**ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# ARTVİN YUSUFELİ VE ÇANKIRI HANDIRI BARAJLARININ GÖVDELERİNİN KARŞILAŞTIRILMALI OLARAK İNCELENMESİ

**Süeda ERDOĞAN KARACA**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇANKIRI**
**2023**

**Her hakkı saklıdır**

**TEZ ONAYI**

Süeda ERDOĞAN KARACA tarafından hazırlanan **"Artvin Yusufeli ve Çankırı Handırı Barajlarının Gövdelerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi"** adlı tez çalışması 02/02/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** **:** Prof. Dr. Ender SARIFAKIOĞLU

**Jüri Üyeleri** **:**

**Başkan** **:** Prof. Dr. Ender SARIFAKIOĞLU
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

**Üye** **:** Doç. Dr. Murat AY
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yozgat Bozok Üniversitesi

**Üye** **:** Dr. Öğr. Üyesi Salih YILMAZ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ**

**Enstitü Müdürü**

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum "**Artvin Yusufeli ve Çankırı Handırı Barajlarının Gövdelerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi**" konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan "Bilimsel İntihal Tespit Programıyla tarandığını, "intihal içermediğini" beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (02/02/2023).

**Süeda ERDOĞAN KARACA**

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ARTVİN YUSUFELİ VE ÇANKIRI HANDIRI BARAJLARININ GÖVDELERİNİN KARŞILAŞTIRILMALI OLARAK İNCELENMESİ

Süeda ERDOĞAN KARACA

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ender SARIFAKIOĞLU

Günümüzde, dünya çapında ve ülkemizde artan nüfus ve şehirleşmenin getirmiş olduğu en büyük ihtiyaçlardan biri su gereksinimidir. Tarımda, sanayide, günlük yaşamda su kullanımı için inşa edilen yapılar zamanla gelişme göstermektedir. Mevcut su rezervlerini, akarsuları yüksek kapasitede en verimli şekilde kullanabilmek için yeni inşaat projeleri yapılmaktadır. Barajlar ve hidroelektrik santraller ile günümüzde hem su biriktirebilmekte hem de enerji üretimi yapılabilmektedir. Sulama barajları tarım arazilerine verimli ve teknik açıdan düzenli sulama sağlar. Hidroelektrik santralleri enerji üretimi yaparak yerleşim alanlarına akarsu gücü ile destek sağlamaktadır. Barajlar bu özellikleri haricinde günlük yaşama katkı sağlarken milli gelire de destek olur. Barajlar ülkemizde Devlet Su İşleri tarafından yüklenici firmalar ile yapılmaktadır. Yusufeli Barajı ve HES projesi, Artvin ilinde DSİ 26. Bölge Müdürlüğü kontrolünde inşa edilen ülkemizin en yüksek barajı ve dünyanın 5. en yüksek barajıdır. Handırı Barajı, Çankırı ili DSİ 52. Şube Müdürlüğü kontrolünde sulama barajı olarak Silindirle Sıkıştırılan Beton teknolojisiyle inşa edilmiş bir barajdır. Bu yüksek lisans tezinde iki barajın baraj gövdesi, gövde betonu, beton bileşenleri ve özellikleri, baraj tasarımı yüklenici firmaların saha çalışmalarına dâhil olunarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda barajların kendi kategorisinde son teknoloji ve yüksek mühendislik dizaynı ile inşa edildiği sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda farklı amaçlar için tasarlanan, tip ve projelendirme açısından birbirinden ayrılan barajların parametrelerinin farklılığı incelenmiştir. Farklılıklarının yanı sıra bazı parametrelerde benzerlik gösterdiği de tespit edilmiştir. Günümüzde Artvin Yusufeli Barajı ve Çankırı Handırı Barajı başarı ile amaçlarına hizmet etmektedir.

