyük eğimli yatak N2	$\varepsilon_4 = 0,9 - 1,30$	$\lambda_4 = 0,65 - 1,0$
N3	$\varepsilon_4 = 0,7 - 1,0$	$\lambda_4 = 0,65 - 1,0$

3.23 ve 3.24 nolu denklemler sadece aşağıdaki sınırlar için geçerlidir.

$$0,25-0,30 < N' < 1,0-1,1$$

Buradaki N' değeri ise aşağıdaki eşitlikte verilmiştir

$$N' = \left(\phi_2 \cdot \frac{T_o}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{1}{Fr_b^{0,8}} \cdot \left(\phi^2 \cdot \frac{h}{h_2} - (1 - \phi^2)^{\frac{4}{9}} \right) \quad (3.34)$$

3.6.2 Aksoy Formülü

Aksoy [4] yüksek düşülü barajların mansabında kaya tabanlı nehir yataklarındaki yersel oyulmaları incelemiştir. TÜBİTAK tarafından desteklenen bu araştırmanın laboratuvar çalışmaları DSİ Araştırma ve Geliştirme Dairesi Hidrolik Laboratuvarında yapılmıştır

(Şekil3.15). Yapılan çalışmalarda düzenli kaya bloklarından oluşmayan ve bloklar arasında bağlantı bulunmayan bir yatağın oyulması incelenmiş ve oyulma derinliği için:

$$\frac{t}{B_0} = \frac{3}{2} \left(\frac{h_2}{B_0} - 10,9 \right) + 12 \log X \quad (3.35)$$

eşitliği elde edilmiştir. Burada:

$$X = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{V_0^2}{q \cdot B_0} \cdot \frac{B_0}{D} \right) \quad (3.36)$$

ρ = Suyun yoğunluğu

ρ_0 = Kaya malzemenin yoğunluğu

D = Küp blok boyutu

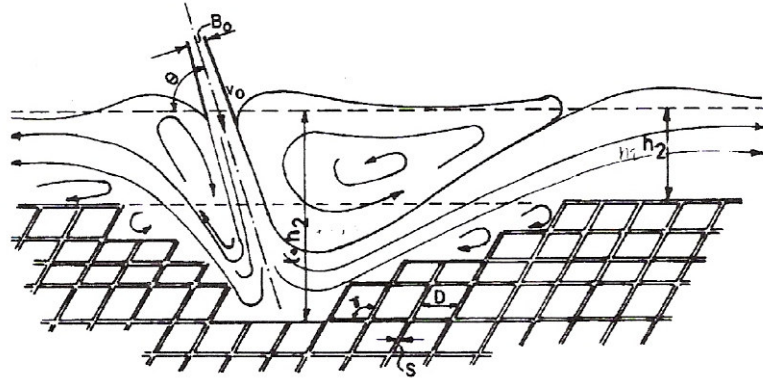
t = Tabandan itibaren oyulma derinliği

B_0 = Jetin genişliği (dikdörtgen jet)

V_0 = Jetin mansap suyuna dalış hızı

h_2 = Mansap su derinliği

X = Oyma etkisi parametresi



Şekil 3.15 Oyulma ile ilgili semboller.

Bu çalışmalarda oyulma oluşumunun başlangıcı için

$$\frac{h_2}{B_0} = 36 \log X - 21,8 \quad (3.37)$$

eşitliği elde edilmiştir.

Yukarıda verilen eşitlikler $\theta \leq \frac{h_2}{B_0} \leq 12$ sınırları için geçerlidir. Bu çalışmalar sonunda

yayınlanan raporda elde edilen oyulma eşitliklerinin aşağıdaki temel kabullere göre geçerli olduğu belirtilmiştir.

1. Tabanı oluşturan kaya kütlesi düzenli bir bloklanma sistemine sahip değildir.
2. Bloklar birbirine bağlı değildir.

Eşitliğin kullanılması öncesinde kaya tabanın bloklanma yapısının ve blok boyutunun belirlenmesi gereklidir. Eşitlikteki jet dalış hızı olan V_0 değerini hesaplamak zor olduğundan bu hesap için yaklaşık sonuçlar veren yöntemler kullanılmaktadır.

3.6.3 Taraimovich Formülü

Taraimovich [17] dolu savağın işletmesinden sonra maksimum oyulma derinliğinin maksimum debinin geçtiği 2-7 mevsim, arasında oluşacağını iddia etmiştir. Bunun yanı sıra bir mevsim boyunca oluşan maksimum oyulma derinliğinin toplam oyulma derinliğinin %27 si ile %65 i arasında değiştiğini ileri sürmüştür. I_{sc} oyulma çukuru uzunluğu ise Taraimovich tarafından

$$I_{sc} = (11 - 12) \cdot h_c \quad (3.38)$$

olarak verilmiştir. Burada h_c =kritik akım derinliğidir.

Taraimovich bu çalışmaları sonunda sıçratma ucu yapısının stabilitesi için bazı proje kriterleri vermiştir. Buna göre stabilize için sıçratma eşiğinin oyulma çukuru başlangıcına olan uzaklığında

$$X_0 > (5,5 - 6,0) \cdot h_c$$

şartının sağlanması gereklidir. Orijinal yatak seviyesinin altındaki maksimum oyulma derinliği ise;

$$t = (5,5 - 6,0).h_c . \tan \phi_u \quad (3.39)$$

formülü ile verilmiştir. Burada ϕ_u oyulma çukurunun memba yüzünün açısıdır. Toplam oyulma derinliği $(t + h_2)$ hesabı için ise aşağıdaki eşitlik verilmiştir.

$$t + h_2 = h_c . \sqrt[4]{h} . \left(\frac{\theta}{\phi_0} \right) . \phi . \left(\frac{\eta'}{k_r} . w \right) \quad (3.40)$$

Burada,

h = Mansap kuyruk suyu ile rezervuar su yüzü arasındaki fark

k_r = Kayanın gerilme (strength) katsayısı

θ = Jetin sıçratma ucundan çıkış açısı

ϕ_u = Oyulma çukurunun memba yüzü açısı

η_1 = Ortalama ve maksimum taban hızlarından sıçratma eşiği üzerindeki hızlara geçiş katsayısı

ϕ = Oyulma çukuru malzemesinin içsel sürtünme açısı

h_2 = Mansap kuyruk suyu seviyesidir.

Taraimovich tarafından verilen bazı örneklerde

$$0,9 < \eta' / k_r . w < 1,08$$

olarak alınmıştır. Bu nedenle bu değer yaklaşık 1 olarak alınabilir.

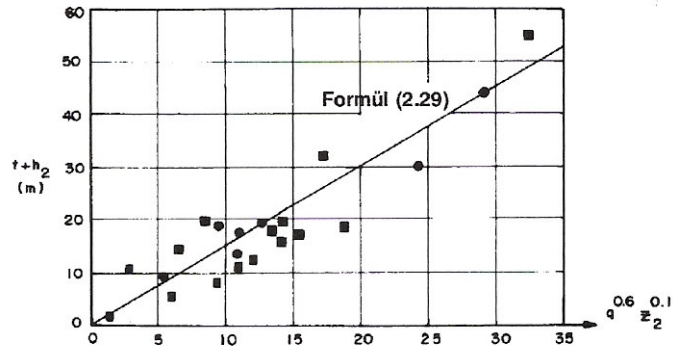
Bundan sonra verilecek olan eşitlikler Rubinstein ve Taraimovich eşitliklerinden çok daha basit eşitliklerdir. Bunlar Kotulas'ın jet oyulmaları için elde ettiğine benzer formdaki eşitliklerdir.

3.6.4 Martins B Formülü

Martins serbest düşen jetler altında, kaya yataklarda oluşan 18 adet oyulmayı inceleyerek aşağıda verilen eşitliği elde etmiştir.

$$t + h_2 = 1,5 . q^{0,6} . Z_2^{0,1} \quad (3.41)$$

Martins tarafından elde edilen bu veriler Şekil 3.16 üzerinde noktalanmıştır.



Şekil 3.16 Prototipteki oyulma derinlikleri.

3.6.5 Chian Formülü

Chian sıçratma eşikli dolu savakların mansabında meydana gelen oyulmalarla ilgili olarak aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.

$$t + h_2 = 1,18 \cdot h^{0,235} \cdot q^{0,51} \quad (3.42)$$

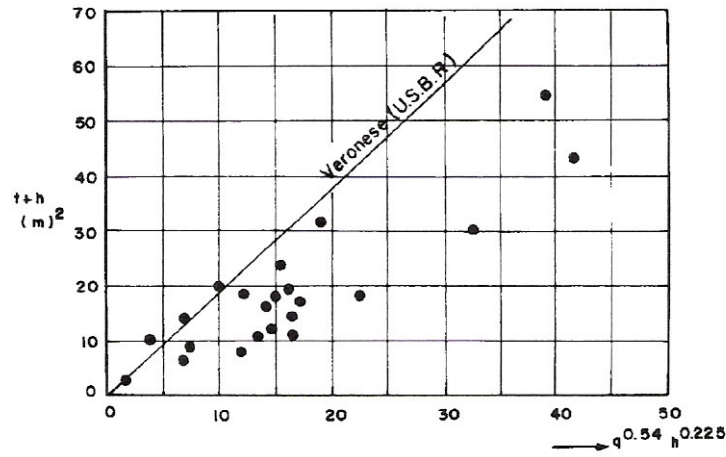
Chian prototipteki 6 adet oyulmayı inceleyerek bu basit eşitliğe ulaşmıştır. Nehir yatağı malzemesi ile mansap suyu seviyesi ve dalma açısı gibi diğer bazı parametrelerin oyulma üzerine etkisi Chian tarafından da ihmal edilmiştir. Bu eşitlik 1,18 katsayısı hariç Veronese'nin [7] modelde ince daneli malzemeler ile elde ettiği limit oyulma derinliği eşitliğine çok benzer bir eşitliktir. Bu eşitlikte de dane çapının nihai oyulma derinliği üzerindeki etkisi göz ardı edilmiştir. Chian Z_2 yerine h seviyesi kullanmasına rağmen Şekil 3.14 eşitlik Martins'in verdiği eşitliğe de çok benzemektedir.[19]

Kullanılan bu iki değişik parametreden gelen fark denklemdeki üslerin çok küçük olması nedeniyle sonucu çok küçük oranda etkilemektedir. Z_2 ve h arasındaki farktan meydana gelebilecek hataların çok küçük olduğu kabul edilerek ölçülen bazı prototip oyulma değerleri, Martin'in ve Veronese'nin denklemleri kullanılarak tekrar hesap edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Tablo 3.4'te verilmiş olan bu sonuçlar Şekil 3.17 üzerine noktalandığında dikkate değer bir uyum elde edilmiştir.

Martin'in Tablo 3.4'te verilen verileri, Veronese'in yaklaşımı ile karşılaştırılmak üzere Şekil 3.17 üzerinde noktalanmıştır. Şekil 3.17'de görüldüğü gibi Veronese eşitliği özellikle prototipten elde edilen küçük oyulma değerleri ile oldukça iyi bir uyum sağlamıştır.

Tablo 3.4 Prototipteki oyulma derinlikleri.

$Q \text{ (m}^2/\text{sn)}$	$Z_2, h \text{ (m)}$	$t + h_2$	$q^{0,6} \cdot Z_2^{0,1}$	$q^{0,54} \cdot Z_2^{0,225}$
113,6	180	43,2	28,76	41,432
40,0	34	19,7	13,00	16,21
25,0	31	18,9	9,73	12,32
95,2	97	30,1	24,33	32,77
32,0	26,1	17,5	11,09	16,628
31,4	27,0	15,0	10,998	16,496



Şekil 3.17 Prototip oyulmaları.

(3.29) ve (3.30) nolu eşitliklerin ikisi de yatak malzemesi özelliklerinin oyulma üzerine olan etkisini dikkate almamaktadır. Bu konuda Akhmedov çatlaklı kaya özelliğindeki yatak malzemesinin kendi içinde ayrıştığını ileri sürmüştür. Bu durumdaki oyulma işlemi daha önce de değinildiği gibi belirli ebatlardaki kohezyonsuz malzemede içinde oluşan oyulma özelliği gösterir.

3.6.6 Mpiri Formülü

Aşağıda verilen (3.31) bağıntısı ise bir sıçratma eşiğinden çıkan jetin oluşturacağı oyulma derinliği hesabı için Mpiri tarafından önerilmiştir. Formülde kullanılan semboller Şekil 3.14'te verilmiştir.

$$\frac{(t + h_2)}{Z_3 + h_2} = \frac{0,355.(q.Z_2)^{0,5}}{(g.d_{50}^2.(Z_3 + h_2)^3)^{0,25}} \quad (3.43)$$

Burada;

Z_3 = Sıçratma ucu çıkış ağız ile jetin çarptığı mansap su seviyesi arasındaki kot farkı (m)

h_2 = Mansap su derinliği (m) dir

d_{50} (m)

3.6.7 Mason ve Arumugan Formülü

Mason ve Arumugan [21] 47 model çalışması ve 26 prototip ölçümden elde ettikleri veriler ile prototip için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir. İncelenen koşullardaki jetin mansap su yastığı çarpma açısı 20° ile 85° arasında değişmiştir.

$$t + h_0 = (6,42 - 3,1.h_0^{0,1}) \left(q^{(0,6-0,0033.H)} . H^{(0,15-0,005.H)} . h_0^{0,15} / g^{0,3} . d_0^{0,1} \right) \quad (3.44)$$

Burada;

d_m = Yatak malzemesi boyutu olup prototipte 0,25 m olarak kabul edilmiştir.

H = Memba ve mansap su seviyeleri arasındaki fark (m)

h_0 = Mansap su derinliği (m)

t = Nehir yatağından itibaren oyulma derinliği (m)

q = Birim debi

g = Yerçekimi ivmesi

3.6.8 Wang Shixia Formülü

Wang Shixia ise 50 barajdan elde edilen verileri değerlendirerek aşağıdaki eşitliği elde etmiştir.

$$t = 2,44.K.h_c^{0,89} . H^{0,11} \quad (3.45)$$

H = Memba ve mansap su seviyeleri arasındaki fark

t = Nehir yatağından itibaren oyulma derinliği

K = Kayanın yapısı ile ilgili katsayı

K=0,7-1,1 (sağlam ve yekpare kaya)

K=1,1-1,4 (orta derece ve sağlam kaya)

K=1,4-1,8 (yumuşak ve çatlaklı kaya)

3.6.9 Schoklitsch Formülü

$$t + h_2 = 3,15 \cdot \frac{q^{0,57} \cdot H^{0,2}}{d_{90}^{0,32}} \quad d_{90} = 1m \quad (3.46)$$

Schoklitsch [2] araştırmaları sonunda kaya tabandaki oyulmalarla ilgili olarak yukarıdaki (3.34) eşitliğini elde etmiştir.

3.6.10 Mason Formülü

Bazı araştırmacılar serbest düşümlü jetler altında oluşan oyulma derinliğinin aşağıda verilen değişkenlerin bir fonksiyonu olduğunu ileri sürmüştür.

Q= Birim debi

H= Kuyruksuyu ile rezervuar seviyesi arasındaki fark

d= Yatak malzemesi boyutu

h_2 = Mansap su seviyesi

Bu değişkenler Mason tarafından ele alınmış ve bu çalışma sonrasında Mason aşağıda verilen genel eşitlik formunu elde etmiştir.

$$t + h_2 = k \cdot \frac{q^x \cdot H^y \cdot h^w}{g^v \cdot d^z} \quad (3.47)$$

$t + h_2$ = Kuyruksuyu seviyesinden itibaren oyulma derinliğidir.

Mason bu genel eşitlik formu üzerinde yaptığı çalışmada prototipten elde edilen 26 değer ile model çalışmalarından elde edilen 47 değeri kullanılmıştır.

Mason model çalışmalarındaki oyulma derinliği 0,071 m ile 1,175 m, düşü yüksekliği 0,325 m ile 2,150 m arasında, çarpma açısı ise 25°-85° arasında değişmiştir. Prototipteki oyulma

derinliđi ise 6,70 m ile 90 m, dūřu yūkseklēđi 15,82 m ile 109 m arasında deēiřmiřtir. İncelenen prototip verilerinin çarpma açısı deēerleri ise 20° ile 72° arsında farklılık gōstermiřtir. Genel eřitlikteki k'nın ve ūslerin modelde elde edilen en uygun deēerleri ařaēıda verilmiřtir.

$$t + h_2 = 3,27 \cdot \frac{q^{0,6} \cdot H^{0,05} \cdot h^{0,15}}{g^{0,3} \cdot d^{0,10}} \quad (3.48)$$

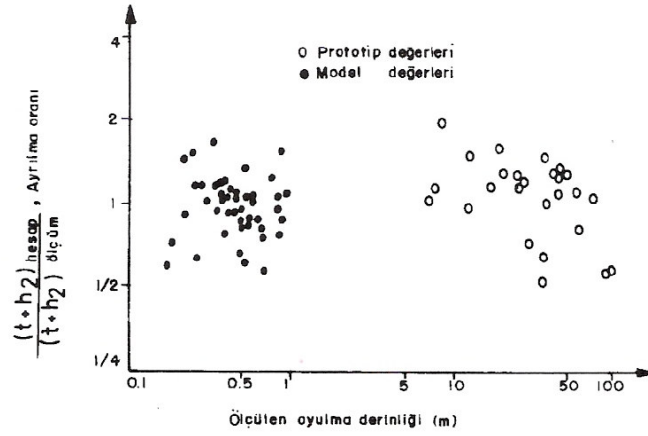
Bu formūl ile hesaplanan oyulma derinliēđi ile ōlūlen bazı oyulma derinlikleri arasındaki varyasyon katsayısı %25,4 olarak elde edilmiřtir. Bu formūl, model sonuçları aēısından oldukça tatminkār olmasına raēmen prototipteki oyulma derinlikleri için tatminkār sonuçlar vermemiřtir.

