T.C.
BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ VE DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ILISU BARAJI DOLUSAVAK HAVALANDIRICISININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Cesur KAPLAN

MAYIS 2018

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ILISU BARAJI DOLUSAVAK HAVALANDIRICISININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Hazırlayan

Cesur KAPLAN

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Cihan AYDIN

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. M. Cihan AYDIN

Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ

Doç. Dr. Fevzi ÖNEN

MAYIS 2018

Cesur KAPLAN tarafından hazırlanan **"Ilısu Barajı Dolusavak Havalandırıcısının Performans Değerlendirmesi"** adlı tez çalışması **09/05/2018** tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir

Jüri Üyeleri	**İmza**
Doç. Dr. M. Cihan AYDIN (Danışman)	
Prof. Dr. Aydın BÜYÜKSARAÇ	
Doç. Dr. Fevzi ÖNEN	

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/06/2018 gün ve 27/22 Sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Koray KÖKSAL
Enstitüsü Müdürü

ÖZET

ILISU BARAJI DOLUSAVAK HAVALANDIRICISININ
PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Cesur KAPLAN

Yüksek Lisans Tezi

Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. M. Cihan AYDIN
2018, 69 sayfa

Bu çalışmada dolusavaklarda beton yüzeyinde oluşan kavitasyon hasarı ve dolusavak havalandırıcıların kavitasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Ilısu barajı ve HES Projesi model alınarak, dolusavak havalandırıcılarının 1982 ilk tasarımı ile 2010 revize tasarımının performansı ve akım karakteristikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile incelenmiştir. İlk olarak Ilısu Baraj dolusavağının 1982 tasarımının üç boyutlu (3B) sayısal modeli sonlu elemanlar ağı ile hazırlanmış; daha sonra hazırlanan bu model ANYSYS-FLUENT programıyla projesindeki hidrolik verilere göre sınır şartları girilerek HAD analizleri yapılmıştır. Ilısu Barajının dolusavağının 1982 tasarımının CFD analizi sonuçları DSİ'nin bazı model deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra, 2010 revize tasarımı model deneyleri olmadığından performans değerlendirilmesi HAD yardımıyla yapılmaya çalışılmıştır. Her iki tasarımın detaylı HAD sonuçları verilmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar 2010 revize tasarımın havalandırma performansının çok daha iyi olduğunu göstermiş ve bu tasarımın dolusavak şut kanallarını kavitasyon hasarından yeterince koruyabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ilısu Barajı, Dolusavak, Kavitasyon, Havalandırıcı, HAD, ANSYS FLUENT

ABSTRACT

PERFORMANCE EVALUATION OF THE ILISU DAM SPILLWAY AERATOR

Cesur KAPLAN

Master Thesis

Bitlis Eren University Graduate School of Sciences
Department of Civil Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN
2018, 69 pages

In this thesis the cavitational damage on the concrete surface of spillways and the effects of aerators on the cavitation wer investigated. The effects of aerators on the cavitation is searched. Firstly, Ilısu Dam and HEPP Project aerations' section in 1982 and revised section in 2010 performance and flow characteristics were analyzed by Computational Fluid Dynamics (CFD). The spillway design of the dam in 1982 was three dimensionally simulated using "Fine Volume Method, FVM". The model prepared with FVM export to ANYSYS-FLUENT Program, and then, analyzed with HAD in accordance with hydraulic data specified in the project. CFD analysis results of the 1982 design of the dam spillway were compared with some experimental model data presented by DSI. Second, the performance evaluations of the revised design of the spillway aerator in 2010 were performed using CFD analysis without physical model experiments. The numerical analysis results of both designs of the spillway aerator were detailed presented and the performance of them were evaluated comparatively. The CFD analyses results showed that the new revised design in 2010 is more efficiency than the old design in 1982, and the new design is sufficient to protect against cavitational damage

Keywords: Ilısu Dam, Spillway, Cavitation, Aerator, CFD, Ansys-Fluent

TEŞEKKÜR

Tez çalışması sırasında her türlü bilgi, teşvik ve deneyimleri ile yardımlarını esirgemeyen Tez Danışmanım Doç. Dr. Mehmet Cihan AYDIN'a, çalışmalarımda yardımcı olan meslektaşım Ahmet KOÇ'a ve teknik ressam Fahrettin AYTEKİN'e ve yüksek lisans eğitimim süresince her türlü maddi ve manevi destekleri ile göstermiş oldukları sabırdan dolayı eşim Şirvan KAPLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezde DSİ tarafından hazırlatılan Ilısu barajı dolusavak projelerinden faydalanılmıştır. Bu imkânı verdiği için DSİ 16. Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
TEŞEKKÜR ..... **iii**
İÇİNDEKİLER DİZİNİ ..... **iv**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **vi**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **vii**
SİMGELER DİZİNİ ..... **ix**
KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR **3**
2.1. Literatür Özeti 3
2.2. Kavitasyon 4
2.2.1. Kavitasyon İndeksi 5
2.2.2. Ayrık Pürüzlülük Yüzeyine Sahip Anolarda Kritik Kavitasyon İndisi 6
2.2.4. Dolusavaklarda Kavitasyon Hasarları 7
2.3.Dolusavak Havalandırıcıları 9
3. MATERYAL VE YÖNTEM **13**
3.1. Ilısu Barajı ve HES Projesi Dolusavak Yapısı 13
3.2. Ilısu Barajı Dolusavak Havalandırıcıları Tasarımı 16
3.3. Dolusavak Havalandırıcılarında Hava Konsantrasyonu 19
3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) 19
3.4.1. ANSYS-Fluent Programı 22
3.4.2. Türbülans Modeli 25
3.3. HAD Analizlerinde Çözüm Ağının Oluşturulması 26
4. BULGULAR **27**
4.1. Ilısu Barajı Havalandırıcısı 1982 Tasarımı HAD Analizi 27
4.2. Ilısu Barajının 1982 Kesiti HAD sonuçları İle Model Deney Analizinin Karşılaştırması 41
4.3. Ilısu Barajı Dolusavak Revize Tasarımının Analizi 44
4.3.1. Revize tasarımın sayısal modeli 44
4.3.2. Revize tasarım sayısal analiz sonuçlarının değerlendirmesi 46
4.3.3. Revize tasarımın havalandırma performansı 52

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 55
KAYNAKLAR 57
EKLER 60
EK-1. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak kret ve şut yapısı genel yerleşim planı 60
EK-2. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak genel yerleşim boyuna profil 61
EK-3. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak şut kesiti havalandırma detayları 62
EK-4. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak plan ve kesiti 63
EK-5. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak düşüşü, kesitler havalandırma detayları 64
EK-6. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak genel yerleşim plan ve boy kesiti 65
EK-7. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak derzler 66
EK-8. Ilısu Barajı (1982 kesiti) dolusavak derzler 67
EK-9. Ilısu Barajı (1982 kesiti) dolusavak derzler 68
ÖZGEÇMİŞ 69

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE Sayfa

Çizelge 2.1. Kavitasyon hasarının önlenmesi için kriterler (Kels vd. 1991).....6
Çizelge 3.1. Ilısu Barajının Özellikleri (DSİ, 2010).....13
Çizelge 4.1. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı HAD analizi sonuçları (kaba meş) 31
Çizelge 4.2. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı HAD analizi sonuçları (orta meş) 32
Çizelge 4.3. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı HAD analizi sonuçları (nihai meş) 33
Çizelge 4.4. Ilısu Barajı model deney raporu değerleri (Demiröz, 1982) 41
Çizelge 4.5. Model deney raporundaki kavitasyon indeksi ile HAD analizi ile hesaplan kavitasyon indisinin karşılaştırılması 42
Çizelge 4.6. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 2010 revize tasarımı HAD sonuçları 53

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL Sayfa

Şekil 2.1. Ayrık pürüzlülük elemanları için a, b, c katsayıları (Falvey, 1990) 6
Şekil 2.2. Dolusavak üzerinde sınır tabakasının gelişmesi (Demiröz, 1982).....7
Şekil 2.3. İran Shaid Abbaspour (Karun-1) Barajı dolusavak hasarı (Falvey, 1990).....8
Şekil 2.4. Glen Kanyon Barajının tünel dolusavağının kavitasyon hasarı (Falvey, 1990) 8
Şekil 2.5. Dolusavak üzerinde su ve hava tabakasının gelişimi (Demiröz, 2012) 9
Şekil 2.6. Dolusavak havalandırıcılarının tipik gösterimi (Kökpınar, 2012) 10
Şekil 2.7. Falvey tarafından önerilen havalandırıcı tipleri (Falvey, 1990).....11
Şekil 2.8. Baca ve saptırıcının birlikte olduğu dolusavak örneği (Borçka Barajı).....11
Şekil 2.9. Keban Barajında sonradan yapılan havalandırıcılar 12
Şekil 3.1.(devam) Ilısu Barajı dolusavak eşik yapısı ve Beton Baraj (Çelen vd. 2013).....15
Şekil 3.2. Ilısu Barajı dolusavak eşik yapısı ve Beton Barajdan bir görüntü 15
Şekil 3.3. Dolusavak (eşik yapısı + şut kanalı + sıçratma eşiği + apron) yapısının 3B görünüşü 16 (a)(b) 16
Şekil 3.4. Ilısu Barajı dolusavak yapısı eşik yapısında ve şut kanalındaki ilk havalandırıcı tasarımı (EİE, 1982).....16
Şekil 3.5. Ilısu Barajı eşik yapısındaki nihai durumda havalandırıcı detayları (DSİ, 2010).....17
Şekil 3.6. Ilısu Barajı revize tasarımı: a) Dolusavak enkesitinden görünüş, b) Havalandırıcı enkesiti (A-A), c) Havalandırıcı kesiti (D-D) dolusavak yapısı şut kanalı enine kesit (DSİ, 2010) 18
Şekil 3.7. Dolusavak şut kanalı havalandırıcısı inşaatından görüntüler.....18
Şekil 3.8. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Özet Şeması (Güney, 2010).....21
Şekil 3.9. Akım profili altındaki ağ elemanlarının doluluk oranı (Aköz vd, 2015) 24
Şekil 4.1. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı sayısal modeli: a) kaba b) orta c) nihai meş 27
Şekil 4.2 Ilısu Barajı 1982 tasarımına göre çizilen 3 boyutlu geometrik modeli.....28
Şekil 4.3. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı sağ duvarda basınç dağılımı (Kaba meş, Fr=7.98) 28
Şekil 4.4. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı orta duvarda oluşan basınç kontör çizgileri (Kaba meş, Fr=7.98) 29
Şekil 4.5. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı orta duvarda oluşan hava-su fazı (Kaba meş, Fr=7.98) 30

Şekil 4.6. Ilısu Barajı Dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde kaba meş yapısında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi. 35
Şekil 4.7. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde orta meş yapısında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi. 35
Şekil 4.8. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde nihai meş yapısında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi. 36
Şekil 4.9. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde kaba-orta-nihai meş yapılarında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi.....36
Şekil 4.10. Ilısu Barajı 1982 tasarımının şut tabanındaki hava faz oranları:.....37
a) Fr=6.39, b) Fr=4.52, c) Fr=3.69. 37
Şekil 4.11. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı boy kesit su-hava karışımları: a) Fr=6.39,.....38
b) Fr=4.52, c) Fr=3.69 38
Şekil 4.12. Ilısu Barajı 1982 tasarımı dolusavak havalandırıcısı kaba-orta-ince (nihai) meş yapılarında *H*=2 m ve *V*=20 m/s durumu için ana hava kanalı boyunca basınç ile hava hızı değişimleri 40
Şekil 4.13. Ilısu Barajı 2010 havalandırıcısı revize tasarımı ve 3B sayısal model geometrisi 45
Şekil 4.14. Ilısu Barajı 2010 revize tasarım sayısal meş yapısı 46
Şekil 4.15. 2010 yılı revize tasarımın HAD analizi su yüzü görüntüsü 47
Şekil 4.16. Ilısu Barajı 2010 tasarım tabandaki hava-su faz oranları: (a) *h*=1.0m, *v*=15m/s, Fr=4.79, (b) *h*=1.5m, *v*=15m/s, Fr=3.91, (c) *h*=2.0m *v*=15m/s, Fr=3.39, (d) *h*=1.0m, *v*=30m/s, Fr=9.57, (e) *h*=1.5m, *v*=30 m/s, Fr=7.82, (f) *h*=2.0, *v*=30m/s, Fr=6.77 48
Şekil 4.17. Ilısu Barajı 2010 revize tasarım taban basınçları 49
Şekil 4.18. Ilısu Barajı 2010 revize tasarım boy kesit hava-su fazı durumu.....50
Şekil 4.19. Ilısu Barajı 2010 revize tasarımında bacada ve ana kanalda hız vektörleri 51
Şekil 4.20. Ilısu Barajı 2010 revize tasarımı aynı su yüksekliğinde farklı hızlarda hız vektörleri51
Şekil 4.21. Ilısu Barajı 2010 revize tasarımı havalandırma performansının Froude sayısı ile değişimi (a) Hava giriş katsayısı, (b) Ortalama hava konsantrasyonu 54

SİMGELER DİZİNİ

$(V_a)_{ort}$	Ortalama su hızı
ρ	Akışkanın yoğunluğu
ρ_w	Suyun yoğunluğu
A_a	Hava giriş en kesit alanı
C_0	Havalandırıcının ortalama hava konsantrasyonu
C_a	Ortalama hava konsantrasyonu
C_b	Alt hava konsantrasyonu
F_j	VOF modelde kütle kuvveti
Fr	Froud sayısı
Fr_{kr}	Kritik froude sayısı
g	Yer çekim ivmesi
G_a	Kütlesel hava giriş debisi
γ_{hava}	Havanın özgül ağırlığı
h	Akım yüksekliği
H	Model deneyde mutlak basınç yükü
H_0	Model Deney atmosfer basınç yüksekliği
h_p	Akım içindeki dikkate alınan noktanın basınç yüksekliği
h_d	Pürüzlü yüzeyin yüksekliği
H_v	Akımın mutlak buhar basıncı
k_s	Eşdeğer pürüzlülük yüksekliği
L	Dolusavak profilinin başlangıcından itibaren dolusavak boyunca uzunluk
P	Dikkate alınan kesitte mutlak basınç yüksekliği
P_0	Atmosfer basıncı basıncı
P_{fluent}	Fluent programında okunan ortalama basınç
p	Tabanda ölçülen basınç
P_s	VOF modelde Basınç
Q_a	Akıma gelen hava debisi
q_a	Birim hava debisi
Q_w	Akım debisi
u	Akışkanın hız vektörü
U	Model Deneydeki suyun Hızı
V	Ortalama akım hızı

z	Şut kanalı üzerinde alınan noktanın kotu
β	Hava giriş oranı
ρ_a	Suyun özgül kütlesi
σ_{kr}	Kritik kavitasyon indeksi
σ_p	Savaklanan debinin kavitasyon indeksi
δ	Sınır tabakası kalınlığı

KISALTMALAR DİZİNİ

ASMM	Cebirsel Kayma Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model)
VOF	Volume of Fluid
GRKP	Güncel Revize Kati Proje
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
DSİ	Devlet Su İşleri
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	Computational Fluid Dynamics
ASCE	Amerikan Society of Civil Engineers
TAKK	Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi
NSS	Normal Su Seviyesi
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
HES	Hidroelektrik Santralı
DPM	Dağınık Faz Modeli (Dispersed Phase Model
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FVM	Sonlu Hacimler Yöntemi
FDM	Sonlu Farklar Yöntemi

1. GİRİŞ

Su yapılarında dolusavaklar, feyezan halinde gelen akımı kontrollü olarak mansaba aktaran yapılardır. Dolusavaklar gelen akımı mansaba aktarırken boşaltım kanallarında yüksek akım hızlarından dolayı kavitasyon hasarıyla karşılaşabilmektedirler. Dolusavakta oluşan kavitasyon zaman zaman çok ciddi hasarlara sebep olabilmektedir. Dolusavakta oluşan kavitasyon hasarını önlemenin en pratik yolu boşaltım kanalı boyunca değişik tasarımlarda havalandırıcılar inşa etmektir. Havalandırıcılar üzerine ilk olarak Panama'da Madden Barajında kavitasyon sonucu oluşan hasar rapor edilmiştir. Türkiye'de ise ilk olarak 1976 yılında çalıştırılan Keban Barajı ile dolusavak şut (boşaltım) kanalı boyunca ciddi hasar görülmüş ve sonradan havalandırıcılar ilave edilmiştir. Dolusavak üzerindeki akım hızlarının çok yüksek olması sebebi ile dolusavaklarda sadece tasarım hesabının yapılması yeterli olmayabilir. Büyük dolusavak hesaplarında bu sebeple belli bir ölçekte model yapılarak dolusavak gözlemlenmektedir. Dolusavaklarda, barajdaki su seviyesi normal su seviyesinde (N.S.S) olduğunda baraj rezervuarına giren taşkın dalgasının bir kısmı dolusavaktan atılırken diğer kısmı rezervuarda depolanmaktadır. Baraj rezervuarında seviye yükselmesinden dolayı depolanma olduğundan gelen su daha düşük bir debi ile dolusavaktan boşalmaktadır. Ancak taşkınlar sırasında gelmesi muhtemel debinin dolusavaklar tarafından atılması barajın emniyeti bakımından oldukça önemlidir. Bu nedenle dolusavaklarda gelebilecek taşkınların hesabının iyi yapılması gerekmektedir. Devlet Su İşleri (DSİ) taşkın öteleme hesaplarında kullanılacak taşkın tekerrür debisi için dolgu barajlarda muhtemel maksimum feyezan, beton barajlarda 10.000 yıl tekerrürlü feyezan hidrografı seçilmektedir. Bu büyük debilerin dolusavaklar üzerinden atılması esnasında dolusavak yüzeyi yüksek akım hızlarına maruz kalabilmekte ve bu da yüzey düzensizliklerinin de neden olduğu düşük basınç bölgeleri oluşturabilmektedir. Bu basınçların suyun buhar basıncının altına düşmesi sonucu buhar kabarcıkları oluşmaktadır. Kavitasyon olarak bilinen bu fiziksel olay sonucu oluşan buhar kabarcıkları akım içerisinde ilerleyerek normal hidrostatik basınçla karşılaştığında aniden faz değişimine uğrayarak akım içerisinde patlayarak dağılır. Bu olay sonucu oluşan hasara ise "kavitasyon hasarı" adı verilir. Kavitasyon hasarı beton üzerinde çok ciddi hasarlara neden olmakta ve gittikçe ilerleyerek tüm yapıyı kullanılmaz hale getirebilmektedir. Kavitasyon hasarından korunmak için birçok yöntem önerilmekle birlikte bunlardan en etkilisi kavitasyon önleyici havalandırıcılar kullanmaktır.

Geçmişten bu yana dolusavaklar ve havalandırıcıların tasarımında ve incelemesinde kullanılan geleneksel yöntem fiziksel laboratuvar çalışmaları olmuştur. Bu çalışmaların fiziksel model inşası ve deneylerini yapmak ciddi zaman ve para gerektirmektedir. Maalesef günümüzde

su yapılarının hidrolik model çalışmalarını her zaman yapmak mümkün olamamaktadır. Bu sebeple su yapıları gibi hidrolik ve akışkanlar dinamiği tasarımlarında gelişen bilgisayar ve yazılım teknolojisinin kullanıldığı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılması büyük avantajlar sağlamaktadır. HAD, akışkanın temel hareket denklemlerini, sonlu farklar, sonlu hacimler, sonlu elemanlar gibi sayısal çözümleme yöntemleri kullanarak çözen bir sayısal simülasyon yöntemidir. Bu modellemeyi yapabilen gelişmiş bir kaç paket program bulunmaktadır. Çeşitli paket programları içerisinde dünyada yaygın olarak kullanılan yazılımlardan biri de ANSYS - FLUENT programıdır.

Ilısu Barajı ve HES Projesi, Mardin ve Şırnak illeri arasında sınır teşkil eden Dicle Nehri üzerinde, Mardin iline bağlı Dargeçit İlçesinin 15 km doğusunda, Şırnak iline bağlı Güçlükonak İlçesinin 13 km kuzey batısında, Suriye sınırına 45 km mesafede yer almaktadır. Enerji üretim amaçlı bir barajdır. Ilısu Barajı dolusavağı ülkemizin büyük deşarj kapasitesine sahip sayılı dolusavaklarındandır. Ilısu Barajı ve HES Projesinin dolusavak ve havalandırıcılarının ilk model deneyleri 1982 yılında yapılmış fakat 2010 yılında tasarımları değiştirilmiştir. Buna rağmen yüksek maliyet ve zaman nedeniyle yeni model deneyleri yapılmamıştır. Bu tezde, Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcılarının model deney yapılmamış olan revize tasarımının farklı hidrolik koşullar altında performansı HAD analizleriyle test edilecek ve tasarımın uygunluğu kontrol edilmiştir. Çalışma için öncelikle dolusavak havalandırıcısının 1982 yılında yapılan eski tasarımının HAD sonuçları elde edilmiş, daha sonra da yeni tasarımın performansı eski tasarımla birlikte değerlendirilmiştir. HAD analizlerindeki sayısal hata, çözüm ağı hassasiyeti, seçilen türbülans ve matematiksel modelin uygunluğu gibi bazı dezavantajlarının yanında, modelin esnekliği, deneylerden alınamayacak detaylı sonuçların alınması gibi avantajları vardır. Sayısal modelin doğruluğu ve hassasiyetini test etmek için çeşitli alternatifler denenerek en uygun sonuçların alınması hedeflenmiştir. Uygulama projeleri revize tasarım haliyle kabul edilmesine rağmen yeni tasarımla ilgili detaylı bir model deneyi yapılamaması bu konuda bir eksiklik oluşturmakta ve bu çalışmayı orijinal kılmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Literatür Özeti

Bugüne kadar yapılan dolusavaklardaki kavitasyon hasarları ve alınan önlemlerle ile ilgili aşağıda çalışmalar detaylı olarak sunulmuştur.

Russel vd. (1974) kavitasyon hasarını önlemek için gerekli hava konsantrasyonu belirlemeye çalışmışlardır. Demiröz (1987) Türkiye'de ilk olarak kavitasyon hasarına karşı korunması için Karakaya Barajı dolusavak boşaltım kanalında "düşey eğik tipi havalandırıcılar" üzerine 1/25 ölçeğinde model deneyleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Falvey vd. (1988) yüksek akımda hava giriş karakteristikleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Özbek (1989) Kavitasyonun nedenleri ve kavitasyonu önleyici tedbirler üzerine çalışmıştır. Falvey vd. (1989) tarafından yüksek hızlı su jetinin hava giriş karakteristikleri üzerinde çalışmıştır. Chanson (1989), havalandırıcı yeri ve aralıklarını belirlemek amacıyla Clyde Barajı dolusavak modeli üzerindeki çalışmalarında "direkt yaklaşım" ve "endirekt yaklaşım" olmak üzere iki adet yaklaşım sunmuştur. Okay (1990) havalandırıcılara ait büyüklüklerle akım ve akışkana ait büyüklükler arasındaki bağıntıları inceleyerek bu bağıntıları boyutsuz parametrelerin fonksiyonu olarak bulmuştur. Volkart vd. (1991) tarafından, dolusavak boşaltım kanallarında havalandırıcı tipleri hakkında bilgi verilmiştir. Abbasoğlu vd. (1992) dolusavaklar üzerinde kavitasyona sebep olan faktörler üzerinde durmuştur. Nie (2001) pürüzlendirilmiş yüzeylerle kavitasyon hasarını önleme konusunda çalışmalar yapmıştır. Kökpınar vd. (2002) fiziksel model verileri ile prototip verileri karşılaştırarak ölçek etkisini düzelterek belli şartlar altında bazı ampirik formüller elde etmişlerdir. Aydin (2006) kavitasyon hasarı önlemek için yeni önerdiği havalandırıcı tipi olan alttan alışlı dolusavak havalandırıcılarıyla ilgili CFD yöntemi kullanarak detaylı bir çalışma yapmış ve bu havalandırıcıların özellikle geniş dolusavaklarda daha etkili olduğu sonucuna varmıştır.

Son yıllarda Pfister (2010), Pfister vd. (2010a), Pfister vd. (2010b) dolusavak havalandırıcıları üzerinde kapsamlı çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu araştırmacılar havalandırıcıların hidrolik tasarımları üzerinde kriterler belirlemek ve akım içerisindeki hava konsantrasyonu ve transferini incelemek üzere bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır.

Aydin (2005) ve Öztürk vd. (2008) özellikle geniş dolusavaklarda ve düşük Froude sayılarında batık durumlarda bile etkili olabilecek ve Ilısu Barajı Dolusavağı havalandırıcısına benzer fakat daha basit, "Alttan Alışlı Havalandırıcı" havalandırıcı tipini önermiştir. Bu çalışmalardaki analizler 3B Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD=CFD) kullanılarak yapılmış

ve daha sonra bu havalandırıcı ile ilgili deneysel çalışmalar yürütülerek performansı belirlenmeye çalışılmıştır (Aydın 2017).

Tiğrek vd. (2015) Fluent programını kullanarak farklı su yapılarında çalışmalar yapmıştır. Çalışılan örneklerde hidrolik akım koşulları sonucunda yapıların şekil ve boyut değişiminin gerekliliği ortaya konmuştur.

Kurt (2016) Dolusavak havalandırıcılarının civarında akım karakteristiklerini incelemiştir. Kurt (2016) tabana konumlandırılacak olan dairesel havalandırıcıların akım ve yapı üzerindeki etkilerini gözlemlemiştir. Gümüş (2014) dolusavak akımlarında farklı türbülans modelleri ile model deney sonuçlarını karşılaştırmıştır. Jahani (2011) su yapılarındaki kavitasyonun yapı stabilitesi, ekonomik ömür ve işletme verimliliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kumcu vd. (2017) dairesel kesitli düşülü bacalarda hava-su karışımının deneysel çalışma ve CFD modelleme ile analizini karşılaştırmıştır. Deney sonuçlarını Flow 3D programı ile karşılaştırmıştır. Büyüktaş vd. (2017) enerji kırıcı yapıların etkinliğin HAD yöntemi ile belirlenmesi üzerine çalışma yapmışlardır.

2.2. Kavitasyon

Bir akımda hızın artması nedeni ile meydana gelen mutlak basıncın buhar basıncının altına düşmesi ile akım içinde buhar kabarcıkları meydan gelir. Daha yüksek bir basınç bölgesiyle karşılaşan bu kabarcıklar gürültü ile patlar. Patlama ile meydana gelen kinetik enerji basınç enerjisine dönüşerek zamanla yüzeyde aşınmalara sebep olur. Bu olaya kavitasyon denir. Kavitasyon çok yüksek hızlı akımlarda ortaya çıkar ve yapılara çok ciddi şekilde zarar verir.

Dolusavaklar üzerindeki akımlar serbest yüzeyli ve çok hızlı akımlar olduğu için çok uzun boşaltım kanallarında akım hidroliği sebebiyle ciddi kavitasyon hasarları olabilmektedir. Kavitasyon parçacığının parçalanması ile oluşan basınç değişimi ters orantılıdır.

Kavitasyonun sebep olduğu durumlar malzemeye göre değişmekle beraber betonda ilk olarak harç etkilenmekte ve agrega yerinden sökülmektedir. Ilısu barajı derivasyon tünellerinde meydana gelen kavitasyonun, ciddi zararı olmamakla beraber beton yüzeyinde görülen donatıların etrafında oyulmalara sebebiyet vermiştir. Bunun nedeni donatı ucunun meydana getirdiği düzensizliktir. Beton yüzeyi tamir harcı ile kapatılmasına rağmen pürüzsüz bir yüzey elde edilmemesi sebebi ile kavitasyon hasarı net bir şekilde görülebilmektedir

Özbek (1989) Kavitasyonu önlemek ya da azaltmak amacıyla yapılacak çalışmaları aşağıdaki gibi sıralamıştır:

- Derzlerin düzenlenmesinde dikkat edilecek hususlar

- Mukavemeti artırıcı önlemler
- Düzensizliklerin sınırlandırılması
- Tabana yakın havalandırma
- İşletmede elde edilecek deneyimler.

Abbasoğlu ve Okay (1992)'a göre dolusavaklar üzerinde kavitasyona sebep olan faktörler şöyle sıralanabilir.

- Beton yüzeyler üzerindeki farklı düzensizliklerin varlığı,
- Akım yönünde veya karşısında kanal tabanındaki ani süreksizlikler veya eşikler,
- Ani eğim değişiklikleri,
- Akımın alt napına uydurulmamış keskin eğriler ve tam teğet olmayan eğri yüzeyler,
- Yüksek hidrolik hızlar,
- İnşaat hatalarında meydana gelen yüzeydeki diğer kusurlar.