**2023, 89 sayfa**

**ANAHTAR KELİMELER:** Baraj gövdesi, Baraj betonu, Agrega, Beton özellikleri, Beton deneyleri

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

COMPARATIVE INVESTIGATION OF THE BODİES OF THE ARTVIN YUSUFELI AND ÇANKIRI HANDIRI DAMS

Süeda ERDOĞAN KARACA

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Ender SARIFAKIOĞLU

Today, one of the biggest needs brought by the increasing population and urbanization around the world and in our country is the need for water. The structures built for the use of water in agriculture, industry and daily life show improvement over time. New construction projects are being carried out in order to use the existing water reserves and streams at high capacity in the most efficient way. Today, both water can be collected and energy can be produced with dams and hydroelectric power plants. Irrigation dams provide efficient and technically regular irrigation to agricultural lands. Hydroelectric power plants produce energy and provide support to residential areas with river power. Apart from these features, dams contribute to daily life and also support national income. Dams are built by the State Hydraulic Works with contractor companies in our country. Yusufeli Dam and HEPP project is the highest dam of our country and the 5th highest dam in the world, built under the control of the 26th Regional Directorate of State Hydraulic Works in Artvin. Handırı Dam is a dam built with Roller Compacted Concrete technology as an irrigation dam under the control of Çankırı province DSI 52nd Branch Directorate. In this master thesis, the dam body, body concrete, concrete components and properties of two dams were examined by including the dam design contractors in the field studies. As a result of the examination, it was concluded that the dams were built with the latest technology and high engineering design in their category. At the same time, the differences in the parameters of the dams designed for different purposes and differing from each other in terms of type and design were examined. In addition to the differences, it has been determined that there are similarities in some parameters. Today, Artvin Yusufeli Dam and Çankırı Handırı Dam successfully serve their purposes.



**2023, 89 pages**

**Keywords:** Dam body, Dam concrete, Aggregate, Dam characteristics, Concrete tests

# ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Türkiye'nin en büyük projesi olan Yusufeli Barajı (Artvin) ve yeni teknoloji ile yapılan en yeni projelerinden biri Handırı Barajı (Çankırı) bu tez çalışmasında incelenmiştir. İki barajın baraj gövdesi ayrıntılı olarak ele alınmış benzerlik farklılıkları ile parametre ve raporları çalışmalara dâhil edilmiştir. Her iki barajın yapımında sahada bizzat bulunularak gözlem ve incelemeler tamamlanmıştır. Yusufeli Barajı Limak Holding bünyesinde, Handırı Barajı, Çolakoğlu İnşaat-Özaras Grup ortaklığında yapılmıştır. Barajların kontrolörlüklerini Artvin DSİ 26. Bölge Müdürlüğü ve Çankırı DSİ 52. Şube Müdürlüğü yapmıştır. Barajlar günümüzde amaçlarına hizmet etmektedir.

Yüksek Lisans tez çalışmamda, tüm aşamalarda beni yönlendiren, katkılarını esirgemeyen, yol gösteren, destek olan saygı değer tez danışman hocam Prof. Dr. Ender SARIFAKIOĞLU'na rehberliği ve anlayışı için teşekkür ederim.

Tez çalışmamda ve Yusufeli baraj şantiyesinde desteklerinden ötürü şefim, Yusufeli Barajı Limak Kalite Kontrol Şefi Jeoloji Mühendisi Harun Hamit KENDİRCİ'ye ve Yusufeli Barajı Tüneller Şefi Jeofizik Mühendisi Coşkun DEMİRCİ'ye sürecin her aşamasında desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Tez çalışmamdan öncesi ve son sürecine kadar tüm konularda bana yardımcı olan, bilgi paylaşımını esirgemeyen Çankırı DSİ 52. Şube Müdürlüğü Jeoloji Mühendisi Cemil ATAK'a teşekkür ederim.

Handırı Barajı ilk kazısından işletmeye açılmasına kadar olan tüm süreçte şantiye ve laboratuvar çalışmalarına beni bizzat dâhil eden, destek olan şefim, Handırı Barajı Şantiye Şefi İnşaat Mühendisi Erhan CÖMERT'e teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarımda destekleyen ve anlayış gösteren değerli aileme, bana yol gösteren Çankırı Tarım İl Müdürlüğü Şube Müdürü babam Yüksel ERDOĞAN'a sabır ve katkıları için teşekkür ederim.