Formūlūn hem prototip hem de modelde uygun sonuçlar vermesi için k sabiti ve ūsler için ařaēıdaki deēerlerin kullanılmasının uygun olduēu tespit edilmiřtir.

$$\begin{aligned} K &= 6,42-3,10 & v &= 0,30 \\ w &= 0,15 & x &= (0,60-H/300) \\ y &= (0,15+H/200) & z &= 0,10 \text{ (prototipteki sabit ve 0,25 m olarak kabul edilen d deēeri için)} \end{aligned}$$

Yukarıdaki k, x ve y deēerlerinin kullanıldıēı formūl ile hesaplanan ve modelde ōlūlen oyulma deēerlerinin ortalamasının oranı 1,01; varyasyon katsayısı ise %25,3 olmuřtur. Bu řekilde hesaplanan oyulma derinliklerinin prototipte ōlūlen derinliklere oranının ortalama deēeri 1,07; varyasyon katsayısı ise %30,1 olarak bulunmuřtur.

Model ve prototipte oluřan oyulma derinlikleri arasındaki iliřki Froude benzeřim kurallarında gōz ōnūne alınandan çok daha karmařık faktōrlerin bir fonksiyonu olmaktadır. Prototipte, modele nazaran çok daha būyūk oranda gerçekleřen hava karıřımı bu faktōrlerden birisidir.



Şekil 3.18 Mason formülü kullanılarak hesaplanan oyulma derinliklerinin ölçülen değerleri karşılaştırılması [21].

Yukarıdaki formül kullanılarak yapılan hesap, model ve prototipten elde edilen veriler arasındaki ilişki Şekil 3.18’de görülmektedir. Prototip sonuçları için elde edilen varyasyon katsayısı model için elde edilenden çok az farklıdır. Bu da prototipte değişik zamanlarda oluşan ve modele nazaran daha değişken özellikler gösteren akım koşullarından meydana gelmektedir. Bu durum aynı zamanda prototipteki oyulma gelişiminin çok hızlı olduğunu ve pratik kullanımda prototip oyulmaları için nihai oyulma derinliği yaklaşımının uygun ve geçerli olduğunu ortaya koymaktadır.

3.6.11 Gunko ve Soleva Formülü

Gunko ve Soleva [18] sıçratma ucundan çıkan ve yörüngesi boyunca planda yayılan bir jetin oluşturduğu oyulma derinliğindeki azalma oranı için aşağıda verilen formülü önermiştir.

$$\frac{t + h_2}{(t + h_2)_{\max}} = \left(\frac{B_0}{B_{\max}} \right)^{0.6} \quad (3.49)$$

Burada;

B_0 : Jetin dolusavak çıkışındaki genişliğidir.

$B_{\max}$: Jetin kuyruk suyu üzerine çarptığı noktadaki genişliğidir.

$(t + h_2)_{\max}$: Yanal yayılması olmayan birleşik durumdaki bir jetin maksimum oyulma derinliğidir.

3.7 Sıçratma Eşikleri

3.7.1 Sıçratma Eşiklerinin Yararları

- Temel problemlerin basitçe çözümlenebilmesi halinde ve özellikle büyük taşkın debilerinin geçirilmesi söz konusu ise nispeten ucuz çözümler verir. Bunun nedeni büyük boyutlu düşü havuzlarından kaçınılmasını sağlamalarıdır. Ayrıca suyu akarsu yüzeyine indirme zorunluluğu olmadığından hem taşkın kanalı kısa olmakta hem de kazılardan kaçınılabilmektedir.
- İnşaat kuruda bitirilebilmektedir.
- Enerjinin söndürülebilmesi suyun hava ile karışması sonucu olmakta ve gayet iyi sonuçlar alınmaktadır. Su, büyük bir hızla boşluğa fırlatılırken havayı beraberinde sürükler. Su jeti adeta bir bomba gibi patlar ve zerreler halinde etrafa yayılır. Böylelikle enerjinin de tamamı yitirilmiş olur. Savaktan püskürtülen suyun rengi beyazdır. Özgül ağırlığı küçüktür. Jeti oluşturan akışkan zerreler halinde ayrışır. Böylelikle dolu savak tarafından mansaba aktarılan su, yatağa yağmur gibi damla damla iade edilir.
- Dar vadilerde enerji santralini dolusavak kanalı altına yerleştirme imkanı sağlar.
- Yatak içindeki oyulmanın en derin noktası baraj eteğinden çok uzaklara atılabilir. Yansıtıcıların kullanılması yoluyla su jetinin ağırlık merkezi akarsu yatağı içinde istenilen bir noktaya yerleştirilebilir.

3.7.2 Sıçratma Eşiklerinin Zararları

Temelin zayıf olması halinde suyun yön değiştirmesinden doğan kuvvet emniyetle zemine aktarılamaz. Dolayısıyla kazıklı sistemlere gitme zorunluluğu doğar. Bu da yapının maliyetini artırır.

Küçük debilerde sıçratma ucu düşü havuzu görevi yapacağından temelde oyulmalar olur.

Sıçratma ucundan çıkan su jeti zerrelere bölünüp bir cins bulut oluşturur. Rüzgâr bu bulutu vadinin yamaçlarına yükleyerek toprak kaymalarına neden olmaktadır. Kışın sert olduğu yerlerde don ana kayayı tahrip edebilmektedir. Kışın yapılan savaklamalarda su zerreleri küresel buz parçaları oluşturarak rüzgâr ile savrulmakta ve gerek doğanın gerekse sanat yapılarının tahrip olmasına yol açmaktadır.

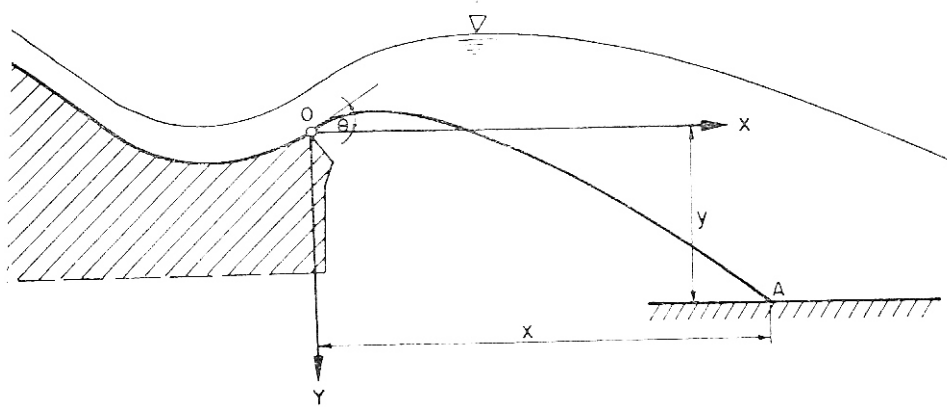
3.7.3 Basit Sıçratma Uçlarının Projelendirilmesi

Basit sıçratma uçlarının projelendirilmesinde göz önüne alınması gereken üç unsur vardır. Bunlar

- Sıçratma ucunun yarıçapı,
- Sıçratma ucunun mansap nihayetinin yüksekliği,
- Sıçratma ucunda küçük debileri savmak için alınması gerekli tedbirlerdir.

Her üç tedbir için de açık matematiksel bağıntılar yoktur. Bu tür problemler genellikle model çalışmaları üzerinde çözümlenmektedir.

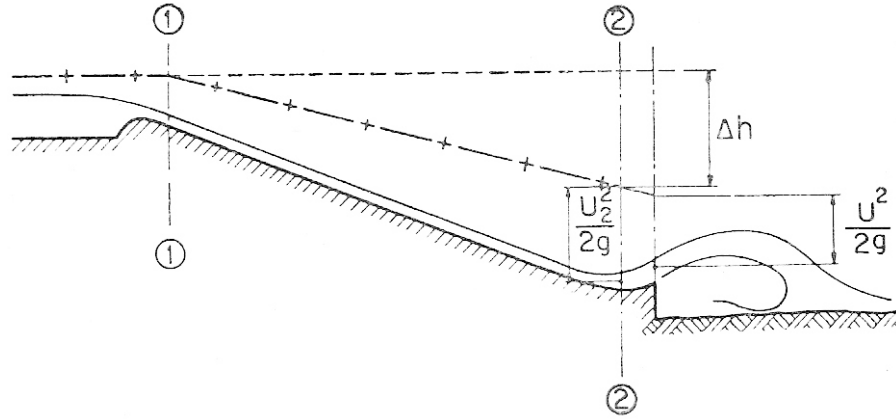
Sıçratma ucunun tertibinde ilk adım havaya fırlatılacak olan su kitlesinin yatakta düşeceği noktanın belirlenmesi olmalıdır. Bu nokta öyle seçilir ki oyulmalar baraj topuğunu etkilemesin. Böylelikle suyun düştüğü noktanın x apsisi belli oluyor demektir. Bu nokta şekil 3.19'da A noktasında gösterilmiştir. A noktasının y ordinatı 0 noktasının konumuna bağlıdır. Bu nokta ise dolu savağın sıçratma ucunda bulunur.



Şekil 3.19 Su napının düştüğü noktanın matematiksel tanımlanması.

Görülüyor ki A noktasının seçilmesi çözülmesi gerekli problemin verilerini tarif etmeye yeterlidir. A noktasının kotu ve su napının yatay ile yaptığı θ açısı suyun ağırlık noktası, belirtilen yerde olacak şekilde hesaplanır. Böylelikle gerek θ açısı gerekse y ordinatı belirlenecektir. Doğada ise olaylar hava sürtünmesi ve yük kayıpları nedeniyle farklı gelişmektedir. Özellikle dolusavak kanalının uzun olması halinde yük kayıpları ihmal edilemez. Şekil 3.20'de görülen uzun kanallı dolusavak üzerinde alt basınç bölgesine kadar (1-1 kesiti) hız potansiyelli bir akım yer almaktadır. Burada yük düzlemindeki kayıp ihmal edilebilir. Bundan sonra kanal içinde önemli yük kayıpları yer alacaktır. 2-2 kesitindeki U_2 hızı teorik

formüllerden elde edilecek olan U'_2 hızından daima küçüktür. Bunun nedeni hava sürtünmesi dolayısıyla akımın yavaşlamasıdır. Suya havanın karışması halinde başlangıçta su hızında bir artma görülür. Fakat bu artma, hız arttıkça önce azalır sonra sıfır olur. Buna tavan hızı denilmektedir. Çok yüksek barajlarda hesaplara 32 m/sn olarak sokulabilir. Fransa'da bu konuda yapılmış olan deneylerin sonuçları Tablo 3.5 ve 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.20 Dolusavak mansap kanalında akım.

Tablo 3.5 Chastang barajının dolusavağında ölçülmüş olan hızlar.

Kesitler	Islak Alan	Ortalama Su Derinliği	Ölçülen Ortalama Hızlar
B	25,45	1,87	23,57
C	25,35	1,86	23,67
D	25,32	1,86	23,70
E	24,79	1,82	24,20
F	26,30	1,94	22,80

Bu savağın özellikleri:

Savakta düşü = 42 m, Toplam düşü = 71 m, $q = 147 \text{ m}^3 / \text{sn} / \text{m}$, Teorik hız = 28,7 m/sn

Çıkış kesitindeki deneysel ve teorik hız oranları $\frac{U}{U_t} = \frac{22,8}{28,7} = 0,79$

Hızlar dolusavağın deşarj kanalı üzerinde fiilen ölçülmüş bulunmaktadır. Sonuç olarak bulunan en yüksek hız $U=22,8 \text{ m/sn}$ dir ki buna tekabül eden teorik hız $U_{\max}=27,8 \text{ m/sn}$ olarak hesaplanabilmektedir. Aradaki bu fark doğrudan hava sürtünmesi ile ilgilidir. Yük kaybını bu koşullar altında ampirik formüllerden faydalanarak bulmak olanak dışıdır. Yukarıdaki tablonun

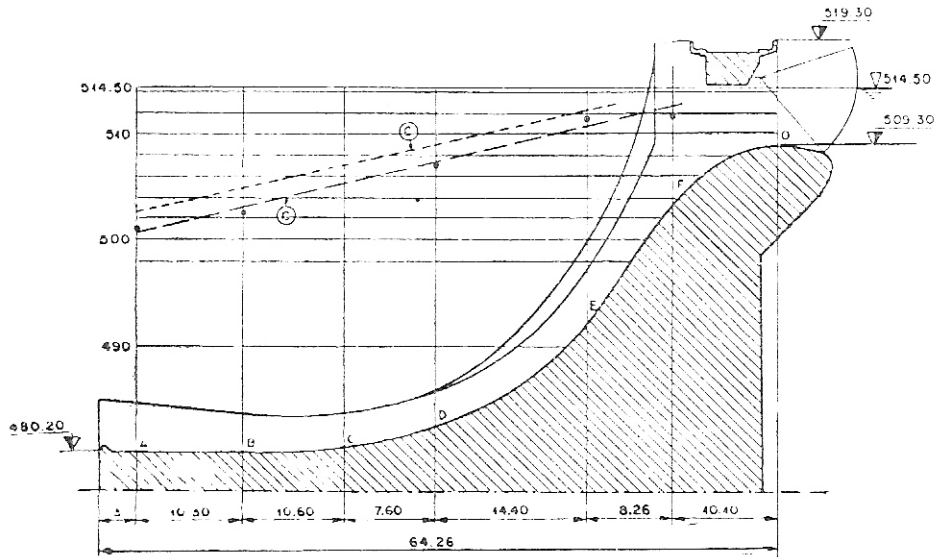
incelenmesinden de anlaşılaçağı gibi bu tür hesapların yapılmasında mühendisin bu konudaki deneyimi rol oynamaktadır.

Tablo 3.6 Saint-Etienne Cantales barajının dolusavağında ölçülmüş olan hızlar.

Kesitler	Islak Alan	Ortalama Su Derinliğı	Ölçülen Ortalama Hızlar
A	11,90	1,62	20,4
B	11,35	1,32	19,5
C	10,95	1,17	21,2
D	10,95	1,08	21,2
E	12,25	1,10	18,95
F	18,95	1,65	12,25

Savakta düşü = 37 m, Toplam düşü = 70 m, $q = 71 \text{ m}^3 / \text{sn} / \text{m}$, Teorik hız = 26,8 m/sn

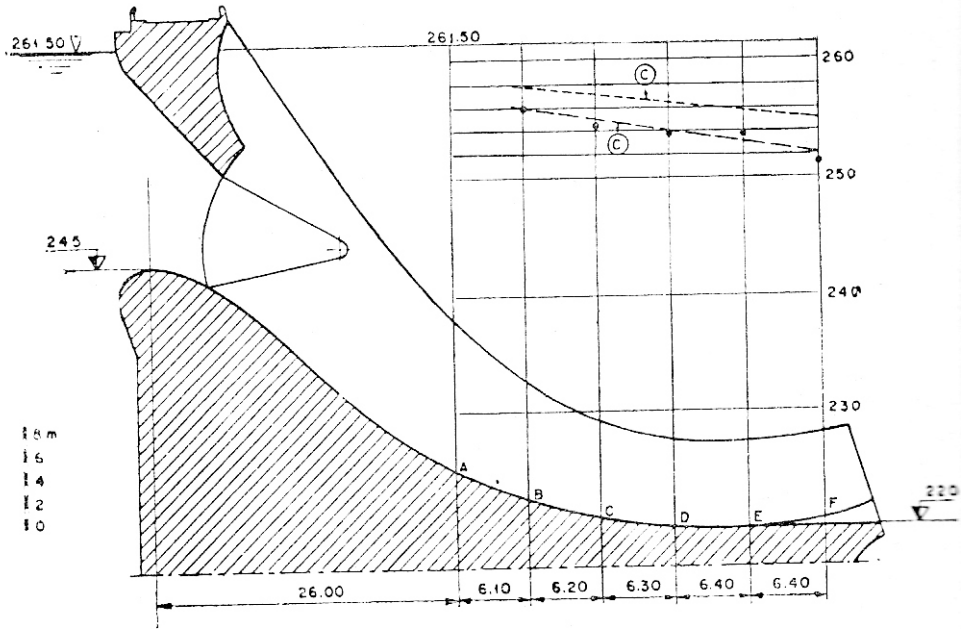
Çıkış kesitindeki deneysel ve teorik hız oranları $\frac{U}{U_t} = \frac{14,5}{19,6} = 0,74$



Şekil 3.21 St Etienne Cantales barajı mansap kanalında akış.

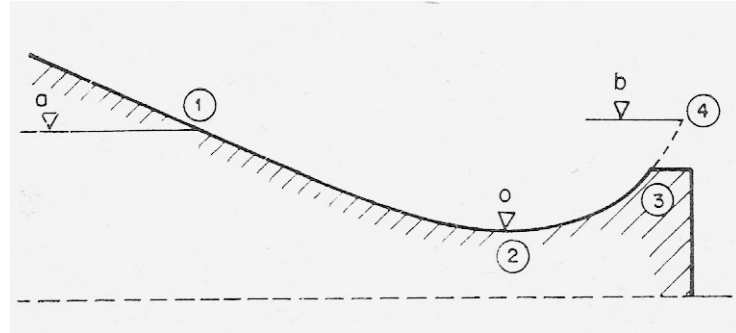
Şekil 3.22’de görülen sıçratma ucunun profili a kotundan 0 kotuna kadar düşmektedir (1 noktasından 2 noktasına kadar). Bundan sonra 3 ayrı çözüm uygulanabilir.

- Sıçratma ucu 0 kotunda yatay olarak devam eder. Bu takdirde küçük debiler problemi çözülmüş sayılabilir. En küçük debili savaklamalarda bile su birikmeden mansaba aktarılabilir.



Şekil 3.22 Chastang barajı mansap kanalında akım.