2.2.1. Kavitasyon İndeksi

Kavitasyon oluşumu ile ilgili fikir sahibi olmak için savaklanan akımın kavitasyon indeksi hesaplanmalı ve kritik kavitasyon indeksleri ile karşılaştırılmalıdır. Kavitasyon indeksi aşağıda verilen denklem ile hesaplanır.

$$\sigma_p = \frac{P - H_v}{V^2/2g} \tag{2.1}$$

Buradaki; H_v: Akımın Mutlak Buhar basıncı (Pascal) , V: Akımın Hızı (m/s) g: yer çekim ivmesi, P: Dikkate alınan kesitte mutlak basınç yükü, $P = P_{atm} + P_{su}$ olup; P ve V değerleri su yüzü hesaplarından alınır. Ilısu Barajı dolusavak kavitasyon indeksi kavitasyon indeksinin tahmini; Akımın hızı V=30 m/s, Su sıcaklığı 10 ˚C, Akımın derinliği 1 m, H_v=1,23 kPa, P=$P_{atmosfer}$ + P_g=101+9,8 kPa ise;

kavitasyon indeksi;

$\sigma = \frac{P-P_v}{\rho\frac{V^2}{2}} = \frac{(101{,}0+9{,}8-1{,}23)\times10^3}{999{,}7\times\frac{30^2}{2}} = 0{,}244$ olarak bulunmuştur.

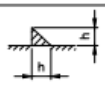
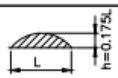
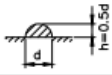
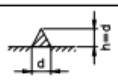
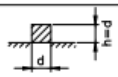
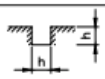
Kavitasyon indeksinin 0,2-0,5 arasında olması kavitasyon hasarı potansiyelinin olduğunun göstergesidir (DSİ, 2012). Ilısu Barajı için bulunan kavitasyon indeksi Kels ve Simith (1991) tarafından yapılan çalışmaya göre şut yüzeyinin tasarım değişikliği veya ilave havalandırıcılar ile korunması gerekmektedir.

Çizelge 2.1. Kavitasyon hasarının önlenmesi için kriterler (Kels vd. 1991)

Kavitasyon İndeksi (σ)	Tasarım Gereksinimi
>1.8	Yüzey korunması gerekli değildir, kavitasyon önemli değildir.
0.25 – 1.8	Şut yüzeyi özel pürüzlü kaplamalarla korunabilir.
0.17 - 0.25	Kanal yüzeyi şut profilinin ilave tasarım düzenlenmesiyle veya tasarıma havalandırıcılar ilave edilerek korunabilir.
0.12 -0.17	Tasarıma havalandırıcılar eklenerek şut yüzeyi korunabilir.
<0.12	Şut yüzeyi muhtemelen kavitasyondan korunamayacaktır. Tasarım değiştirilmelidir.

2.2.2. Ayrık Pürüzlülük Yüzeyine Sahip Anolarda Kritik Kavitasyon İndisi

Yüzey üzerinde bulunan iki veya üç boyutlu girinti ve çıkıntılar kavitasyon üretebilir. Beton yüzey pürüzlülüğü ile ilgili kritik kavitasyon indeksi aşağıdaki şekilde verilmiştir.

SEMBOL		AKIŞ ÖLÇÜSÜ	TARİH	a	b	c	
△	Üçgenler	2	Holl -1960	0.361	0.196	0.152	
○	Dairesel	2	Holl -1960	0.344	0.267	0.041	
▲	Yarı küre	3	Benson -1966	0.439	0.298	0.0108	
●	Koni	3	Benson -1966	0.632	0.541	0.00328	
■	Silindirler	3	Benson -1966	0.737	0.550	0.00117	
⊔	Boşaltma (Yarık)	2	Bohn -1972	0.041	0.510	0.000314	

Şekil 2.1. Ayrık pürüzlülük elemanları için a, b, c katsayıları (Falvey, 1990)

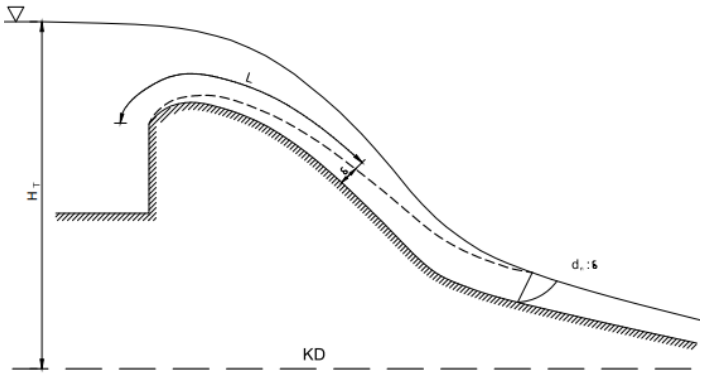
$$\sigma_{kr} = c\left(\frac{h}{\delta}\right)^{a}\left(\frac{U_p\delta}{\nu}\right)^{b} \tag{2.2}$$

Burada; *a, b, c:* Pürüzlülük yüzeyine göre değişen sabit sayılardır. h_d: Pürüzlü yüzeyin yüksekliğidir, δ: Sınır tabakası kalınlığıdır. Sınır tabakası kalınlığı (2.3) eşitliğindeki gibi bulunur.

$$\frac{\delta}{L} = 0{,}08\left(\frac{L}{K_s}\right)^{-0{,}233} \tag{2.3}$$

L: Dolusavak profilinin başlangıcından itibaren uzunluğu,

k_s: Eşdeğer pürüzlülük yüksekliği (0.6 mm olarak alınabilir.)

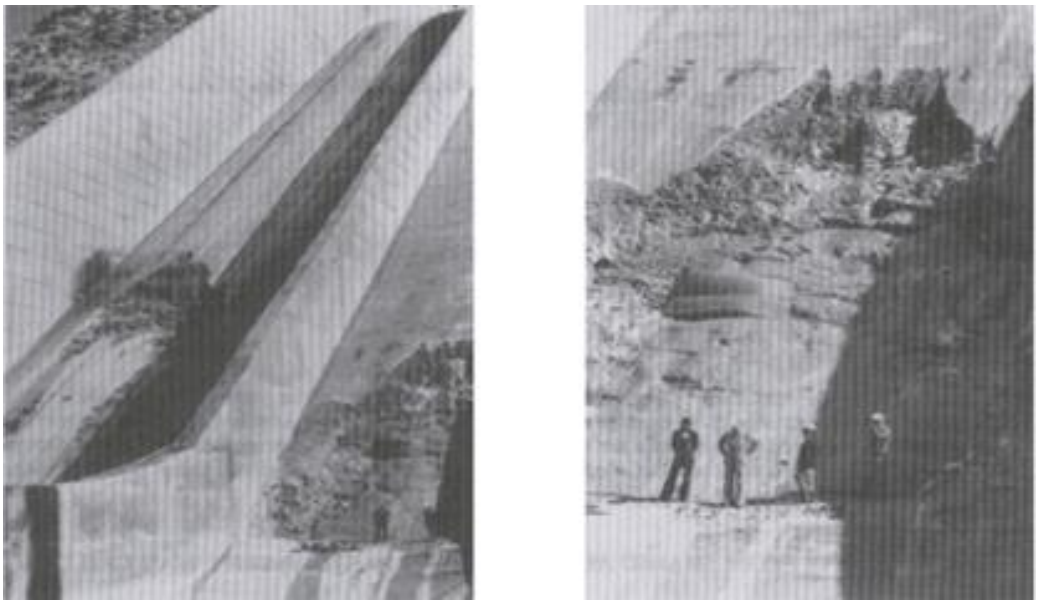


Şekil 2.2. Dolusavak üzerinde sınır tabakasının gelişmesi (Demiröz, 1982)

Şut kanalı boyunca sınır tabakasına ulaşılan noktaya kadar akımın yüzeyden havalanması mümkün olamamaktadır. σ_{kr}: Kritik kavitasyon indeksi, σ_p: Savaklanan debinin kavitasyon indeksi Dolusavaklarda herhangi bir km de $\sigma_{kr} \geq \sigma_p$ olması durumunda yüzey pürüzlülüğünden dolayı kavitasyon oluşacağı anlamına gelir.

2.2.4. Dolusavaklarda Kavitasyon Hasarları

Kavitasyon hasarı ilk olarak Madden Barajı (Panama) dolusavağında görülmüştür. 1945 yılında ASCE (Amerikan Society of Civil Engineers) de bir sempozyum da hidrolik yapılar üzerindeki kavitasyon hasarından bahsedilmiştir. 1978 yılında İran'daki Karun Barajının dolusavağında meydana gelen büyük hasar ve yüksek hızlı dolusavak kanallarında kavitasyonun neden olduğu ilk ciddi hasarlardır. Karun Barajında meydana gelen bu kavitasyon hasarı sonucu dip savak ve dolusavaklarda havalandırıcıların kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır (Şekil 2.3).



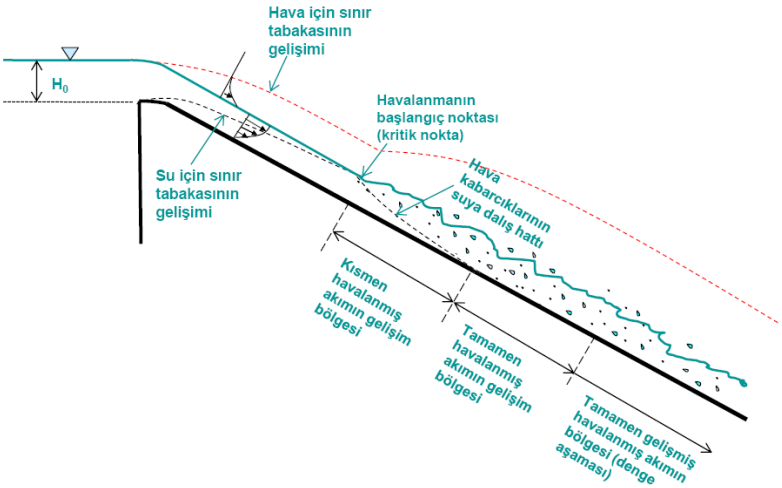
Şekil 2.3. İran Shaid Abbaspour (Karun-1) Barajı dolusavak hasarı (Falvey, 1990)

Diğer önemli bir kavitasyon hasarı, 2 Haziran 1983 tarihinde Glen Kanyon Barajının dolusavağında kavitasyonun sonucu 11 m derinliğinde, 40 m. uzunluğunda ve 15 m genişliğinde büyük bir kavitasyon çukuru olarak rapor edilmiştir (Şekil 2.4). Daha sonra çeşitli ülkelerde yapılan dolusavaklarda belli mesafelerde havalandırıcılar kullanılması sayesinde havalandırıcıların önemi fark edilmiştir. Hasarların onarılmasından sonra Glen Kanyon Barajında dolusavağına havalandırıcılar yerleştirilmiş ve maksimum 1400 m^3'lük debi 72 saat süre içerisinde verilmesine rağmen herhangi bir kavitasyonun hasarı gözlemlenmemiştir.

Şekil 2.4. Glen Kanyon Barajının tünel dolusavağının kavitasyon hasarı (Falvey, 1990)

2.3. Dolusavak Havalandırıcıları

Dolusavaklarda akım sınır tabakasının serbest yüzeyi kestiği yani sınır tabaka kalınlığının akımın derinliğine eşit olduğu nokta tam gelişmiş akımın başladığı nokta olarak tanımlanır. Tam gelişmiş akım içerisindeki türbülans sayesinde bazen havalandırmaya ihtiyaç duyulmadan akım havalandırılmış olur (Şekil 2.5). Bu nokta sonrasında serbest yüzeyden giren hava konsantrasyonunun şut tabanına ulaştığı mesafe tasarım debisi gibi yüksek debilerde o kadar uzun olmaktadır ki çoğu durumda dolusavak yapısının uzunluğundan fazla olmaktadır. Bu nedenle kendi kendine havalanma pratik ve uygulanabilir olamamaktadır. Dolayısıyla bu tür durumlarda ve akıma hava karıştırmak ve dolayısıyla kavitasyon hasarını önlemek için havalandırıcıların kullanılması gerekir.



Şekil 2.5. Dolusavak üzerinde su ve hava tabakasının gelişimi (Demiröz, 2012)

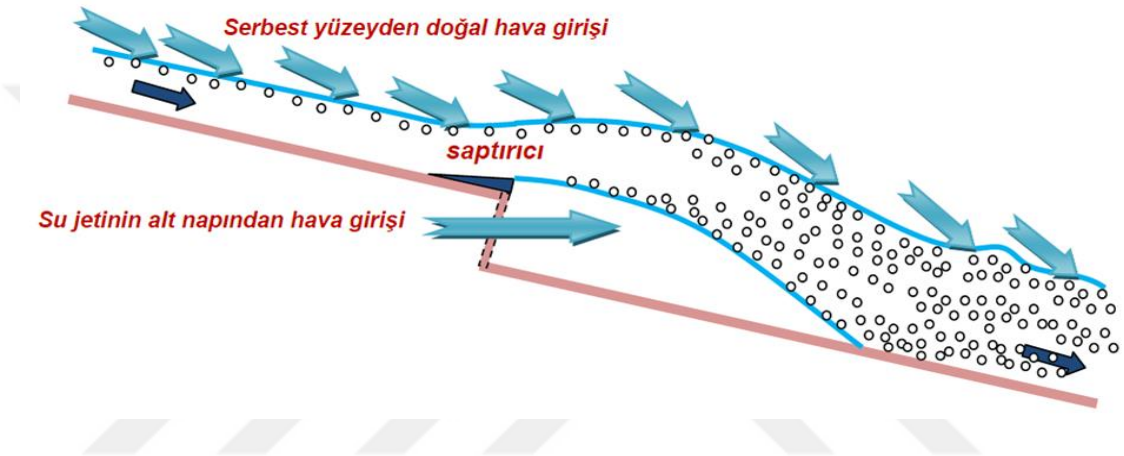
Havalandırıcılar, dolusavak şut kanalları üzerindeki yüksek hızlı su jeti altında yapay olarak oluşturulan boşluk içinde meydana gelen atmosfer altı basınçlar sayesinde, dışarıdan hava emmek suretiyle çalışırlar. Bu amaçla genel olarak bir havalandırıcıda, yüksek hızlı su jetini kanal tabanından yükseltecek bir eleman (rampa veya saptırıcı ve/veya basamak) ve su jetinin altındaki alt basınç bölgesini besleyecek baca vb. elemanların olması gerekir. En iyi sprey etkisini sağlamak için genelde eşik ve rampa birlikte kullanılır. Kanal kesiti boyunca rampa ve/veya eşiğin hemen mansabında bir oluk yerleştirilerek kanal genişliğince daha iyi hava girişi sağlanabilir. Ancak yalnız başına bir oluk kesinlikle kullanılmamalıdır (Aydın 2015).

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi taban bölgesindeki akımın bir basamak-saptırıcı tipli havalandırıcı ile tabandan ayırılmasıyla oluşacak olan su jetinin alt napına hava girişi sağlanır.

Serbest yüzeyden de hava girişinin olmasına karşın, tasarım için önemli olan havalandırıcı ile oluşan su jetinin alt napından giren hava miktarıdır.

(Falvey 1990) Falvey ve birçok bilim insanı dolusavak havalandırıcılarını 4 kısma ayırmıştır. Bunlar;

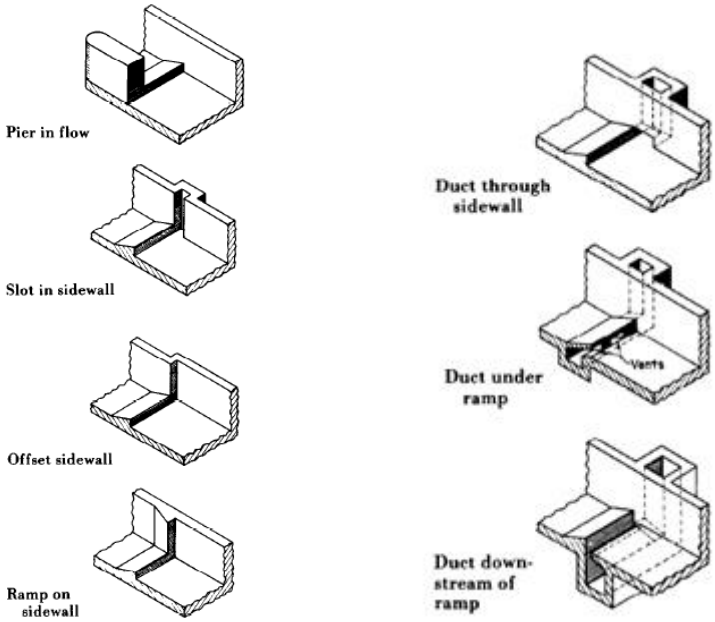
- Yaklaşım akım bölgesi
- Geçiş Bölgesi
- Havalandırma Bölgesi
- Hava çıkış bölgesidir.



Şekil 2.6. Dolusavak havalandırıcılarının tipik gösterimi (Kökpınar, 2012)

Havalandırıcılar dolusavak şut (boşaltım) kanalı dış duvar boyunca karşılıklı olabildiği gibi tek başına da tasarlanabilmektedir. Geniş dolusavak boşaltım kanallarında genellikle simetrik durum tercih edilmektedir.

Falvey (1990) yedi faklı tasarımda havalandırıcı tipi önermiştir (Şekil 2. 7). Bu tasarımların tamamında rampa bulunmaktadır. Dört tanesinde ise havalandırma bacası vardır. Yalnız iki tanesinde kanal bulunmaktadır. Ilısu Barajı dolusavağı havalandırıcısı Şekil 2. 7'de görülen Falvey (1990)'in yedi tip örneğinden biri kabul edilmiştir. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı saptırıcı, havalandırma bacası ve kanaldan oluşan bir yapı mevcuttur.



Şekil 2.7. Falvey tarafından önerilen havalandırıcı tipleri (Falvey, 1990)

Şekil 2.8. Baca ve saptırıcının birlikte olduğu dolusavak örneği (Borçka Barajı)

Şekil 2.8'de Borçka Barajı dolusavağı örneği görülmektedir. Bu örnekte görüldüğü belirli aralıklarla yerleştirilmiş havalandırıcı rampalarının oluşturduğu su jetlerinin altları orta duvara yerleştirilmiş havalandırma bacaları tarafından hava ile beslenmektedir.

Şekil 2.9. Keban Barajında sonradan yapılan havalandırıcılar

1970'li yıllarda Ülkemizin Keban Barajı dolusavak şut kanallarında meydana gelen ciddi kavitasyon hasarlarından sonra yerleştirilen havalandırıcılar sayesinde günümüze kadar beton yüzeyi emniyetli bir şekilde korunmuştur (Şekil 2.9).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Ilısu Barajı ve HES Projesi Dolusavak Yapısı

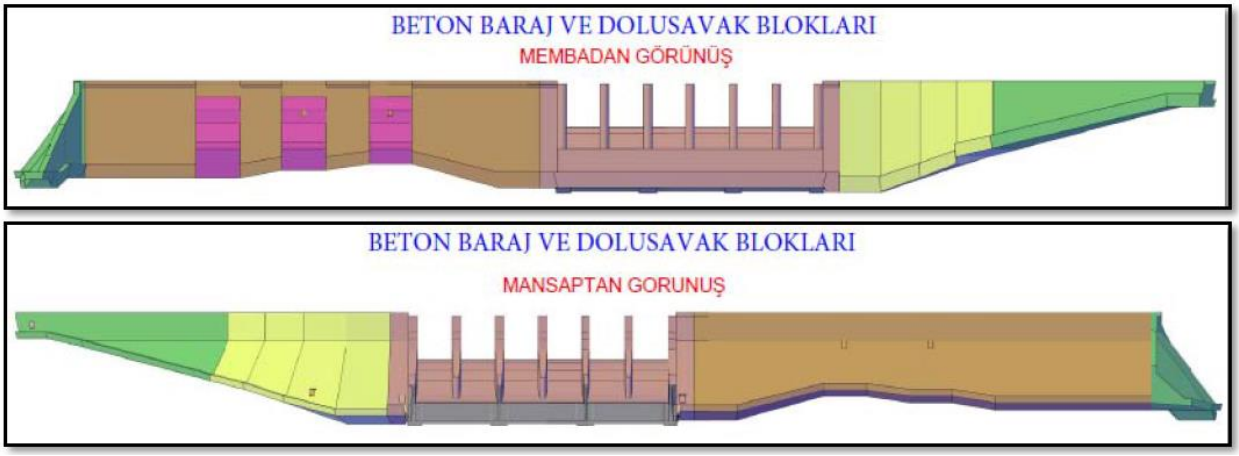
Ilısu Barajı ve HES Projesi elektrik üretim amaçlı olup 1200 MW Kurulu gücüyle Türkiye'de elektrik üretiminde Atatürk, Keban, Karakaya barajlarından sonra 4. büyük barajdır. Dolgu hacmi olarak Atatürk Barajından sonra Türkiye'de 2. büyük barajdır. Önyüz beton kaya dolgu (ÖBKD) baraj tipinde baraj ana gövde kret uzunluğu bakımından ise dünyada birinci sıradadır. Şekil 3.1 – 3.3'te Barajın gövde ve dolusavak yapısının 3B tasarımları verilmiştir.

Ilısu Barajı enerji üretmek amacıyla inşa edilmiş olup kurulu gücü 1200 MW, yıllık üretmesi beklenen enerji ise 4 120 GWh/yıl'dır. Bu güç Türkiye'deki Hidroelektrik santralleriyle üretilen enerjinin yaklaşık % 10'luk bir kısmına denk gelecek olup barajın işletime açılmasıyla 400.000.000 $/yıl gelir getirmesi beklenmektedir. Ilısu Barajının yapımına 2009 yılında DSİ tarafından başlanmış olup halen devam etmektedir. Barajın yapımı sırasında bölgedeki yaklaşık 4 bin kişiye iş imkânı sağlanmıştır. Barajın detaylı karakteristik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

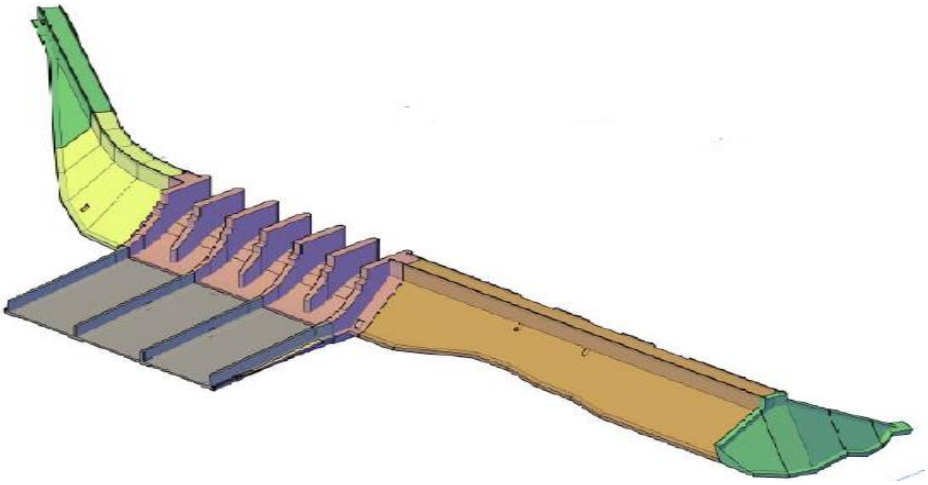
Çizelge 3.1. Ilısu Barajının Özellikleri (DSİ, 2010)

Hidroloji	Drenaj Alanı	35 517 km^2
	Ortalama Debi (Doğal)	490 m^3/s
Rezervuar	Maksimum Su Seviyesi	527.86 m
	Maksimum Su Seviyesi Rezervuar Alanı	313 km^2
	Normal Su Seviyesinde Toplam Rezervuar Alanı	10 410*10^6 m^3
Baraj Ana Gövdesi	Tipi	Önyüzü Betonla Kaplı Kaya Dolgu Baraj (ÖBKD)
	Talveg Kotu	400.00 m
	Gövde Dolgu Hacmi	23.7*10^6 m^3
	Kret Genişliği	9.02 m
	Kret Uzunluğu	2 327 m
	Kret Kotu	530 m
Memba Batardosu	Tipi	Kil Çekirdekli Kaya Dolgu
Mansap Batardosu	Tipi	Kil Çekirdekli Kaya Dolgu
Derivasyon Tünelleri	Tipi	Dairesel, Beton Kaplamalı
	Tünel Sayısı	3
Dip Savak	Tipi	Tünel
	Derivasyon Kapasitesi	3 600 m^3/s

Beton Baraj	Beton Barajı Temelden Yüksekliği		51.50 m
Dolusavak	Radyal Kapaklı, Sıçratma Eşikli		17 988 m^3/s
Enerji Su Alma Yapıları ve Cebri Borular	Tünel Sayısı		3
Santral Binası	Tipi		Yarı Gömülü
	Ünite Sayısı		6
	Toplam Kurulu Güç		1200 MW
	Ortalama Yıllık Enerji Üretimi		4120 GWh
	Boyutları		180 x 47 x 56 m
Kuyruk suyu Kanalı	Uzunluğu		1080.00 m
	Taban Genişliği		90.00 m
Türbinler	Tipi		Düşey Francis
	Türbin Adedi		6
	Yardımcı Ünite Tipi		Yatay Francis
	Yardımcı Türbin Adedi		1
Jeneratörler	Tipi		Düşey Eksenli Senkron Jeneratör
	Ünite Sayısı		6
	Anma Gücü		223 MVA
	Tipi		Yatay Senkronize Jeneratör
	Ünite Sayısı		1
	Anma Gücü		5.5 MVA
Transformatörler	Ünite Adedi		18+1 Yedek
Şalt Sahası	**a)**380 Kv Şalt Sahası	Tipi	Harici
		Anma Gerilimi	380 Kv
	b)154 Kv Şalt Sahası	Tipi	Harici
		Anma Gerilimi	154 Kv



Şekil 3.1.

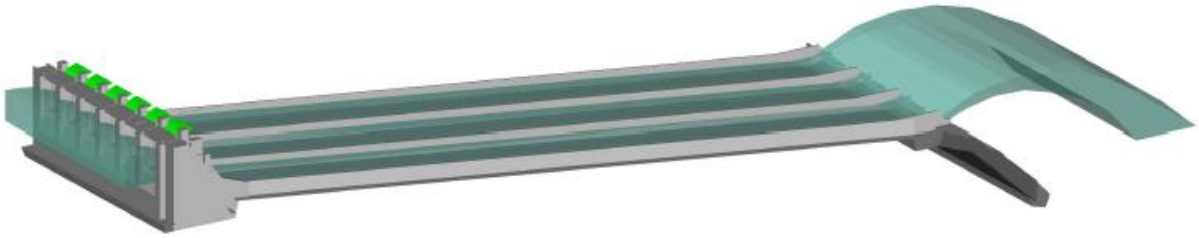


Şekil 3.1. (devam) Ilısu Barajı dolusavak eşik yapısı ve Beton Baraj (Çelen vd. 2013)

Şekil 3.2. Ilısu Barajı dolusavak eşik yapısı ve Beton Barajdan bir görüntü

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi 2012'de Ilısu Mühendislik ve Müşavirlik Konsorsiyumu (ECS) tarafından yapılan revize tasarımda dolusavak eşik yapısında 8 radyal kapak yerine 6 adet radyal kapak önerisi DSİ genel müdürlüğü tarafından da kabul görmüştür.

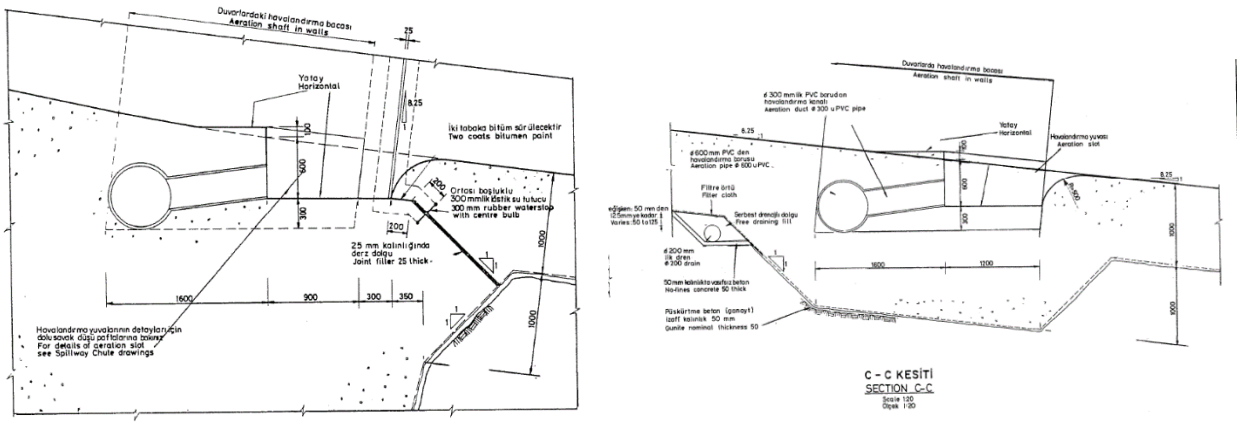
Dolusavak eşik yapısı beton ağırlık baraj üzerinde olup Şekil 3,2'de görüldüğü gibi 6 adet radyal kapak ile kontrol edilmektedir. Ilısu Barajı ve HES Projesi dolusavak yapısı 6 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; Eşik Yapısı-Şut Kanalı-Sıçratma Eşiği-Apron-Enerji Kırıcı Havuz-Boşaltım Kanalı (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Dolusavak (eşik yapısı + şut kanalı + sıçratma eşiği + apron) yapısının 3B görünüşü

3.2. Ilısu Barajı Dolusavak Havalandırıcıları Tasarımı

Ilısu Barajı ve HES Projesinde dolusavak havalandırıcıları tasarımı ilk olarak 1982'de EİE tarafından tasarlanmıştır (Şekil 3.4). EİE projelerine göre eşik yapısının bittiği yerde ilk havalandırıcı yerleştirilmiştir. Şekil 3.4a da eşik yapısının bitiminde bu durum görülebilmektedir. Şut kanalı genişliği boyunca Ø300'lük boru ve belli aralıklarda havalandırıcı kanalları tasarlanmıştır. Şut kanalı boyunca 1982 de benimsenen havalandırıcı şekil 3.4b de görülmektedir.