**Süeda ERDOĞAN KARACA**

**Çankırı, Şubat 2023**

# İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... **i**
**ABSTRACT** ..... **ii**
**ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR** ..... **iii**
**İÇİNDEKİLER** ..... **iv**
**SİMGELER DİZİNİ** ..... **vi**
**KISALTMALAR DİZİNİ** ..... **vii**
**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... **viii**
**ÇİZELGELER DİZİNİ** ..... **x**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
**1.1 Çalışmanın Amacı** ..... **2**
**1.2 Çalışmanın Alanı** ..... **3**
**2. LİTERATÜR ÖZETİ** ..... **7**
**3. BARAJLAR** ..... **10**
**3.1 Baraj Tanımı** ..... **10**
**3.1.1 Barajların yapım amaçları** ..... **11**
**3.1.2 Barajların yararları** ..... **11**
**3.1.3 Barajların zararları** ..... **12**
**3.2 Baraj Bölümleri** ..... **12**
**3.3 Baraj Sınıflandırması** ..... **16**
**3.3.1 Büyüklüğüne göre sınıflandırma** ..... **16**
**3.3.2 Yapılış amacına göre sınıflandırma** ..... **16**
**3.3.3 Fonksiyonlarına göre baraj sınıflandırması** ..... **16**
**3.3.4 Gövde malzemesi ve projelendirilmesine göre sınıflandırma** ..... **17**
**4. MATERYAL VE METOT** ..... **21**
**4.1 Yusufeli Barajı** ..... **21**
**4.1.1 Beton dizaynı** ..... **26**
**4.1.2 Betonda kür** ..... **29**
**4.1.3 Çimento özgül ağırlık tayini (Le Chatelier deneyi)** ..... **30**
**4.1.4 Çimento kıvam yoğunluk tayini vicat deneyi** ..... **33**

**4.1.5 Metilen mavisi deneyi ..... 35**
**4.1.6 Elek analizi ..... 37**
**4.1.7 Slump deneyi ..... 39**
**4.1.8 Los Angeles deneyi ..... 40**
**4.2 Handırı Barajı ..... 41**
**4.2.1 Beton dizaynı ..... 44**
**4.2.2 Betonda kür ..... 47**
**4.2.3 Çimento özgül ağırlık saptama ..... 48**
**4.2.4 Agrega birim hacim ağırlık ..... 49**
**4.2.5 Elek analizi ..... 51**
**4.2.6 Slump deneyi ..... 53**
**4.2.6 Ve-Be deneyi ..... 54**
**5. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 57**
**5.1 Çoruh Nehri üzerinde Yusufeli Barajı ..... 57**
**5.1.1 Beton ..... 58**
**5.1.2 Agrega ..... 62**
**5.1.3 Çimento ..... 63**
**5.1.4 Baraj gövdesi yapımı ..... 64**
**5.2 Handırı Barajı ..... 70**
**5.2.1 Beton ..... 70**
**5.2.2 Agrega ..... 73**
**5.2.3 Baraj gövdesi yapımı ..... 74**
**6. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 79**
**KAYNAKLAR ..... 83**
**EKLER ..... 86**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 89**

## SİMGELER DİZİNİ

| | |
|---|---|
| $E_C$ | 28 günlük elastisite modülü |
| $F_{CK}$ | Karakteristik basınç dayanımı |
| $F_{CTK}$ | Karakteristik eksenel çekme dayanımı |
| $M_{DKY}$ | Havadaki ağırlık |
| Mm | Tüketilen boya miktarı |
| $M_{SUDA}$ | Sudaki ağırlık |
| M1 | Agrega numunesinin kütlesi |
| SSB | Silindirle sıkıştırılan beton |
| T | Sıcaklık |
| $V_1$ | İlave edilen boya çözeltisinin toplam hacmi |
| YASS | Yer altı su seviyesi |
| $\delta_{DKY}$ | Havadaki ağırlık |
| µm | Mikrometre |

## KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| ASTM | Uluslararası Amerikan test ve materyalleri topluluğu |
| C | Çimento |
| Cm | Santimetre |
| Dk | Dakika |
| GAP | Güneydoğu Anadolu Projesi |
| g | Gram |
| HES | Hidroelektrik enerji santrali |
| Hm | Hektometre |
| Kg | Kilogram |
| $Kg_f$ | Kilogram kuvvet |
| Km | Kilometre |
| KPa | Kilopaskal |
| KWs | Kilowatt saat |
| L | Litre |
| Ml | Mililitre |
| Mm | Milimetre |
| MW | Megawatt |
| N | Newton |
| RCCD | Silindirle sıkıştırılmış beton baraj |
| S | Saniye |
| SSB | Silindirle sıkıştırılmış beton |
| TWh | Terawatt saat |
| W | Su |
| YASS | Yer altı su seviyesi |