- b) Sıçratma ucu 3 noktasına yani a kotuna yükseltilebilir. Bu takdirde küçük debili savaklamalarda sıçratma ucu bir düşü havuzu gibi çalışabilir.



Şekil 3.23 Sıçratma ucunun tertibi.

- c) Sıçratma ucu 4 noktasına yani $b > a$ kotuna yükseltilebilir. Bu takdirde sıçratma ucunun düşü yatağı gibi çalışması yeteneği büyür.

Her 3 çözümde de ve birinci çözümde başlayarak artmak suretiyle hızlarda büyük düşmeler kaydedilmektedir.

St. E. Cantales Barajı:

Çıkış ağız : Çözüm 1'deki gibi 23.90 m yatay

Hız azalması : 2 noktasındaki hız 21.20 m/sn

3 noktasındaki hız 19,50 m/sn

Chastang Barajı:

Çıkış ağız : Çözüm 1'deki gibi 12,80 m yatay

Hız azalması : 2 noktasındaki hız 24,20 m/sn

3 noktasındaki hız 22,80 m/sn

1 numaralı çözümün kabulü halinde x uzunluğu elde edilemiyorsa 2. veya 3. çözüme gidilmelidir. Bu takdirde karşılaşılması mümkün hidrolik olaylardan bahsetmekte yarar vardır. Küçük debilerde sıçratma uçlu savak bir düşü havuzu niteliği göstermekte su sıçrayarak nap örtülmekte ve savak sonundan aşağıya dökülmektedir. Bu akım şekli en çok rastlanılan şekil olduğundan savak topuğunda büyük oyulmalara neden olur. Debinin kritik bir değerinden sonra nap, sıçratma ucundan yukarıya doğru itilmekte ve fırlatılmaya hazır bir duruma getirilmektedir. Debi daha da arttırılacak olursa nap sıçratma ucu vasıtasıyla fırlatılmaktadır. Bundan sonra hava ile karışan su enerjisini tamamen kaybettiğinden zararlı olmaktan çıkar. Sıçratma uçlarının kullanılması halinde en büyük tehlike suyun sıçratılamaması tehlikesidir. Bu durumda yapıyı tehdit eden oyulmalar meydana gelir. Bu tehlikeyi önlemek için sıçratma ucunu şekil 3.23'te görülen 2 noktasının kotuna uzatmak yeterlidir. Bu durumda ise jetin ağırlık merkezinin yapıdan yeterli uzaklığa yerleştirilememe tehlikesiyle karşılaşılmaktadır. Probleme basit sıçratma uçları kullanılarak çözüm bulunamazsa başka bir sıçratma ucu tipine gitmekten başka çözüm kalmaz.

3.8 Düşüm Yataklarının Sonundaki Oyulmalarla İlgili Uygulanmış Örnekler

3.8.1 Tarbela Barajı Dolusavağı Düşüm Yatağında Meydana Gelen Oyulmalar

143 m yüksekliğindeki Tarbela Barajı dünyanın en büyük gövde dolgu hacmine sahip barajlarından biridir. Başlangıçta rezervuarı çabuk dolan barajdan şutlu ve sıçratma uçlu 2 dolusavak yardımıyla her yıl büyük miktarlarda su bırakılmaktadır. Tarbela Barajının her iki dalma havuzu bölgesindeki jeolojik yapı benzer özellik göstermektedir. Bu bölgelerde zayıf silisli kireçtaşı ile kireçtaşı arasında phylites bulunmaktadır. Servis dolusavağı dalma havuzunda ek olarak havuz mansabına kadar sağlam bir kaya bandı yer almaktadır. Barajın servis dolusavağının işletilmesine 1975 yılı ağustos ayında başlanmıştır. Bu işletme sonrasında dalma havuzunun sağ tarafında oyulmalar oluşmuş ve bu oyulmalar gelişerek 1976 yılında dik şevlerin bir bölümünün kaymasına neden olmuştur. Bu oyulmalar sonrasında yaklaşık $400000 m^3$ malzemenin yer değiştirdiği belirlenmiştir. Oyulma çukuru gelişimi devam ettikçe sıçratma eşiği yapısının stabilitesi bozulacağından, havuzun sağ sahilindeki ters akımlar ile bu bölgenin de oyulacağından endişe edilmiştir. Bunun yanı sıra oyulmanın hangi derinliğe kadar devam edeceği konusunda da büyük bir belirsizlik yaşanmıştır.

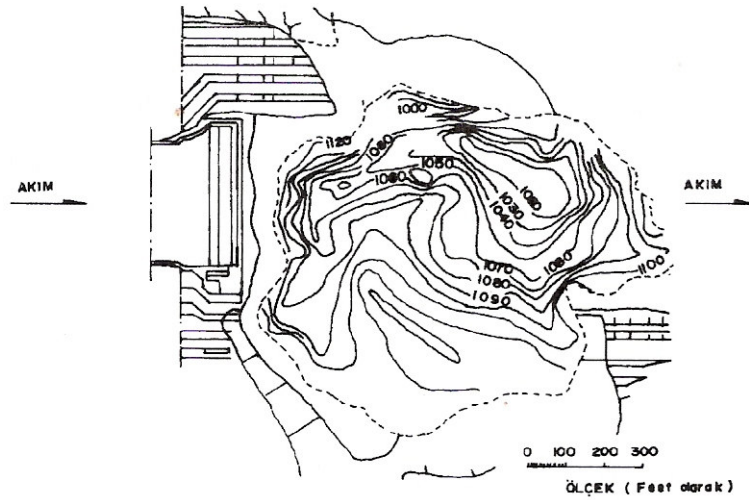
Tarbela barajında oyulmaya karşı alınacak tedbirler ile ilgili çalışmalar bir program dahilinde yıllarca sürmüştür. Bu çalışmalarda:

- Dalma havuzu etrafındaki dik eğimli şevler daha büyük kaymaları önlemek için stabil hale getirilmiştir.
- Sıçratma eşiği topuğunun stabilitesinin bozulması tehlikesine karşı yapı hemen mansaptaki kaya formasyonu içerisine bağlanmıştır.
- Dalma havuzu sonunda geri dönen ters akımların havuz kenarlarına etkisinin azaltılmasına çalışılmıştır.
- Havuz kenarında silindire sıkıştırılmış beton (RCC) kullanılarak masif duvarlar yapılmış, drenaj galerileri bırakılmış ve duvarlar ankrajlar ile sağlamlaştırılmıştır.

Ancak servis dolusavağının onarım çalışmaları yardımcı dolusavağın planlanandan daha uzun bir süre için işletilmesini zorunlu kılmıştır. Bu işletme sonunda yardımcı dolusavak şutu mansabında, servis dolusavağı mansabındaki gibi oyulmalar oluşmuş, ancak herhangi bir şev kayması görülmemiştir. Ancak oyulma gelişimi servis dolusavağı mansabında olduğu gibi kesin olarak tahmin edilemediğinden aynı tedbirler bu dalma havuzunda da alınmıştır. Servis dolusavağı ile dalma havuzu onarım çalışmalarının maliyeti 120 milyon US\$, yardımcı dolusavakta yapılan iyileştirmelerin maliyeti de 90 milyon US\$'ı aşmıştır.

Bu dolusavakların mansabındaki oyulmaların gelişimini engelleyecek koruma yapıları için Alden Araştırma Enstitüsü (ABD) ve Lahor Araştırma Enstitüsünde (Pakistan) 1/80 ölçeğinde 2 adet hidrolik model çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarda dalma havuzunun kaya zemini Lahor Enstitüsünde çakıl ve kil karışımı ile Alden Enstitüsünde ise kum ve çimento karışımı ile temsil edilmiştir. Her iki çalışmanın sonunda oyulmaların yapının güvenliğini tehlikeye düşürmeyeceği tespit edilmiştir. Ancak buna rağmen ilave bir tedbir olarak servis dolusavağının hemen mansabında 45 m derinliğinde bir Cut-off duvarının yapılması kararlaştırılmıştır.

Tarbela barajında dalma havuzu derinliği ile ilgili olarak yapılan matematik ve hidrolik model çalışmaları, daha derin oyulmalar oluşacağını ortaya koymasına rağmen dalma havuzu sıçratma ucu çıkışı 6 m derinlikte kazılmıştır. Gerekli havuz derinliğinin diğer kısmının akım tarafından gerçekleştirileceği kabulü yapılmıştır. Sıçratma eşiğinin 150 m mansabındaki proje debisinin çarpma bölgesinde, doğal kaya zemin 6 m den daha derine gitmektedir. Nehir yatağının bir bölümündeki kazıda sıçratma eşiği ucundan 12 m derine kadar inilmiştir.



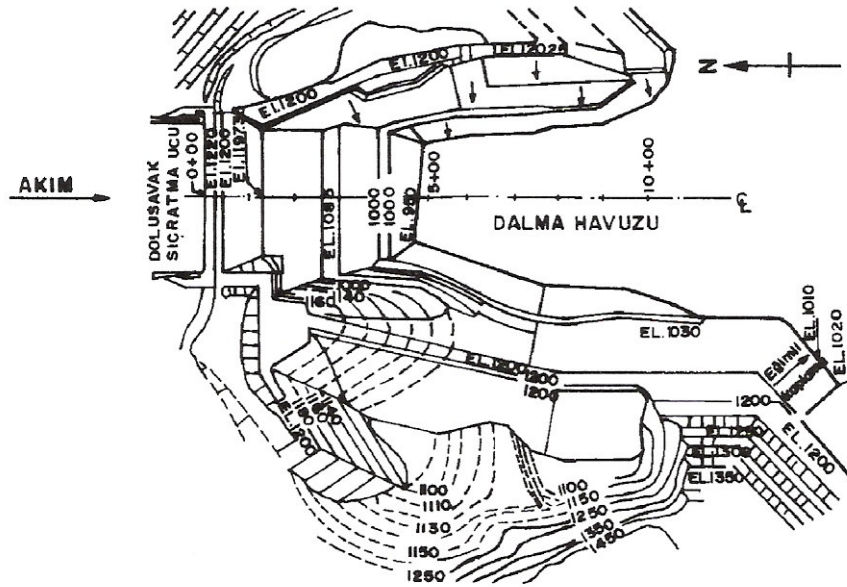
Şekil 3.24 Tarbela barajı dolusavak mansabı topografik haritası.

3.8.2 Tarbela Barajı Mansabının Korunması İçin Yapılan Çalışmalar

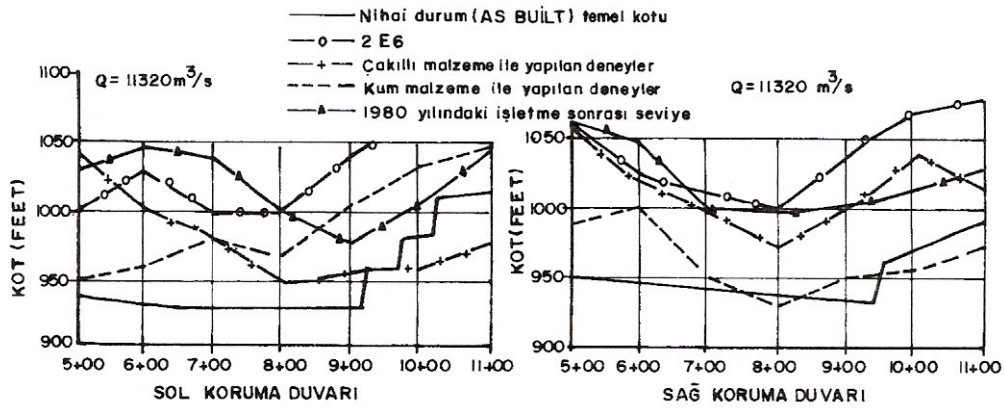
Bu çalışmalar da sıçratma eşiği ve dalma havuzu, geoteknik ve yapı statik açısından incelenmiştir. Hidrolik model çalışmaları için Lahor Araştırma Enstitüsünde 1/50 ölçeğinde bir hidrolik model daha inşa edilmiştir. Bu çalışmalarda, sıçratma eşiğindeki hareketin önlenmesi için yapılacak çalışmaların en az 2-3 mevsimde tamamlanacağı görülmüştür. Bundan dolayı gelecek mevsimde güvenli bir işletme yapabilmek için minimum koruma tedbirleri ile ilgili

önerilerin belirlenmesine karar verilmiştir. Bununla birlikte sıçratma eşiği önüne bir payanda yapılmış sağ yamaç ve sol yamaçlarda uygun bir derinliğe kadar koruma önlemleri alınmıştır. Koruma çalışmalarının nihai durumu 1980 yılında Şekil 3.25'teki gibi belirlenmiştir. Bu düzenleme hidrolik model testleri ile de tahkik edilen ve oyulmaların önlenmesi için en uygun sonucu veren düzenleme olmuştur.

Bazı tedbirler alınarak sağlamlaştırılan dalma havuzuna 1980 yılında su bırakılmıştır. Normal işletmenin dışında, dolusavaktan belirli sürelerde belirli debiler bırakılarak model ve prototipte elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, prototipte elde edilen oyulmanın daha derin olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle model yeniden düzenlenmiş ve yatak malzemesi olarak 1 mm çapında kum kullanılmıştır. Bu yeni düzenleme sonrasında modelde, nehir tabanındakine daha yaklaşan oyulmalar elde edilmiştir.(Şekil 3.24)



Şekil 3.25 Tarbela barajı dalma havuzunda koruma çalışmalarından sonraki nihai durum.



Şekil 3.26 Tarbela barajı dolusavak dalma havuzunda modelde ve prototipte oluşan oyulma derinlikleri karşılaştırılması.

Daha sonra aynı hidrolik koşullar altında prototip oyulmaları ile en uygun benzerliği sağlayan yatak malzemesinin kum ve çakıl karışımından oluştuğu tespit edilmiştir. Bir başka deyişle model prototipteki oyulmalara göre kalibre edilmiştir. Bu testler sonucunda mevcut derinliğin proje debileri için yeterli olmadığı ortaya çıkmıştır. Bu durumda mevcut yapıların sağlamlaştırılması için çeşitli alternatifler araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonunda yapılan en önemli değişikliklerden birisi akımın dağılması ve daha iyi havalandırmasını sağlayabilmek için sıçratma eşiğini üç bölüme ayırmak olmuştur. Tarbela barajı dalma havuzu için yapılan hidrolik model çalışmalarında, model prototip karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

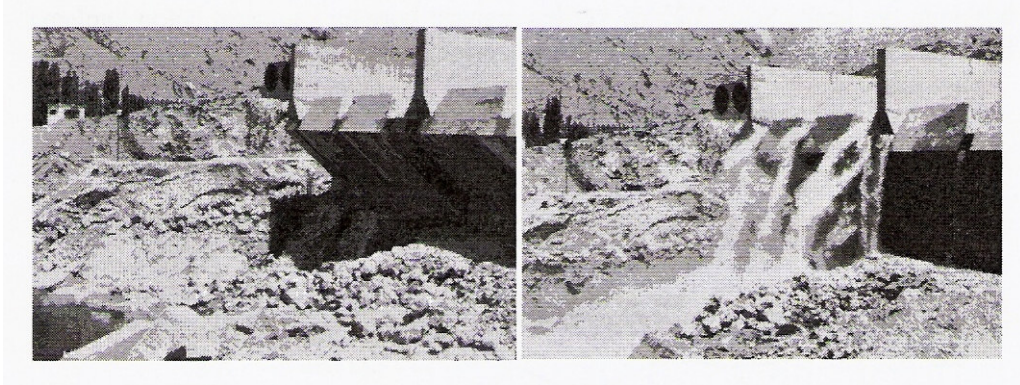
- Jetin etkisi ile nehir yatağı kaya tabanı öncelikle çatlaklar boyunca kırılıp parçalanmaktadır. Bu iri kayalar tekrar parçalanıp daha da küçülerek havuz içerisindeki akım ile birlikte hareket ederler. Kaya parçaları ne kadar sağlam olursa olsun, akım tarafından kolaylıkla taşınabilen küçük parçalara ayrılabilirler. Bu nedenle model çalışmalarında kullanılan malzeme ebatlarının prototipteki kayanın çatlaklı durumunu dikkate alarak belirlenmesi gerekmektedir. Yatak malzemesinin sabit boyutlu olarak alınması da doğru sonuçlar vermemektedir.
- Modelde ne kadar ince malzeme kullanılırsa kullanılsın özellikle havuz çıkışındaki hızlar sediment taşınımı için yeterince yüksek olmadığından sediment taşınımı prototipteki kadar etkili olmamaktadır. Bu da modelde havuz sonunda bir yığılma oluşturarak akımın geriye dönmesine, havuzun içerisindeki hızlara ve dolayısıyla oyulma derinliğine etki etmektedir.
- Model çalışmaları, oyulmalar için oldukça yararlı sonuçlar veren ve çeşitli alternatiflerin karşılaştırılmasına niteliksel olarak olanak tanıyan çalışmalardır. Ancak bu çalışmalardan elde edilen değerler, analitik veya nümerik bağıntılardan elde edilen sonuçlarla birlikte değerlendirilerek en uygun projelendirme gerçekleştirilebilir.

3.8.3 Keban Barajı

Keban barajı, Fırat nehri üzerinde Elazığ ili batısında enerji, sulama ve taşkın koruma amacı ile inşa edilmiş bir barajdır. Kaya dolgu ve beton tipinde olan barajın temelden yüksekliği 207 m, talvegden yüksekliği ise 163 m dir. Radyal kapaklı olarak inşa edilen Keban barajı dolusavağının toplam kapasitesi $17000 \text{ m}^3 / \text{s}$ 'dir. Dolusavak deşarj kanalı iki ayırma duvarı ile üç bölüme ayrılmış olup deflektörlü sıçratma eşiği yapısı ile sonlanmaktadır.