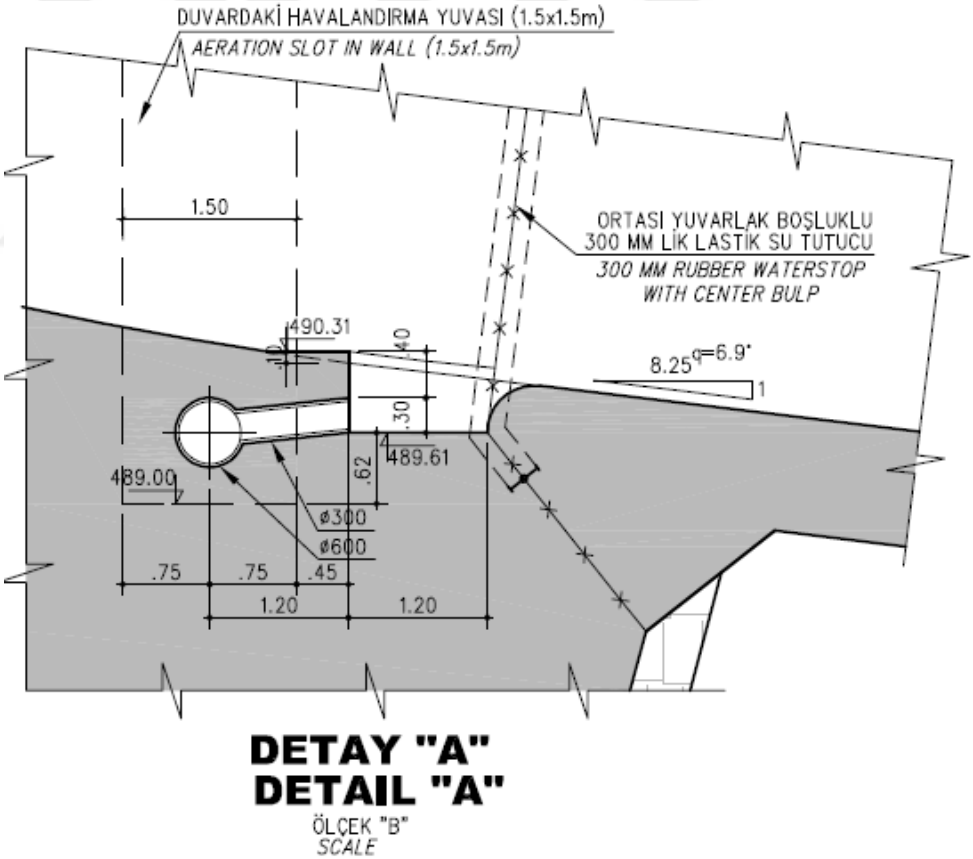
(a) (b)

Şekil 3.4. Ilısu Barajı dolusavak yapısı eşik yapısında ve şut kanalındaki ilk havalandırıcı tasarımı (EİE, 1982)

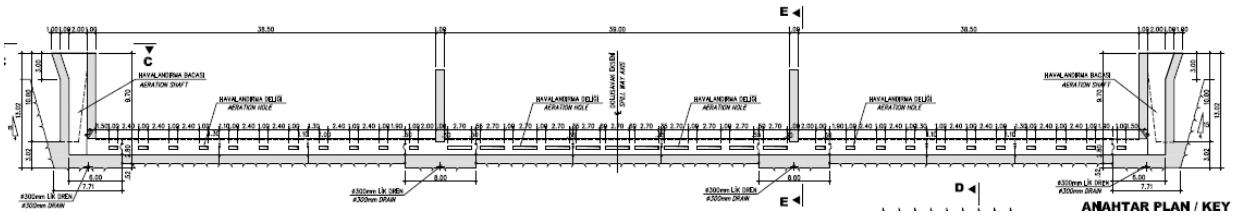
2010 revize tasarımı sonrasında eşik yapısı sonunda (ogee profili sonunda) 1982 tasarımının benzeri kullanılmıştır. Şut Kanalında ise Şekil 3.6'da havalandırıcı tipi kullanılmıştır.

Son revize tasarım olan Güncel Revize Kati Proje (GRKP)'ler Şekil 3.6'de gösterildiği gibidir. GRKP'lere göre orta duvarlarda havalandırıcılara gerek duyulmamış ve şut kanalı havalandırıcılarında farklı tipte bir havalandırıcı benimsenmiştir. Güncel revize projelerde eşik yapısından şut kanalına geçişte Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin (EİE) 1982 tasarımı korunmuştur.

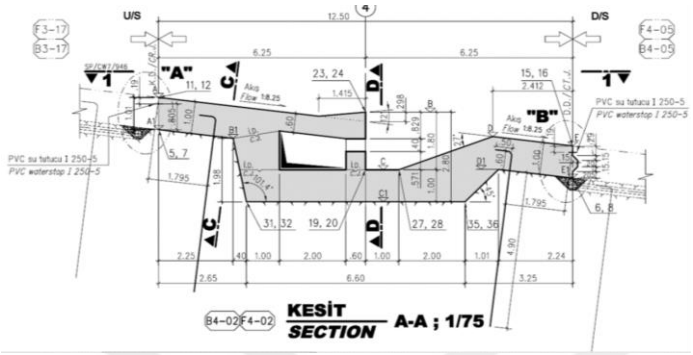
Şekil 3.6 (a)'da görüldüğü gibi 3 adet boşaltım kanalı görülmektedir. Orta boşaltım kanalında hava çıkış pencereleri görüldüğü gibi daha büyük tasarlanmıştır. Bunun sebebi kanal ortasına doğru artacak olan basınç farkıdır. Ayrıca orta duvarlarda olan havalandırıcı bacasına gerek duyulmamıştır. Şut kanalı boyunca eşik yapısındaki ile birlikte toplam 6 adet havalandırıcı bulunmaktadır. Havalandırıcılar 75 m arayla sıralanmaktadır.



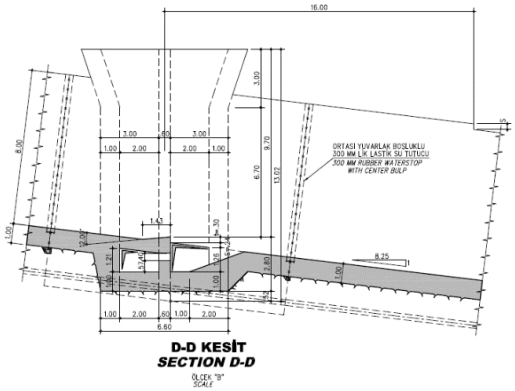
Şekil 3.5. Ilısu Barajı eşik yapısındaki nihai durumda havalandırıcı detayları (DSİ, 2010)



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.6. Ilısu Barajı revize tasarımı: a) Dolusavak enkesitinden görünüş, b) Havalandırıcı enkesiti (A-A), c) Havalandırıcı kesiti (D-D) dolusavak yapısı şut kanalı enine kesit (DSİ, 2010)

Şekil 3.7. Dolusavak şut kanalı havalandırıcısı inşaatından görüntüler

3.3. Dolusavak Havalandırıcılarında Hava Konsantrasyonu

Dolusavak havalandırıcılarının havalandırma performansının belirlenmesinde en etkili parametrelerden birisi hava giriş oranıdır. Bu parametre akıma giren hava debisinin akımın debisine oranı olarak Denklem (3.1)'deki gibi hesaplanır:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \tag{3.1}$$

Burada; Q_a: Akım giren hava debisi (m^3/s), Q_w: Su debisi (m^3/s), β=Hava giriş oranı (veya katsayısı).

Ortalamalı hava konsantrasyonu ise;

$$C_0 = \frac{\beta}{\beta + 1} \tag{3.2}$$

Havalandırıcıların performansını etkileyen birçok parametre mevcuttur. Ancak en önemli parametre hava giriş oranıdır. Pinto vd. (1982) yüksek hızlı akımlarda havalandırıcıları ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Falvey vd. (1988) yüksek hızlarda hava giriş karakteristikleri üzerinde durmuştur. Abbasoğlu vd. (1992) göre ortalama hava konsantrasyonunun % 2-8 arasında olmalıdır. Ancak genel kabul olarak, kavitasyon hasarından korunmak için hava konsantrasyonunun ortalama % 5'in altında olmaması gerektiği belirtilmektedir. Aksi takdirde dolusavak havalandırıcıları akıma yeterli havayı verememesinden dolayı kavitasyon hasarından korunması garanti edilemez ve havalandırıcı batık duruma geçebilir.

3.4. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

Mühendislikteki akışkanlar dinamiği uygulamaları genel olarak, deneysel, analitik ve sayısal yöntemler olmak üzere üç farklı şekilde analiz edilebilir. Akışkan dinamiğindeki teorik zorluklar geçmişte bu alandaki çalışmaları deneysel olarak yapılmaya zorlamıştır. Gelişen sayısal teknikler ve bilgisayar teknolojileriyle birlikte deneysel çalışmalardan elde edilen bilgi birikimiyle birlikte teorik yaklaşımların kullanıldığı sayısal modellemelerin uygulanmasına olanak sağlamıştır. Akışkanlar mekaniğinin temel bünye denklemlerinin sayısal analiz yöntemlerine uyarlanarak karmaşık problemlerin bile çözüldüğü 2 ve 3 boyutlu sayısal modelleme teknikleri günümüzde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) (Computational Fluid Dynamics=CFD) olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde endüstriyel ürünlerin tasarımı, uzay bilimleri, otomotiv, havacılık, makine mühendisliği, inşaat mühendisliği gibi birçok alanda bu teknikler çok etkili bir şekilde

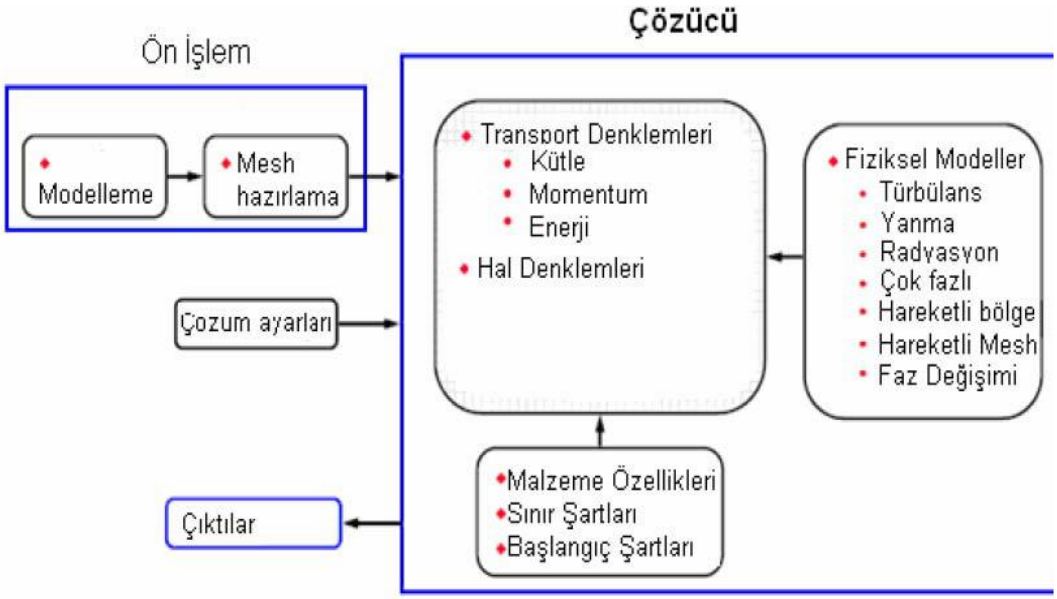
kullanılmaktadır. Bu bölümde sayısal yöntemlerde kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinden (HAD) bahsedilecektir. Bu tekniklerle sıvı ve gazların katı yüzeyler ile etkileşimleri bilgisayar yardımı ile simüle edilebilir. Sonuçların doğruluğu kullanılan model, ağ yapısı ve bilgisayar performansıyla yakından alakalıdır.

HAD tekniği birçok dalda kullanılmaktadır. Bunlardan bazısı şunlardır; havacılık, savunma sanayisi, inşaat, denizcilik, otomotiv, çevre, güç üretimi ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Karamanoğlu (2006) Genel olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, her türlü akışkan ve akışının değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak üç ana denklem (süreklilik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınır ve bu denklemler sayısal çözülerek akış içindeki basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağlı olarak birçok veriye ulaşılır. Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği araştırma–geliştirme ve ürün tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak bir uçak kanadının üzerindeki basınçlar, bir yeraltı rezervuarının sıcaklık dağılımı, bir ortamdaki hava akımı dağılımı veya hareketli bir arabanın etrafındaki hava hızı gibi akış ile ilgili birçok parametre bulunabilir. Son yıllardaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği teorisi ve bilgisayar yazılımlarındaki gelişmeler yüksek türbülanslı akışların ve dinamik sistemlerin nümerik olarak incelenmesine ve sanal ortamda simüle edilmesine olanak sağlamıştır.

Akışkanların dinamik modellenmesinde kullanılan sayısal yöntemler şunlardır:

- Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)
- Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)
- Sonlu Hacimler Yöntemi (FVM)

HAD analizlerinde genelde sonlu hacimler yöntemi kullanılmaktadır. Domain kontrol hacimlerinin (veya hücrelerin) sonlu seti üzerinde ayrışma yapılarak çözüm yapılır. Genelde kütle, momentum, enerji, vb. korunum denklemleri kontrol hacimlerine göre hazırlanan denklem takımları ile çözülür (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin Özet Şeması (Güney, 2010)

Dündar (2009) bu durumu şu şekilde açıklamıştır: "Genel olarak bir akımı çözmek için süreklilik denklemi, momentum denklemi ve yardımcı denklemlerin aynı anda çözümü gerekmektedir. 2-boyutlu bir akım için denklem sistemi indirgenerek ve yardımcı denklemlerin aynı anda çözülebilir. Ancak akım 3-boyutlu ve türbülanslı olduğu durumlarda denklem sistemini kapatan bir türbülans modeli sisteme eklenir. Ayrıca eğer akım açık kanal akımı şeklindeyse, su yüzeyinin yerini belirleyebilmek için sisteme yüzey belirleme denklemi katmak gerekecektir. Eğer akım içinde dağılan bir başka madde varsa konsantrasyon denklemleri de çözülür. Tüm bunlar göz önüne alındığında sayısal olarak modellenmek istenen akımın şartlarına göre yeni çözüm denklem sistemi ortaya koyup bu denklemlerin her biri ayrı ayrı sayısallaştırıp çözülerek sonuca ulaşılabilir. Akış, akım ve sınır koşulları dâhilinde bir, iki ya da üç boyutta değişkenlik gösterebilir. Bir ve iki boyutlu çözümlerde göreceli olarak daha kısa zamanda sonuçlar elde edilebilir. Üç boyutlu modellerde çözüm zamanı ve zorluğu artmaktadır. Üç boyutlu hassas çözümlemeler, hızlı ve bellek kapasitesi yüksek günümüz bilgisayarları yardımıyla yeni yeni mümkün olabilmektedir. Hatta bazı problemlerin sayısal çözümlemesi için sadece bir bilgisayar yeterli olmayıp, işlemci ve bellek kapasitesini arttırmak için birden fazla bilgisayarın paralel çalıştırıldığı sistemler gerekebilir."

3.4.1. ANSYS-Fluent Programı

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır. 1983' ten bu yana dünya çapında birçok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır.

Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbo makine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler vb.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı birçok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde kullanıcısına birbirinden farklı birçok probleme aynı ara yüzü kullanarak çözüm alma olanağı sağlar.

Fluent, sıkıştırılamaz (düşük sabsonik), orta sıkıştırılabilir (transonik) ve yüksek sıkıştırılabilir (süpersonik ve hipersonik) akışlar için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözücüsüdür. Yakınsamayı hızlandıran çoklu ağ metoduyla beraber çoklu çözücü seçenekleri ile Fluent geniş hız rejimleri aralıklarında optimum çözüm etkinliği ve hassasiyeti getirir. Fluent'deki fiziksel modellerin zenginliği, laminer, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çokfazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar. (ANOVA 2018)

Fluent programı çok fazlı akışkan modelleri için 4 farklı model önermiştir. Bunlar;

- Dağınık Faz Modeli (Dispersed Phase Model-DPM)
- Akışkan Hacmi Modeli (Volume of fluid Model-VOF)
- Cebirsel Kayma Karışım Modeli (Algebraic Slip Mixture Model-ASMM)
- Kavitasyon Modeli (Cavitation Model)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinin gerçek oranlı fiziksel model yöntemleri ile karşılaştırıldığında aşağıdaki üstünlükleri sıralanabilir (Tiğrek vd. 2015)

- Gözlemlenmesi tehlikeli veya ulaşılamaz bölgelerdeki akışkan davranışları ve akış özellikleri, akış bozulmadan incelenebilir. HAD 'de her bir sayısal ağ elemanı aynı zamanda bir ölçüm noktası olduğundan, ölçüm cihazlarının oluşturabileceği etkilerinden bağımsız veriler elde edilebilir.
- HAD yazılımlarıyla elde edilen sonuçlar ve sanal deney ortamı, birçok parametreye ait bilgilerin de çözümün içerisinde olması sebebiyle gereken yeni ihtiyaçlara göre benzetim

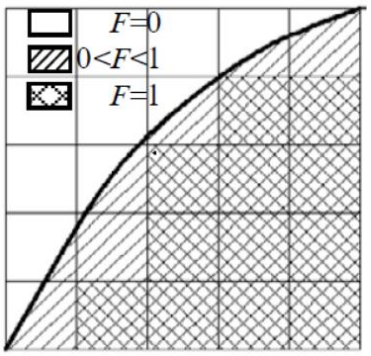
sonrasında da kullanılabilir. Fiziksel model çalışmalarında gözden kaçan veya sonrasında ihtiyaç duyulan veriler için deneyler tekrarlanmalıdır.

- Fiziksel model çalışmalarında elde edilebilecek veri ve parametreler kullanabileceğiniz ölçüm cihazları ve sensörler ile sınırlıdır. HAD analizinde, kullanılan sayısal ağ elemanı kadar (milyonlarca olabilir) ölçüm elemanı bulunabilir ve veri dağılımları, deneylerden elde edilebilecek ayrık veriler şeklinde değil, gradyenler olarak geniş bir alanda değerlendirebilmektedir.
- Fiziksel modelin tasarımı ve inşası için gerekli zaman, para ve insan kaynakları rekabetçi piyasa koşullarında çok daha önemli olabilmektedir. Aynı zamanda en küçük hataların dahi yüksek maliyetlere sebebiyet verdiği projelerdeki hata esnekliğinin yok denebilecek azlığı, doğruluğu kesinleştirebilecek ölçüde tekrarları gerektirebilmektedir. Bu da fiziksel deneylerde neredeyse imkânsızdır.
- Akışkanlar dinamiğinin önemli bir unsuru olan türbülans, ölçek etkisinden dolayı laboratuvar ortamındaki fiziksel modellerde tam olarak temsil edilemezler. Ancak sayısal modellemelerle türbülans etkisini daha fazla gözlemlemek mümkündür.

Akışkan Hacmi Modeli (Volume of Fluid Model-VOF):

Dolusavaklar üzerindeki akımlar gibi serbest yüzeyli akımların sayısal yöntemlerin en etkililerinden biri Akışkan Hacmi Modelidir (VOF: Volume of Fluid). Literatürde VOF modeli şu şekilde tanımlanmaktadır:

Sayısal modellemelerde, sıvı ile havanın ara kesitindeki serbest su yüzünün bulunmasında Akışkan Hacimleri yöntemi güvenilir bir teknik olarak kullanılmaktadır (Hirt vd. 1981). Bu yöntem, hesaplama ağında, sıvı ile havanın ara kesitindeki ağ elemanlarının hacimsel doluluk oranını esas almakta ve bir sayısal hesaplama ağına belirli zaman aralıklarında giren sıvının eleman hacimlerini doldurma oranlarının belirlenmesini ve böylece, akımda serbest yüzey profilinin seçilmiş zaman adımlarında hesaplanmasını gerçekleştiren bir sürece dayanmaktadır. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, hacimsel doluluk oranını temsilen F=1 için ağ elemanı sıvı ile tam dolu, F=0 için boş (hava ile dolu), ve $0<F<1$ için sıvı ile kısmen dolu olmaktadır (Hava-su ara yüzü içermekte). Sayısal çözüm sürecinde, VOF yöntemi ile zamana bağlı temel denklemlerin her bir zaman adımındaki sayısal çözümünden, hesaplama ağı içerisindeki akım yüzeyinin konumu tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.9. Akım profili altındaki ağ elemanlarının doluluk oranı (Aköz vd, 2015)

Bu tezde Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısını HAD analizleri VOF Modeli kullanılarak Fluent paket programıyla simüle edilmiştir. ANSYS-Fluent'te çok fazlı akımlar genelde, birincil faz sürekli ortam akışkanı, diğeri ise bu akışkan içine dağılmış olan ikincil faz olarak tanımlanır. Atmosfere serbest yüzeyli akımlar için bu durum, sürekli ortam akışkanı hava, ikincil faz ise su olarak alınabilir. Çok fazlı akımlarda sonlu eleman ağları ile bölünmüş her bir hücre akışkanın belirli hacim oranlarıyla işgal edilir. "k" akışkanın hacim oranı için üç durum söz konusudur.

- $\mathcal{E}_k = 0$ ise $\boldsymbol{k}$ akışkanın hücresi boş,
- $\mathcal{E}_k = 0$ ise $\boldsymbol{k}$ akışkanı hücreyi tamamen doldurmuştur.
- $0 \leq \mathcal{E}_k \leq 1$ ise iki akışkan hücreyi tamamen doldurmuştur ve iki akışkanın ara yüzünü içerir.

VOF modelde süreklilik denklemi (3.3) verilen şekildedir.

$$\frac{\partial_{\varepsilon_k}}{\partial_t} + u_i \frac{\partial_{\varepsilon_k}}{\partial_{x_i}} = S_{\varepsilon_k} \tag{3.3}$$

$$\sum_{k=1}^{n} \varepsilon_k = 1 \tag{3.4}$$

VOF metodu kullanılarak dolusavak ve havalandırıcı akımı modellenmiştir. Bu yöntem daha önce birçok çalışmada denenmiştir. VOF Modelin momentum denklemi (3.5) de verilmiştir (Ansys-Fluent 2012).

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial_{x_i}}(\rho u_i u_j) \quad = -\frac{\partial P_s}{\partial_{x_j}} + \frac{\partial}{\partial_{x_i}} \mu \left(\frac{\partial_{u_i}}{\partial_{x_j}} + \frac{\partial_{u_j}}{\partial_{x_i}} \right) + \rho g_j + F_j \tag{3.5}$$

Burada; ρ: Akışkanın yoğunluğu, μ:Akışkanın dinamik viskozitesi, u:Akışkanın hızı (hız vektörü), P_s: Basınç, g:yerçekim ivmesi, F_j: Kütle kuvvetleridir.

3.4.2. Türbülans Modeli

Dolusavak şut kanallarındaki akım hızları çok yüksek olduğundan sayısal modellerde türbülans etkisinin dikkate alınması gerekir. Özellikle hava-su gibi çok fazlı akımlarda türbülans etkisi oldukça önemlidir. Tam gelişmiş akımlarda türbülans gerilmelerinin viskoz gerilmelerin önüne geçmesi, akıma hava karışmasındaki türbülans etkisinin önemi gibi nedenlerle bu gibi problemlerde uygun türbülans modellerden biri kullanılmalıdır. ANSYS-Fluent birçok farklı türbülans modeli bünyesinde bulundurmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılan biri Realibze k–$\boldsymbol{\varepsilon}$ Türbülans Modelidir. Sayısal analizlerde türbülans modeli olarak seçilen Realibze k–ε modelin teorisi aşağıdaki denklemlerle verilmiştir (ANSYS-Fluent 2012):

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial_{x_j}}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial_{x_j}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial_k}{\partial_{x_j}}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial_{x_j}}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial_{x_j}}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial_\varepsilon}{\partial_{x_j}}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1_\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} C_{3_\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \tag{3.7}$$

Burada;

$$C_1 = max\left[0{,}43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right] \tag{3.8}$$

$$\eta = S\frac{k}{\varepsilon} \tag{3.9}$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{3.10}$$

Türbülans viskozitesi;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.11}$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \tag{3.12}$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \Omega_{ij}\Omega_{ij}} \tag{3.13}$$

$$\Omega_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \tag{3.14}$$

$$A_0=4.04, \quad A_s=\sqrt{6}\cos\phi \tag{3.15}$$

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right) \tag{3.16}$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{ij}S_{ij}}{S^3} \tag{3.17}$$

$$S=\sqrt{S_{ij}S_{ij}} \tag{3.18}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial_{u_j}}{\partial_{x_i}} + \frac{\partial_{u_i}}{\partial_{x_j}}\right) \tag{3.19}$$

Model sabitlerinin varsayılan olarak aşağıdaki gibi alınması önerilmektedir:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

Buradaki; G_b: Yüzdürme nedeni ile türbülans kinetik enerjisinin üretimi. Y_m: Sıkıştırılabilinir türbülanstaki dalgalı genişlemeninin toplam dağılım oranına katkısını, C_2 ve $C_{1\epsilon}$: Sabitleri, σ_k ve σ_ϵ : k ve ϵ için Prandtl türbülans sayılarını, S_k ve S_ϵ: Kullanıcılar tarafından tanımlanan kaynak terimlerini, $\overline{\Omega_{ij}}$: Açısal hız ile dönen ω_k ortalama dönme hızının tensörünü ifade etmektedir.

3.3. HAD Analizlerinde Çözüm Ağının Oluşturulması

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde yüksek hassasiyette ağ oluşturulmadan hesaplamalara geçilmemesi en önemlisidir. Çözümlerin alınması sonuçların girilen değerlerin doğruluğu ile doğru orantılıdır. Geometrisi hazırlanmış akışkanın sonlu hacimlere ayrılarak hareket denklemleri ile her bir sonlu hacim elamanı için çözüm yapılır.

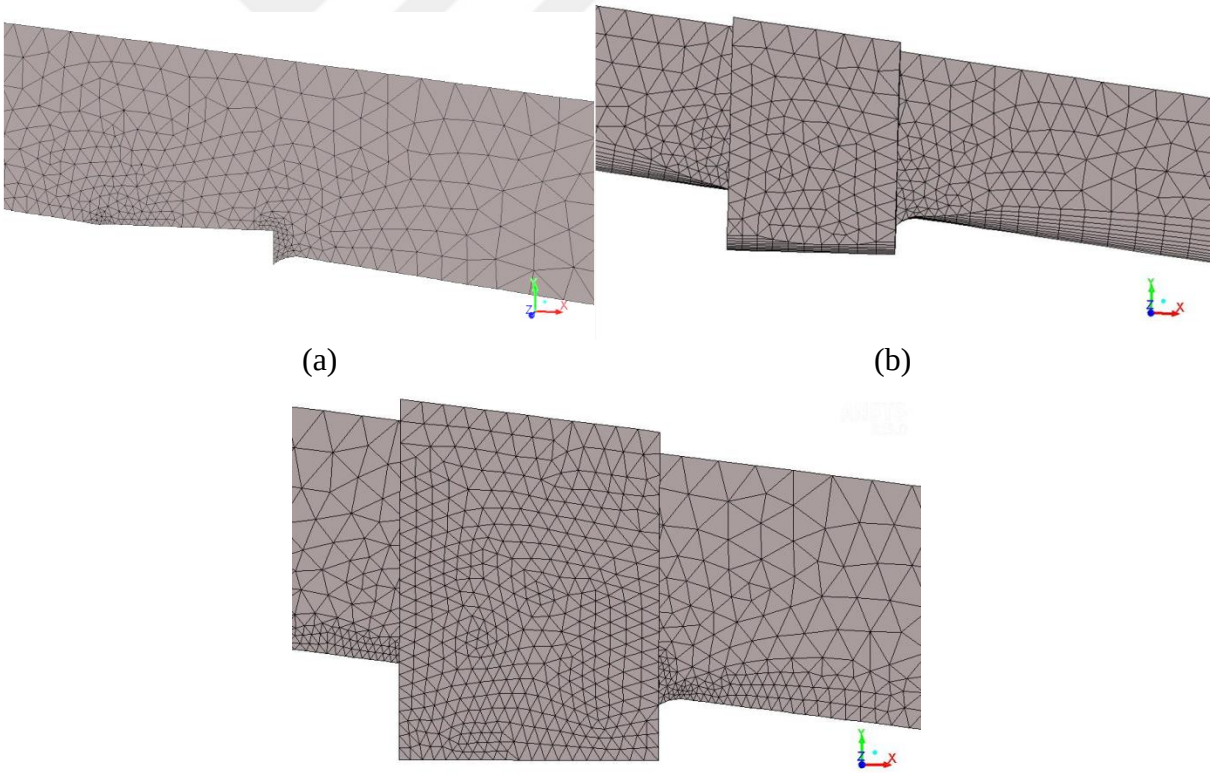
İyi bir ağ oluşturmak sıkıcı ve zaman alan bir iştir. HAD'ı düzenli olarak kullanan mühendisler, ağ oluşturmanın çoğunlukla HAD çözümünden başka daha fazla vakit aldığında hem fikir olacaklardır (mühendisin zamanı, CPU zamanı değil). Ancak iyi bir ağ oluşturmak için harcanan zaman boşa gitmiş bir zaman değildir, çünkü böylece HAD sonuçları daha güvenilir olur ve daha çabuk yakınsar. Yüksek nitelikli ağ, doğru HAD çözümü için çok önemlidir; düşük çözünürlüklü veya düşük nitelikli ağ doğru olmayan çözümlere götürebilir. HAD kullanıcıları için çözümlerinin **ağdan bağımsızlığının** gösterilmesi çok önemlidir. Ağ bağımsızlığını test etmek için standart bir yöntem, çözünürlüğü (mümkünse her yönde 2 kat) arttırmak ve simülasyonu tekrarlamaktır. Eğer sonuçlar kayda değer bir şekilde değişmiyorsa, muhtemelen başlangıçtaki ağ uygun olacaktır. Diğer yandan eğer iki çözüm arasında kayda değer farklar varsa başlangıçtaki ağın çözünürlüğü uygun değildir. Böyle bir durumda çözümde yeterli yakınsama sağlanıncaya kadar daha sık ağlar denenmelidir. Ağdan bağımsızlığı test etmek için kullanılan bu yöntem zaman alıcıdır ve özellikle çözümün bilgisayarın sınırlarını zorladığı karmaşık mühendislik problemleri için ne yazık ki her zaman akılcı değildir (Çengel ve Cimbala 2015).