# ŞEKİLLER DİZİNİ


**Şekil 1.1** Artvin ili ve Yusufeli Barajı topografik haritadaki konumu (ArcGIS, 2023) 4
**Şekil 1.2** Yusufeli Barajı konumu (https://earth.google.com, 2022) ..... 5
**Şekil 1.3** Çankırı ili ve Handırı Barajı topografik haritadaki konumu (ArcGIS, 2023) 5
**Şekil 1.4** Handırı Barajı konumu (https://earth.google.com, 2022) ..... 6
**Şekil 4.1** Yusufeli Barajı proje kesiti ..... 21
**Şekil 4.2** Yusufeli Barajı ve HES yapıları ..... 24
**Şekil 4.3** Yusufeli baraj gövdesi mansap görünümü ..... 25
**Şekil 4.4** Yusufeli baraj gövdesi membadan görünüm ..... 25
**Şekil 4.5** Anolar ile bölünmüş gövde betonu imalatı (2019) ..... 26
**Şekil 4.6** Agrega konkasör tesisinde 63-120 mm agrega depo alanı (2019) ..... 27
**Şekil 4.7** Numunelerin basınç dayanım mekanizmasında tayini (2019) ..... 28
**Şekil 4.8** Silindir numune kür havuzu ve kürlenen numuneler (2019) ..... 30
**Şekil 4.9** Le Chatelier deneyi ekipmanları ve deney aşamaları (2019) ..... 33
**Şekil 4.10** Çimento karıştırma makinesi (cement mixer) ve vicat iğnesi (2019) ..... 34
**Şekil 4.11** Vicat deneyi yapım aşamaları (2019) ..... 35
**Şekil 4.12** Metilen mavisi deneyi uygulanmış deney filtreleri (2019) ..... 37
**Şekil 4.13** Agrega ve elek analizinde kullanılan ekipman (2019) ..... 38
**Şekil 4.14** Slump deneyi aşamaları (2019) ..... 40
**Şekil 4.15** Los Angeles deneyi tamburu ve agrega numuneleri (2019) ..... 41
**Şekil 4.16** Handırı Barajı proje kesiti ..... 41
**Şekil 4.17** Handırı Barajı (DSİ, 2021) ..... 42
**Şekil 4.18** Handırı Barajı gövde yapımı (2019) ..... 45
**Şekil 4.19** Dolusavak enerji kırıcı (2021) ..... 46
**Şekil 4.20** Kür havuzunda silindir beton numuneleri (2019) ..... 48
**Şekil 4.21** Laboratuvarda hassas cihaz ile agrega tartımı (2019) ..... 50
**Şekil 4.22** Sarsma tablası üzerinde numune içindeki betonu işleme (2018) ..... 51
**Şekil 4.23** Elek analizi deneyi (2019) ..... 52
**Şekil 4.24** Agrega granülometri eğrisi ..... 53
**Şekil 4.25** Slump deneyi sonucu numune (2018) ..... 54
**Şekil 4.26** Ve-Be deneyi (2018) ..... 55
**Şekil 4.27** Ve-Be deneyi ağırlık yükleme (2018) ..... 56
**Şekil 5.1** Yusufeli Barajı şema ..... 57
**Şekil 5.2** Yusufeli Barajı dolusavak (2021) ..... 58
**Şekil 5.3** Anolar ile beton imalatı yapılan baraj gövdesi (2019) ..... 59
**Şekil 5.4** Beton hava içeriği tayini (2019) ..... 61
**Şekil 5.5** Agrega konkasör ve konveyör hatları (2019) ..... 63
**Şekil 5.6** Hava hattı beton kovaları ile döküm (2019) ..... 65
**Şekil 5.7** Beton serimi (2019) ..... 66

**Şekil 5.8** Paletli ekskavatör ile vibratör işlemi (2019) ..... 66
**Şekil 5.9** Soğuk su boruları ve olgunluk cihazı kabloları (2019) ..... 67
**Şekil 5.10** Galeri içi su tahliye kanalı ve kablolar (2019) ..... 68
**Şekil 5.11** Gövde betonu üstten görünüm (2022) ..... 69
**Şekil 5.12** Handırı Barajı mansap tarafından dolu savaktan su tahliyesi (DSİ,2020) ... 70
**Şekil 5.13** Baraj etrafı 50 cm konvansiyonel beton (2018) ..... 71
**Şekil 5.14** Kırmızı ile çevrili alanda galeri imalatı (2018) ..... 72
**Şekil 5.15** Büyük dereden çıkarılan agrega yığını ve agrega dane boyutları (2020) .... 73
**Şekil 5.16** Baraj temelinin oturduğu ana kaya ve su tahliye sistemi ve batardo (2018) 74
**Şekil 5.17** Mansaptan baraj gövdesi (2021) ..... 75
**Şekil 5.18** Baraj üzerinde SSB beton serimi ve sıkıştırması (2018) ..... 76
**Şekil 5.19** Galeri ve kontrol odası mansap tarafından görünüşü (2019) ..... 77