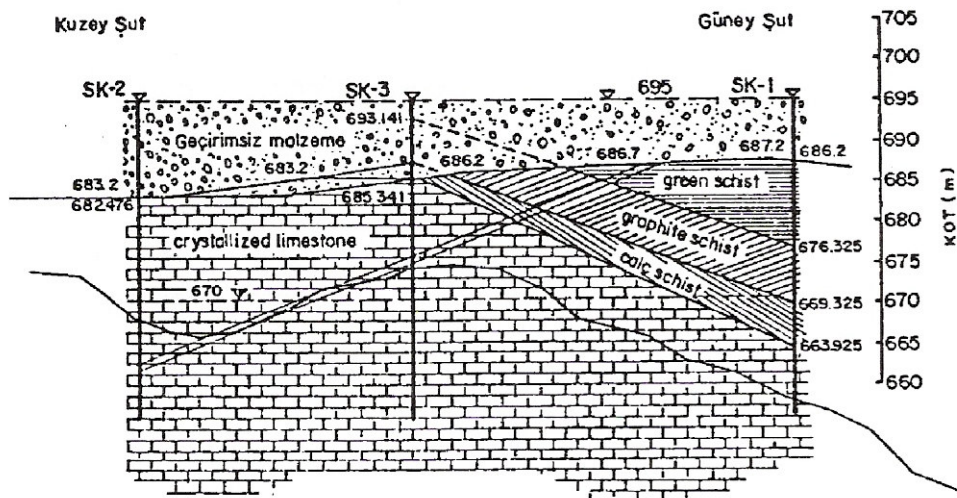
Keban barajı inşaatı 1975 yılında tamamlanmış olup bunun hemen peşinden ise dolusavak çalışmaya başlamıştır. Keban barajı dolusavağı 1983-1986 dönemindeki 4 yıl hariç her yıl genellikle küçük debiler ile çalıştırılmıştır. Bu debilerde sıçratma eşiği topuğuna yakın

bölgeye düşen su jeti, buraya yerleştirilen beton blokları parçalayarak oyulmalara neden olmuş ve oyulma çukuru işletme süresince gelişim göstermiştir.



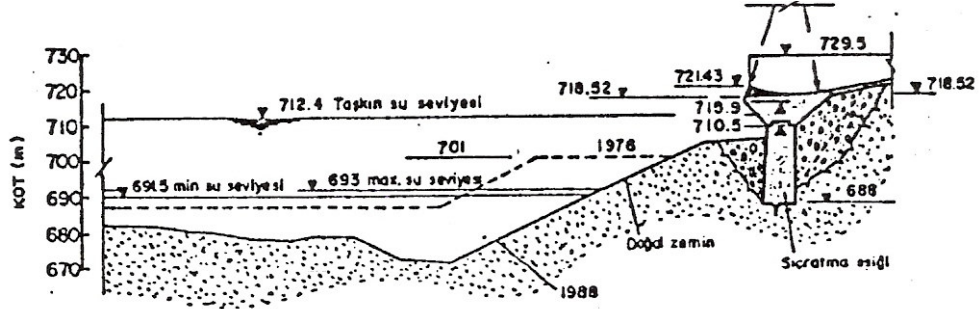
Şekil 3.27 Keban barajı dolusavağı sıçratma eşiği mansabının oyulmalardan sonraki görünüşü.

Keban barajı dolusavak işletmesinde doğal olarak kapakların açılması ve tamamen kapanması sırasında nap, salınımlar yaparak mansap tahkimatı üzerine düşmüş ve buraya konulmuş olan kaya tahkimatını yerinden oynatmıştır. Daha büyük debilerde ise jet nehir yatağındaki alüvyon malzemeyi oyarak çok geniş olan nehir yatağındaki farklı bölgelere taşımıştır. Keban barajı dolusavağı sıçratma eşiği mansabının jeolojik yapısı Şekil 3.28’de verilmiştir.



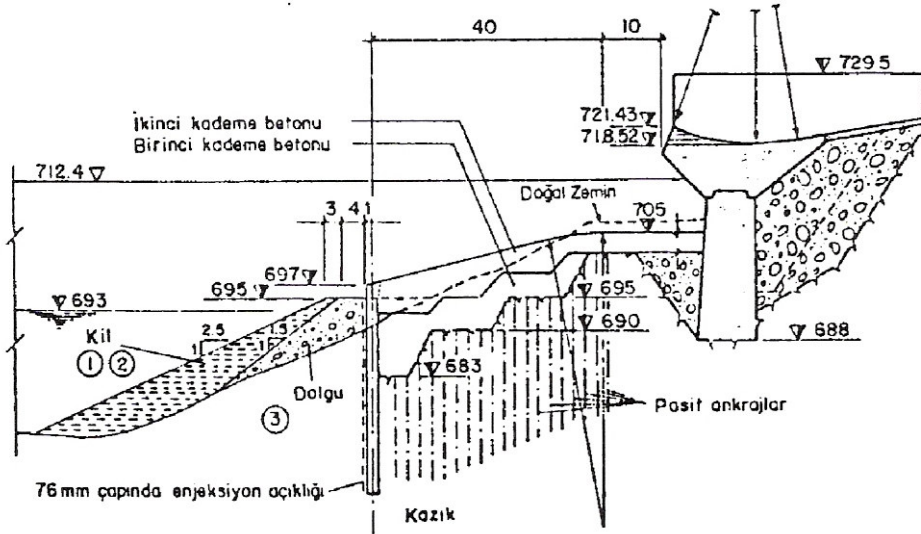
Şekil 3.28 Keban barajı dolusavağı sıçratma eşiği mansabının jeolojik yapısı.

Daha büyük debilerde ise jetin düştüğü bölgede nehir yatağı çok geniş olup nehir tabanında alüvyon malzemesi yer almaktadır. Dolusavaktan bırakılan suyun mansapta oluşturduğu oyulmalar 1978-1982 yıllarında nehir yatağından alınan haritalarla belirlenmiştir. 1988 yılındaki oyulma profili ise Şekil 3.29'da verilmiştir.



Şekil 3.29 Keban barajı dolusavak sıçratma eşiği mansabında oluşan oyulma.

Bu oyulmaların sıçratma eşiği topuk yapısını da tehdit eder bir hale gelmesi üzerine bir mansap koruma yapısı inşaatına karar verilmiştir. İnşaatına 1990 yılında başlanan mansap koruma yapısının beton kaplama bölümü 2 m çapındaki 74 adet fore kazık üzerine inşa edilmiştir. Fore kazıklar temeldeki kireçtaşı tabakasına 5 m girecek şekilde derine indirilmiştir. Bu tabakaya koruma yapısının bazı bölümlerinde 50-60 m derinlikte ulaşılmıştır. Bu nedenle 15 adet fore kazık 60 m derinliğe, diğerleri ise ortalama 30-35 m derinliğe kadar indirilmiştir. (Şekil 3.30)



Şekil 3.30 Keban barajı dolusavak sıçratma eşiği mansabında inşa edilen koruma yapısı.

Keban barajı sıçratma eşiği mansabının koruma yapısı inşaatı 1989 yılında yaklaşık 15510 US\$ keşif bedeli ile ihale edilmiştir.

3.9 Literatür Özeti

Aşağıda düşün yatakları sonundaki oyulmalar hakkında yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Yıldız [1] “Barajların mansabındaki oyulmalar” ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulmanın şiddetinin gelen debinin büyüklüğüne ve yapının şekline bağlı olduğu görülmüştür.

Schoklitsch [2] “Oyulma” hakkında ilk deneysel çalışmayı yapmıştır. Bu çalışmada mansap su yüksekliğini dikkate almaksızın sabit bağlama için oyulma derinliğini bulmuştur.

Eggenberger ve Müller [3] “Batık su jetleri ile oluşan oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmışlar. Bu çalışmada, batık kapak altı akım jetlerinin oluşturduğu oyulma derinliği oyulma konumu için bazı eşitlikler vermiştir.

Aksoy [4] “Yüksek düşülü barajların dolusavağı mansabında kaya tabandaki yersel oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada jetin hidrolik karakteristiklerine, mansap suyuna ve kaya blokların özelliklerine bağlı olarak bir oyulma derinliği bağıntısı geliştirilmiştir.

Hartung ve Hausler [5] “Jet enerjisinin sönümüne bağlı olarak oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, yapmış oldukları deneylere dayanarak dairesel enkesitli jetlerin difüzyon olayını kapsayan teorinin $y \approx 20 D_0$ derinliğine kadar geçerli olduğunu saptamışlardır.

Cola [6] “Jet enerjisinin sönümüne bağlı olarak oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, yapmış olduğu laboratuvar çalışmalarına göre dikdörtgen enkesitli jet halinde difüzyon olayının teorik olarak incelenebileceği bölge için $y \approx 40 B_0$ olarak kabul edilmiştir.

Veronese [7] “Oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, oyulma derinliği hesabı için dikkate alınan birçok parametre arasından en önemlilerini birim debi ve toplam su yükü olarak tespit etmiştir.

Shalash [8] “Batık veya serbest yüzeyli hidrolik sıçramanın oyulmaya etkisi” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada eşiksiz bir platforma doğru çıkan bir kapak altı akımının platform sonunda oluşturacağı oyulma derinliği için çeşitli eşitlikler saptamıştır.

Yıldız ve Üzücek [9] “Dolusavak sıçratma eşiğinden çıkan jetlerin oluşturduğu oyulma derinliğinin hesaplanması” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada şutlu ve sıçratma eşikli dolusavaklardan mansaba bırakılan akımın oluşturacağı oyulma derinliği basit bir eşitlik ile ifade edilmiştir.

Rubinstein [10] “Yüksek düşülü barajların kanal yataklarındaki yersel oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada prototip gözlemlerine dayanarak kaya tabanlı nehir yataklarındaki oyulmalar için eşitlikler elde etmiştir.

Hay ve White [11] “Hava girişinin düşü havuzunun performansına etkisi” hakkında çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarda, akıma hacim olarak %15,20 oranında karışan havanın, eşikli bir düşü havuzu mansabındaki oyulmaları %5 ile %10 arasında azalttığı sonucu elde edilmiştir.

Çataklı, Özal ve Tandoğan [12] “Düşü havuzu sonundaki oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, hem eşikli hem de eşiksiz düşü havuzlar için eşitlik verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada oyulmalara karşı düşü havuzu enkesitine havuz tabanından yukarıya doğru yerleştirilen kırıların etkisi de araştırılmıştır

Studenichikov [13] “Oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada özellikle jetin yanal açılımından dolayı oyulma derinliğindeki azalmayı dikkate almaktadır.

Eggenberger [14] “Oyulma uzunlukları” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada oyulma uzunluklarının iki kısımdan meydana geldiğini esas alarak oyulma uzunlukları için eşitlikler verilmiştir.

Martins [15] “Serbest düşen bir jetin küpsel bloklardan oluşan tabandaki oyma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada jetin düştüğü andaki yatayla yaptığı açı $\alpha = 40^\circ - 70^\circ$ arasında değişmiş ve bunun sonuca pratik etkisi görülmemiştir.

Mirtsskhulava [16] “Kohezyonsuz zeminlerdeki ve kaya zeminlerdeki bölgesel ve genel oyulmaların yöntem ve hesapları” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, oyulma derinliği ve jet giriş genişliğini veren eşitlikler elde etmiştir.

Taraimovich [17] “Kaya temeller üzerindeki yüksek düşülü dolusavakların altında bulunan kanalların deformasyonları” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, dolusavağın işletmesinden sonra maksimum oyulma derinliğinin, maksimum debinin geçtiği 2-7 mevsim arasında oluşacağını iddia etmiştir. Bunun yanı sıra bir mevsim boyunca oluşan maksimum oyulma derinliğinin, toplam oyulma derinliğinin %27 si ile %67 si arasında değiştiğini ileri sürmüştür.

Gunko ve Soleva [18] “Yüksek düşülü barajların dolusavakları altındaki nehir yataklarındaki yersel oyulmalar ve hidrolik rejim” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu

Çalışmada, sıçratma ucundan çıkan ve yörüngesi boyunca planda yayılan bir jetin oluşturduğu oyulma derinliğindeki azalma oranı için bir formül belirlemişlerdir

Chain [19] “Barajların mansabındaki oyulmalar” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, prototipteki 6 adet oyulmayı inceleyerek basit bir eşitliğe ulaşmıştır. Nehir yatağı malzemesi ile mansap suyu seviyesi ve dalma açısı gibi diğer bazı parametrelerin oyulma üzerine etkisini ihmal etmiştir.

Martins [20] “Serbest düşülü jetlerin kaya zeminlerde oluşturduğu oyulma derinliği” hakkında bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, deneyler özellikleri zaman göre değişmeyen ve hava karışimsız kompakt bir jet ile dikdörtgen enkesitli bir kanal içinde yapılmış ve tabana bloklar yerleştirilmiştir.

Mason ve Arumugan [21] “Barajlarda serbest jetlerle oyulma” hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, 47 model çalışması ve 26 prototip ölçümden elde ettikleri veriler ile prototip için bir bağıntı geliştirmişlerdir.

4. DENEY DÜZENEGİ

Hidrolik mühendisliği ile ilgili problemler; teorik, ampirik ve yarı ampirik metotlar, matematik ve fiziksel modeller yardımıyla çözümlenmektedir.

Sadece teorik yaklaşım, laminar akımın birkaç hali dışında kullanılamamaktadır. Ampirik metotlar ise fiziksel sistemde gözlenen etkili değişkenler arasındaki korelasyona dayandırılmakta ve ancak benzer verilerin olması halinde kullanılabilir. Yarı ampirik metotlar ise uygun şekilde tasarlanmış deneylerle elde edilen teorik kavramlar esas alınarak bulunan matematiksel formüllerdir.

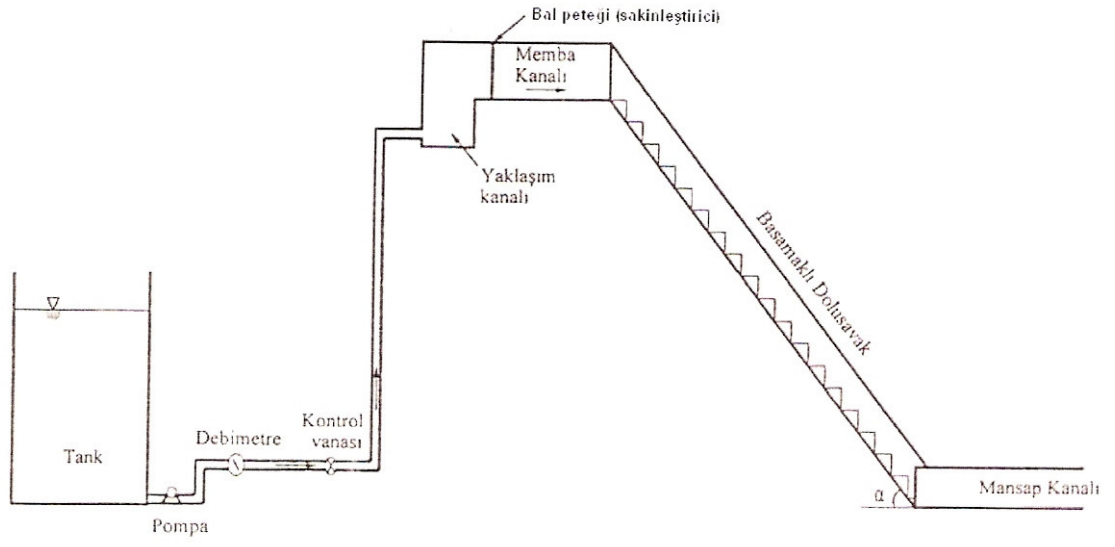
Matematik modelleme ise son yıllarda yüksek hızlı bilgisayarların ortaya çıkmasıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Matematik modelde, önce sistemin fiziği ortaya konularak matematik denklemlerle tanımlanmakta, daha sonra denklemler sayısal yöntemlerle çözülmektedir.

Fiziksel model ise, matematik modelle problemlerin tam olarak ifade edilememesi halinde, çözüme ulaşmak için yapılan kabullerin ve hesaba katılmayan diğer faktörlerin etkisini belirlemek için laboratuvarda yapılan deneysel çalışmaları kapsar. Böylece, teorik sonuçların model çalışmalarıyla karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

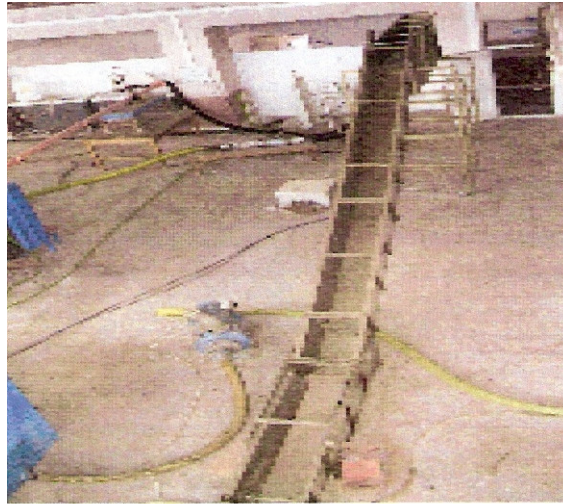
Dolusavak mansabındaki oyulmalarla ilgili deneysel çalışmalar yapmak için Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında Şekil 4.1’de kesiti ve Şekil 4.2’de fotoğrafı verilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneği laboratuvar tabanından 2,50 m yüksek, genişliği sabit ($b=0.30$ m) olan dikdörtgen kesitli bir kanal olup dolusavak mansap eğimi $\alpha = 40^\circ$, dolusavak uzunluğu 5,13 m ve mansap kanalı uzunluğu 3 m olacak şekilde tasarlanmıştır.