4. BULGULAR

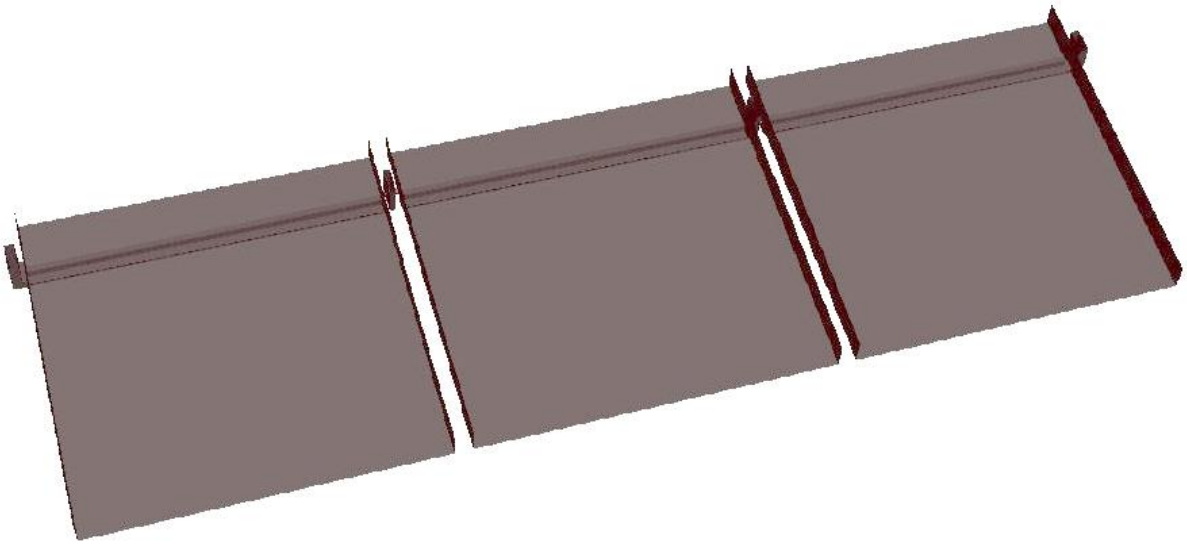
4.1. Ilısu Barajı Havalandırıcısı 1982 Tasarımı HAD Analizi

Sayısal modelin meş yapısını test etmek ve sonuçlara etkisini görmek için ilk olarak Ilısu dolusavak havalandırıcısının 1982 tasarımı modellenmiştir. ANSYS-Fluent ile HAD analizi yapılan Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcıları üzerinde 3 farklı mesh yapısı ile çözümler alınmıştır. Bu meş yapıları kaba-orta-nihai meş yapısı olarak isimlendirilerek her bir meş yapısı için farklı hız ve su yükseklikleri (Farklı Froude sayılarında) çözümler alınmıştır.

Ansys-Fluent Programında meş kalitesi hakkında fikir vermesi açısından kaba meş yapısı incelendiğinde; minimum orthogonal quality: 0.203 olduğu görülmüştür. Bu değerin "0" sıfıra yakın olması meş kalitesinin düşük, 1'e yakın olması ise meş kalitesinin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Kaba meş 1,419,987 orta mesh 1,640,053 ve nihai mesh yapısı 2,904,186 adet hibrid hücreden oluşmaktadır. Meş yapısında hücre sayısı artıkça analiz sonuçların daha doğru olduğu anlaşılmalıdır. Her üç meş yapısının görünüşleri Şekil 4.1'de verilmiştir.

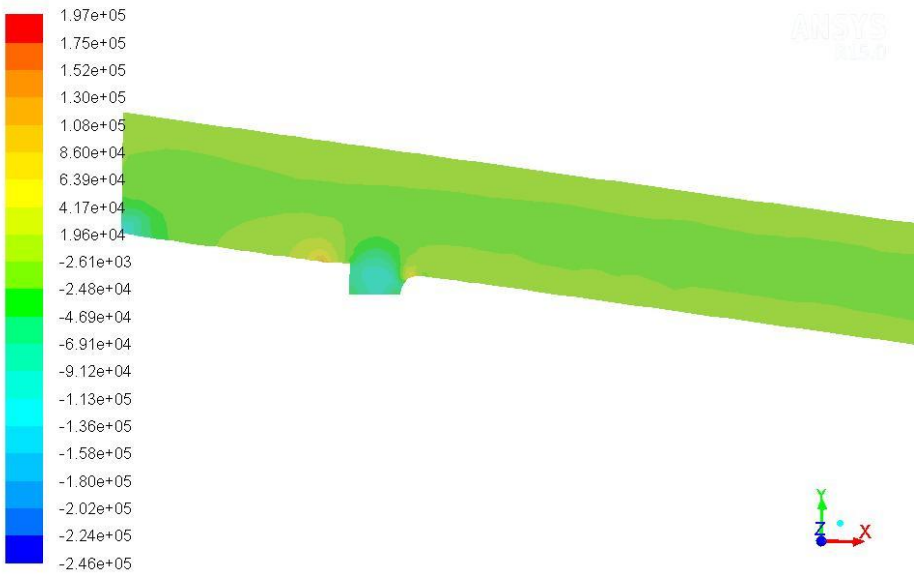


Şekil 4.1. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı sayısal modeli: a) kaba b) orta c) nihai meş

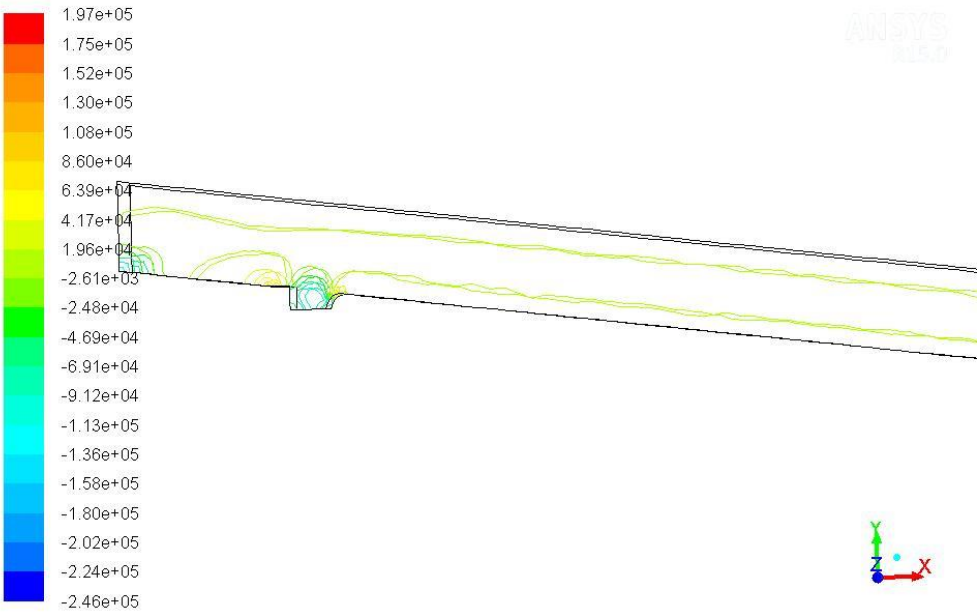


Şekil 4.2 Ilısu Barajı 1982 tasarımına göre çizilen 3 boyutlu geometrik modeli

Dolusavak şut kanalı ve havalandırıcısının 1982 tasarımının hazırlanan üç boyutlu geometrik modelinin genel görünüşü Şekil 4.2'de verilmiştir. 1982 tasarımında orta duvarlarda havalandırma bacası konulmuş fakat revize tasarımda orta duvarlardaki bu havalandırma bacaları kaldırılmıştır.

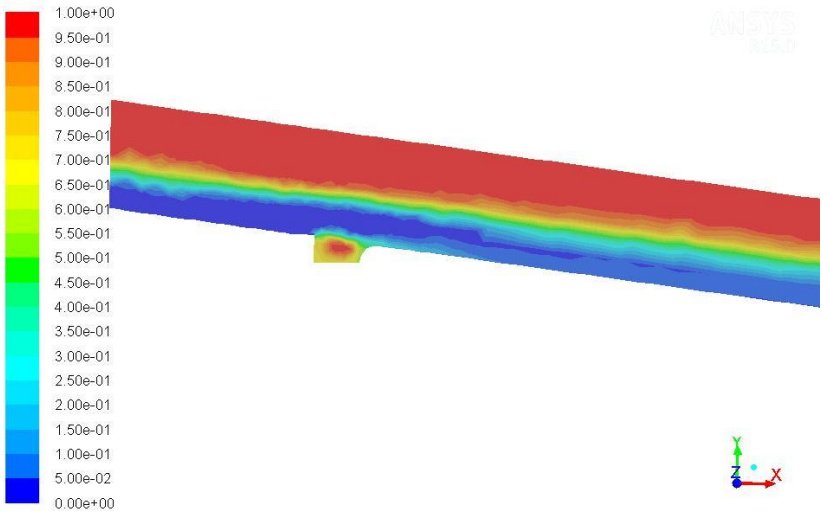


Şekil 4.3. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı sağ duvarda basınç dağılımı (Kaba meş, Fr=7.98)



Şekil 4.4. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı orta duvarda oluşan basınç kontör çizgileri (Kaba meş, Fr=7.98)

Su yüksekliğinin 1 m ve su hızının 25 m/s olduğu (Fr=7.98) durum için orta duvar yüzeyinde oluşan basınç dağılımları ve basınç kontör çizgileri Şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Şekillerde görüleceği üzere, rampa mansabında basınç değeri maksimum iken, nap altındaki hava oluğu içerisinde basınç değeri minimum seviyesindedir. Nap altında oluşan bu düşük basınçlar sayesinde atmosfere açılan yan bacalardan hava nap altından akıma karışmaktadır. Aynı Fr sayısı için hava faz oranı Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere sıçratma rampası sayesinde nap altındaki boşluktan hava girişi sağlanmaktadır. Alt ve üst naptan giren hava karışıp havalandırıcının belirli bir mesafe mansabında birleşerek tam karışmış akım elde edilir. Tam karışmış akım durumu havalandırıcıların etkin çalıştığı anlamına gelir fakat sadece bu durum havalandırıcının yeterli hava sağladığı hakkında yeterli fikir vermez.



Şekil 4.5. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı orta duvarda oluşan hava-su fazı (Kaba meş, Fr=7.98)

Ilısu Barajı Dolusavak Havalandırıcısının 1982 tasarımı kesitinin HAD analizinden çıkan sonuçlar (Dış baca 2.8 x 1 = 2.8 m^2 ile orta bacanın kesit alanı 2.8x0.7=1.96 m^2 olmak üzere havalandırıcı giriş toplam alanı A_a=4.76 m^2 simetri olarak alındığından) 2 ile çarpılmıştır. Dolayısıyla toplam hava giriş alanı 9.52 m^2 dir. Hava giriş oranları ($\beta=Q_a/Q_w$) ve ortalama hava konsantrasyonları ($C_o=\beta/(1+\beta)$) elde edilmiştir. Buradaki Q_a hava giriş debisi, $\underline{Q_w}$ su debisi, V_a ortalama hava giriş hızı, G_a kütlesel hava giriş debisidir. Hava giriş debisi kütlesel debinin havanın yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmiştir ($Q_a=G_a/\rho_a$). Burada ρ_a=1.225 kg/m^3 alınmıştır.

Her üç meş yapısı için farklı Froude sayılarındaki HAD analizi sonuçları Çizelge 4.1 – 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde Fr sayısı artıkça hava giriş oranları ve dolayısıyla hava konsantrasyonunun arttığı görülmektedir. Hava giriş konsantrasyonu maksimum % 7.92 olduğu en iyi durumun su yüksekliğin 1 m ve su hızının 25 m/s olduğu durumdur. Farklı meş yapılarında elde edilen sonuçların düşük olduğunun görülmesi havalandırıcıların performansı hakkında kesin kanıya vardırmıştır. Çizelgeler detaylı incelendiğinde hava konsantrasyonu değerlerinin çoğunun literatürdeki sınır değerlerin (% 5) altında kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla 2010 yılında yapılan havalandırıcı kesitlerinin tasarım değişikliği kararı isabetli olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.1. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı HAD analizi sonuçları (kaba meş)

H **(m)**	***V*** **(m/s)**	**Fr**	$(V_a)_{ort}$ **(m/s)**	G_a **(kg/s)**	Q_a **(m^3/s)**	$2xQ_a$ **(m^3/s)**	G_w **(kg/s)**	Q_w **(m^3/s)**	β	**Hava kons.** C_0	**Hava kons. %**
1.00	15.00	4.79	15.78	36.89	30.11	60.23	916085.50	917.74	0.03	0.029	2.9
1.00	20.00	6.39	17.83	71.70	58.53	117.06	1209271.80	1211.45	0.05	0.048	4.8
1.00	25.00	7.98	20.92	106.50	86.94	173.88	1470557.90	1473.21	0.06	0.057	5.7
1.00	30.00	9.58	26.41	146.86	119.89	239.77	1793213.30	1796.45	0.07	0.066	6.6
2.00	15.00	3.39	21.92	10.68	8.72	17.44	1885600.90	1889.00	0.00	0.000	0.0
2.00	20.00	4.52	23.28	54.46	44.46	88.91	2482378.80	2486.86	0.02	0.020	2.0
2.00	25.00	5.64	24.31	92.61	75.60	151.20	3080624.50	3086.18	0.02	0.020	2.0
2.00	30.00	6.77	28.58	137.82	112.51	225.01	3700805.00	3707.48	0.03	0.029	2.9
3.00	20.00	3.69	26.44	39.95	32.61	65.22	3727065.50	3733.79	0.01	0.010	1.0
3.00	25.00	4.61	26.28	78.23	63.86	127.72	4664182.00	4672.59	0.01	0.010	1.0
3.00	30.00	5.53	29.96	129.10	105.39	210.78	5567849.50	5577.89	0.02	0.020	2.0
1.35	19.45	5.34	15.72	87.24	71.22	142.43	1447289.30	1449.90	0.05	0.048	4.8
1.90	20.77	4.81	22.65	61.19	49.95	99.90	2389578.80	2393.89	0.02	0.020	2.0
2.39	21.40	4.42	23.94	53.30	43.51	87.02	3075250.80	3080.80	0.01	0.010	1.0
2.91	22.60	4.23	25.39	62.39	50.93	101.86	4027113.30	4034.38	0.01	0.010	1.0

Çizelge 4.2. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı HAD analizi sonuçları (orta meş)

H (m)	*V (m/s)*	*Fr*	$(V_a)_{ort}$ *(m/s)*	G_a *(kg/s)*	Q_a *(m^3/s)*	$2xQ_a$ *(m^3/s)*	G_w *(kg/s)*	Q_w *(m^3/s)*	*β*	*Hava kons.* C_0	*Hava kons.* *%*
1.00	15.00	4.79	22.49	46.89	38.28	76.56	906896.1	908.53	0.04	0.038	3.8
1.00	20.00	6.39	18.53	84.98	69.37	138.74	1179310	1181.44	0.06	0.056	5.6
1.00	25.00	7.98	22.67	119.32	97.4	194.81	1478256	1480.92	0.07	0.065	6.5
1.00	30.00	9.58	26.51	139.88	114.19	228.38	1768579	1771.77	0.06	0.056	5.6
2.00	15.00	3.39	22.74	21.45	17.51	35.02	1870179	1873.55	0.01	0.009	0.9
2.00	20.00	4.52	23.85	61.40	50.12	100.24	2468903	2473.36	0.02	0.019	1.9
2.00	25.00	5.64	25.18	101.50	82.86	165.71	3069623	3075.16	0.03	0.029	2.9
2.00	30.00	6.77	28.11	138.69	113.22	226.43	3672951	3679.57	0.03	0.029	2.9
3.00	25.00	4.61	27.82	61.35	50.08	100.16	4424339	4432.32	0.01	0.009	0.9
3.00	30.00	5.53	29.59	114.4	93.39	186.78	5335364	5344.98	0.02	0.019	1.9
1.35	19.45	5.34	20.21	78.13	63.78	127.56	1550106	1552.90	0.04	0.038	3.8
1.90	20.77	4.81	28.03	72.22	58.96	117.91	2399246	2403.57	0.02	0.019	1.9
2.46	21.39	4.35	25.91	71.50	58.37	116.73	3211411	3217.20	0.02	0.019	1.9
2.91	22.60	4.23	27.29	73.76	60.21	120.42	3856046	3863.00	0.02	0.019	1.9

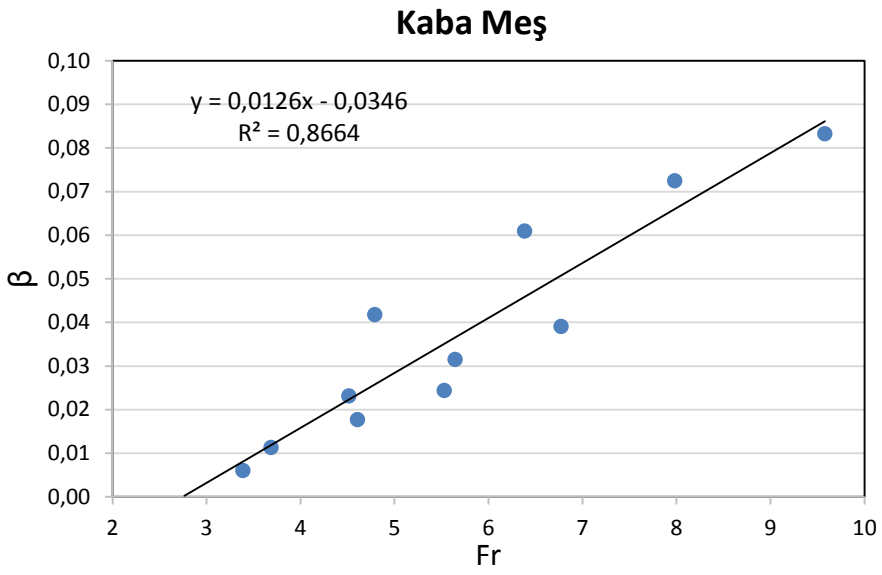
Çizelge 4.3. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 tasarımı HAD analizi sonuçları (nihai meş)

H (m)	***V (m/s)***	***Fr***	***$(V_a)_{ort}$*** ***(m/s)***	***G_a*** ***(kg/s)***	***Q_a*** ***(m^3/s)***	***$2xQ_a$*** ***(m^3/s)***	***G_w*** ***(kg/s)***	***Q_w*** ***(m^3/s)***	***β***	***Hava kons.*** ***C_0***	***Hava kons.*** ***%***
1.0	15	4.79	15.42	17.13	13.98	27.97	919759.6	921.42	0.02	0.019	1.9
1.0	20	6.39	18.19	41.94	34.24	68.47	1214526	1216.72	0.03	0.029	2.9
1.0	25	7.98	20.00	86.14	70.32	140.64	1509116	1511.84	0.05	0.047	4.7
1.0	30	9.58	26.74	140.28	114.51	229.03	1805018	1808.27	0.06	0.056	5.6
2.0	20	4.52	23.46	37.04	30.24	60.47	2507171	2511.69	0.01	0.009	0.9
2.0	25	5.64	24.84	84.03	68.60	137.19	3116220	3121.84	0.02	0.019	1.9
2.0	30	6.77	28.32	132.40	108.08	216.16	3727782	3734.50	0.03	0.029	2.9

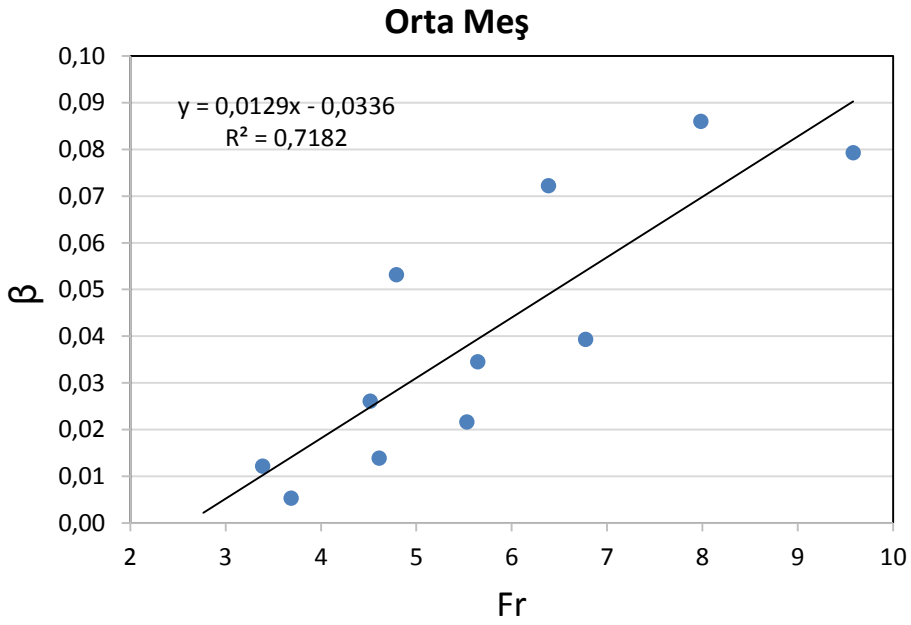
Çizelge 4.1 de farklı hız ve su yükseklikleri için Ilısu Barajı 1982 kesitinde yapılan CFD analizi sonuçlarından hava giriş oranı ve ortalama hava konsantrasyonları verilmiştir. Örneğin (sistemin simetriden dolayı yarısı dikkate alınarak Çizelge 4.1'deki değerlere göre); akım derinliği H = 1m ve şut kanalındaki ortalama akım hızı (V) 25 m/s (Fr=7.98 için) iken HAD ile yapılan analiz sonucunda havalandırıcı tarafından sağlanan hava giriş debisi 86.94 m^3/s elde edilmiş ve suyun debisinin 1473.21 m^3/s dikkate alındığında hava giriş oranı β = 86.94/1473.21=0.06 (%6) olarak hesaplanır. Buna karşılık ortalama hava konsantrasyonu C_o = 0.06/(1+0.06) = 0.057 (%5.7) elde edilmiştir. Kavitasyondan korunmak için hava konsantrasyonunun en az %5 olması gerektiği hatırlanırsa bu konsantrasyonun yeterli olacağı görülür. Ancak tüm değerlere bakıldığında hava konsantrasyonunun % 1 ila % 10 aralığında kaldığı ve bazı akım değerleri için yeterli olmadığı görülmektedir.

Havalandırıcının sağladığı hava konsantrasyonunun Fr sayısı ile değişimini daha iyi görebilmek için Şekil 4.6 – 4.8'deki grafikler çizdirilmiştir. Bu grafiklerden, hava konsantrasyonu Fr sayısıyla birlikte hemen hemen doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Literatürde verilen birçok bağıntı da hava giriş oranının ve dolayısıyla ortalama hava konsantrasyonunun önemli derecede Fr sayısına bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca grafikler incelendiğinde kaba ve orta meş için verilerin daha dağınık fakat ince (nihai) meş için daha belirgin bir değişim olduğu görülmektedir. Sırasıyla kaba, orta ve nihai meş için belirlilik katsayıları (R^2) değerleri 0.87, 0.72 ve 0.99 olarak elde edilmiştir. Buna göre bağımlılığı en yüksek sonuçlar nihai meş için alınmış ve dolayısıyla sonuçların meşe olan duyarlılığı nihai meş ile azaltılmıştır. Diğer bir değişle sayısal meş yapısından kaynaklanabilecek sayısal hataların azaltılması sağlanmıştır. Şekil 4.7'den anlaşılacağı gibi en dağınık sonuçlar orta meş yapısında elde edilmiştir.

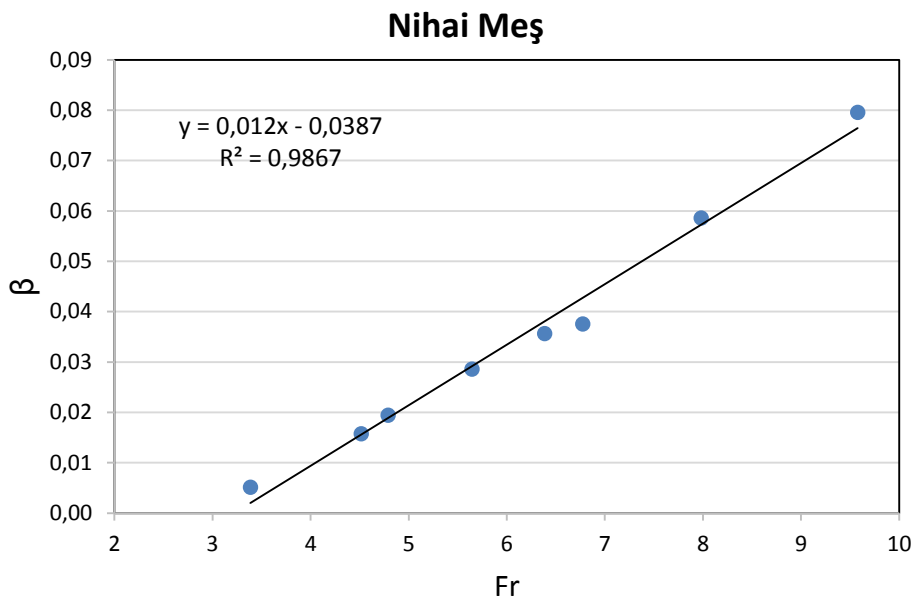
Froude sayısının yaklaşık olarak 7'den düşük olduğu durumlarda hava konsantrasyonu %5'in altında olduğu görülmektedir. Bu durum, her ne kadar düşük Fr sayılarında kavitasyon riski azalsa da yetersiz hava girişinin olduğu anlamına gelmektedir. Elde edilen sonuçlardan, 1982 yılındaki Ilısu barajı havalandırıcısının ilk tasarımının yetersiz olduğu ve ilk tasarımdan vazgeçilerek yeni tasarıma geçilmesinin doğru bir karar olduğu sonucuna varılabilir. görülmektedir. Bu tasarımdaki diğer önemli bir sorun ise kenardaki havalandırma bacalarının geniş şut kanallarının orta kesimlerini yeterince havalandıramama riskidir. Yeni tasarımla aralara yerleştirilen küçük hava kanallarıyla bu sorun giderilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.6. Ilısu Barajı Dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde kaba meş yapısında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi.

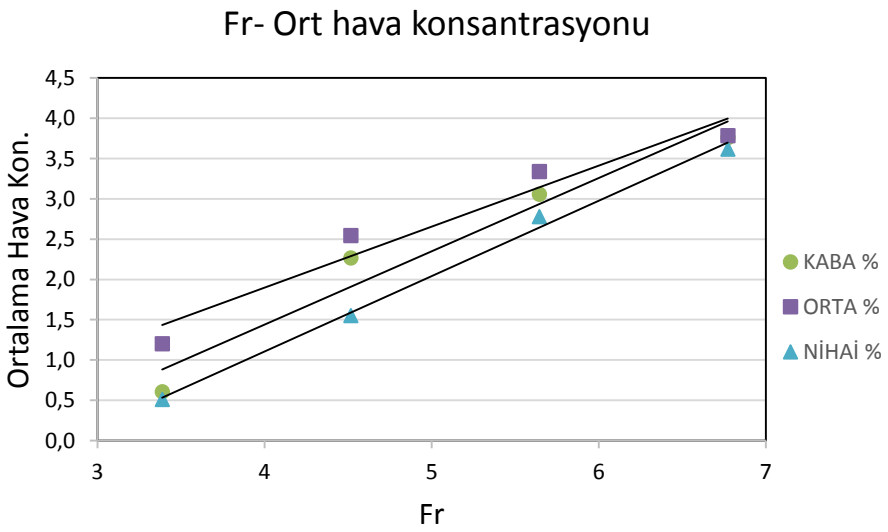


Şekil 4.7. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde orta meş yapısında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi.