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Çizelge 4.1** Baraj rezervuarına ait veriler ..... 22
**Çizelge 4.2** Baraj gövdesine ait kot bilgileri ..... 22
**Çizelge 4.3** Derivasyon tesislerine ait veriler ..... 22
**Çizelge 4.4** Dolusavak verileri ..... 23
**Çizelge 4.5** Dipsavak verileri ..... 23
**Çizelge 4.6** Elde edilen agrega verileri ..... 39
**Çizelge 4.7** Baraj hidrolik verileri ..... 42
**Çizelge 4.8** Gölet alanı özellikleri ..... 43
**Çizelge 4.9** Baraj gövdesinin teknik özellikleri ..... 43
**Çizelge 4.10** Dolusavak tünelinin teknik özellikleri ..... 43
**Çizelge 4.11** Derivasyon tünelinin teknik özellikleri ..... 44
**Çizelge 4.12** Dipsavak geçişinin teknik özellikleri ..... 44
**Çizelge 4.13** Bir metreküp beton için karışım dizaynı ($D_{maksimum}$ 25,4 mm) ..... 47
**Çizelge 4.14** Deney sonuçları ..... 51
**Çizelge 4.15** Elek analizi % sonuç verileri ..... 52
**Çizelge 4.16** Ve-Be deney sonuç parametreleri ..... 55
**Çizelge 5.1** TS500 beton sınıfı parametreleri ..... 60
**Çizelge 5.2** Baraj parametrelerinin karşılaştırılması ..... 77

# 1. GİRİŞ

Hızla büyüyen, değişen, gelişen dünyada her geçen gün insan sayısı artmaktadır. Nüfus artışı ile birlikte toplumların ihtiyaçları da aynı ölçüde artış göstermektedir. Yaşamın temel taşı olan unsurlardan biri hatta tek unsuru denebilecek ölçüde önemli olan ise sudur. Su yaşamın her alanında zorunlu ihtiyaçtır. Beslenme, barınma, üretme gibi faaliyetlerde olmazsa olmazdır. Su, barınmada önem kaydeder çünkü yapılaşmada yardımcı etkendir. Beton yapımı için su gereklidir. Temel üretim için önemlidir çünkü sanayi, ticari gibi sektörlerde su en önemli faktörlerden biridir. Su olmadan besin üretilmesi zorlaşabilir ve üretim olmazsa yaşamda pek çok aksaklıklar meydana gelebilir.

Ülkemizde pek çok su kaynak ve rezervlerimiz mevcuttur. Yeraltı ve yerüstü su kaynakları açısından önemli bir noktada yer almaktayız. Ancak, bu dağılım her bölgede ya da konumda eşit orantılı değildir. Suyun önemli ölçüde orantılanması gerekir, bu insan yaşamı için gereklidir. Belirli bölgelerde belirli ihtiyaçlar için su daha fazla öneme sahiptir. O bölgelerde verimi artırmak için su kullanımını dönüşümlü kılmak zorunludur. Örneğin: Güney Doğu Anadolu Projesi (GAP) ile ülkemizin güneyinde önemli üretimler yapılabilmektedir. Su, bu noktada hayat için iyi bir döngü sağlamaktadır. Suyun bize sağladığı bir diğer fayda ise enerji üretmektir. Enerjiye ihtiyacımız her geçen gün artan nüfus ve sanayileşme nedeniyle artmaktadır. Ülkemizin 2021 yılı enerji tüketimi 332,9 milyar kWs'tir. Bir önceki yıla göre tüketim miktarı %8,74 artış göstermiştir. Türkiye elektrik enerjisi talep projeksiyonu raporuna göre 2025 yılında tüketim miktarı 370 TWh olacaktır. 2040 yılında ise 591 TWh'a ulaşması beklenmektedir.

Ülkemizde enerji üretim faaliyetlerinin başında hidrolik enerji üretimi yani barajlar ve hidroelektrik santralleri gelir. Barajlar, suyu istenilen noktaya ulaştırmak ya da verim sağlamak kısacası, enerji üretmek için yapılır.

Baraj yapımında dikkat edilmesi gereken önemli unsurlar bulunmaktadır. Her alana baraj yapılamaz ve bunu tespit edip saptamak ve tasarlamak İnşaat Mühendislerinin görev alanlarından biridir. İnşaat Mühendisliğinin yanı sıra pek çok mühendislik alanı ile projelendirilme yapılmaktadır.