İhtiyaç duyulan su, bodrum katta bulunan 100 m^3 kapasiteli depodan pompalar vasıtasıyla 50 m^3 kapasiteli ana depoya basılmış, ana depodaki fazla su ise dolusavaktan savaklanarak bir by-pass hattı ile tekrar büyük depoya geri döndürülmüştür. Bu devridaim sırasında ana depodaki su yüksekliği sabit tutulmuş ve buradan üzerinde bir vana bulunan boru vasıtasıyla istenilen miktarda ki debi deney kanalını besleyen dinlendirme havuzuna alınmıştır.

Deney düzeneğinde dolusavak mansap kanalının yan duvarı akım koşullarını ve kanal tabanındaki oyulma derinliğini görebilmek amacı ile cam malzemeden teşkil edilmiştir. Sistemdeki debiler Şekil 4.3’te görülen debimetre kullanılarak belirlenmiştir. Vana yardımı ile ayarlanan farklı debi miktarları, plaka yardımı ile ayarlanan farklı eşik yükseklikleri ve yine plaka yardımı ile ayarlanan farklı mansap yükseklikleri için oyulma derinlikleri ve oyulma yastık boyu değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.1 Deney düzeneğinin kesiti.



Şekil 4.2 Deney düzeneği.

4.1 Yürütülen Deney Düzeneği

Basamaklı boşaltım kanalı mansabında, genişliği 0,30 m uzunluğu 3 m olan nehir yatağını temsil edecek bir malzeme havuzu inşa edilmiştir. 40⁰ boşaltım kanalı eğiminde, sabit geometrili basamak tipinde, belli bir boşaltım kanalı uzunluğunda, altı farklı düşü şütu için, altı farklı mansap (kuyruksuyu) derinliğinde ve Şekil 4.5'te granülometri eğrisi verilen malzeme ile, her bir alternatif için altı ayrı debide deneyler yapılmıştır. Her debide oyulma profili incelenmiş, oyulmayı etkileyen parametrelere ait değerler belirlenmiştir. Her deney sonrasında, oyulma çukuru geometrisini belirlemek için x ve y yönlerinde mesafe ölçümleri yapılmış ve elde edilen verilerle maksimum oyulma derinliğinin meydana geldiği noktalardaki grafikler hazırlanmıştır.

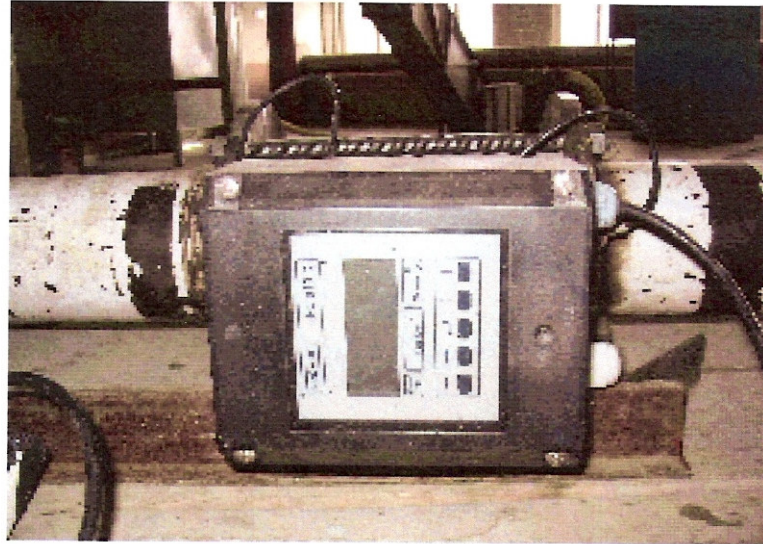
Deney düzeneği amaca uygun ölçümlerin yapılabilmesi için ölçüm aletleri ile teçhiz edilmiştir. Bu ölçümler ve kullanılan aletler aşağıda açıklanmıştır.

a) Su seviyesi ölçümleri

Su seviyesi ölçümleri (kanal tabanına dik akım derinlikleri) nokta uçlu limnimetre ve dolusavak boşaltım kanalı yan duvarı üzerine yerleştirilen çelik şerit metreler yardımıyla yapılmıştır.

b) Debi ölçümleri

Yapının memba kısmına yerleştirilen bir debimetre yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 4.3 Debimetre

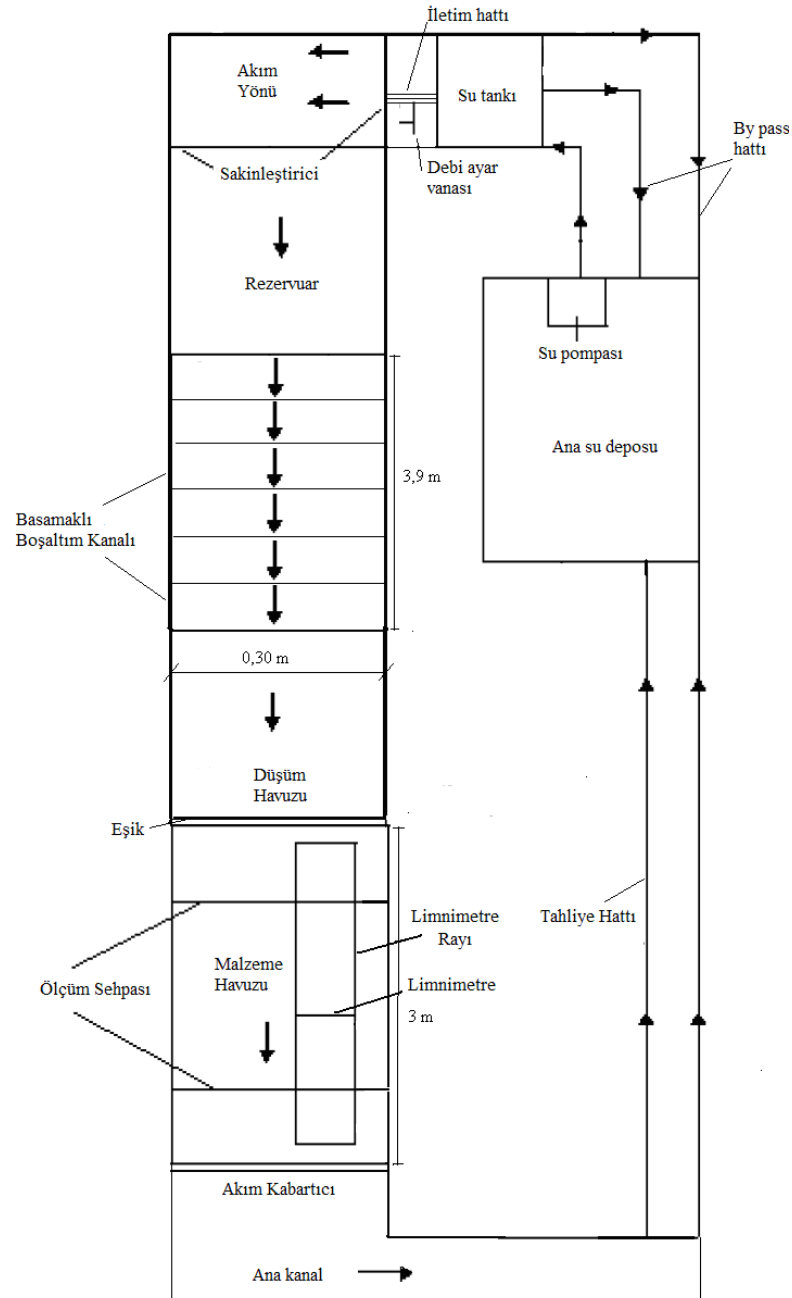
c) Oyulma ölçümleri

Mansap Kanalı üzerine yerleştirilen raylar vasıtasıyla yatay ve düşey ekseninde okuma imkânı veren arabaya yerleştirilmiş bir limnimetre ($\pm 0,01$ mm hassasiyetli) yardımıyla yapılmaktadır.

Bu çalışmada, sabit çapta yatak malzemesi, sabit boşaltım kanalı eğimi, sabit geometrili basamak kullanılarak boşaltım kanalı eğiminin, basamak geometrisinin ve yatak malzemesinin oyulmaya tesiri devre dışı bırakılmıştır.

Görünüşü Şekil 4.5'te verilen, uzunluğu 75 cm ve ucundaki eşik yükseklikleri farklı altı düşü havuzu eşik tipi (eşiksiz ve 1,2,3,4,5 cm eşikli) kullanılarak eşik tiplerinin oyulma parametrelerine olan etkisi araştırılmıştır.

Ayrıca altı farklı kuyruksuyu derinliği 0,1,2,3,4,5 cm için oyulma parametrelerinin değişimi araştırılmıştır.



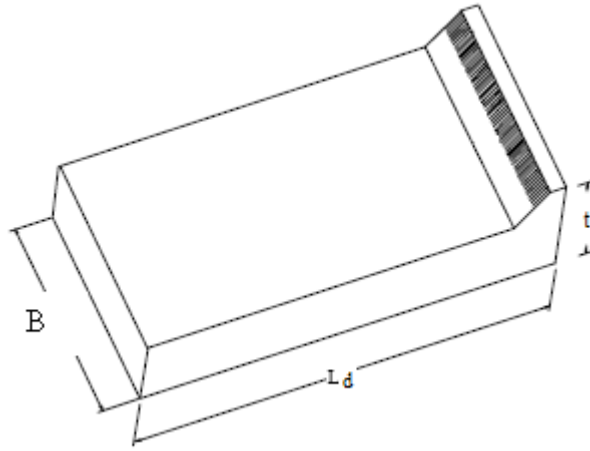
Şekil 4.4 Deney düzeneğinin şematik planı.

4.2 Boşaltım Kanalı

Deneylerde boşaltım kanalı eğimi ve bu eğime karşılık gelen boşaltım kanalı uzunluğu;
 $\alpha=40^\circ$ için $L=5,48$ m

4.3 Düşü Havuzu Eşik Tipi

Boşaltım kanalından gelen akımın enerjisini sönmölemek amacıyla mansap kanalı içerisine kesiti aşağıda verilen $L_d=75$ cm uzunluğunda ve sonundaki eşik yükseklikleri farklı olan ($t=0,1,2,3,4,5$ cm) şütlar yerleştirilmiştir.



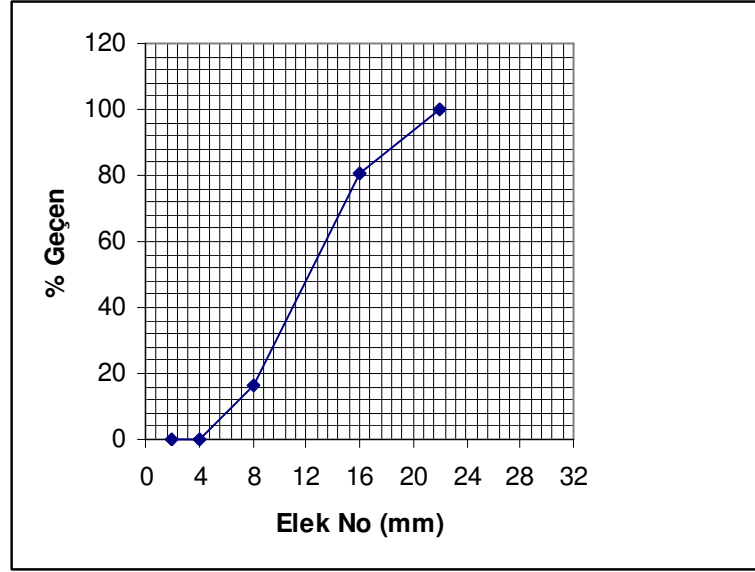
Şekil 4.5 Eşik tipleri

4.4 Malzeme Granölometrisi

Deneylerde, mansap kanalı tabanına 25 cm kalınlığında yatak malzemesi serilmiştir. Malzeme laboratuvarında yapılan elek analizinden elde edilen taban malzemesinin granölometri eğrileri Şekil 4.6’da verilmiştir. Deneylerde kullanılan yatak malzemesinin özellikleri, Şekil 4.6 dan $d_{50}=12$ mm olarak okunmuştur. Ayrıca malzemenin özgül ağırlığı 2,45 gr/cm³’tür.

Tablo 4.1 Elek analizi tablosu.

Elek No (mm)	Her Elek Üstünde Kalan (gr)	% Kalan	% Geçen
22	0	0	100
16	439	19,6	80,4
8	1866,5	83,4	16,6
4	2237	100	0



Şekil 4.6 Elek Analizi

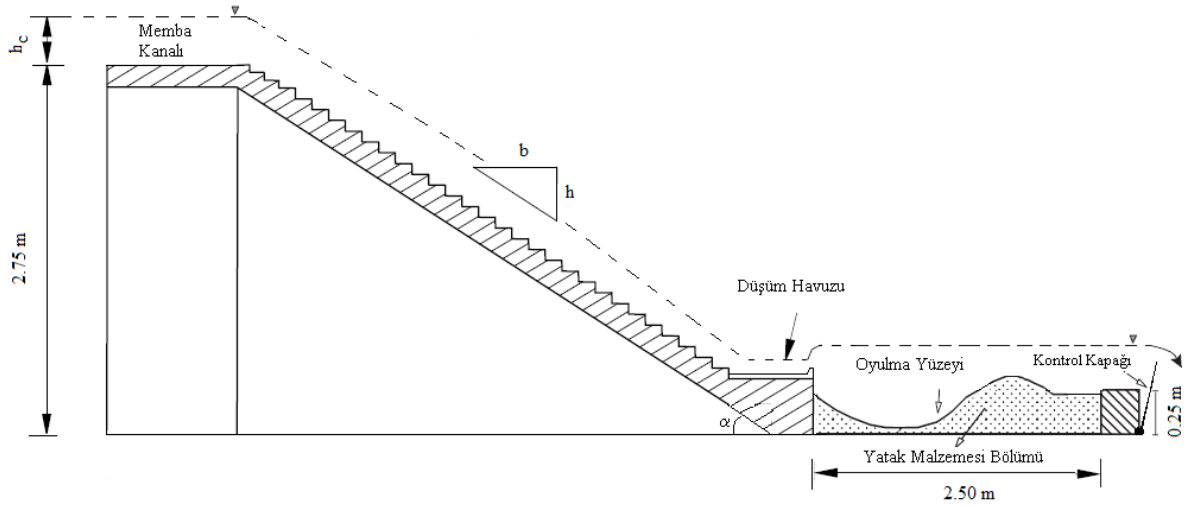
4.5 Mansap Kanalı (Kuyruk Suyu)

Mansap kanalı sonuna mansaptaki su seviyesini (H_1) istenilen şekilde ayarlamak amacıyla yükseklikleri 25,26,27,28,29,30 cm olan kare kesitli kabartıcılar yerleştirilmiştir.

4.6 Deneylerin Yapılışı

Şekil 4.7’de verilen deney düzeneği üzerinde yapılan çalışmalarda, oyulma çukuru geometrisini belirlemek amacıyla olayla ilgili parametrelerin ölçümü yapılmıştır. Geri besleme sistemi ile çalışan deney düzeneğinde, su ana su deposundan pompa vasıtasıyla su tankına basılarak iletim borularına iletilmektedir. Buradan dolusavak kanalına gelen akım, kanal mansabında yerleştirilen boşaltım kanalından sonra mansap (kuyruksuyu) kanalına düşürülür. Mansaba doğru ilerleyen akım, havuz mansabından tahliye hattı yoluyla yeniden ana su deposuna dönmektedir. Sisteme verilen akımın debisi, debi ayar vanası yardımı ile düzenlenmiştir. Mansap kanalı üzerine yerleştirilmiş bir limnimetre bulunmaktadır. Kum havuzu üzerindeki limnimetreden maksimum oyulma derinliği ölçülmektedir. Birim debi (q), toplam debi (Q) ve kanal genişliği (B) kullanılarak bulunmuştur. Mansap kanalının yan duvarları üzerine ölçüm sehpası sabitlenmiştir. Bu sehpa üzerine yerleştirilen hareketli bir ray üzerinde bulunan limnimetre ile x ve y yönlerinde okumalar yapılmaktadır. Ölçüm sehpasının iki ayağı üzerinde bulunan cetveller yardımı ile x yönünde, limnimetre rayı üzerindeki cetvel ile y yönünde ölçümler gerçekleştirilmektedir. Ölçümlerde

kullanılan limnometrelerle cm'nin 1/10'i hassasiyetinde okumalar yapılmıştır. Dolusavak düşü havuzu ucunun ekseni x (B) ve y (L) yönlerinin başlangıç (sıfır) noktası kabul edilmiştir.



Şekil 4.7 Deney düzeneği

Bu deneysel çalışma Şekil 4.7'de kesiti verilen ve Şekil 4.2'de resmi görülen deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düzenek üzerinde eşik yüksekliği ve akımın debisi kademeli olarak değiştirilerek oyulma derinliği değişimleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada, debi ölçümleri memba tarafına yerleştirilen debimetre vasıtasıyla yapılmış, debi ayarı ise debimetre önündeki bir vanayla yapılmıştır. Çalışma sırasında genişliği 30 cm olan dikdörtgen kesitli boşaltım kanalından verilen debiler $Q = 5 \text{ L/sn}$ ile $Q = 30 \text{ L/sn}$ arasında ve eşik yükseklikleri de 0 cm ile 5 cm arasında değiştirilmiştir.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Eşik Yüksekliğinin 0 cm Olması Alternatifi

Bu alternatifte eşik yüksekliği 0 cm alınmıştır. Debiler $Q = 5 \text{ L/sn'}$ 'den başlamak üzere $Q = 30 \text{ L/sn'}$ ye kadar artırılarak her artım için oyulma derinlikleri ve uzunlukları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda gösterilmiş ve şekillerdeki grafiklerle değerlendirilmesi yapılmıştır. Tablo ve şekillerde h_e eşik yüksekliğini, H_1 mansap su yüksekliğini, h_0 maksimum oyulma derinliğini, L_0 ise oyulma yastık uzunluğunu göstermektedir.