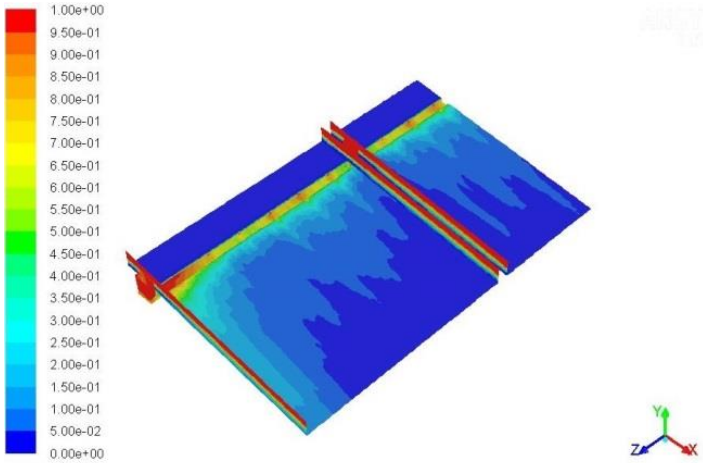


Şekil 4.8. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde nihai meş yapısında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi.

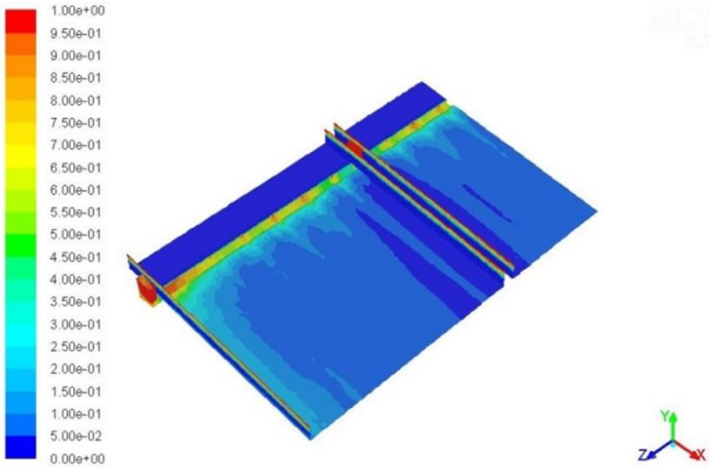
Şekil 4.9'da Farklı mesh yapıları için Fr sayılarıyla hava konsantrasyonlarının değişimi verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında her üç meş yapısından elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte en yüksek hava konsantrasyonu orta meş yapısında, en düşüğü ise nihai meş yapısından elde edilmiştir. En belirgin ilişki ise R^2=0.99 ile yine nihai meş yapısından elde edilmiştir.



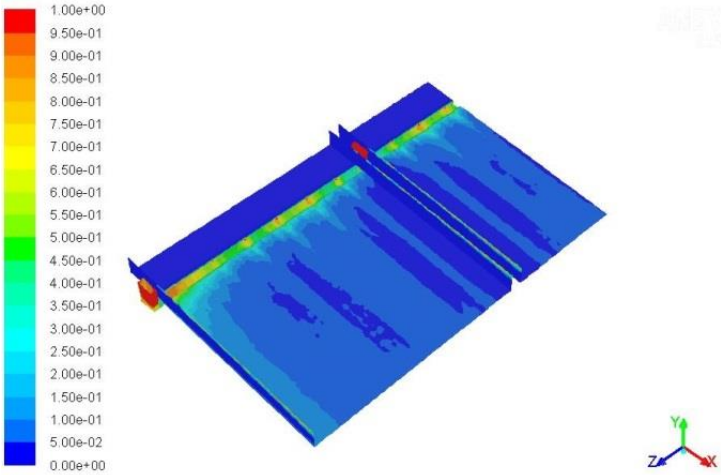
Şekil 4.9. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 1982 kesitinde kaba-orta-nihai meş yapılarında ortalama hava konsantrasyonun Fr ile değişimi.



(a) Fr=6.39

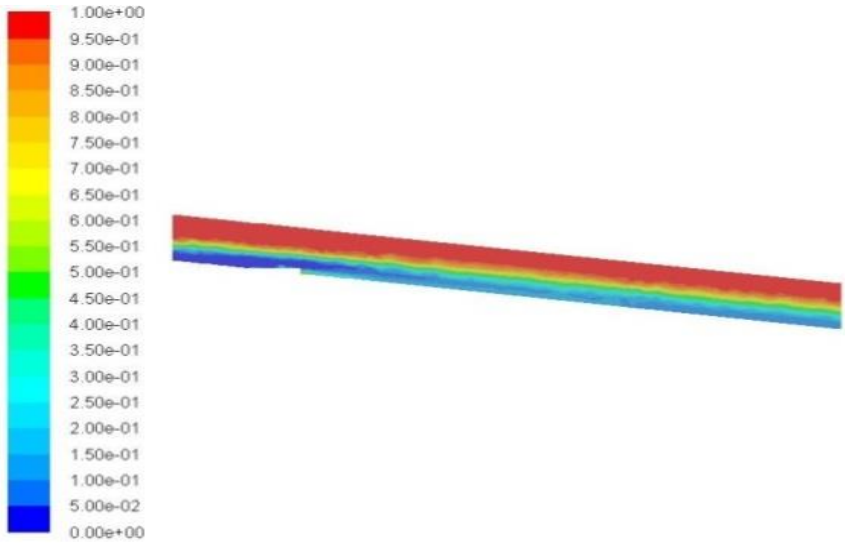


(b) Fr=4.52

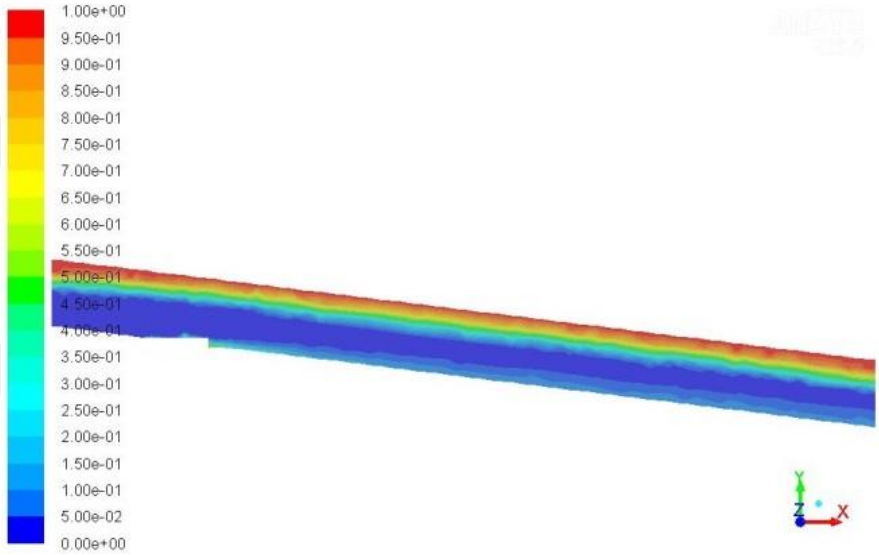


(c) Fr=3.69

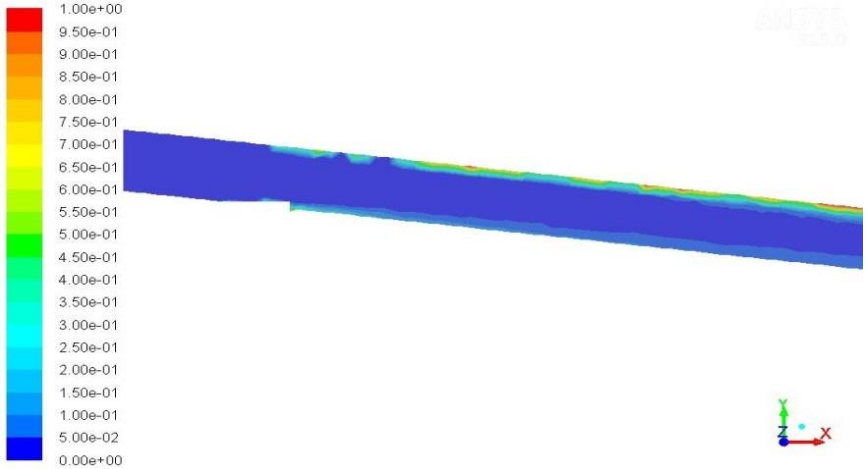
Şekil 4.10. Ilısu Barajı 1982 tasarımının şut tabanındaki hava faz oranları:
a) Fr=6.39, b) Fr=4.52, c) Fr=3.69.



(a)



(b)



(c)

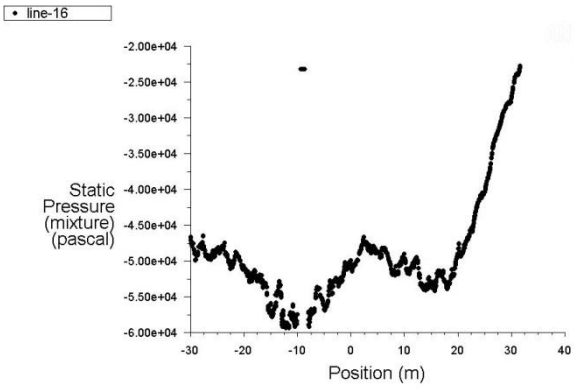
Şekil 4.11. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı boy kesit su-hava karışımları: a) Fr=6.39, b) Fr=4.52, c) Fr=3.69

Şekil 4.10'da farklı Froude sayıları için Ilısu Barajı 1982 havalandırıcı tasarımının tabandaki hava karışımların gösterilmektedir. Özellikle düşük Froude sayılarında şut tabanındaki yetersiz hava karışımı gözükmektedir (Şekil 4.10c). Ayrıca kenar bacalara yakın hava karışımı daha fazla kanal ortalarına doğru ise hava karışımının azaldığı ve yetersiz kaldığı da görünmektedir. Bu durum kanal genişliği boyunca üniform olmayan bir hava karışımı ve dolayısıyla kavitasyon üretebileceği anlamına gelebilir. Ayrıca orta bölgelerdeki yetersiz hava girişi nedeniyle basınçların fazla düşerek batık havalandırıcı durumu meydana getirebilmektedir. Batık bir havalandırıcı durumunun ise düşük Froude sayılarında bile kavitasyon üretebileceği bilinmektedir. Bu nedenle böyle bir durum tasarımcılar tarafından istenmez

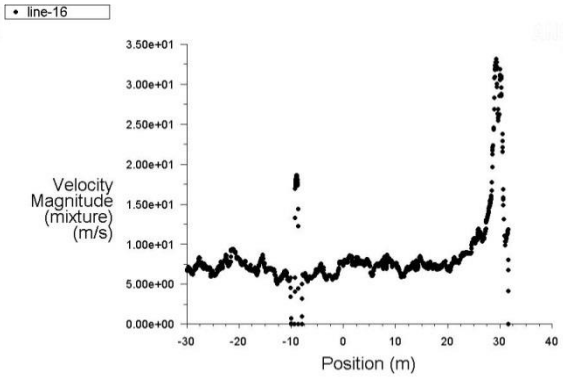
Şekil 4.11'deki boy kesitlerde kanal boyunca havalandırıcının memba ve mansabındaki hava karışımının akım derinliği boyunca değişimi görünmektedir. Düşük akım derinliklerinde (Şekil 4.11a) görüldüğü gibi alt ve üst naptan giren hava karışımı tüm derinlik boyunca sağlanırken daha büyük derinliklerde (Şekil 4.11b ve c) derinlik boyunca hava karışımı sağlanamamaktadır.

Şekil 4.12 (a-f)'de yine 1982 tasarımında kanal genişliği boyunca hava kanalındaki basınç ve hız değişimleri grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafiklerde sağ taraf (Position = 30) hava bacasının olduğu havanın ilk giriş yaptığı noktayı, sol taraf ise (Position = -30) ortadaki şut kanalının tam ortasını (simetri eksenini) temsil etmektedir. Bu grafiklerden genel olarak anlaşılacağı üzere, hava kanalı boyunca negatif basınçlar oluşmakta ancak basınçlar havanın ilk giriş yaptığı yerden yani hava bacalarından uzaklaştıkça daha da düşmektedir. Bununla paralel olarak hava bacasına yakın (sağ tarafta) hava giriş hızları orta bölgelere nazaran daha fazladır. Hava hızları ve basınçların ortalara doğru üniform olarak azalmaması ve aniden azalması kanal genişliği boyunca havalandırma performansının da iyi olmadığı anlamına gelir.

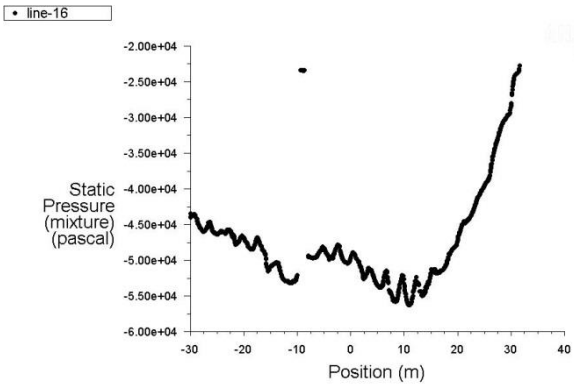
Bu grafiklerde farklı meş yapılarının etkisi incelendiğinde ise sonuçların meş yapısına oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Kaba ve orta meş için değişimlerin daha stabil olduğu görülürken ince (nihai) meş yapısı için sonuçlar daha değişkendir. Bu durum kanal ortalarındaki basınç değişimlerinin daha hassas olduğu ve türbülansın etkisinin daha fazla görüldüğü anlamına gelebilir. Grafiklerde -10 pozisyonunda görülen sıra dışı değer ise orta ayağa denk gelen kısım olup herhangi bir geçerliliği yoktur.



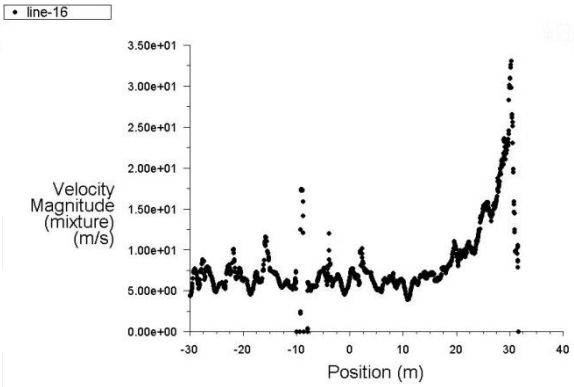
a) Kaba meş basınç değişimi



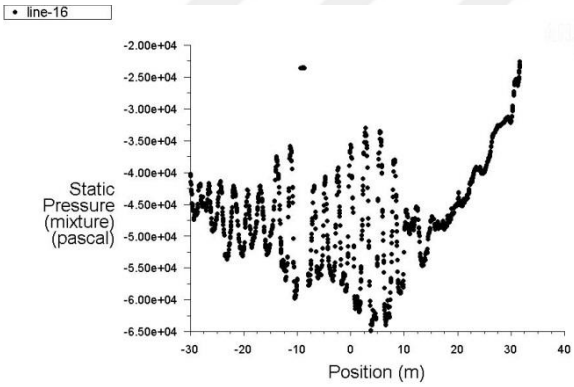
b) Kaba meş hız değişimi



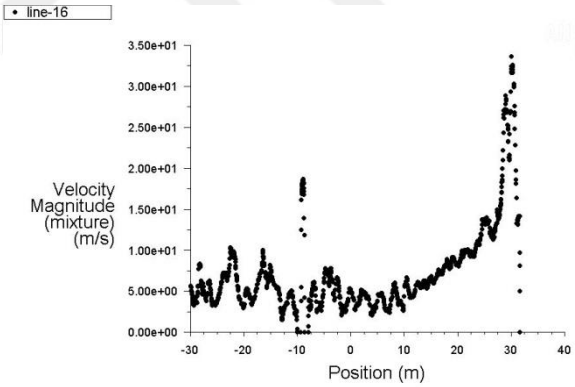
c) Orta meş basınç değişimi



d) Orta meş hız değişimi



d) Nihai meş basınç değişimi



f) Nihai meş hız değişimi

Şekil 4.12. Ilısu Barajı 1982 tasarımı dolusavak havalandırıcısı kaba-orta-ince (nihai) meş yapılarında *H*=2 m ve *V*=20 m/s durumu için ana hava kanalı boyunca basınç ile hava hızı değişimleri

4.2. Ilısu Barajının 1982 Kesiti HAD sonuçları İle Model Deney Analizinin Karşılaştırması

Çizelge 4.4. Ilısu Barajı model deney raporu değerleri (Demiröz, 1982)

σ_p'nin debiye ve dolusavak başlangıcına olan mesafeye bağlı hesaplanmış değerler.								
q (m^2/s)	Taban Kotu (*m*)	Dolusavak başlangıcına mesafe (*m*)	H_0 (*m*)	$h_p=p/\gamma$ (*m*)	*H* (*m*)	H_v (*m*)	*U* (*m/s*)	σ_p
26.32	487.48	65	9.7	0.82	10.55	0.2	19.9	0.513
	478.38	140	9.71	0.78	10.51	0.2	21.15	0.452
	469.3	215	9.72	0.74	10.47	0.2	21.9	0.42
	463.33	265	9.73	0.69	10.42	0.2	22.09	0.411
	457.71	315	9.73	0.66	10.39	0.2	22.87	0.382
	451.13	365	9.74	0.64	10.37	0.2	23.17	0.372
	445.02	415	9.75	0.6	10.33	0.2	23.53	0.359
39.47	487.48	65	9.73	1.25	10.98	0.2	20.76	0.49
	478.38	140	9.73	1.2	10.93	0.2	22.14	0.431
	469.3	215	9.73	1.16	10.89	0.2	23.1	0.393
	463.33	265	9.73	1.11	10.84	0.2	23.92	0.37
	457.71	315	9.73	1.02	10.75	0.2	23.99	0.36
	451.13	365	9.73	0.96	10.69	0.2	24.46	0.344
	445.02	415	9.73	0.93	10.66	0.2	24.48	0.342
52.63	487.48	65	9.73	1.7	11.43	0.2	21.53	0.475
	478.38	140	9.73	1.59	11.32	0.2	22.84	0.418
	469.3	215	9.73	1.52	11.25	0.2	24.05	0.375
	463.33	265	9.73	1.44	11.17	0.2	24.92	0.347
	457.71	315	9.73	1.38	11.11	0.2	25.42	0.331
	451.13	365	9.73	1.36	11.09	0.2	26.66	0.309
	445.02	415	9.73	1.32	11.05	0.2	25.85	0.313
65.79	487.48	65	9.73	2.09	11.82	0.2	22.41	0.475
	478.38	140	9.73	2.01	11.74	0.2	23.69	0.403
	469.3	215	9.73	1.9	11.63	0.2	24.91	0.361
	463.33	265	9.73	1.8	11.53	0.2	25.72	0.336
	457.71	315	9.73	1.73	11.44	0.2	25.95	0.327
	451.13	365	9.73	1.67	11.43	0.2	26.5	0.314
	445.02	415	9.73	1.59	11.3	0.2	26.98	0.299
118.42	487.48	65	9.73	3.85	13.58	0.2	24.77	0.428
	478.38	140	9.73	3.63	13.36	0.2	26.11	0.379
	469.3	215	9.73	3.45	13.23	0.2	27.1	0.348
	463.33	265	9.73	3.32	13.15	0.2	28.29	0.317
	457.71	315	9.73	3.2	12.79	0.2	28.7	0.3
	451.13	365	9.73	3.05	12.74	0.2	28.9	0.295
	445.02	415	9.73	2.94	12.67	0.2	29.84	0.275

Çizelge 4.4 de 1982 de model deneyinde yapılan kavitasyon indeksinin (σ_p) debiye ve dolusavak başlangıcına olan mesafeye bağlı hesaplanmış değerleridir. Burada;

q = Birim m de debi miktarı

H_0=10.33 – z* γ_{hava}

z =şut kanalı üzerinde dikkate alınan noktanın kotu

γ_{hava}= Havanın özgül ağırlığı (γ_{hava} =0.0013 t/m^3)

Burada; $H_0 + h = H$

h_p=Akım içindeki dikkate alınan noktadaki basınç yüksekliğidir. ($h_p=\frac{p}{\gamma}$)

g=yer çekim ivmesi, p= tabanda ölçülen basınç

Burada şut kanalı boyunca ortalama taban kotu 463 m kabul edilerek H_0= 9.73 m bulunmuştur.

H_v= mutlak buhar basıncıdır (17° C için H_v=0.2 alınmıştır.)

U= Model deney ölçümlerde alınan suyun hızıdır.

σ_p=Şut Kanalı için bulunan kavitasyon indeksi $\sigma_p = \frac{H-H_v}{U^2/2g}$ formülü ile hesaplanır.

Çizelge 4.5. Model deney raporundaki kavitasyon indeksi ile HAD analizi ile hesaplan kavitasyon indisinin karşılaştırılması

q ***(m²/s)***	***h*** ***(m)***	***H₀*** ***(m)***	***hₚ*** ***(m)***	***Hᵥ*** ***(m)***	***U*** ***(m/s)***	***Model H*** ***(m)***	***Model σₚ*** ***(--)***	***Fluent H*** ***(m)***	***Fluent P*** ***(Pa)***	***Fluent σₚ*** ***(--)***
26.32	1.35	9.70	0.82	0.2	19.90	10.52	0.51	10.53	1985.2	0.51
39.47	1.90	9.73	1.25	0.2	20.76	10.98	0.49	10.71	3693.65	0.48
52.63	2.46	9.73	1.7	0.2	21.53	11.43	0.48	11.56	12109.5	0.48
65.79	2.91	9.73	2.09	0.2	22.41	11.82	0.45	11.53	11742.65	0.44

Burada ANSYS-Fluent programı ile Ilısu Barajı şut kanalındaki basınç değeri Pa cinsinden okunarak mutlak basınç yükü H bulunmuştur. Bulunan mutlak basınç yükü ile kavitasyon indeksi bulunmuştur. Çizelge 4.5 de görüldüğü gibi deneysel bulunan kavitasyon indeksi ile sayısal analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada görülmüştür ki model deney sonucu ile bulunan kavitasyon indeksleriyle ile simülasyon sonucu bulunan kavitasyon indeksleri birbirine elde edilmiştir.

Çizelge 4.4 DSİ TAKK tarafından yapılan model deney raporundan alınmıştır. Çizelge 4.5'de ise HAD analizlerinden elde edilen basınç değeri ile 1982 de yapılan model deney raporunda bulunan kavitasyon indeksleri karşılaştırılmıştır. Bir örnek olarak, su derinliği 1.35 m, su hızının 19.90 m/s için HAD analizinde tabanda ölçülen basınç değerleri -2249 Pa ile 6219.4 Pa arasında okunmuş olup ortalama değer olarak 1985.2 Pa alınmıştır. Mutlak basınç yüksekliği Denklem (4.1)'den aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Kavitasyon indeksi ise Denklem (4.2) ile hesaplanır.

$$P = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{P_{fluent}}{\gamma} \tag{4.1}$$

Çizelge 4.52'in ilk satır için; $P = \frac{101325}{9810} + \frac{1985,2}{9810}$=10.53 m Olarak bulunur.

$$\sigma = \frac{P - Hv}{\frac{V^2}{2g}} \tag{4.2}$$

$$\sigma = \frac{10,53-0,2}{\frac{19,9^2}{2*9,81}} = 0.51$$

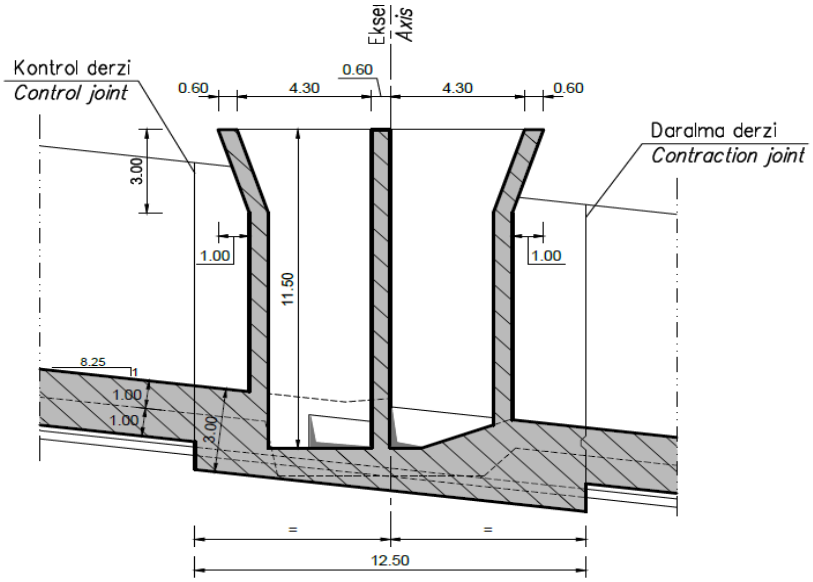
P_0: Atmosfer basıncı basıncı (Pascal) , V: Akımın Hızı (m/s) g: yer çekim ivmesi, P_{fluent}: Dikkate alınan kesitte programda bulunan basınç yükü, γ : Suyun özgül ağırlığı (N/m^3), P: Dikkate alınan kesitteki mutlak basınç yükü Çizelge 4.4 ve 4.5'te görüldüğü gibi, Ilısu Barajı 1982 tasarımının model deney raporunda hesaplanan kavitasyon indeksleriyle, sayısal modellemeden elde edilen kavitasyon indeks değerleri oldukça uyumlu çıkmıştır. Çizelge 2.1 de verilen (Kells vd. 1991) kritik kavitasyon indeksleri ile kavitasyon indeksi karşılaştırıldığında şut yüzeyinin özel pürüzlü kaplamalarla korunması görüşü benimsenir. Ancak 2010 yılında yapılan revize proje değişikliğinde yeni bir tasarım benimsenmiştir. Yeni revize tasarımda (2010 kesiti) ise eşik yapısı, şut kanalı ve sıçratma eşiğinde Türkiye'de ilk defa silika katkılı beton kullanılmıştır.

4.3. Ilısu Barajı Dolusavak Revize Tasarımının Analizi

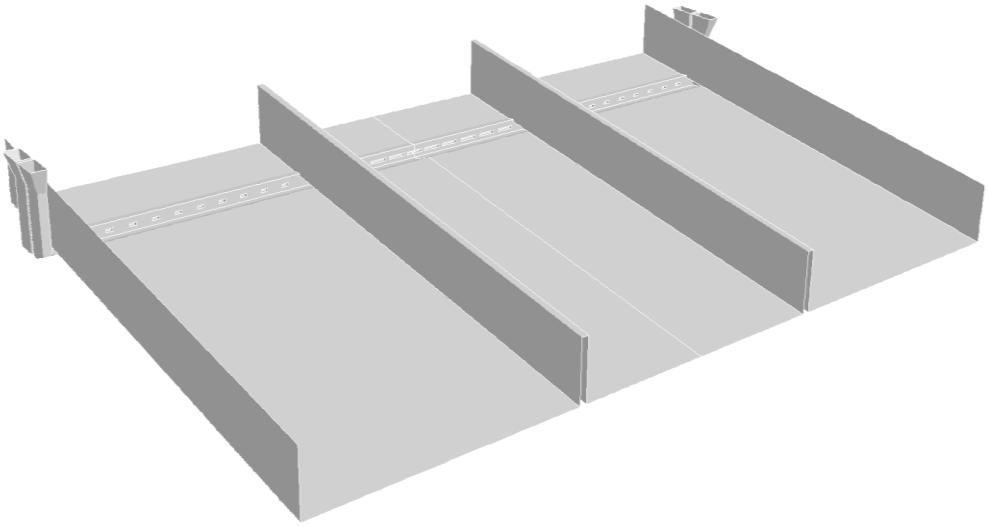
4.3.1. Revize tasarımın sayısal modeli

Ilısu Barajı ve HES Projesinde 1982 yılında hazırlanan dolusavak projeleri revize edilerek 2010 yılında yeni bir tasarım geliştirilmiştir.2010 yılında geliştirilen tasarım ile 8 olan radyal kapak sayısı 6'ya düşürülmüş, 65 m olan havalandırıcılar arası mesafe ise revize tasarımla 75 m'ye çıkarılmıştır. Yeni tasarımda ana havalandırıcı kanalları ile beraber sağlı sollu ek havalandırıcı bacalar eklenmiştir. Ayrıca ara duvarlar içerisinde havalandırma bacalarına gerek olmadığına karar verilmiştir. 2010 yılındaki revize tasarımın üç boyutlu sayısal modeli ve meş yapısı Şekil 4.13 ve 4.14'te verilmiştir. Tasarımın detayları tezin sonundaki Ekler kısmında verilmiştir. Bu yeni tasarımda şut kanalı üzerindeki hava kanalı (oluğu) ile taban altına yerleştirilen hava galerisi her iki tarafa yerleştirilen ayrı iki baca ile beslenmektedir. Taban altına yerleştirilen hava kanalı dikdörtgen kesitli ağızlarla ana hava oluğuna açılmakta ve böylece şut kanallarının bacadan uzak kesimlerine de hava sağlanması düşünülmüştür. Tasarımda dikkat çeken diğer bir önemli detay havalandırıcıyı ek olarak besleyen bu hava giriş ağzı kesitlerinin kanal genişliği boyunca aynı olmayıp orta bölgelerde daha büyük kesit seçilmesidir. Zekice yapılmış bu tasarımla havalandırma bacalarına uzak bölgelerin daha iyi havalandırmasının sağlaması amaçlanmıştır.