Ülkemizin en büyük debili akarsularından biri olan Çoruh nehri, değerlendirilmesi gereken ve değerlendirilen kaynaklarından biridir. Bu doğrultuda, Çoruh nehri güzergâhında Artvin il sınırları içerisinde 5 tane baraj ve hidroelektrik santral mevcuttur. Bu barajlar; Yusufeli Barajı HES, Artvin Barajı HES, Deriner Barajı HES, Borçka Barajı HES'tir.

Deriner Barajı yapım itibariyle Yusufeli Barajı'ndan daha öncesinde hizmete sunulmuştur ve önemli HES'lerden biri olarak hizmet vermektedir. Baraj 2012 yılında hizmete açılmıştır. Deriner Barajı'nın su tutma kapasitesi 1 milyar 970 milyon $m^3$'tür. Artvin Yusufeli Barajı ise dünyanın 5. en yüksek barajı, ülkemizin 1. en yüksek barajıdır.

Diğer yandan baraj sistem ve teknikleri, değişen dünya ile gelişmektedir. Yeni yapım teknikleri ile yeni barajlar da inşa edilmektedir. Bu tekniklerden biri ise SSB (silindirle sıkıştırılan beton) ile baraj yapım tekniğidir.

Bu tezde, SSB tekniği ile yapılan ülkemizin yeni barajlarından biri, Handırı Barajı incelenmiştir. Aynı zamanda, ülkemizin mega projesi olan Artvin Yusufeli Barajı ile mega proje olan bir barajı da incelenmiş, farklı koşul ve ihtiyaçlar için farklı proje dizaynları karşılaştırılmıştır.

## 1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, ülkemizde ve dünyada teknolojinin gelişmesi ile birlikte baraj teknolojisinin de gelişmesini göz önüne sermek ve bu gelişmelerin hangi unsurlar doğrultusunda ilerlediğini tespit etmektir. Aynı zamanda, çözüme giden yol incelenirken sonucun nasıl değiştiği de incelenmiştir.

Çalışma konusu olan iki baraj da konum ve faktör açısından nadir görülen projelerdir. İkisi de son teknoloji ile yapılmıştır. Projeler dizayn aşamasında incelikle tamamlanmış olmakla birlikte yapım aşamasında da hassasiyet ve kontrollü bir şekilde

gerçekleştirilmiştir. Özellikle, yoğun olarak incelenecek olan baraj betonları şantiye sahasında üretim ve imalat aşamasında belirli deneyler ve kontrollere tabi tutulmuştur.

Bu deneyler incelenmiş ve bizzat yapılmış raporları ise üst mercilere yine kontrol amaçlı teslim edilmiştir. Yapıların adım adım ilerleyişi ve sona ulaşırken kalite standardizasyonunun bozulmaması amaçlanmıştır. Her iki barajda da oldukça sağlıklı veriler ile imalat yapılmıştır.

## 1.2 Çalışmanın Alanı

Bu tez çalışmasının yapıldığı alan iki il ve iki bölge olarak seçilmiştir. Artvin ili Yusufeli ilçesi Yusufeli Barajı ve Hidroelektrik Santrali (HES) ve Çankırı ili Handırı köyü Handırı Barajıdır.

Artvin Yusufeli ilçesi, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde yer alır (Şekil 1.1). Artvin il merkezinin ise güneybatısında konumlanmıştır. Yusufeli alan olarak Türkiye'nin 85. en büyük ilçesidir. Konumu ise 40° 49' 14.4012" kuzey ve 41° 32' 37.1328" doğu koordinatlarındadır.

İl merkezine (Artvin) 76 km uzaklıktadır. Erzurum'a ise 139 km mesafededir. Ulaşım Erzurum-Artvin Karayolu ile sağlanmaktadır, zira ilçe iki il merkezi arasında bulunmaktadır. Yusufeli Barajı, Yusufeli ilçe merkezine 12,5 km uzaklıktadır.