Tablo 5.1 $t = 0 \text{ cm}$ ve $z = 25 \text{ cm}$ için oyulma değerleri.

$q=Q/B \text{ (L/sn.m)}$	$H_1 \text{ (cm)}$	$h_0 \text{ (cm)}$	$L_0 \text{ (cm)}$	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	27,6	0	0	0	0
33,33	28,4	1,5	17	0,05	0,61
50	28,9	2,5	37	0,08	1,5
66,67	29,5	4,5	77	0,15	2,61
83,33	29,9	6,5	110	0,21	3,67
100	30,3	7	115	0,23	3,79

Tablo 5.2 $t = 0 \text{ cm}$ ve $z = 26 \text{ cm}$ için oyulma değerleri.

$q=Q/B \text{ (L/sn.m)}$	$H_1 \text{ (cm)}$	$h_0 \text{ (cm)}$	$L_0 \text{ (cm)}$	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	28,6	0	0	0	0
33,33	29,4	1,2	15	0,04	0,59
50	29,9	2,2	33	0,07	1,28
66,67	30,5	4	65	0,13	2,25
83,33	30,9	6	97	0,19	3,14
100	31,3	6,8	112	0,21	3,57

Tablo 5.3 $t = 0 \text{ cm}$ ve $z = 27 \text{ cm}$ için oyulma değerleri.

$q=Q/B \text{ (L/sn.m)}$	$H_1 \text{ (cm)}$	$h_0 \text{ (cm)}$	$L_0 \text{ (cm)}$	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	29,6	0	0	0	0
33,33	30,4	1	13	0,03	0,42
50	30,9	2	30	0,06	0,97
66,67	31,5	3,6	71	0,11	2,13
83,33	31,9	5,2	82	0,16	2,57
100	32,3	6	95	0,18	2,92

Tablo 5.4 $t=0$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.

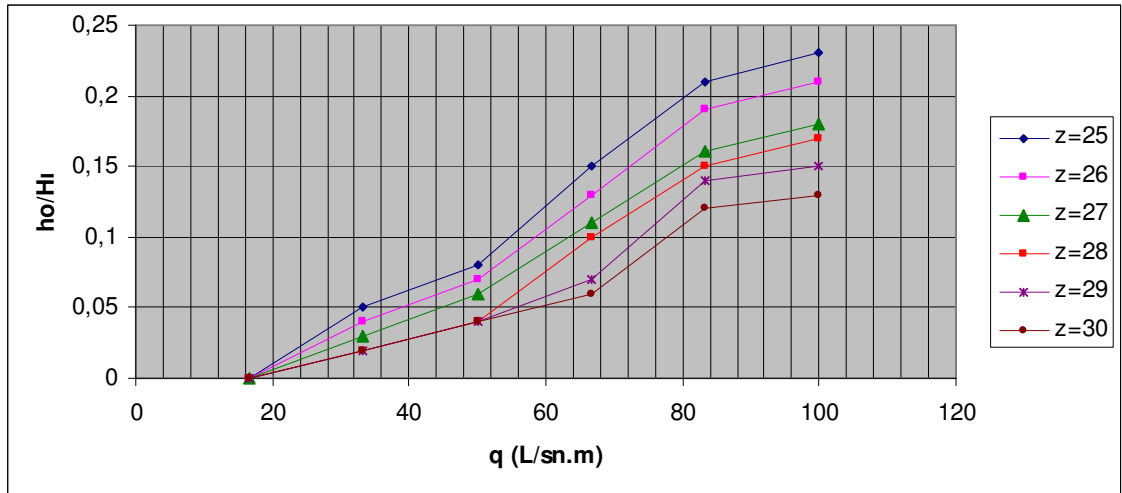
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	30,6	0	0	0	0
33,33	31,4	0,8	12	0,02	0,38
50	31,9	1,5	22	0,04	0,69
66,67	32,5	3,5	43	0,10	1,32
83,33	32,9	5	73	0,15	2,21
100	33,3	5,6	86	0,17	2,58

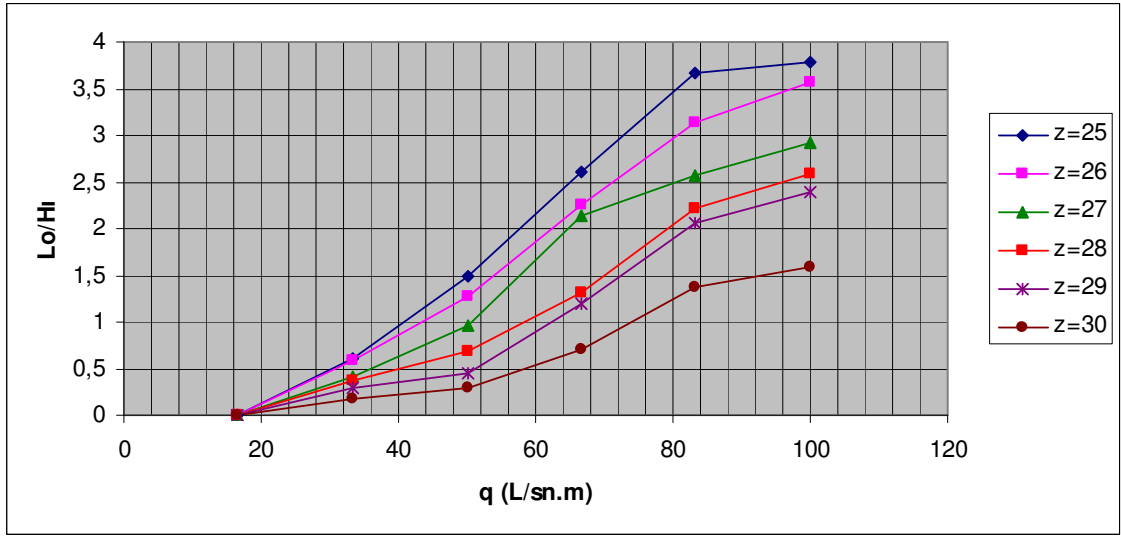
Tablo 5.5 $t=0$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	31,6	0	0	0	0
33,33	32,4	0,7	10	0,02	0,3
50	32,9	1,4	15	0,04	0,45
66,67	33,5	2,5	40	0,07	1,19
83,33	33,9	4,8	70	0,14	2,06
100	34,3	5	82	0,15	2,39

Tablo 5.6 $t=0$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	32,6	0	0	0	0
33,33	33,4	0,6	6	0,02	0,18
50	33,9	1,3	10	0,04	0,3
66,67	34,5	2	21	0,06	0,7
83,33	34,9	4	48	0,12	1,38
100	35,3	4,5	56	0,13	1,59

**Şekil 5.1** $t=0$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde h_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.



Şekil 5.2 $t=0$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde L_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerde eşiksiz durumda birim debideki değişimin oyulma derinliği-mansap su yüksekliği oranına ve oyulma uzunluğu-mansap su yüksekliği oranına etkisi gösterilmiştir. Her bir tabloyu tek başına incelediğimizde birim debideki artışın mansap su yüksekliğini arttırdığını görmekteyiz. Debideki artış aynı zamanda maksimum oyulma derinliği ve uzunluğunda da artışa neden olmaktadır. Bunun yanı sıra tabloların tümü bir arada incelediğinde eşik yüksekliği sabit tutulduğunda mansap yüksekliğinin arttırılması halinde gerek maksimum oyulma derinliği gerekse oyulma yastık uzunluğunda azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç grafiklerde de açıkça görülmektedir.

5.2 Eşik Yüksekliğinin $t=1$ cm Olması Alternatifi

Bu alternatifte eşik yüksekliği 1 cm alınmıştır. Debiler $Q = 5$ L/sn'den başlamak üzere $Q = 30$ L/sn'ye kadar artırılarak her artım için oyulma derinlikleri ve uzunlukları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda gösterilmiş ve şekillerdeki grafiklerle değerlendirilmesi yapılmıştır. Tablo ve şekillerde h_e eşik yüksekliğini, H_1 mansap su yüksekliğini, h_0 maksimum oyulma derinliğini, L_0 ise oyulma uzunluğunu göstermektedir.

Tablo 5.7 $t=1$ cm ve $z=25$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	27,6	0	0	0	0
33,33	28,4	1	20	0,04	0,53
50	28,9	1,5	37	0,05	1,13
66,67	29,5	3,5	77	0,12	2,21
83,33	29,9	4,2	110	0,14	3,28
100	30,3	4,5	115	0,15	3,3

Tablo 5.8 $t=1$ cm ve $z=26$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	28,6	0	0	0	0
33,33	29,4	0,8	17	0,03	0,48
50	29,9	1,3	33	0,04	1,08
66,67	30,5	3	71	0,10	2,06
83,33	30,9	4	97	0,13	2,57
100	31,3	4,3	112	0,14	2,94

Tablo 5.9 $t=1$ cm ve $z=27$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	29,6	0	0	0	0
33,33	30,4	0,6	16	0,02	0,43
50	30,9	1,1	30	0,04	0,97
66,67	31,5	2,5	65	0,08	1,53
83,33	31,9	3,5	82	0,11	2,22
100	32,3	4,2	95	0,13	2,58

Tablo 5.10 $t=1$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.

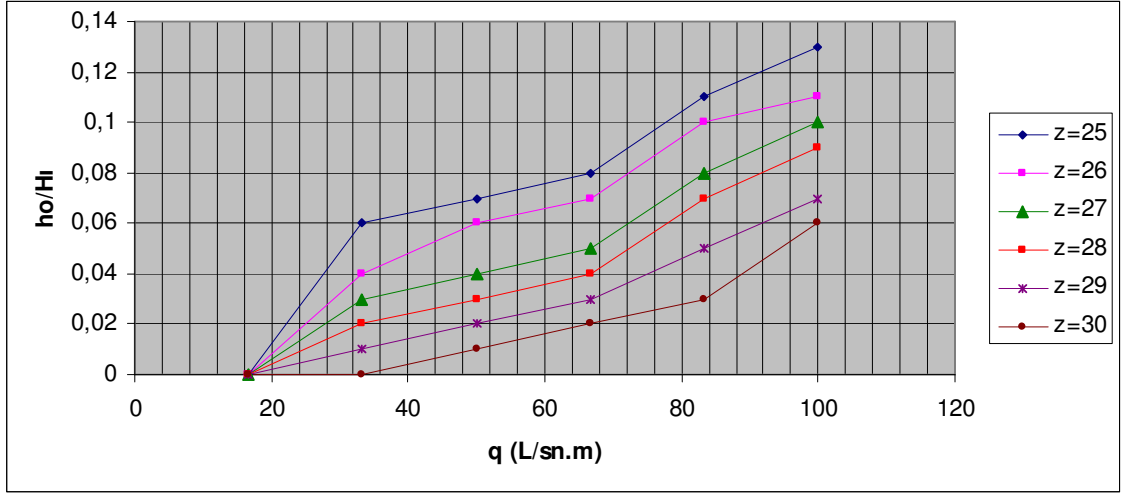
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	30,6	0	0	0	0
33,33	31,4	0,5	15	0,02	0,38
50	31,9	1	22	0,03	0,69
66,67	32,5	2	43	0,06	1,32
83,33	32,9	2,5	73	0,08	2,14
100	33,3	4	86	0,12	2,48

Tablo 5.11 $t=1$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.

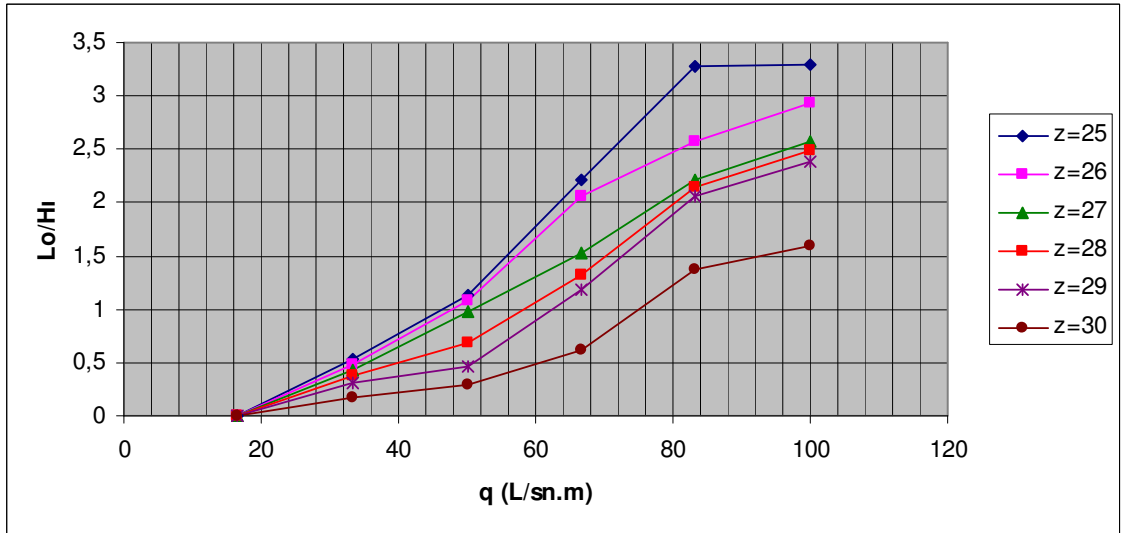
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	31,6	0	0	0	0
33,33	32,4	0,3	10	0,01	0,31
50	32,9	0,5	15	0,02	0,46
66,67	33,5	1,2	40	0,04	1,19
83,33	33,9	2	70	0,06	2,06
100	34,3	3	82	0,09	2,39

Tablo 5.12 $t=1$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	32,6	0	0	0	0
33,33	33,4	0,1	6	0,00	0,18
50	33,9	0,3	10	0,01	0,29
66,67	34,5	1	21	0,03	0,61
83,33	34,9	1,5	48	0,04	1,38
100	35,3	2	56	0,06	1,59



Şekil 5.3 $t=1$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde h_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.



Şekil 5.4 $t=1$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde L_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerde $t=1$ cm durumunda birim debideki değişimin oyulma derinliği-mansap su yüksekliği oranına ve oyulma uzunluğu-mansap su yüksekliği oranına etkisi

gösterilmiştir. Her bir tabloyu tek başına incelediğimizde birim debideki artışın mansap su yüksekliğini arttırdığını görmekteyiz. Debideki artış aynı zamanda maksimum oyulma derinliği ve uzunluğunda da artışa neden olmaktadır. Bunun yanı sıra tabloların tümü bir arada incelediğinde eşik yüksekliği sabit tutulduğunda mansap yüksekliğinin arttırılması halinde gerek maksimum oyulma derinliği gerekse oyulma yastık uzunluğunda azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç grafiklerde de açıkça görülmektedir.

5.3 Eşik Yüksekliğinin $t=2$ cm Olması Alternatifi

Bu çalışmada eşik yüksekliği 2 cm alınmıştır. Debiler $Q = 5$ L/sn'den başlamak üzere $Q = 30$ L/sn'ye kadar beşer beşer artırılarak her artım için oyulma derinlikleri ve uzunlukları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda gösterilmiş ve şekillerdeki grafiklerle değerlendirilmesi yapılmıştır. Tablo ve şekillerde h_e eşik yüksekliğini, H_1 mansap su yüksekliğini, h_0 oyulma derinliğini, L_0 ise oyulma uzunluğunu göstermektedir.

Tablo 5.13 $t = 2$ cm ve $z=25$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	27,6	0	0	0	0
33,33	28,4	0,8	3	0,03	0,21
50	28,9	1,5	6	0,04	0,91
66,67	29,5	2,5	14	0,08	1,37
83,33	29,9	3,2	33	0,11	2,11
100	30,3	4	50	0,13	2,65

Tablo 5.14 $t = 2$ cm ve $z=26$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	28,6	0	0	0	0
33,33	29,4	0,7	2	0,02	0,17
50	29,9	1,2	4	0,04	0,76
66,67	30,5	2	10	0,07	1,23
83,33	30,9	3	31	0,10	1,28
100	31,3	3,5	40	0,11	1,72

Tablo 5.15 $t = 2$ cm ve $z=27$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	29,6	0	0	0	0
33,33	30,4	0,6	1	0,02	0,15
50	30,9	1	2	0,03	0,56
66,67	31,5	1,5	7	0,05	1,1
83,33	31,9	2,5	23	0,08	1,15
100	32,3	3,2	37	0,10	1,22

Tablo 5.16 $t=2$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.

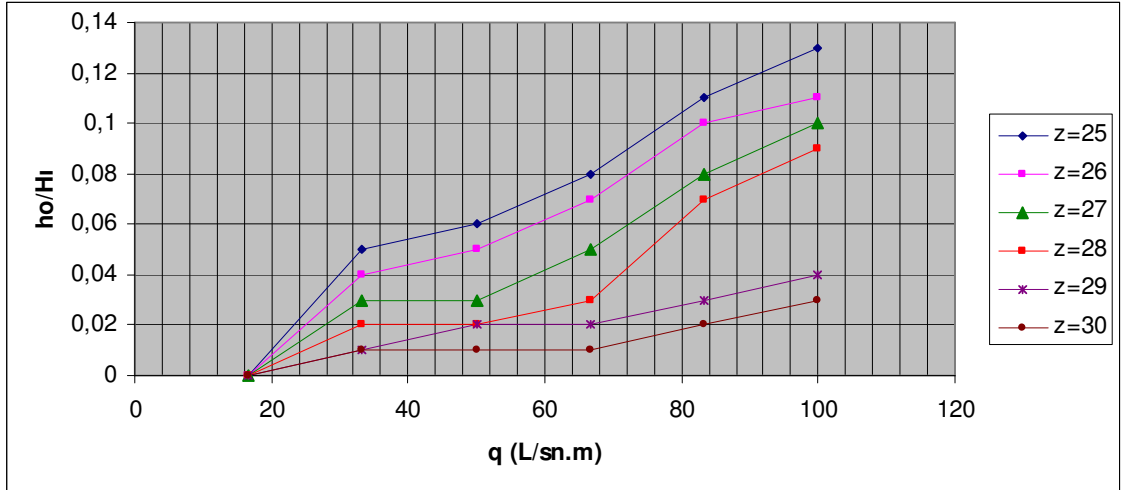
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	30,6	0	0	0	0
33,33	31,4	0,5	1	0,02	0,08
50	31,9	0,7	1	0,02	0,33
66,67	32,5	1	2	0,03	0,5
83,33	32,9	2,3	18	0,07	0,75
100	33,3	3	30	0,09	0,9

Tablo 5.17 $t=2$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.