Eski tasarım olan 1982 tasarımının model deneylerinin DSİ tarafından yapılmış fakat revize tasarımın herhangi bir model çalışması yapılmamıştır. Bu nedenle yeni tasarımın performansı hakkında elde mevcut bir bilgi yoktur. Bu tez çalışmasıyla yukarıda verilen 1982 tasarımı ile bu başlıkta verilecek 2010 tasarımının performansları HAD analizleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.



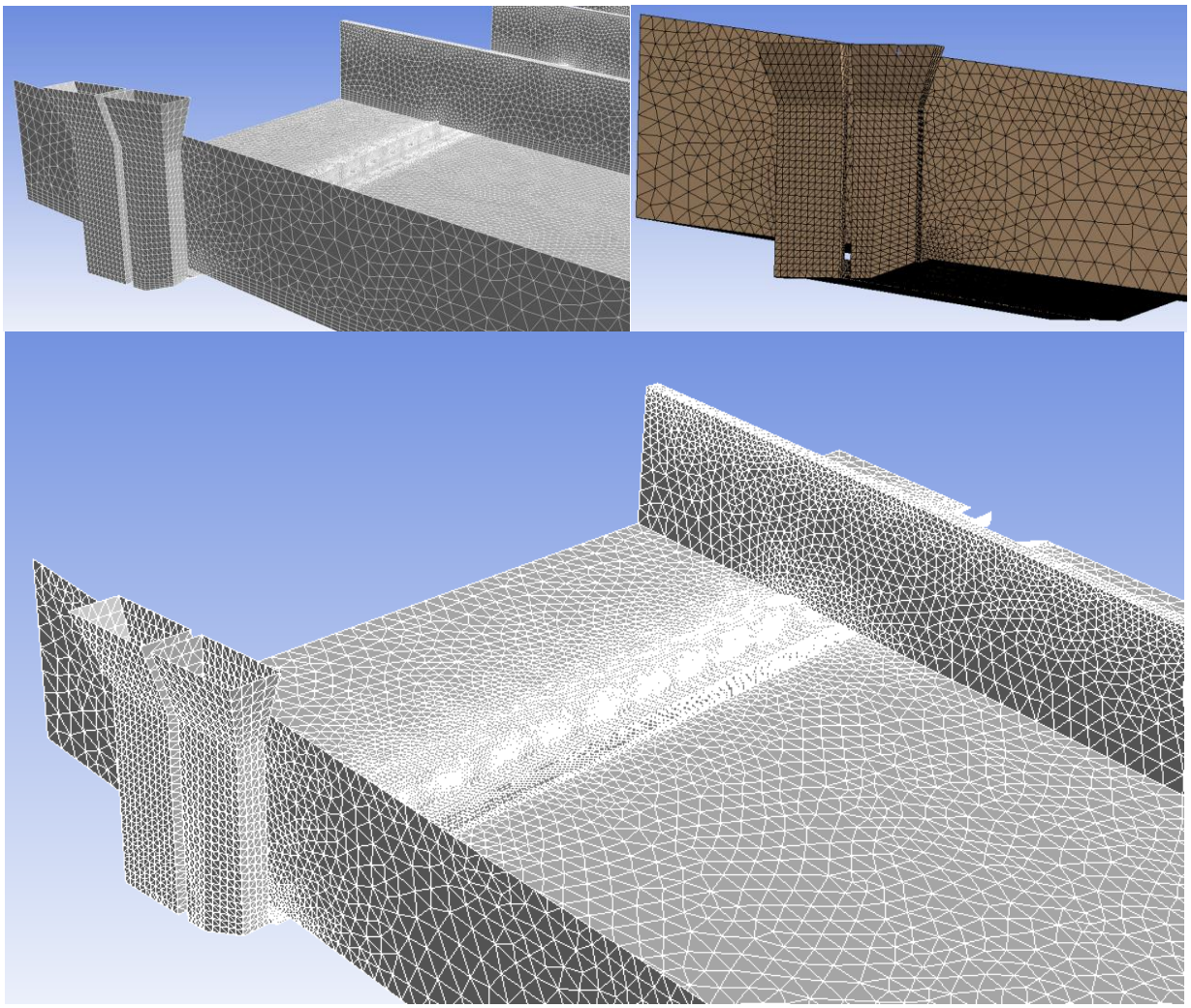
(a) Havalandırıcı bacası kesiti



(b) Sayısal model geometrisi

Şekil 4.13. Ilısu Barajı 2010 havalandırıcısı revize tasarımı ve 3B sayısal model geometrisi

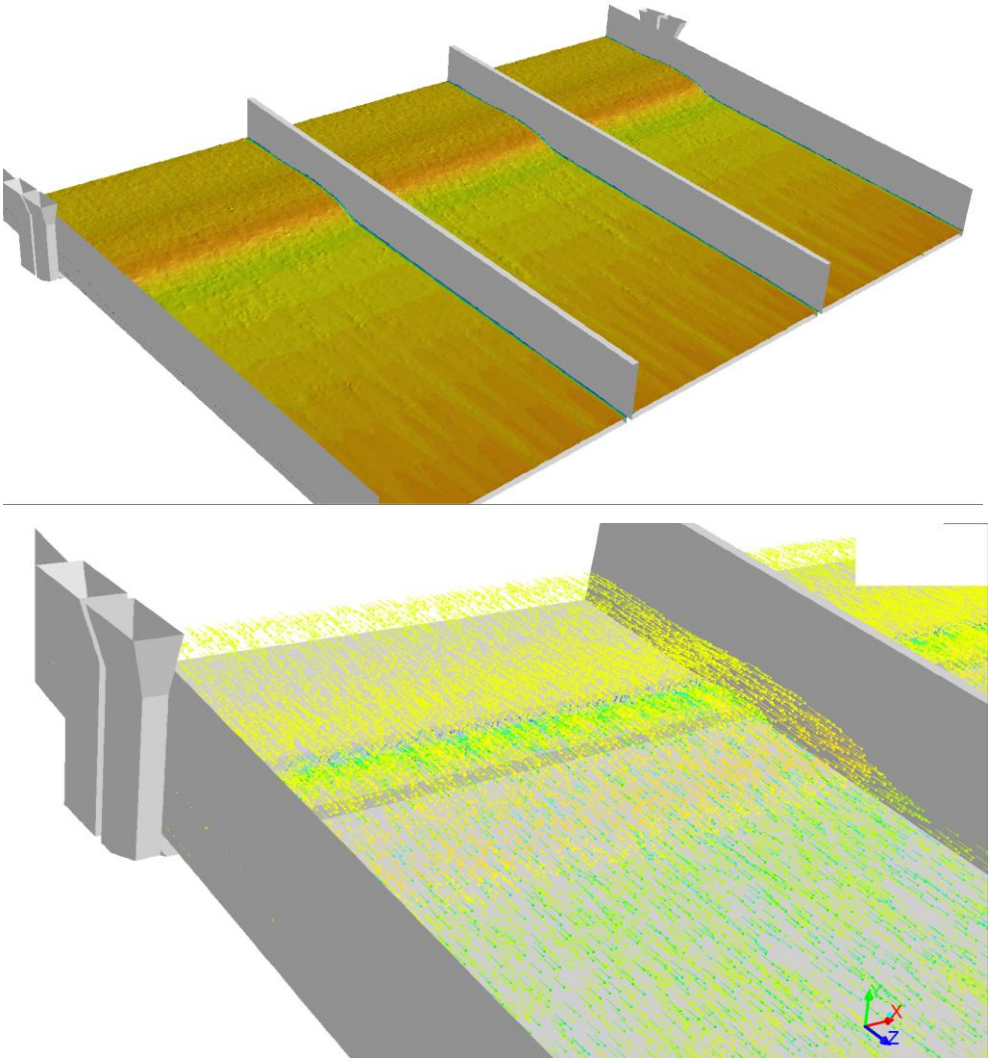
Ilısu Barajı 2010 yılı revize tasarımının sayısal modellemesi için ANSYS yazılımı ile birlikte sunulan Workbench yazılımı kullanılarak 1,781,717 hücreden oluşan karma ağ yapısı kullanılmıştır. Kullanılan sonlu hacimler hücrelerinin minimum ortogonal kalitesi % 5, maksimum şekil oranı ise % 55.7 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Ilısu Barajı 2010 revize tasarım sayısal meş yapısı

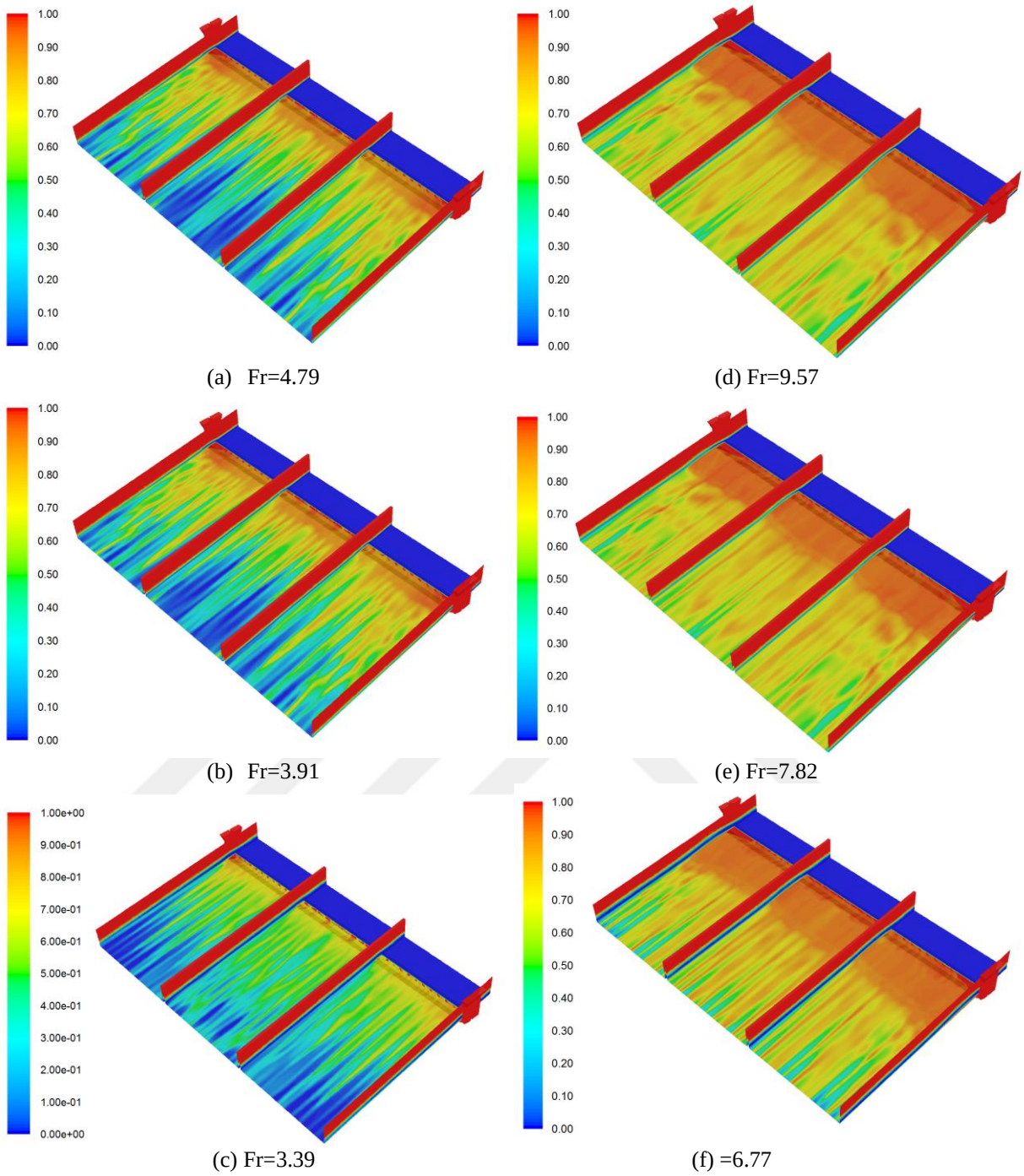
4.3.2. Revize tasarım sayısal analiz sonuçlarının değerlendirmesi

Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısının 2010 yılı revize tasarımı için farklı Froude sayılarında HAD analizleri yürütülmüştür. Hava kanallarının olduğu ve hava girişi sağlayan yerlerde sayısal olarak akımı daha iyi simüle edebilmek için bu kısımlar diğer yerlere göre daha hassas ağ yapısı ile meşlenmiştir. Bu durum sayısal modeli daha iyi yaparken çözüm süresini ise oldukça arttırmaktadır. Akımın çift fazlı ve türbülanslı olması ve yüksek hücre sayısı nedeniyle çözümlerin kararlı hale gelmesi ve yakınsaması her bir çözüm için orta düzey bir PC kullanılarak yaklaşık 4-5 gün kadar sürmüştür. Şekil 4.15'te 2010 yılındaki revize tasarımın HAD analizlerinden elde edilmiş su yüzü profilinin genel bir çıktısı verilmiştir.



Şekil 4.15. 2010 yılı revize tasarımın HAD analizi su yüzü görüntüsü

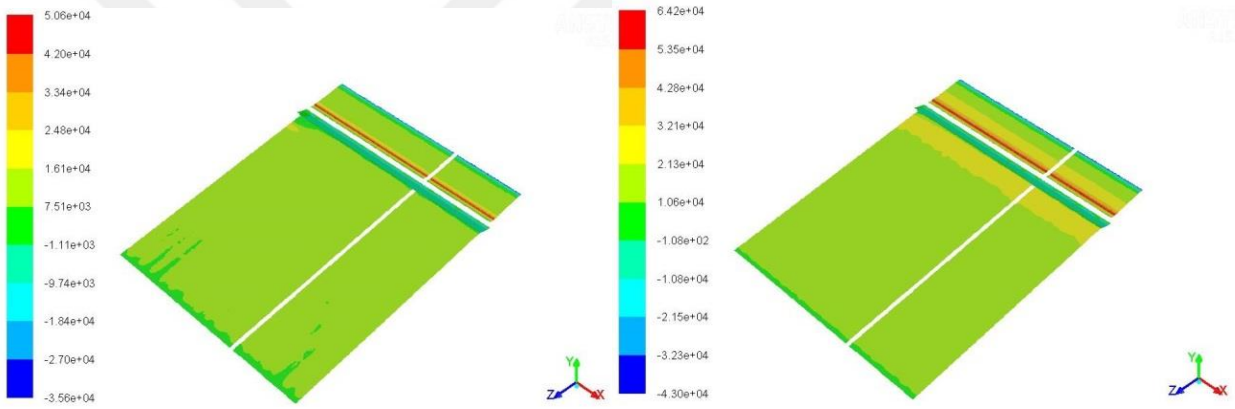
Revize tasarımda su derinlikleri *h* = 1,0, 1,5, 2,0 m ve ortalama akım hızları *v*=15, 30 m/s için çift fazlı, türbülanslı ve değişken akım durumu için Fluent yazılımı yardımıyla 3B sayısal analizler yürütülmüştür. HAD analizleri sonucu elde edilen bazı çıktılar aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



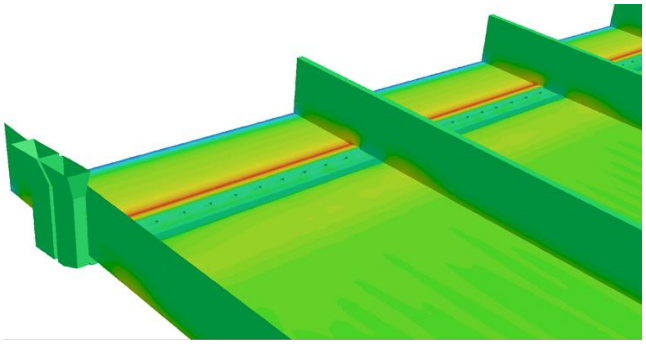
Şekil 4.16. Ilısu Barajı 2010 tasarım tabandaki hava-su faz oranları: (a) *h*=1.0m, *v*=15m/s, Fr=4.79, (b) *h*=1.5m, *v*=15m/s, Fr=3.91, (c) *h*=2.0m *v*=15m/s, Fr=3.39, (d) *h*=1.0m, *v*=30m/s, Fr=9.57, (e) *h*=1.5m, *v*=30 m/s, Fr=7.82, (f) *h*=2.0, *v*=30m/s, Fr=6.77

Şekil 4.16'da farklı akım durumları için havalandırıcı mansabında dolusavak tabanındaki hava-su fazı değişimleri gösterilmektedir. Buradaki kırmızı renk suyu, mavi renk ise havayı temsil etmektedir. Şekiller iki farklı su hızı ve üç farklı akım derinliği için verilmiştir. Sol taraftaki şekiller (a, b ve c) ortalama yaklaşan akım hızı *V*=15 m/s, sağ taraftaki şekiller ise *V*=30m/s için verilmiştir. Böylelikle farklı Fr sayılarının değişimi incelenirken aynı zamanda akım hızlarının

etkisi de yan yana karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekiller aynı akım hızları için farklı su derinliklerinde incelendiğinde (alt alta), akım derinliğinin artmasıyla Fr sayısının azalması tabandaki hava konsantrasyonunu çok fazla değiştirmediği görülmektedir. Fakat tüm kesit boyunca hava girişi dikkate alındığında su debisi oransal olarak artacağından Fr akım derinliğinin artmasıyla (Fr sayısının azalmasıyla) hava giriş oranının (β) dolayısıyla ortalama hava konsantrasyonunun (C_o) da azalacağı açıktır. Şekiller, aynı akım derinliğinde ortalama akım hızlarının etkisi için (yan yana) incelendiğinde ise akım hızının (v) artmasıyla (dolayısıyla Fr sayısının artmasıyla) tabandaki hava konsantrasyonunun önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Akım kesiti boyunca hava giriş oranı ve dolayısıyla hava konsantrasyonu bakımından Fr akım hızının dolayısıyla Fr sayısının etkisini daha net gözlemleyebilmek için $\beta=f(\mathrm{Fr})$ fonksiyonun değişimini incelemek yerinde olacaktır. Bu değişimler ileride verilmiştir.



(a) Fr=4.79 (b) Fr=3.39

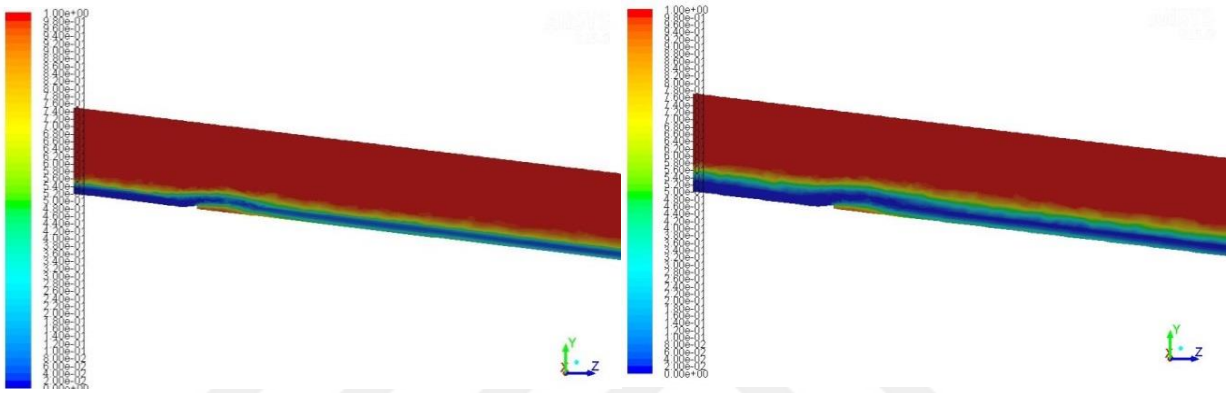


(c) Genel görünüm

Şekil 4.17. Ilısu Barajı 2010 revize tasarım taban basınçları

Farklı Froude sayılarında, dolusavak şut kanalları tabanlarındaki basınçlar Şekil 4.17'de sistemin simetrisi olarak verilmiştir. Tipik olarak basınçlar incelendiğinde ilk akımın rampayla karşılaştığı hat boyunca havalandırıcı mansabındaki bölgede yüksek basınçlar gözlemlenmiştir. Havalandırıcı tarafından oluşturulan su jetinin altındaki hava kanalı boyunca ise atmosfer altı

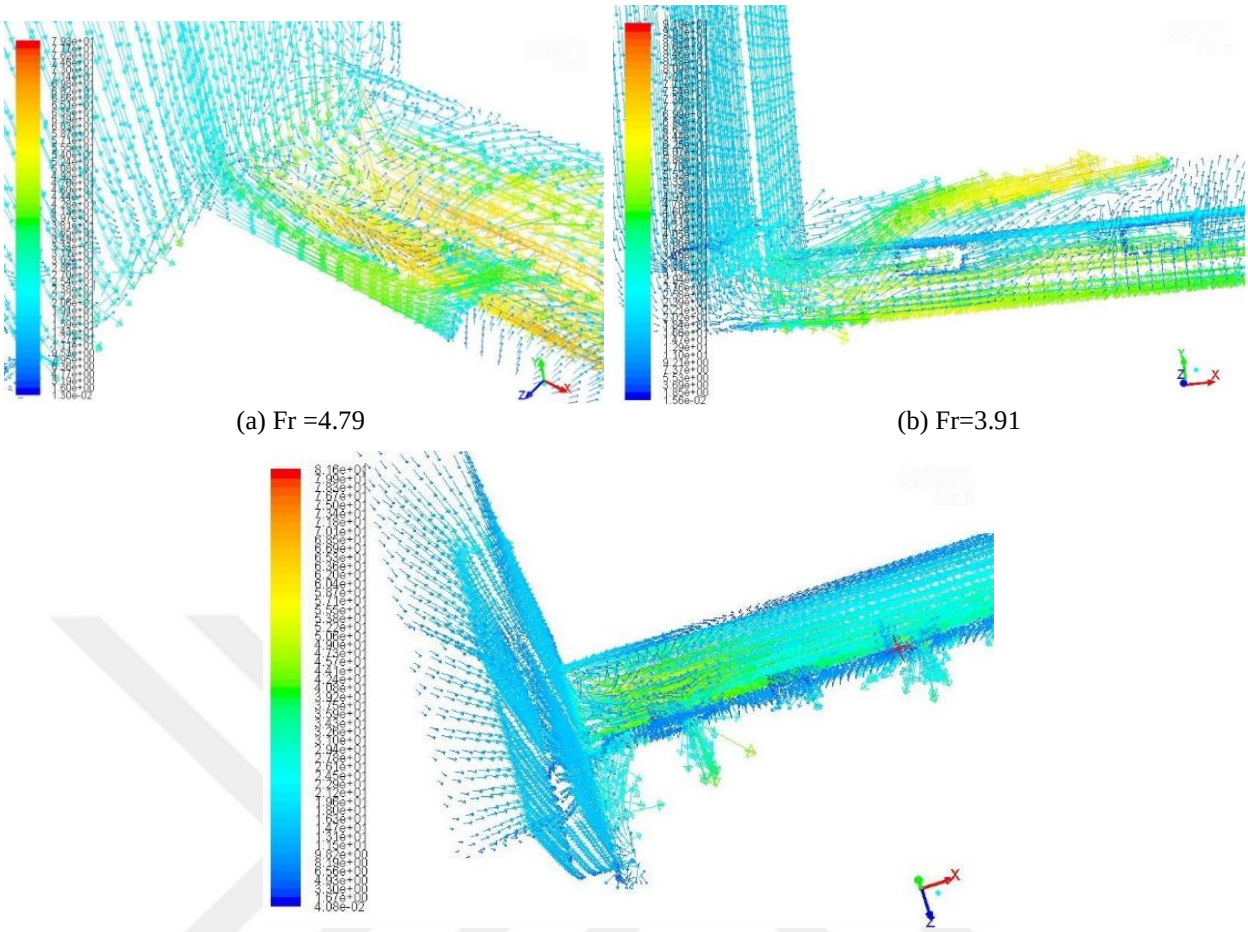
basınçlar oluştuğu görülmektedir. Bu negatif basınçlar sayesinde hava atmosfere açık yan bacalar tarafından emilerek akıma karışmaktadır. Jet altı basınçların çok fazla düşmesiyle batık havalandırıcı durumu ve bunun sonucu olarak da şut kanalı genişliği boyunca üniform olmayan basınç ve hava karışımları gözlemlenebilir. Bu durum kavitasyon hasarı üretebilir ve kaçınılması gereken bir haldir. Fakat 2010 yılı revize tasarımın bu basınç dağılımları incelendiğinde şut kanalı boyunca üniform bir basınç değişimi ve Şekil 4.16'daki hava-su karışımları incelendiğinde ise tabanda üniform bir hava karışımı sağlandığı görülmektedir. Bu ise tasarlanan yeni havalandırıcının oldukça etkin ve verimli çalıştığını göstermektedir.



(a) Fr=4.79 (b) Fr=3.39

Şekil 4.18. Ilısu Barajı 2010 revize tasarım boy kesit hava-su fazı durumu

Şekil 4.18'de dikkate alınan dolusavak şut uzunluğu boyunca havalandırıcı üzerindeki akımın boy kesiti iki farklı Fr sayısı için sayısal olarak gösterilmiştir. Havalandırıcı rampası sayesinde oluşturulan su jeti ve jet altı boşluk net olarak gözükmektedir. Havalandırıcı membaında tabandaki hava fazı gözükmezken havalandırıcının mansabında alt nap ve üst nap boyunca akıma havanın karışmaktadır. Düşük akım derinliklerinde (Şekil 4.18a) alt ve üst nap boyunca akıma giren hava akımın mansabına doğru tüm derinlik boyunca gelişmekte iken daha yüksek su derinliklerinde (Şekil 4.18b) alt ve üst nap hava karışımları tüm derinlik boyunca birleşmemektedir. Yani akım boyunca net su bölgesi (black water) devam etmektedir.

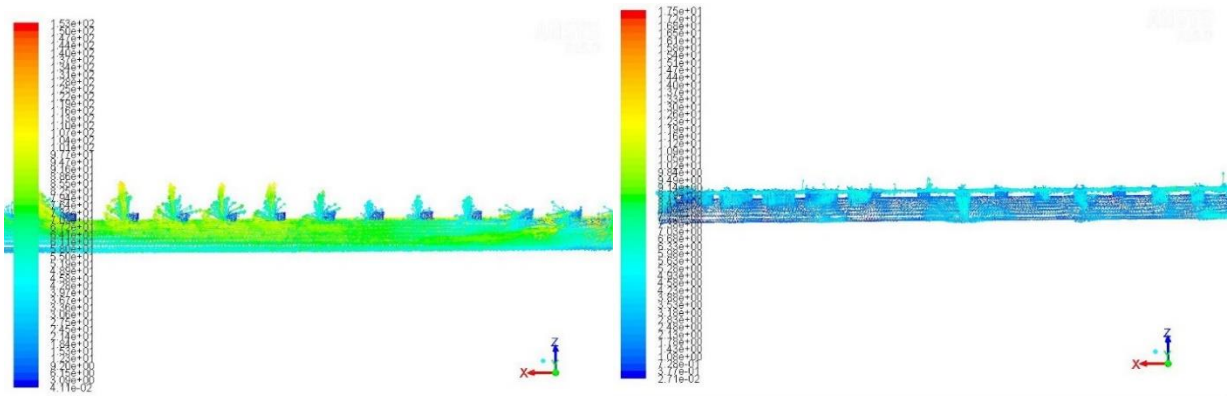


(a) Fr =4.79 (b) Fr=3.91

(c) Fr=3.39

Şekil 4.19. Ilısu Barajı 2010 revize tasarımında bacada ve ana kanalda hız vektörleri

Şekil 4.19'da havalandırıcı bacası ve hava kanalları boyunca hava akımlarının hız vektörleri yine farklı Fr sayıları için verilmiştir. Bu şekillerde, ana bacalardan giren havanın havalandırma kanalı ve alt hava kesitlerinden yönlenerek akım içerisine nasıl girdiği görülmektedir.



(a) Fr=6.77 (h=2 m, v=30 m/s) (b) Fr=3.19 (h=2 m, v=10 m/s)

Şekil 4.20 Ilısu Barajı 2010 revize tasarımı aynı su yüksekliğinde farklı hızlarda hız vektörleri

Şekil 4.20'de ise aynı su yüksekliği fakat farklı akım derinliklerindeki havalandırıcı kanallardan sağlanan havanın hız vektörleri gösterilmektedir.