**Şekil 1.1** Artvin ili ve Yusufeli Barajı topografik haritadaki konumu (ArcGIS, 2023)

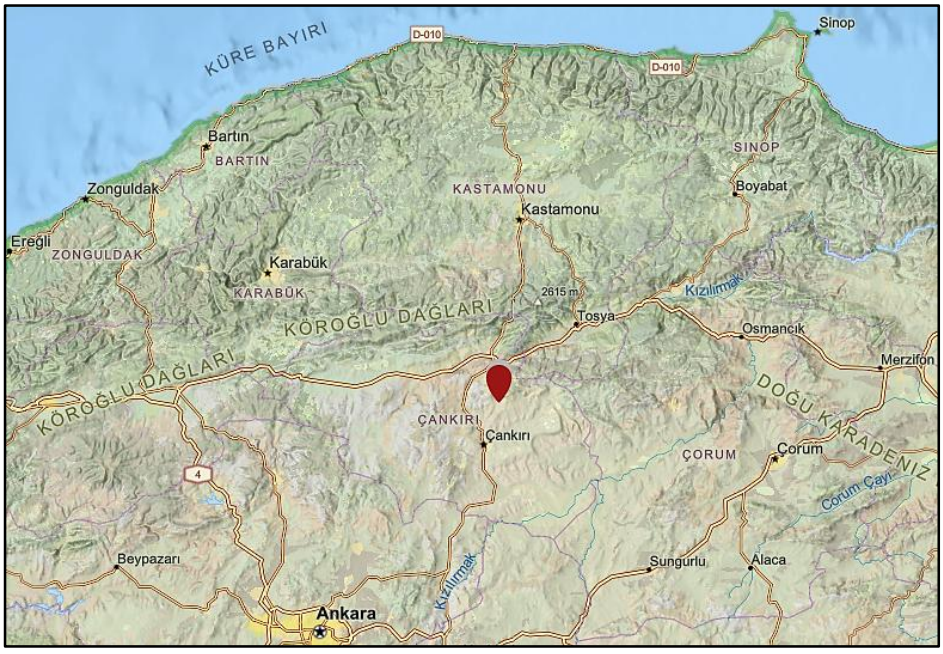
Yusufeli İlçe merkezi vadide kurulmuştur. Vadi iki akarsu birleşiminden oluşur. Bu akarsular; Çoruh Nehri ve Barhal Çayı'dır.

İlçe merkezinin denizden yüksekliği 560 m olmakla birlikte yüz ölçümü 2327 km²'dir. İlçe yüzey şekilleri, genel olarak doğu-batı uzantılı dağlar ve bu dağları da birbirinden ayıran vadilerden oluşmaktadır. Yusufeli, coğrafî konum itibarı ile çok engebeli, dağlık bir alana sahiptir (Şekil 1.2).




**Şekil 1.2** Yusufeli Barajı konumu (https://earth.google.com, 2022)

Çankırı ili Orta Anadolu kuzeyinde bulunmaktadır. Kızılırmak ile Batı Karadeniz havzaları arasında yer almaktadır (Şekil 1.3).




**Şekil 1.3** Çankırı ili ve Handırı Barajı topografik haritadaki konumu (ArcGIS, 2023)

40° 30' ve 41º kuzey enlemleri ile 32° 30' ve 34º doğu boylamları arasında yer almaktadır. İlin komşuları batısında Bolu, kuzeybatısında Karabük, kuzeyinde Kastamonu, doğuda Çorum ve güneyde Ankara ile Kırıkkale'dir. Denizden yüksekliği 730 metredir ve toplam 7,388 $km^2$'lik bir alana sahiptir.

Handırı köyü Çankırı il merkezine bağlı olup il merkezine 22 km uzaklıktadır. Çankırı'nın kuzeybatısındadır ve ulaşım D-765 numaralı Çankırı-Kastamonu anayolu güzergâhı ile ulaşım sağlanmaktadır. Köy merkezi 1276 m rakımlıdır. Çankırı il merkezinden oldukça yüksek bir bölgede bulunmaktadır. Baraj yapılan bölge, yüksek debili ve zengin akarsu vadisidir. Büyükdere isimli akarsu geçmektedir. Konumu ve yüksekliği itibariyle aynı zamanda İç Anadolu-Karadeniz Bölgesi geçiş bölgesi olması nedeni ile oldukça engebelidir (Şekil 1.4).




**Şekil 1.4** Handırı Barajı konumu (https://earth.google.com, 2022)

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

"Artvin Yusufeli Barajı ve Çankırı Handırı Barajlarının Gövdelerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi" isimli bu tez çalışmasında adımsal olarak araştırma esnasında ulusal ve uluslararası literatür taraması yapılmış olup bu çalışmayı destekleyici nitelikteki tezler incelenmiştir. İncelenen ve öncel çalışmalar aşağıda özet olarak sunulmuştur.