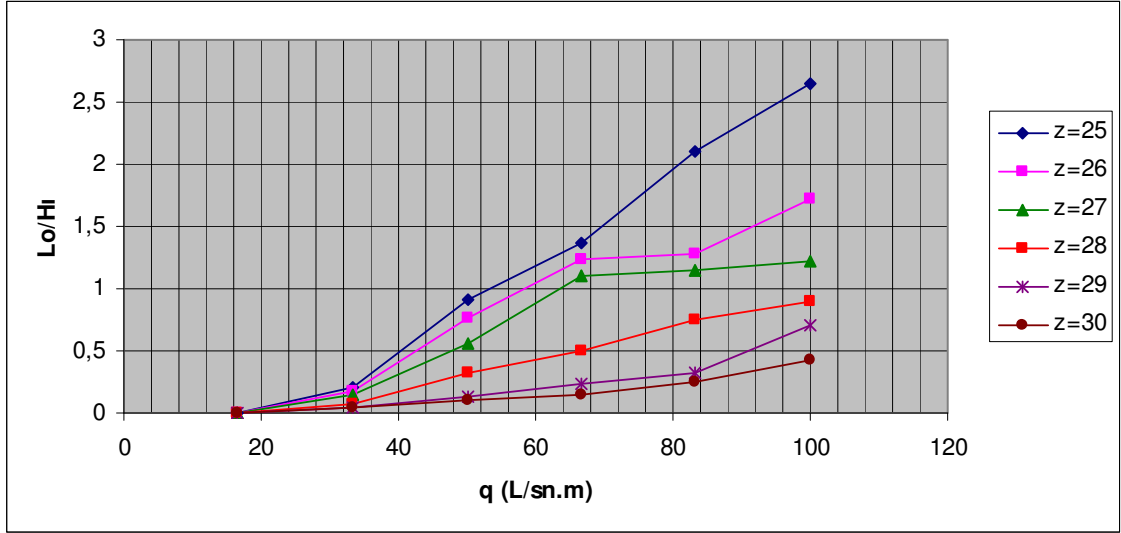
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	31,6	0	0	0	0
33,33	32,4	0,4	1	0,01	0,05
50	32,9	0,6	1	0,02	0,13
66,67	33,5	0,8	1	0,02	0,23
83,33	33,9	1	11	0,03	0,32
100	34,3	1,5	24	0,04	0,7

Tablo 5.18 $t=2$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	32,6	0	0	0	0
33,33	33,4	0,2	1	0,01	0,04
50	33,9	0,5	1	0,01	0,1
66,67	34,5	0,6	1	0,02	0,15
83,33	34,9	0,7	3	0,02	0,25
100	35,3	1	15	0,03	0,42



Şekil 5.5 $t=2$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde h_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.



Şekil 5.6 $t=2$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde L_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerde $t=2$ cm durumunda birim debideki değişimin oyulma derinliği-mansap su yüksekliği oranına ve oyulma uzunluğu-mansap su yüksekliği oranına etkisi gösterilmiştir. Her bir tabloyu tek başına incelediğimizde birim debideki artışın mansap su yüksekliğini arttırdığını görmekteyiz. Debideki artış aynı zamanda maksimum oyulma derinliği ve uzunluğunda da artışa neden olmaktadır. Bunun yanı sıra tabloların tümü bir arada incelediğinde eşik yüksekliği sabit tutulduğunda mansap yüksekliğinin artırılması halinde gerek maksimum oyulma derinliği gerekse oyulma yastık uzunluğunda azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç grafiklerde de açıkça görülmektedir.

5.4 Eşik Yüksekliğinin $t=3$ cm Olması Alternatifi

Bu çalışmada eşik yüksekliği 3 cm alınmıştır. Debiler $Q = 5$ L/sn'den başlamak üzere $Q = 30$ L/sn'ye kadar artırılarak her artım için oyulma derinlikleri ve uzunlukları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda gösterilmiş ve şekillerdeki grafiklerle değerlendirilmesi yapılmıştır. Tablo ve şekillerde h_e eşik yüksekliğini, H_1 mansap su yüksekliğini, h_0 oyulma derinliğini, L_0 ise oyulma uzunluğunu göstermektedir.

Tablo 5.19 t=3 cm ve z=25 cm için oyulma değerleri.

q=Q/B (L/sn.m)	H ₁ (cm)	h ₀ (cm)	L ₀ (cm)	h ₀ /H1	L ₀ /H1
16,66	27,6	0	0	0	0
33,33	28,4	0	0	0	0,12
50	28,9	1	10	0,03	0,55
66,67	29,5	1,7	20	0,06	0,88
83,33	29,9	2,5	33	0,09	1,3
100	30,3	3,5	40	0,12	1,6

Tablo 5.20 t=3 cm ve z=26 cm için oyulma değerleri.

q=Q/B (L/sn.m)	H ₁ (cm)	h ₀ (cm)	L ₀ (cm)	h ₀ /H1	L ₀ /H1
16,66	28,6	0	0	0	0
33,33	29,4	0	0	0	0,05
50	29,9	0,5	5	0,02	0,31
66,67	30,5	1,5	16	0,05	0,54
83,33	30,9	2,2	20	0,07	0,77
100	31,3	3	27	0,10	1,25

Tablo 5.21 t=3 cm ve z=27 cm için oyulma değerleri.

q=Q/B (L/sn.m)	H ₁ (cm)	h ₀ (cm)	L ₀ (cm)	h ₀ /H1	L ₀ /H1
16,66	29,6	0	0	0	0
33,33	30,4	0	0	0	0
50	30,9	0	0	0	0,17
66,67	31,5	0,8	12	0,03	0,28
83,33	31,9	1,8	15	0,06	0,47
100	32,3	2,5	21	0,08	0,89

Tablo 5.22 t=3 cm ve z=28 cm için oyulma değerleri.

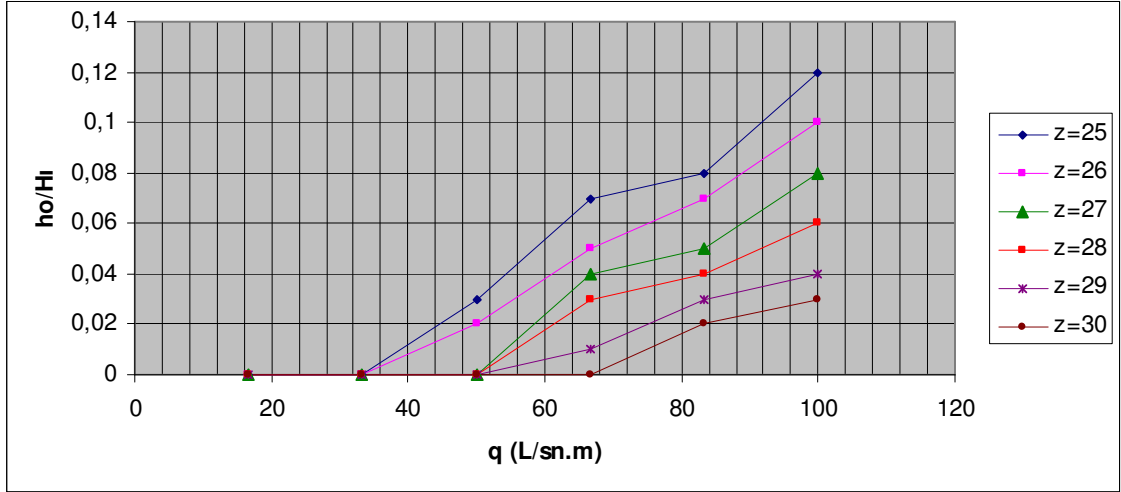
q=Q/B (L/sn.m)	H ₁ (cm)	h ₀ (cm)	L ₀ (cm)	h ₀ /H1	L ₀ /H1
16,66	30,6	0	0	0	0
33,33	31,4	0	0	0	0
50	31,9	0	0	0	0,05
66,67	32,5	0,9	10	0,03	0,21
83,33	32,9	1,3	12	0,04	0,36
100	33,3	1,5	19	0,05	0,6

Tablo 5.23 t=3 cm ve z=29 cm için oyulma değerleri.

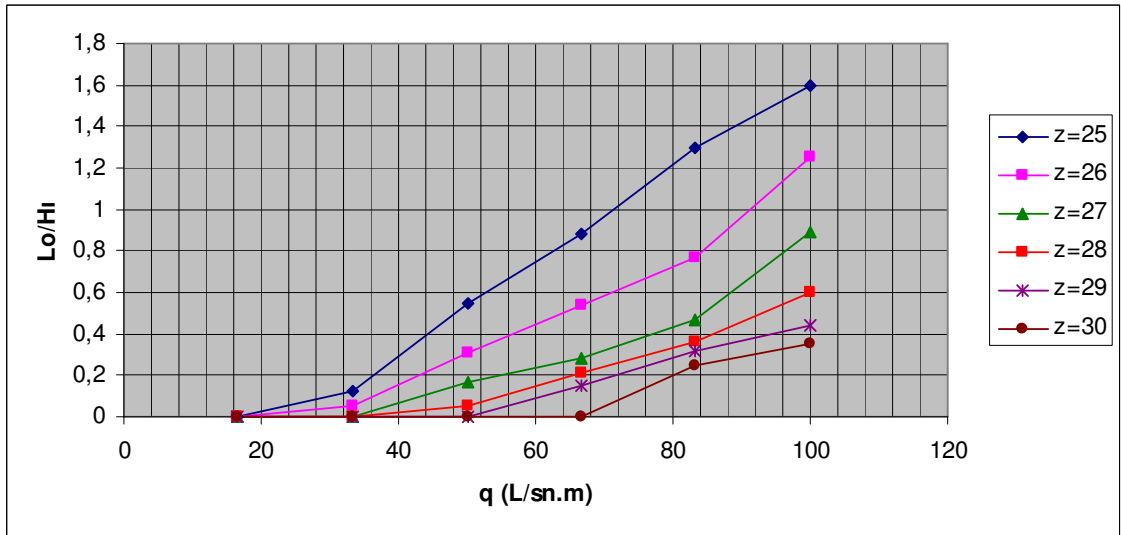
q=Q/B (L/sn.m)	H ₁ (cm)	h ₀ (cm)	L ₀ (cm)	h ₀ /H1	L ₀ /H1
16,66	31,6	0	0	0	0
33,33	32,4	0	0	0	0
50	32,9	0	0	0	0
66,67	33,5	0,5	5	0,01	0,15
83,33	33,9	1	11	0,03	0,32
100	34,3	1,4	15	0,04	0,44

Tablo 5.24 $t=3$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	32,6	0	0	0	0
33,33	33,4	0	0	0	0
50	33,9	0	0	0	0
66,67	34,5	0	0	0	0
83,33	34,9	0,7	10	0,02	0,25
100	35,3	1	13	0,03	0,35



Şekil 5.7 $t=3$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde h_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.



Şekil 5.8 $t=3$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde L_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerde $t=3$ cm durumunda birim debideki değişimin oyulma derinliği-mansap su yüksekliği oranına ve oyulma uzunluğu-mansap su yüksekliği oranına etkisi gösterilmiştir. Her bir tabloyu tek başına incelediğimizde birim debideki artışın mansap su

yüksekliğini arttırdığını görmekteyiz. Debideki artış aynı zamanda maksimum oyulma derinliği ve uzunluğunda da artışa neden olmaktadır. Bunun yanı sıra tabloların tümü bir arada incelediğinde eşik yüksekliği sabit tutulduğunda mansap yüksekliğinin artırılması halinde gerek maksimum oyulma derinliği gerekse oyulma yastık uzunluğunda azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç grafiklerde de açıkça görülmektedir.

5.5 Eşik Yüksekliğinin t=4 cm Olması Alternatifi

Bu çalışmada eşik yüksekliği 4 cm alınmıştır. Debiler $Q = 5 \text{ L/sn'}$ den başlamak üzere $Q = 30 \text{ L/sn'}$ ye kadar artırılarak her artım için oyulma derinlikleri ve uzunlukları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda gösterilmiş ve şekillerdeki grafiklerle değerlendirilmesi yapılmıştır. Tablo ve şekillerde h_e eşik yüksekliğini, H_1 mansap su yüksekliğini, h_0 oyulma derinliğini, L_0 ise oyulma uzunluğunu göstermektedir.

Tablo 5.25 t=4 cm ve z=25 cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B \text{ (L/sn.m)}$	$H_1 \text{ (cm)}$	$h_0 \text{ (cm)}$	$L_0 \text{ (cm)}$	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	27,6	0	0	0	0
33,33	28,4	0	0	0	0
50	28,9	0,5	7	0,02	0,24
66,67	29,5	1,5	18	0,05	0,61
83,33	29,9	2,8	30	0,08	0,9
100	30,3	3	38	0,11	1,25

Tablo 5.26 t=4 cm ve z=26 cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B \text{ (L/sn.m)}$	$H_1 \text{ (cm)}$	$h_0 \text{ (cm)}$	$L_0 \text{ (cm)}$	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	28,6	0	0	0	0
33,33	29,4	0	0	0	0
50	29,9	0	0	0	0
66,67	30,5	0,9	12	0,03	0,39
83,33	30,9	1,5	17	0,05	0,55
100	31,3	2,2	20	0,07	0,64

Tablo 5.27 t=4 cm ve z=27 cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B \text{ (L/sn.m)}$	$H_1 \text{ (cm)}$	$h_0 \text{ (cm)}$	$L_0 \text{ (cm)}$	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	29,6	0	0	0	0
33,33	30,4	0	0	0	0
50	30,9	0	0	0	0
66,67	31,5	0,7	7	0,02	0,22
83,33	31,9	1,5	11	0,05	0,34
100	32,3	2	16	0,06	0,50

Tablo 5.28 $t=4$ cm ve $z=28$ cm için oyulma değerleri.

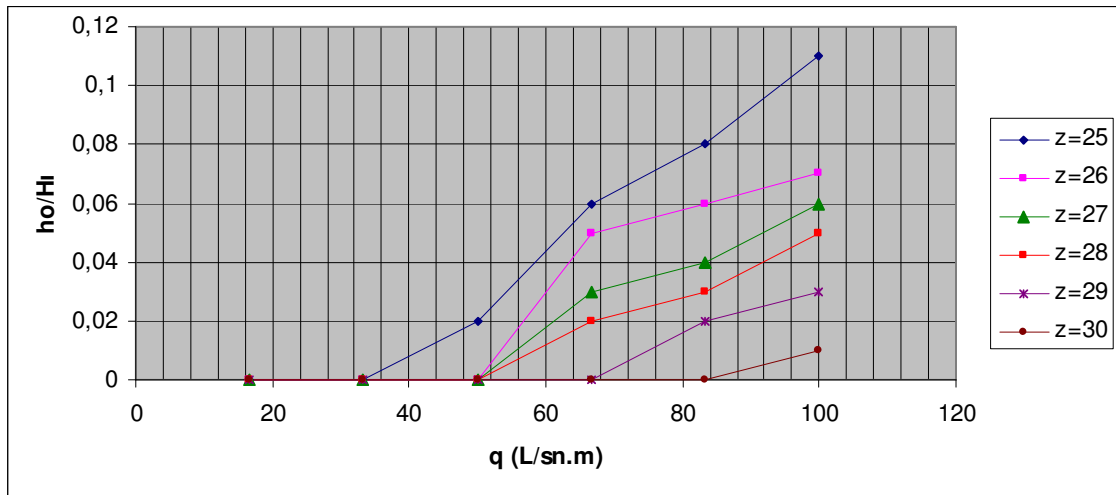
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	30,6	0	0	0	0
33,33	31,4	0	0	0	0
50	31,9	0	0	0	0
66,67	32,5	0,5	3	0,02	0,09
83,33	32,9	1	10	0,03	0,30
100	33,3	1,8	15	0,05	0,45

Tablo 5.29 $t=4$ cm ve $z=29$ cm için oyulma değerleri.