Bu bölümde verilen Ilısu Barajı 2010 yılı revize tasarımının HAD analiz sonuçları havalandırıcının etkin bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu da yapılan revizyon tasarımının yerinde ve başarılı olduğunu gösterir. Yine de deneysel sonuçlar olmadan buna kesin olarak karar vermek yeterli olmayabilir. Fakat bu konuda DSİ tarafından deneysel çalışma yapılmasına gerek duyulmaması ve bu tez çalışması için de eldeki imkânların yeterli olmaması nedeniyle deneysel bir değerlendirme yapılması mümkün olmamıştır. Ancak her iki tasarımın (1982 ve 2010) HAD analizi sonucu elde edilen sonuçları tasarımların performansları açısından yeterli bir fikir vermektedir. Sayısal çıktıların yanında daha iyi bir değerlendirme yapabilmek için önceki tasarım için yapıldığı gibi 2010 revize tasarımın havalandırıcı performansını belirlemek üzere hava giriş katsayıları ve akıma karıştırılan hava konsantrasyonları elde edilerek aşağıda değerlendirilmiştir.

4.3.3. Revize tasarımın havalandırma performansı

Ilısu Barajı dolusavak revize tasarımının HAD analizleri işlem zamanından tasarruf sağlamak için ortadan simetrik olarak alınmış ve dolayısıyla yarısı için simülasyon yapılmıştır. Dolayısıyla Çizelge 4.6'de elde edilen debi değerlerinin iki katı alınarak gerçek debi değerleri elde edilmiştir. Hesaplarda tek tarafın havalandırma bacasının giriş kesit alanı orijinal 2010 revize tasarımına göre A_a=18.92 m^2 olarak alınmıştır. Çizelge 4.6'de havalandırıcı mansabındaki akım derinlikleri h = 1.0, 1.5 ve 2.0 m, ortalama akım hızları ise kavitasyon için riskli hız değerleri olan V=15, 20, 25 ve 30 m/s olarak alınmıştır. Bu değerlere göre her bir akım durumu için ayrı ayrı çözümler gerçekleştirerek hava giriş ve su debileri tespit edilmiş ve bu değerlere bağlı olarak hava giriş katsayıları ($\beta=Q_a/Q_w$) ve ortalama hava konsantrasyonları ($C_o=\beta/(1+\beta)$) elde edilmiştir. Buradaki Q_a hava giriş debisi, $\underline{Q_w}$ su debisi, V_a ortalama hava giriş hızı, G_a kütlesel hava giriş debisidir. Hava giriş debisi kütlesel debinin havanın yoğunluğuna bölünmesiyle elde edilmiştir ($Q_a=G_a/\rho_a$). Burada ρ_a=1.225 kg/m^3 alınmıştır.

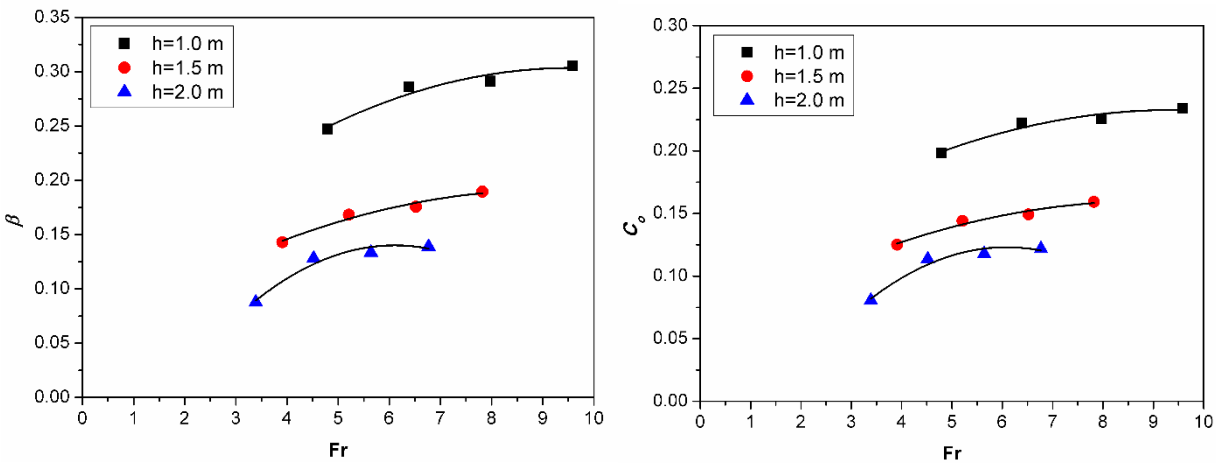
Sonuçlar incelendiğinde hava giriş oranının β=0.09 ~ 0.31 aralığında, ortalama hava konsantrasyonun ise C_o= %8 ~ %23 aralığında olduğu görülmektedir. Bu değerlerin 1982 tasarımına göre oldukça yüksekte olması, 2010 revize tasarımın performansının çok daha iyi olduğu anlamına gelir. Russel vd. (1974) malzeme testleri üzerine yaptığı çalışmada kavitasyon hasarını önlemek için % 5 hava girişi sağlamanın yeterli olacağını ifade etmiştir. Aydın (2015), detaylı literatür araştırması sonucu kavitasyon hasarından korunmak için akıma karıştırılması gereken ortalama hava konsantrasyonunun yaklaşık olarak % 6-8 arasında olması gerektiğini

belirtmiştir. Buna göre 2010 revize tasarım için elde edilen ortalama hava konsantrasyonu değeri kavitasyon hasarından korunmak için yeterli olacaktır.

Çizelge 4.6. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısı 2010 revize tasarımı HAD sonuçları

h **(m)**	***V*** **(m/s)**	**Fr**	V_a **(m/s)**	G_a **(kg/s)**	Q_a **(m^3/s)**	**2x**Q_a **(m^3/s)**	Q_w **(m^3/s)**	**2x**Q_w **(m3/s)**	β	C_0	C_0 **%**
1.00	15.00	4.79	9.41	217.78	177.78	355.56	720	1440	**0.25**	0.20	**19.80**
1.00	20.00	6.39	14.53	336.32	274.54	549.08	960	1920	**0.29**	0.22	**22.24**
1.00	25.00	7.98	18.52	428.00	349.39	698.78	1200	2400	**0.29**	0.23	**22.55**
1.00	30.00	9.58	23.30	539.00	440.00	880.00	1440	2880	**0.31**	0.23	**23.40**
1.50	15.00	3.91	8.18	189.15	154.41	308.82	1080	2160	**0.14**	0.13	**12.51**
1.50	20.00	5.21	12.82	296.95	242.41	484.82	1440	2880	**0.17**	0.14	**14.41**
1.50	25.00	6.52	16.71	386.96	315.89	631.78	1800	3600	**0.18**	0.15	**14.93**
1.50	30.00	7.82	21.65	501.23	409.17	818.34	2160	4320	**0.19**	0.16	**15.93**
2.00	15.00	3.39	6.68	154.50	126.12	252.24	1440	2880	**0.09**	0.08	**8.05**
2.00	20.00	4.52	13.00	300.85	245.59	491.18	1920	3840	**0.13**	0.11	**11.34**
2.00	25.00	5.64	16.95	392.42	320.34	640.68	2400	4800	**0.13**	0.12	**11.78**
2.00	30.00	6.77	21.13	489.38	399.50	799.00	2880	5760	**0.14**	0.12	**12.18**

Çizelgedeki havalandırma oranlarının değişimini daha iyi görebilmek için Şekil 4.21'deki grafikler çizilmiştir. Bu grafiklerde farklı su derinlikleri için hava giriş katsayıları ve ortalama hava konsantrasyonunun Froude sayısı ile değişimleri verilmiştir. Her iki grafikten de görüleceği gibi hava giriş oranları ve dolayısıyla ortalama hava konsantrasyonları Froude sayısıyla belirgin şekilde artmaktadır. Her bir su derinliği için değişimler lineer olmayan bir şekilde Fr=10 değerine yaklaştıkça gittikçe azalan bir eğilim göstermektedir. Bu duruma göre, belirli bir akım derinliğinde hava konsantrasyonunun Fr sayısıyla sürekli olarak artmayacağı kritik bir Fr sayısından sonra (bu değer yaklaşık olarak Fr_{kr} = 10 alınabilir) sabit kalacağı kabul edilebilir.



(a) (b)

Şekil 4.21. Ilısu Barajı 2010 revize tasarımı havalandırma performansının Froude sayısı ile değişimi (a) Hava giriş katsayısı, (b) Ortalama hava konsantrasyonu

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde HAD analizleri yardımıyla Ilısu Barajı dolusavak ve havalandırıcı yapısının 1982 ve 2010 yılı tasarımlarının performansları değerlendirilmiştir. 1982 yılı tasarımı için DSİ tarafından bir dizi hidrolik model deneyleri yapılmış fakat 2010 revize tasarım için herhangi bir model deneyi yapılmamıştır. Bu nedenle bu havalandırıcıların kavitasyon hasarını önlemek üzere havalandırma performansı hakkında yeterince bilgi mevcut değildir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, önce 1982 yılı tasarımının farklı meş yapısı ve akım koşullarında detaylı sayısal analizleri yapılmış ve bu eldeki mevcut deneysel bazı verilerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra 2010 yılı revize tasarımının yine aynı yöntemle sayısal modellemesi yapılarak farklı akım durumları için analizi yapılmıştır.

Elde edilen veriler ışığında varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Farklı meş boyutları ve sayılarıyla yapılan HAD analizlerinden sonuçların meş yapısının oldukça hassas olduğu görülmüştür. Meş etkisini azaltmak için bilgisayar kaynakları ve çözüm zamanı da dikkate alınarak uygun bir meş (nihai meş) yapısı belirlenmiştir.
2. Türbülanslı ve hava-su karışımı gibi çift fazlı akım modelleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği bakımından matematiksel olarak modellemesi zor olan problemlerdir. Modelin başarısı seçilen sayısal modele ve sayısal belirsizliklerin azlığına bağlıdır. Bu nedenle sayısal modellerden elde edilen sonuçların kesinliği olmamakla birlikte elde edilen sonuçların fiziksel nitelikte olması ve deneylerle olan kıyaslaması sonucu tasarımcılar için yeterince iyi olduğu söylenebilir.
3. 1982 yılında yapılan model deney değerlerine yakın su yüksekliklerinde ve su hızlarındaki sayısal analiz sonuçlarıyla model deney sonuçları karşılaştırmasında; HAD analizinde elde edilen taban basınçları ve kavitasyon indeks değerleri model deneylerinden elde edilen değerlere yakın sonuçlar vermiştir.
4. Ilısu Barajı dolusavak havalandırıcısının 1982 yılı tasarımının HAD analiz sonuçları incelendiğinde, dolusavak şut kanalı üzerinde yeterli ve üniform bir hava konsantrasyonu sağlamadığı, bu bakımdan tasarımın kavitasyon hasarını önlemekte yetersiz kalabileceği ve yapılan revizyonun yerinde olduğu sonucuna varılmıştır.
5. Akıma giren ortalama hava konsantrasyonları karşılaştırıldığında; 1982 havalandırıcı tasarımında yaklaşık olarak Froude sayısının 7.0'den küçük olduğu akım durumları için kavitasyondan korunmak için sağlanması gereken minimum hava konsantrasyonu olan %5'in altında hava girişi sağlayabilmektedir. Revize 2010 tasarımında ise ortalama hava konsantrasyonu % 8~23 aralığında elde edilmiştir. Literatürdeki kaynaklara göre

kavitasyondan korunmak için gerek hava konsantrasyonu % 6-8 olduğu dikkate alındığında 1982 tasarımının havalandırma performansı bakımından yetersiz kaldığı, revize 2010 tasarımının ise oldukça yeterli bir performans sergilediği görülmüştür.

6. Revize 2010 tasarımında sadece kenar duvarlarda havalandırıcı bacası bırakılmasına rağmen kanal genişliği boyunca kanal tabanında üniform bir basınç ve hava konsantrasyonu sağlamaktadır. Yani kenar bacalardan giren hava altta dolusavak genişliği boyunca yerleştirilen hava kanalları sayesinde tüm genişlik boyunca yeterli bir hava karışımı sağlamaktadır. Böylelikle düşük Froude sayılarında bile havalandırıcı yeterli hava sağlayabilir ve batık havalandırıcı durumunu önlenebilir.
7. Hava giriş oranı ve dolayısıyla ortalama hava konsantrasyonu literatürdeki çalışmalara benzer olarak Froude sayısıyla önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Yaklaşık kritik bir değer olarak Fr=10 değerinden sonra artışın olmayacağı kabulü yapılabilir.
8. Bu tezde kullanılan HAD analizlerinin bazen deneysel çalışmalarla birlikte ve bazen de deneysel model çalışmalarının olmadığı durumlarda ekonomik olarak sistemin test edilmesine olanak sağladığı da gösterilmiştir. İyi tasarlanmış, sayısal hatalardan yeterince arındırılmış ve doğrulanmış bir sayısal model yeri geldiğinde fiziksel model deneylerinden daha faydalı ve ekonomik sonuçlar verebilir. Özellikle hava-su karışımı gibi problemlerin küçük ölçekli hidrolik model ölçümleri önemli ölçek etkileri içerebileceğinden, Sayısal modeller sayesinde bire bir prototip boyutlarında çalışılarak ölçek etkileri elimine edilmiş olur. Ancak yine de eğer imkan var ise en azından birkaç deneysel veya prototip ölçüm değerleriyle sayısal analiz sonuçlarının kalibre edilmesi önerilir.
9. Ayrıca dolusavağın korunmasına ilişkin imalat sırasında alınan bir önlem olarak; Ilısu Barajı ve HES Projesinde eşik yapısı yüzeyinde, şut kanalı boyunca - orta ve yan duvarlarda - sıçratma eşiği betonlarında 1 metre küpte % 5 silika (silis dumanı) kullanılmıştır. Silika dumanının kavitasyon sebebi ile bahsedilen yerlerde kullanılması gereksiz ve ekonomik olmayan bir durumdur. Bu çalışmada dolusavak havalandırıcılarının 2010 revize kesitinin ortalama hava konsantrasyonu % 8~23 aralığında elde edilmiştir. Bu dolusavak havalandrıcılarının performansının çok iyi olduğunu göstermiştir. Bu sebeple bahsedilen yerlerde silis katkılı betonların yüzeyden 20 cm boyunca dökülmesi daha ekonomik bir çözüm olurdu. Yapılan hesaplamada mevcut silis katkılı betonun sadece 1/5'i (beşte bir oranında) kullanılmış olsaydı yaklaşık 755 000 Euro tasarruf sağlanmış olacaktı. Tasarım aşamasında barajın tüm birimlerinin güvenliği şüphesiz herkes tarafından kabul edilen çok önemli bir konudur ancak bu şekilde yapılan aşırı korumacı, güvenlikçi yaklaşım ciddi maliyet artışına sebep olmuştur.

KAYNAKLAR

Abbasoğlu C, Okay G, 1992. The remedial structures on the spillway of Keban dam, Water Power and Dam Construction, 44: 22-28.

Aköz MS, Şimşek O, Göksu Soydan N, Gümüş V, Kırkgöz MS, 2015. RSM Türbülans Modeli ile Enerji Kırıcı Yapı Üzerindeki Akımın Sayısal Modellenmesi. 4.Su Yapıları Sempozyumu. 19-21 Kasım 2015, İnşaat Mühendisleri Odası, s:104-113.

Anonim, 2018. Fluent Teknik Özellikleri. Anova Mühendislik. http://www.anova.com.tr/main/68/ansys_fluent.aspx (Erişim tarihi: 11.01.2018)

ANSYS-Fluent. 2012. Fluent Theory Guide, Ansys Help System, Ansys Inc.

Aydın MC, 2016. Baraj Dolusavaklarında Havalandırma. Türkiye Alim Kitapları, Elazığ.

Aydın MC, 2017. Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways. ISH Journal of Hydraulic Engineering. 24 (1)

Aydın MC, 2005. Alttan Alışlı Dolusavak Havalandırıcıların CFD Analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Aydin S, Işık E, 2015. Using CFD in Hydraulic Structures. International Journal of Scientific and Technological Research, 1 (5): 7-13.

Büyüktaş K, Tezcan A, Sajıd İ, 2017. Enerji kırıcı yapıların HAD yöntemi ile belirlenmesi. Batı Akdeniz Tarımsal Enstitüsü Derim Dergisi. 34 (2): 172-181

Chanson H, 1989. Flow downstream of aerator –aerator spacing, Journal of Hydraulic Research. 27 (4): 519-536.

Çelen E, Ceylan FZ, Yavrucu İ, 2013. Beton Baraj İmalatları Yapım Yöntem Bildirimi. Mardin, s:3-4.

Çengel YA, Cimbala JM, 2015. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları. 984-985, Palme Yayıncılık.

Demiröz E, 1982, Ilısu Barajı dolusavak boşaltım kanalı havalandırması model çalışma raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Yayın no: Hİ-719, Model No: M-194, Ankara, s: 39.

Demiröz E, 1982.Sır Barajı dolusavak şut kanalı havalandırması model çalışmaları raporu, DSİ Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı, Yayın No: Hİ-721, Model No: M-199, Ankara, s:31.

Demiröz E, 1986. Dolusavak boşaltım kanalı havalandırması için yapıya ilave edilecek havalandırıcılara ait proje kriterlerinin belirlenmesi, DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No: Hİ-754, Model No: M-212. Ankara, s:220.

DSİ, 2010. Ilısu Barajı ve HES İnşaatı Rehber Projeleri, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.

Dündar O, 2009. Dolusavak Akımlarının Modellemesinde Sayısal Hesaplama Yönteminin Güvenli Kullanımı, Ankara, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 457: 52-59.

EİE, 1982. Ilısu Barajı ve Santralı Kati Projesi Cilt 1, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Proje Albümü, Ankara, s: 188.

Emiroğlu ME, 2010. Barajlar Ders Notları. Fırat Üniversitesi. Elazığ.

Falvey H, Ervine DA, 1988. Aeration in jets and high velecity flows. Proceedings of the International Symposiyum on Model-Prootype Correlation of Hydraulic Structures, August 9-11 , American Society of Civil Engineers/International Association for Hydraulic Research, Colorado Springs, s: 25-55.

Falvey HT, 1990. Cavitation in chutes and spillways. A wate resources technical publication Engineering Monograph No 42 : 63, Colorado.

Gunn RM, Pimentel M, Barreto G, 2011. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Ilısu Barajı ve HES Projesi; Dolusavak Stabilite Analizleri, Stucky Report, Mardin, s:50-53

Gümüş V, 2014. Dolusavak akımının sayısal modellenmesi, Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Güney HE, 2010. Adyabatik Mikrokanallarda Akışın Fluent ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Hirt CW, Nichols BD, 1981. A Computational Method for Free-Surface Hydrodynamics. Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the Asme. 103 (2): 136-141.

Hirt CW, Nichols BD, 1981. A Computanional method for free-surface Hydrodynamics. Journal of Pressure Vessel Technology-Transsactions of the Asme. 103 (2): 136-141.

Jahani M, 2011. Su yapılarındaki kavitasyon olayının yapı stabilitesi, ekonomik ömür ve işletme verimliliği üzerindeki etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Karamanoğlu Y, Mobedi M, Ertöz AÖ, 2006. Pompa tasarımının geliştirilmesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin kullanılması. Tesisat Mühendisliği Dergisi. 91: 46-55.

Kells JA, Smith CD, 1991. Reduction of cavitasyon on spillways by induced air entrainment, Canadian Journal of Civil Engineering, 18 (3): 358-377

Kökpınar MA, Gögüş M, 2002. High-speed jet flows over spillways aerators, Canadian Journal of Civil Engineering, 29 (6): 885-898.

Kumcu ŞY, Uçar M, 2017. Dairesel kesitli düşülü bacalarda hava-su karışımının deneysel çalışma ve cfd modelleme ile analizi, Devlet Su İşleri Teknik Bülteni, 124: 34-43.

Kurt C, 2016. Dolusavak havalandırıcılarının civarında akım karakteristiklerinin sayısal yöntemlerle incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Nie NX, 2001. Cavitation prevention with roughened surface, Journal of Hydraulic Engineering. 127 (10): 878-880.

Okay G, 1990. Yüksek hızlı akımların etkisi altındaki dolusavak boşaltım kanallarında kavitasyon hasarını önlemek için kullanılan havalandırıcılara ait büyüklüklerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Öztürk M, Aydın MC, Aydin S, 2008. "Damage limitation- a new spillway aerator." International Water Power and Dam Construction, 60 (5): 36–40.

Özbek T, 1982. Dolusavak Boşaltım Kanalında Kavitasyon. Devlet Su İşleri Teknik Bülteni, (51): 67.

Öztürk M, Aydın C, 2008. Dolusavak Havalandırıcılarında Jet Uzunluğunun CFD Analiziyle Belirlenmesi. Fırat Üniversitesi. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 20 (1):157-164.

Pfister M, 2008. "Schussrinnenbelüfter: Lufttransport ausgelöst durch interne Abflussstruktur [Chute aerators: Air transport due to internal flow structure]." Mitteilung, 203, H.-E. Minor, ed., Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH, Zurich, Germany.

Pfister M, Hager WH, 2010a. Chute Aerators. I:Air Transport Characteristics. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 136 (6):352-359.

Pfister M, Hager WH, 2010b. "Chute aerators II: hydraulic design." Journal of Hydraulic Engineering, 136 (6): 360–367.

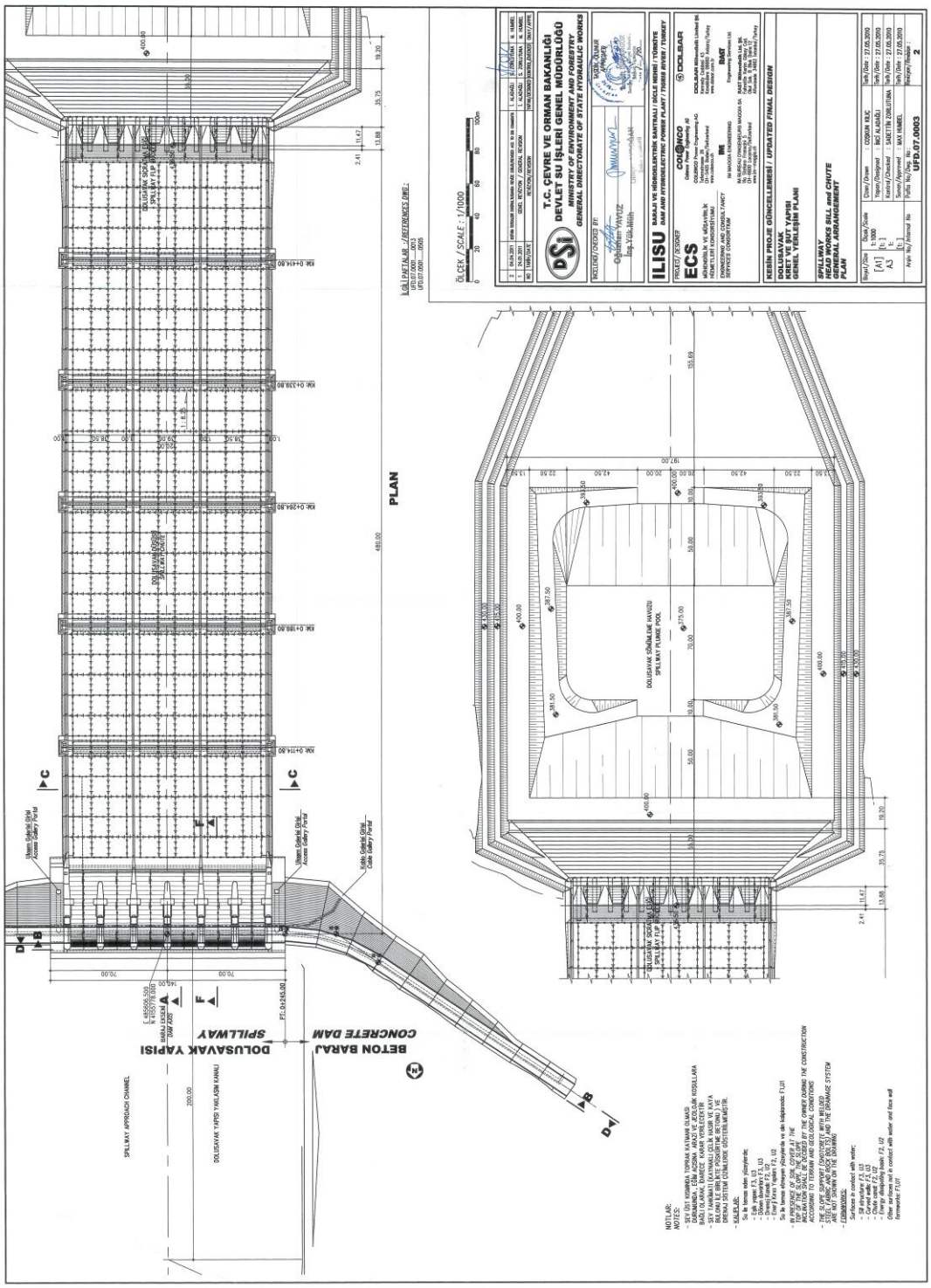
Pinto NL de S, Neidert SH, Ota JJ. 1982. Aeration at high velocity flows. Part 1. Water Power and Dam Construction, 34 (2): 34-38.

Pinto NL de S, Neidert SH, Ota JJ. 1982. Aeration at high velocity flows. Part 2. Water Power and Dam Construction, 34 (3): 42–44.

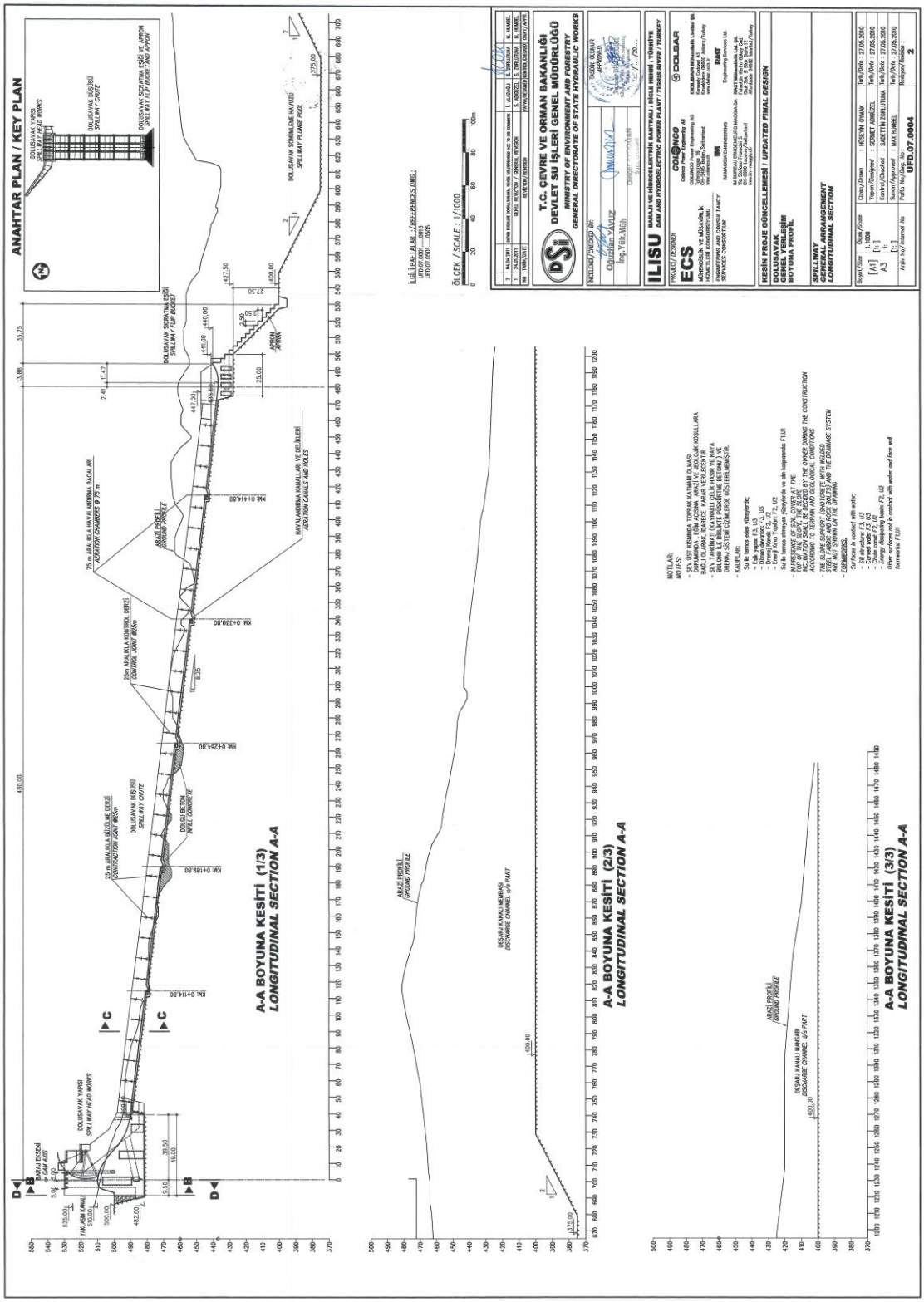
Russell SO, Sheenan GJ, 1974. Effect of entrained air on cavitation damage, Canadian Journal of Civil Engineering, 1 (1):97-107.

Tiğrek Ş, Şahin AN, Yıldırım T, 2015. 4.Su Yapılarında Fluent Uygulamaları. 4.Su Yapıları Sempozyumu, 19-21 Kasım 2015, Antalya İnşaat Mühendisleri Odası Şubesi-Antalya, s:351-360.

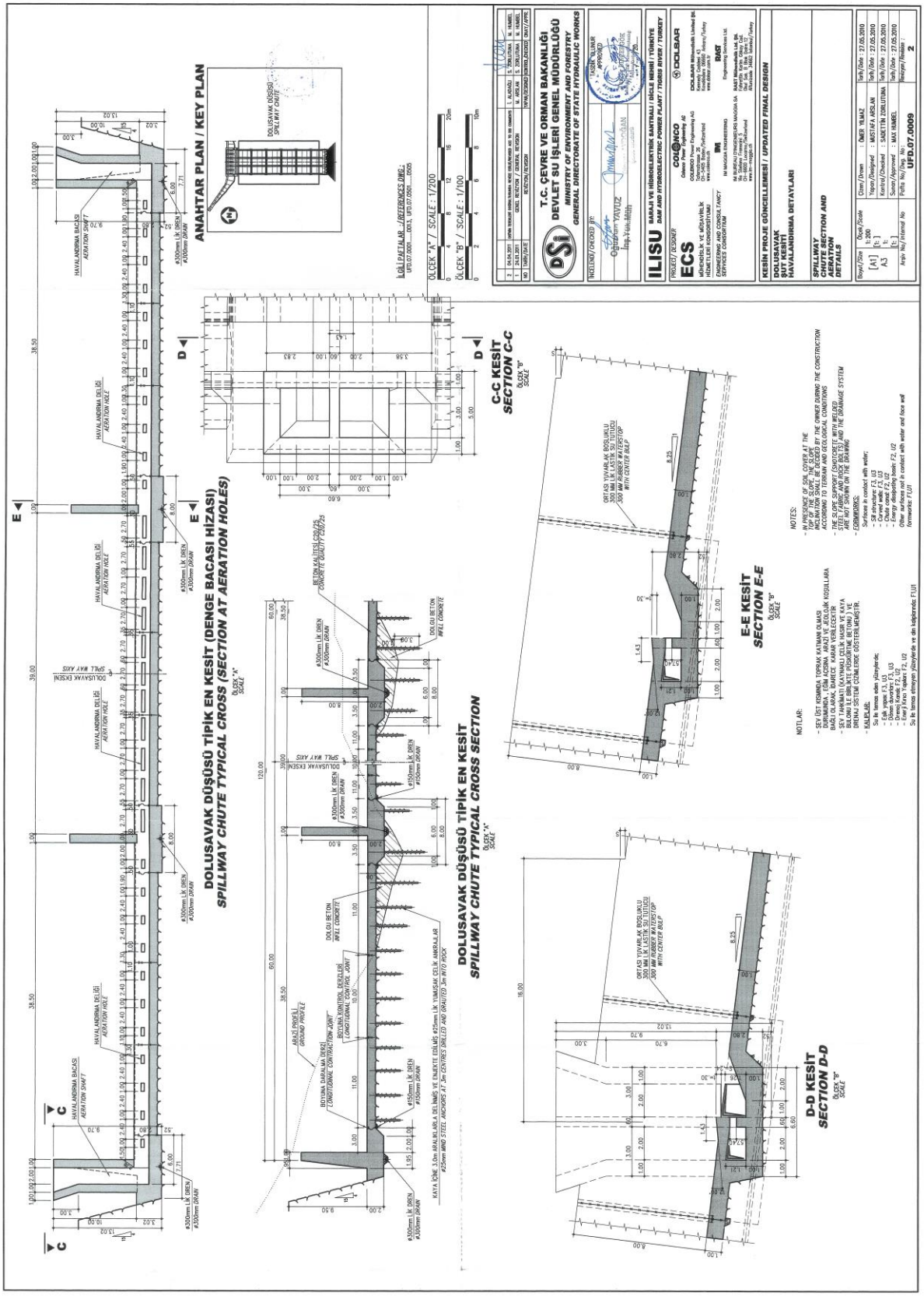
EKLER



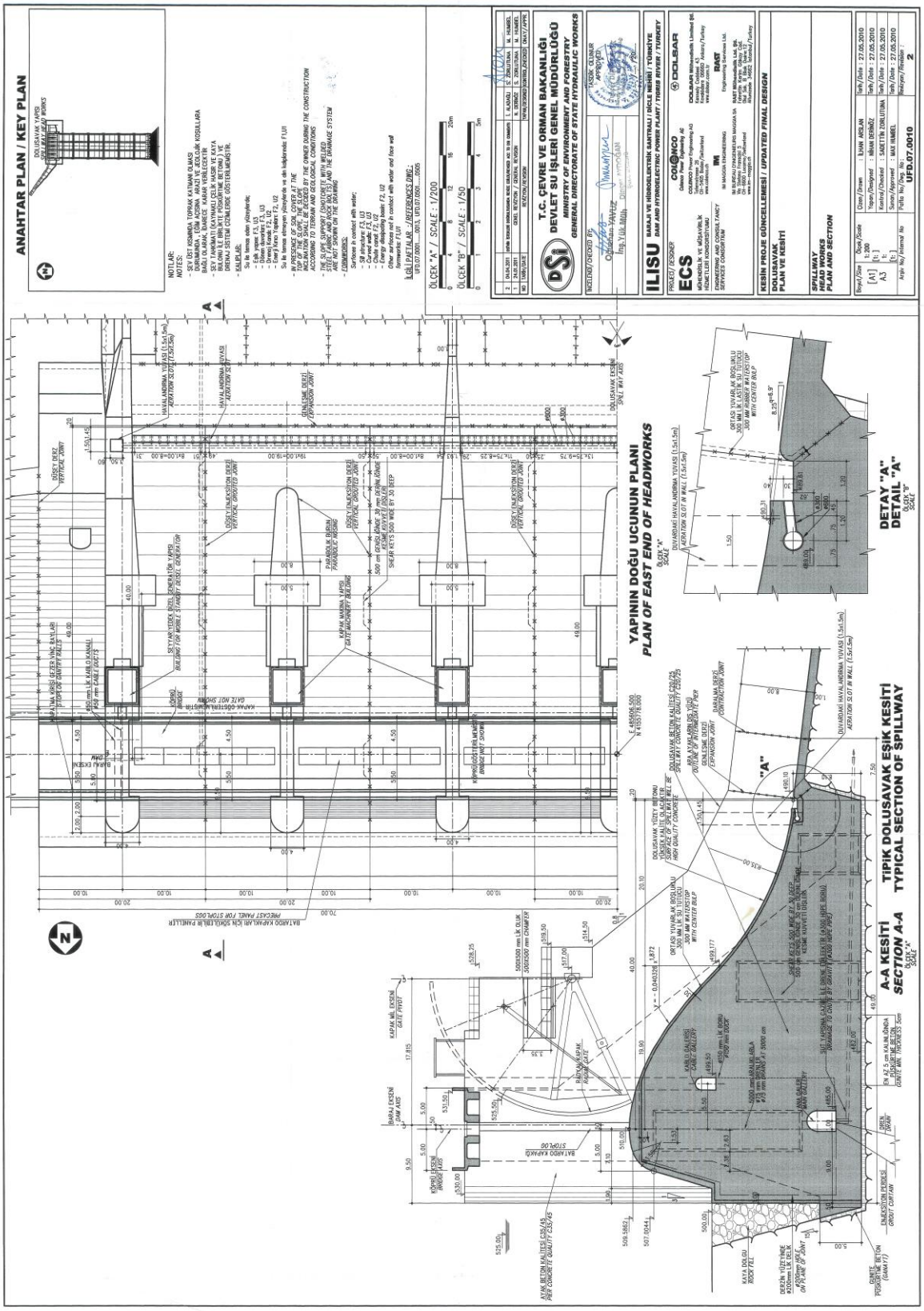
EK-1. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak kret ve şut yapısı genel yerleşim planı



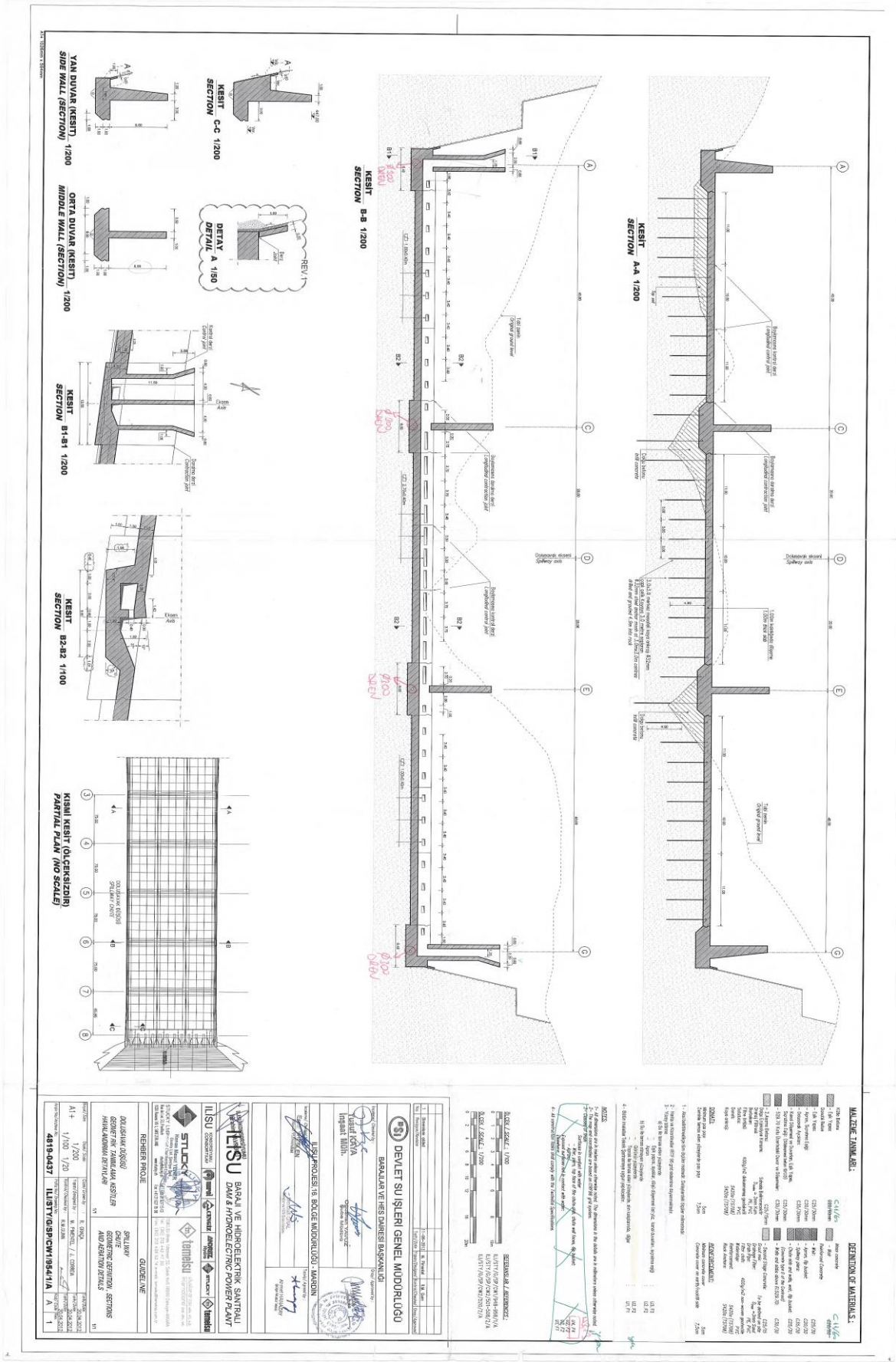
EK-2. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak genel yerleşim boyuna profil

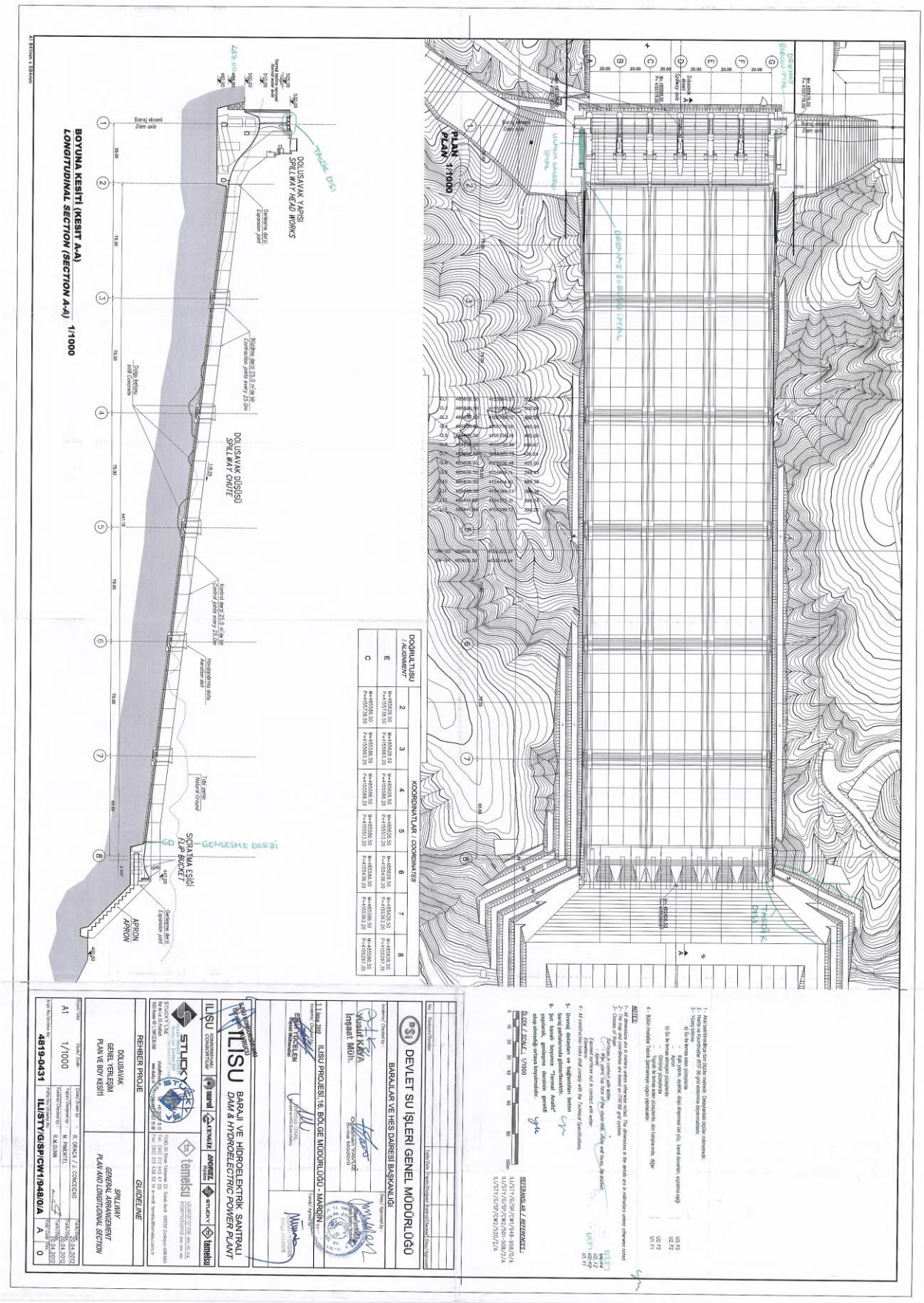


EK-3. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak şut kesiti havalandırma detayları

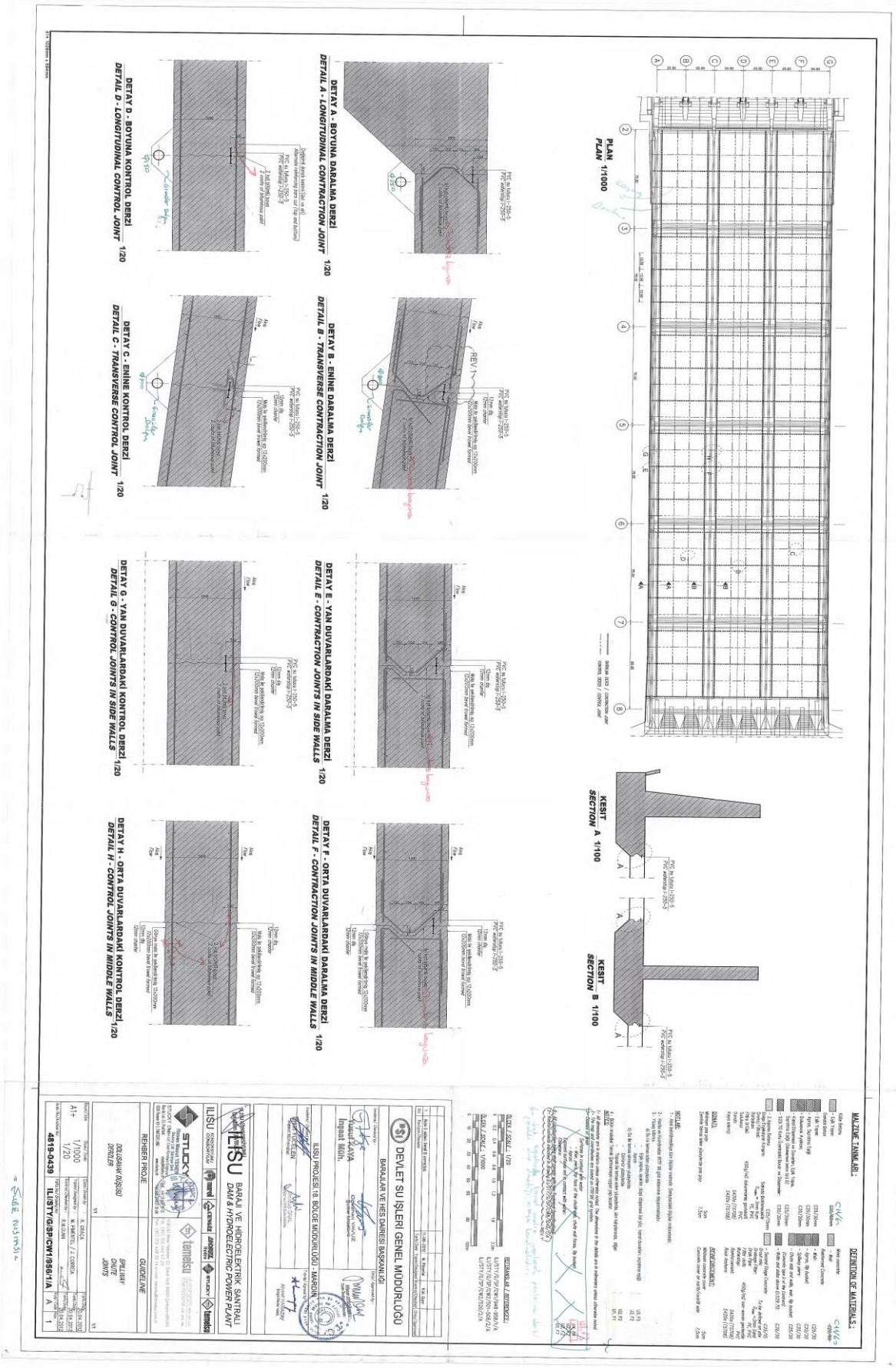


EK-4.Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak plan ve kesiti

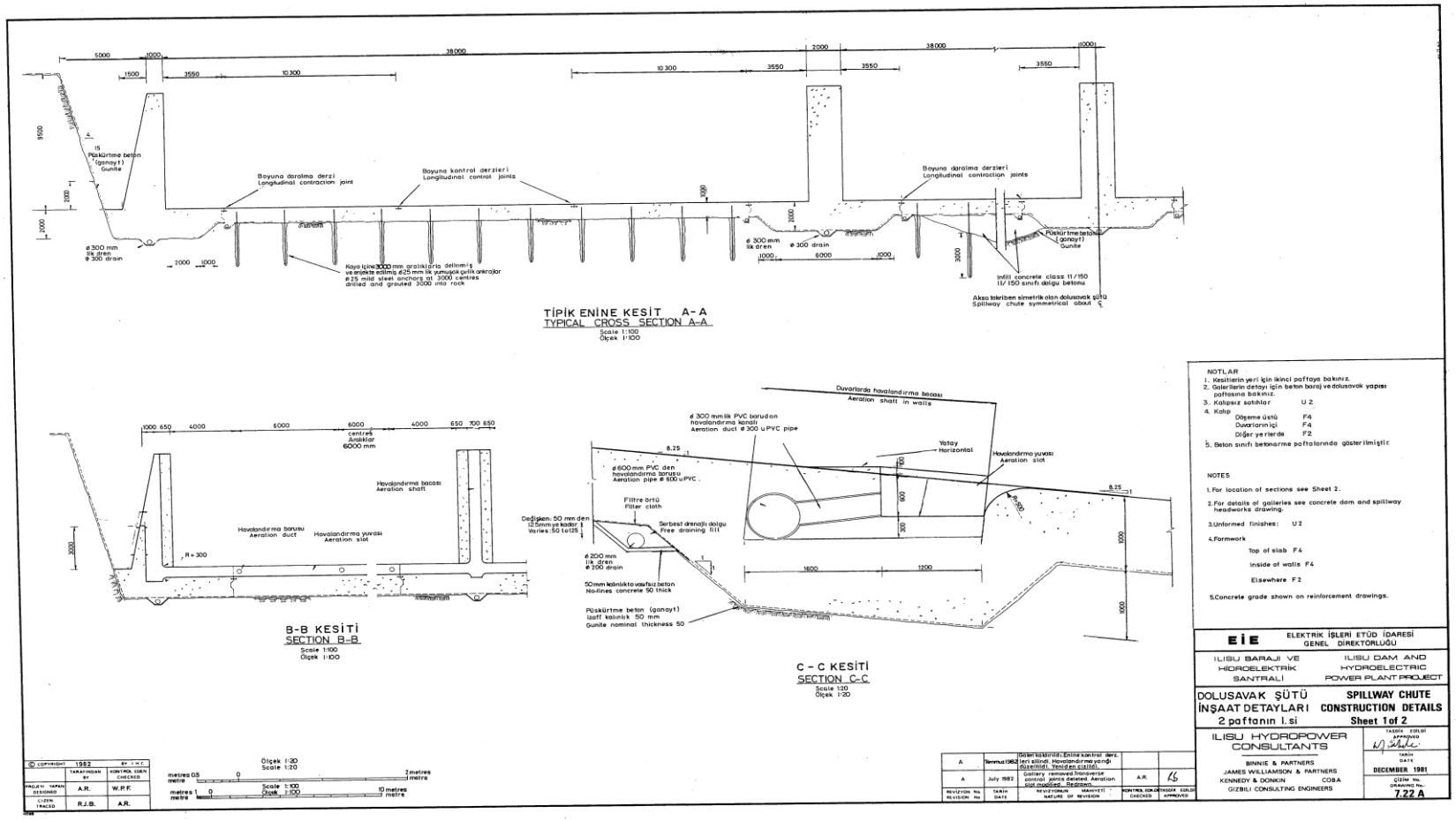

KESIT A-A 1/200
SECTION A-A 1/200
KESIT B-B 1/200
SECTION B-B 1/200
KESIT C-C 1/200
SECTION C-C 1/200
DETAY A 1/50
DETAIL A 1/50
YAN DUVAR (KESIT) 1/200
SIDE WALL (SECTION) 1/200
ORTA DUVAR (KESIT)
MIDDLE WALL (SECTION) 1/200
KESIT B1-B1 1/200
SECTION B1-B1 1/200
KESIT B2-B2 1/100
SECTION B2-B2 1/100
KISMI KESIT (ÖLÇEKSİZDİR)
PARTIAL PLAN (NO SCALE)
DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
BARAJLAR VE HES DAIRESI BAŞKANLIĞI
İnşaat Rıhtımı
İNŞAAT RÖVÜA
İNŞAAT RÖVÜA
İNŞAAT RÖVÜA



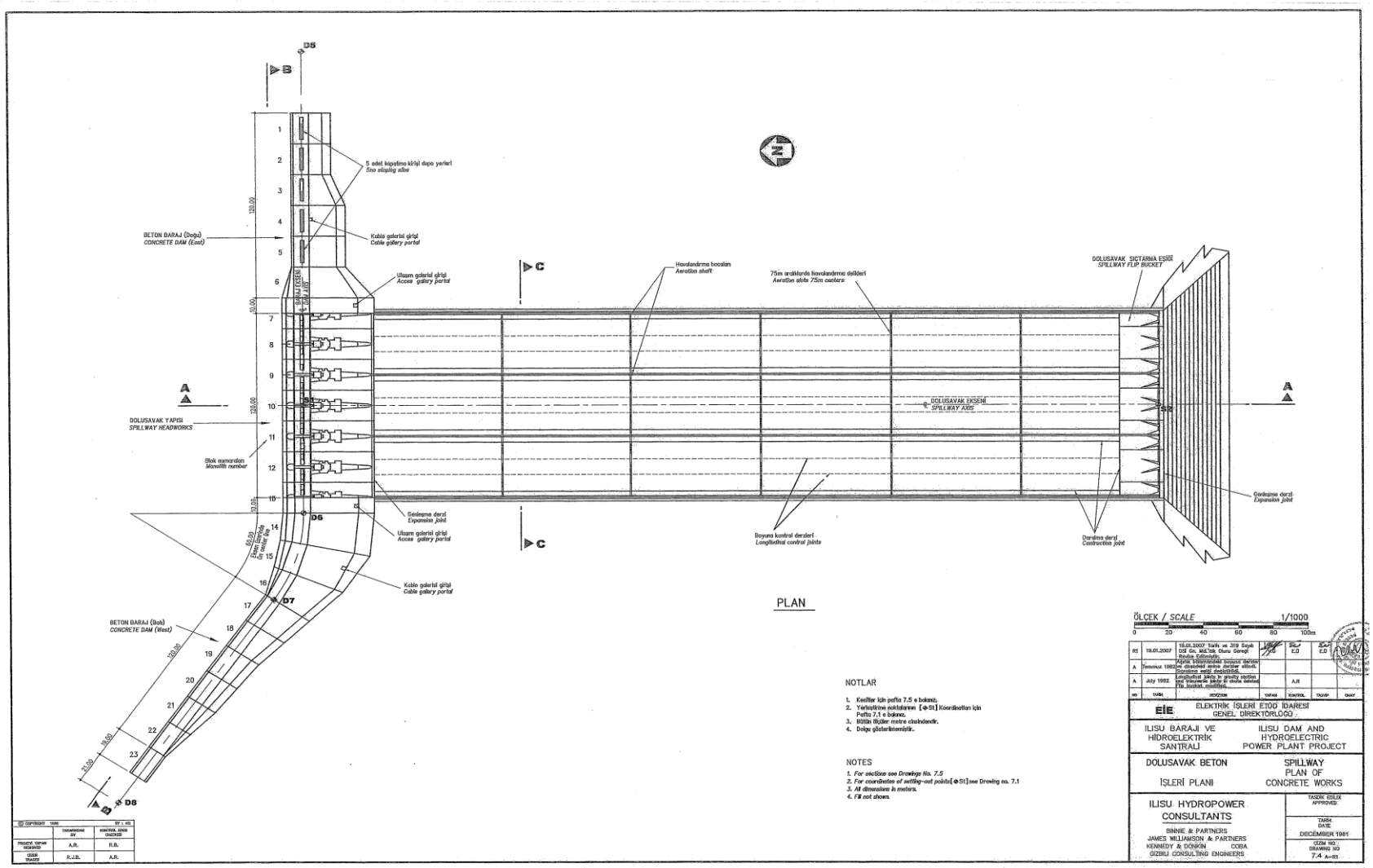
EK-6. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak genel yerleşim plan ve boy kesiti



EK-7. Ilısu Barajı (2010 kesiti) dolusavak derzler



EK-8. Ilısu Barajı (1982 kesiti) dolusavak derzler



EK-9. Ilısu Barajı (1982 kesiti) dolusavak derzler

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Mardin/Nusaybin'de doğdu. İlköğretimi Yıldırım İlköğretim Okulu'nda, liseyi Mardin Anadolu Lisesinde bir yıl okuduktan sonra Nusaybin Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nde tamamladı. 2010 yılında Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Aralık 2010- Şubat 2011 yılları arasında şantiye şefliği yaptı. Nisan 2011'de Devlet Su İşleri 16.Bölge Müdürlüğü Barajlar ve HES Şubesinde göreve başladı. Haziran 2011'de Ilısu Barajı ve HES Projesinde Baraj ana gövdesi ve dolusavak kontrol mühendis yardımcısı oldu. Şubat 2012 tarihinden itibaren Ilısu barajı ana gövdesi-menba ve mansap batardoları-dolusavak-beton baraj kontrol mühendisi olarak görev yapmaktadır.

Cesur KAPLAN