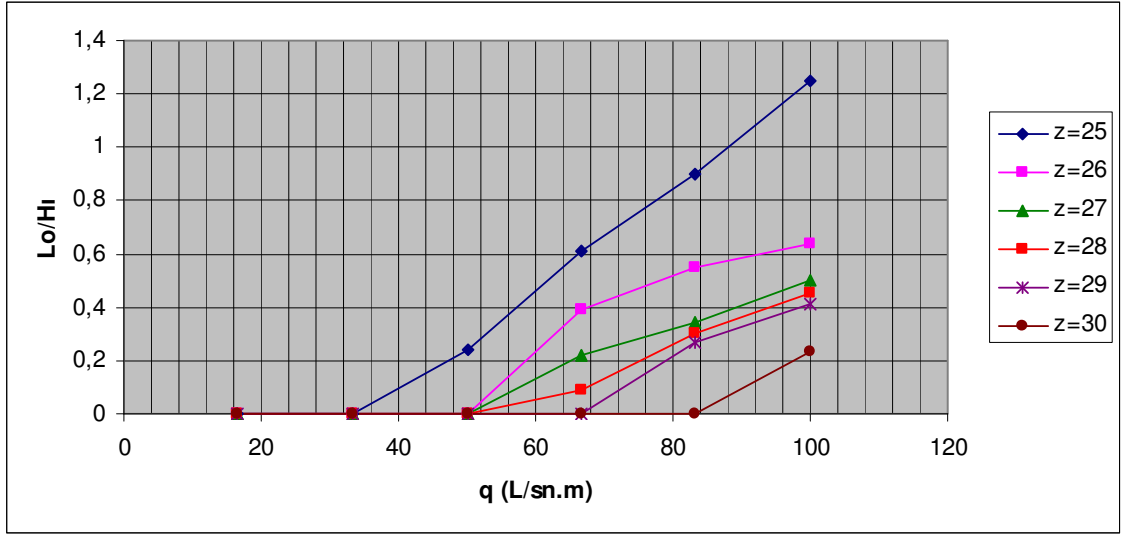
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	31,6	0	0	0	0
33,33	32,4	0	0	0	0
50	32,9	0	0	0	0
66,67	33,5	0	0	0	0
83,33	33,9	0,8	9	0,02	0,27
100	34,3	1,1	14	0,03	0,41

Tablo 5.30 $t=4$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	32,6	0	0	0	0
33,33	33,4	0	0	0	0
50	33,9	0	0	0	0
66,67	34,5	0	0	0	0
83,33	34,9	0	0	0	0
100	35,3	0,5	8	0,01	0,23



Şekil 5.9 $t=4$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde h_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.



Şekil 6.0 $t=4$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde L_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerde $t=4$ cm durumunda birim debideki değişimin oyulma derinliği-mansap su yüksekliği oranına ve oyulma uzunluğu-mansap su yüksekliği oranına etkisi gösterilmiştir. Her bir tabloyu tek başına incelediğimizde birim debideki artışın mansap su yüksekliğini arttırdığını görmekteyiz. Debideki artış aynı zamanda maksimum oyulma derinliği ve uzunluğunda da artışa neden olmaktadır. Bunun yanı sıra tabloların tümü bir arada incelediğinde eşik yüksekliği sabit tutulduğunda mansap yüksekliğinin artırılması halinde gerek maksimum oyulma derinliği gerekse oyulma yastık uzunluğunda azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç grafiklerde de açıkça görülmektedir.

5.6 Eşik Yüksekliğinin $t=5$ cm Olması Alternatifi

Bu çalışmada eşik yüksekliği 5 cm alınmıştır. Debiler $Q = 5$ L/sn'den başlamak üzere $Q = 30$ L/sn'ye kadar artırılarak her artım için oyulma derinlikleri ve uzunlukları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda gösterilmiş ve şekillerdeki grafiklerle değerlendirilmesi yapılmıştır. Tablo ve şekillerde h_e eşik yüksekliğini, H_1 mansap su yüksekliğini, h_0 oyulma derinliğini, L_0 ise oyulma uzunluğunu göstermektedir.

Tablo 5.31 t=5 cm ve z=25 cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	27,6	0	0	0	0
33,33	28,4	0	0	0	0
50	28,9	0	0	0	0
66,67	29,5	1	14	0,03	0,47
83,33	29,9	2,5	22	0,07	0,74
100	30,3	3	30	0,09	0,99

Tablo 5.32 t=5 cm ve z=26 cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	28,6	0	0	0	0
33,33	29,4	0	0	0	0
50	29,9	0	0	0	0
66,67	30,5	0,8	10	0,03	0,23
83,33	30,9	1,2	16	0,04	0,42
100	31,3	1,8	19	0,06	0,51

Tablo 5.33 t=5 cm ve z=27 cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	29,6	0	0	0	0
33,33	30,4	0	0	0	0
50	30,9	0	0	0	0
66,67	31,5	0,5	8	0,02	0,25
83,33	31,9	1	13	0,03	0,41
100	32,3	1,5	18	0,05	0,56

Tablo 5.34 t=5 cm ve z=28 cm için oyulma değerleri.

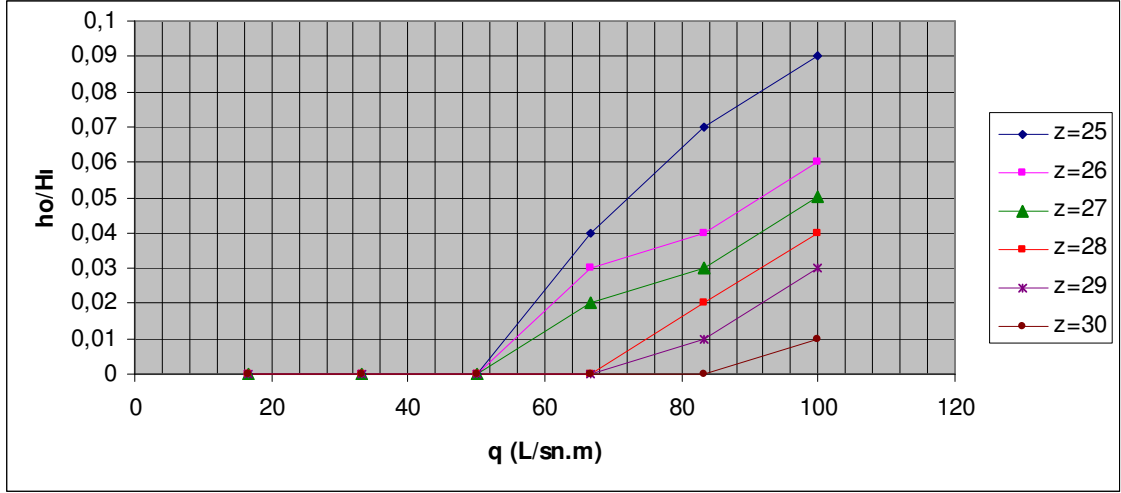
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	30,6	0	0	0	0
33,33	31,4	0	0	0	0
50	31,9	0	0	0	0
66,67	32,5	0	0	0	0
83,33	32,9	0,8	9	0,02	0,27
100	33,3	1,2	15	0,04	0,45

Tablo 5.35 t=5 cm ve z=29 cm için oyulma değerleri.

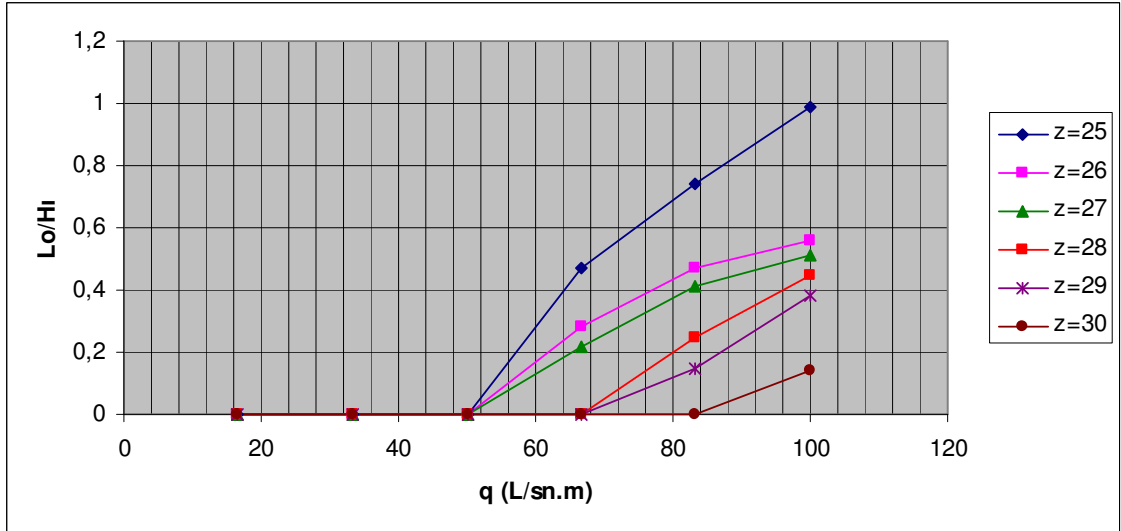
$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	$h_0/H1$	$L_0/H1$
16,66	31,6	0	0	0	0
33,33	32,4	0	0	0	0
50	32,9	0	0	0	0
66,67	33,5	0	0	0	0
83,33	33,9	0,5	5	0,01	0,15
100	34,3	1	13	0,03	0,38

Tablo 5.36 $t=5$ cm ve $z=30$ cm için oyulma değerleri.

$q=Q/B$ (L/sn.m)	H_1 (cm)	h_0 (cm)	L_0 (cm)	h_0/H_1	L_0/H_1
16,66	32,6	0	0	0	0
33,33	33,4	0	0	0	0
50	33,9	0	0	0	0
66,67	34,5	0	0	0	0
83,33	34,9	0	0	0	0
100	35,3	0,5	5	0,01	0,14



Şekil 6.1 $t=5$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde h_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.



Şekil 6.2 $t=5$ cm durumundaki farklı mansap su yüksekliklerinde L_0/H_1 değerinin birim debi ile değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerde $t=5$ cm durumunda birim debideki değişimin oyulma derinliği-mansap su yüksekliği oranına ve oyulma uzunluğu-mansap su yüksekliği oranına etkisi

gösterilmiştir. Her bir tabloyu tek başına incelediğimizde birim debideki artışın mansap su yüksekliğini arttırdığını görmekteyiz. Debideki artış aynı zamanda maksimum oyulma derinliği ve uzunluğunda da artışa neden olmaktadır. Bunun yanı sıra tabloların tümü bir arada incelediğinde eşik yüksekliği sabit tutulduğunda mansap yüksekliğinin arttırılması halinde gerek maksimum oyulma derinliği gerekse oyulma yastık uzunluğunda azalma olduğu görülmektedir. Bu sonuç grafiklerde de açıkça görülmektedir.

Son olarak çalışmanın sonuna kadar yaptığımız tabloların ve grafiklerin tamamını birden incelediğimizde aynı mansap uzunlukları ve aynı debilerdeki maksimum oyulma ve oyulma yastık uzunluklarında eşik yüksekliğindeki artışa bağlı olarak azalma olduğunu görmekteyiz.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Yüksek düşümlü barajların dolusavaklarından bırakılan debilerin enerjisinin mansapta herhangi bir sorun yaratmadan sönmülenebilmesi için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden biri de düşüm yatağı sonuna yerleştirilen bir sıçratma eşiği ile suyun mansaba bırakılmasıdır.

Laboratuarda yapılan model deneylerinde dolusavaklardan bırakılan suyun enerjisinin yol açacağı mansap tabanındaki oyulmaların önceden saptanması mümkün olmamıştır. Yapılan literatür incelemeleri, eşik yüksekliğinin enerjinin sönmülenmesine dolayısıyla oyulmaya etkisini hesaplamaya yetmemiştir. Bizi bu araştırma çalışmasına yönelten neden budur.

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yürütülen bu çalışmada kullanılan altı farklı düşü havuzu eşik tipi ve altı farklı mansap su derinliği ile beş ayrı debide meydana gelen yersel oyulmaların geometrisi incelenmiştir. Bölüm 4'te deneylerin yapıldığı deney düzeneği şematize edilmiş ve ölçüm yöntemleri anlatılmıştır. Bölüm 2 ve 3'te literatür çalışması verilmiş ve deney sonuçları ile yapılan değerlendirme Bölüm 5 içinde aktarılmıştır. Bölüm 5'te, analiz edilen deney serilerin ile ilgili çizimler, grafikler ve yorumlar verilmiştir.

Bu çalışmada enerji yüksekliğinin oyulmaya etkisini tespit etmek için bir dizi deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Eşik yüksekliğindeki artış enerjinin daha iyi sönmülenmesini dolayısıyla oyulmanın en aza indirgenmesini sağlamaktadır.
- Debi arttıkça oyulma derinliği de artmaktadır. Her yersel oyulma farklı karakter taşımaktadır.
- h_0/H_1 değerleri test edilen tüm deney dizilerinde birim debi ile doğru orantılı bir değişim göstermiştir.
- h_0/H_1 değerleri mansap su derinliği arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni ise oyulmayı meydana getiren su jetinin, mansap su seviyesinin artmasıyla oluşan su yastığına dalarak sahip olduğu enerjiyi kaybetmesidir.
- Test edilen aynı mansap su seviyelerine sahip deney dizilerinde genellikle maksimum birim debilerde oyulma uzunlukları aynı çıkmaktadır. Mansap su

derinliğinin 25 cm olduğu durumlarda oyulma uzunlukları hem büyük olmuşlar hem de birbirlerinden oldukça farklı değerkler almışlardır. Mansap su derinliğinin arttığı deney şartlarında oyulma uzunluğu en az olmuş ve aynı debi değerklerinde birbirine neredeyse eşit olmuştur.

- Tabiki bu çalışmada problemin genel olarak çözümlendiği söylemek yanlış olur. Uygulamada karşılaşılan problemin sınır şartları çoğu zaman daha karmaşıktır. Sınır şartlarında yapılan bazı kabul ve basitleştirmelerle laboratuvar deneylerine dayanan sonuçlara varılmıştır. Sonuçların genelleştirilebilmesi için özellikle doğada ve su yapılarında gözlemlerin yapılması zorunludur.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçların ışığı altında bundan sonra yapılacak çalışmalarda; Zaman faktörü, farklı düşü havuzu geometrileri ve sonuna yerleştirilecek eşikler gibi parametrelerin de incelenmesi yapılabilecek çalışmalara yön vermesi bakımından göz önünde tutulabilecek önerilerdendir.

KAYNAKLAR

- [1] Yıldız, D., 2001, Barajların mansabındaki oyulmalar, DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Yayınları, Ankara.
- [2] Schoklitsch, A., 1932, Kolkbildung unter ueberfallstrahlen, Wasswirtschaft.
- [3] Eggenberger, W. und Müller, R., 1944, Experimentelle und theoretische untersuchungen über das kolkproblem, Zürich.
- [4] Aksoy, Ş., 1975, Yüksek düşülü barajların dolusavağı mansabında kaya tabandaki yersel oyulmalar, DSİ Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [5] Hartung, F. and Husler, E., 1973, Scours, Stilling basins and downstream protection “Under free overfall jets at dams”, Proc. 11 Congress, Q41-R.3 ICOLD, Q41-R.3.
- [6] Cola, R., 1965, Energy dissipation of a high-velocity vertical jet entering a basin, Proc. IAHR 11. Congress, Paper Nr.1.52.
- [7] Veronese, A., 1937, Erosion de fond en aval d’une decharge, I.A.H.R. Meeting for Hydraulic Works, Berlin.
- [8] Shalash, M.S.E., 1959, Die kolkbildung beim ausfluss unter schützen, Diss, Von der Fakultat für Bauwesen der Techn. Hochschule München.
- [9] Yıldız, D., ve Üzücek, E., 1996, Dolusavak sıçratma eşiğinden çıkan jetlerin oluşturduğu oyulma derinliğinin hesaplanması, İMO Teknik Dergi, Cilt 7, Sayı 4, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara.
- [10] Rubinstein, G.L., 1963, Laboratory investigation of local erosion on channel beds below high over-flow dams, Trans of co-ordination conferences on hydraulic engineering, VII. Conference on Hydraulics of High Head Water Discharge Structures, Gosenergoizdat M.L.
- [11] Hay, N. and White, P.R.S., 1975, Effects of air entrainment on the performance of stilling basins, 16th Congress of the I.A.H.R., Sao Paulo.
- [12] Çataklı, O., Özal, K., Tandoğan, A.R. 1973, A study of scours at the end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipators, 11th Congress of Large Dams, Madrid.
- [13] Studenichikov, B.I., 1962, Calcul des drosions locales et quelques moyens d’alleger des evacuateurs, Trudy Gidravlichesko Laboratorit No 8, France.
- [14] Eggenberger, W., 1943, Kolkbildung bei ueberfall und unterströmen, Dissertation, V.A.W., E.T.H., Zürich.

- [15] Martins, R., 1975, Contribution to the knowledge on the scour action of free jets on rocky river beds, 11th Congress on Large Dams, Madrid.
- [16] Mirtsskhulava, T.E., 1967, Mechanism and computation of local and general scour in non-cohesive soils and rock beds, 12th Congress of the I.A.H.R., Fort Collins.
- [17] Taraimovich, I.I., 1978, Deformations of channels below high head spillways on rock foundation, Hydrotechnical Construction, No 9, pp 917-923.
- [18] Gunko; F.G., Soleva, A., 1965, Research on the hydraulic regime and local scour of rivers bed below spillways of high-head dams, 11th Congress of the I.A.H.R., Leningrad.
- [19] Chain, M.W., 1973, Scour at downstream end of dams in Taiwan, I.A.H.R. International Symposium on River Mechanics, Bangkok.
- [20] Martins, R., 1975, Scouring of rocky river beds by free jet spillways.
- [21] Mason, P.J., Arumugan K., 1985, Free jet scour below dams and flip bucket journal of hydraulic engineering, Vol 111, No:2, ASCE.
- [22] Valentin, F., 1967, Considerations concerning in the case of flow under Gates, 12th Congress of I.A.H.R., Fort Collins.
- [23] Novak, P., 1955, Study of stilling basins with special regard to their end sill, 6th Congress of the I.A.H.R, The Hague.
- [24] Jaeger, C., 1939, Ueber dei aehnlichkeit bei flussbaulichen modellversuchen, Wasserwirtschaft.
- [25] Tuna, C.M., 2004, Eşikli ve basamak tipli dolusavaklarda akım ve enerji sönümlenmesinin incelenmesi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Ankara’da doğdum. İlk ve ortaöğretimimi Özel Aydın Koleji ve Ankara Kocatepe Mimar Kemal Lisesi’nde bitirdim. 1999 yılında girmiş olduğum Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2004 yılında tamamladım. 2006 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı’nda başladığım yüksek lisans eğitimime hala devam etmekteyim. İngilizce ve biraz da Almanca bilmekteyim.