Demirci (1995), SSB konusunda Türkiye'deki ilk çalışmalardan biri olarak bu tip barajı ayrıntılı incelemiştir. SSB baraj seçilme nedenlerini, bileşenlerini ve laboratuvar hesaplarını ele alarak tüm dünyada kullanılan bu baraj yapım yönteminin uygunluğunu sunmuştur. Bu uygulamaların karışım hesapları ve projeleri de çalışmaya dâhil edilmiş ve elde edilen faydalı imalatlar üzerine çalışmıştır. Laboratuvar sonuçları ve hesaplar doğrultusunda SSB barajları dönemin malzemesi olarak nitelendirmiştir. Ülkemiz ekonomisine katkısının oldukça faydalı olabileceği sonucuna değinilmiştir.

Sürmeli (2002), Silindirle Sıkıştırılmış Beton Ağırlık Barajlar ve Bunların Ağırlık Beton Barajlarla Karşılaştırılması isimli çalışmasında karşılaştırılmalı bir tez sunmuştur. Baraj tiplerini incelemiş ve SSB (silindirle sıkıştırılan baraj) baraj, ağırlık beton baraj tasarım ilkeleri, laboratuvar çalışmaları üzerinde durmuştur. Dünyada SSB baraj sınıfında önde gelen barajları ve gelişmeleri ayrıca çalışmıştır. SSB baraj ve klasik betonla yapılan barajı yapısal yönden karşılaştırmıştır. Bu doğrultuda Manyas Barajı SSB olarak yapılması düşünülmüş ve bazı hatalardan ötürü yapılamayıp farklı baraj yapım tekniği uygulanmıştır. SSB ile yapılmış olsaydı barajın inşa süresinin üç yıl ile sınırlandırılacağı ve maliyet olarak fayda sağlayacağı sonucuna varmıştır. Manyas Barajı SSB ile yapılmış olsaydı derivasyon kanalını temel altından geçirileceği ve böylece fazladan derivasyon tüneli yapılmasının önüne geçileceğini belirtmiştir. Aynı zamanda SSB ile tasarlanan barajda dolusavakta enjeksiyona daha az ihtiyaç olacağını ve New Viktorya Barajı tasarımı örnek alınacak şekilde inşa edileceğini de belirtmiştir. Klasik beton ile tasarımı durumunda daha büyük ve diğer beton barajlara nazaran yüksek mukavemetli baraj elde edileceğini belirtmiştir.

Sonuç olarak, SSB barajların iyi tasarlandığı takdirde %30-40 oranında tasarruf sağladığını ve kolay inşa edilmesi sebebiyle malzeme ve işçilikte de fayda gösterdiğini belirtmiştir.

Emiroğlu (2009), Yusufeli Barajı'nı ülkenin en önemli projelerinden biri olarak nitelendirmiştir. Baraj tiplerinin yanı sıra Yusufeli Barajı'nı detaylı olarak incelemiş ve çevresel etki üzerinde de ayrıntılı bir çalışma sunmuştur. Yusufeli Barajı'nın yılda $1{,}705 \times 10^9$ KWs elektrik üreteceğini ve bu değerin ülkemiz adına çok önemli olduğunu ifade etmiştir.

Taşdemir (2014), Silindirle Sıkıştırılmış Beton Kondüvi Sistemlerini incelerken barajların yapılma nedenlerini araştırmış ve olumlu-olumsuz etkilerini de incelemiştir. Genel olarak barajların insanların doğaya zarar vermesi olarak bakıldığını ancak bu durumun tersi niteliği taşıdığı ve toplumsal yarar dışında maddi olarak da kazanç sağladığını belirtmiştir. Barajların olumlu yönlerini dokuz madde ile ifade etmiş, olumsuz yönlerini yedi madde olarak sıralamıştır. Bunun yanı sıra olumsuz yönlerin baraj yapımına engel olmadığını da belirtmiştir.

Alçay (2014), beton kemer barajlarda ölü yükün yani barajın kendi ağırlığından oluşan yükün içinde birçok etmen olduğunu ifade etmiştir. Bu etmenlere kapak gibi unsurların dâhil olduğunu belirtmiştir. Baraj gövdesindeki sıcaklık dağılımının gövde beton kalınlığına göre değişiklik gösterdiğini, ince kemer barajlarda membadan mansaba doğru lineer bir dağılımı olduğunu ve dolayısıyla da projelendirmede makul yaklaşımlar elde edildiği fikrini sunmuştur. Çift eğrilikli kemer barajlara örnek olan Ermenek barajı, 2009 yılında tamamlanan alt kısmı 5 m ve üst kısmı 150 m olan barajın dünyanın sayılı yüksek barajlarından olduğunu vurgulamıştır.

Bayar (2019), baraj betonlarında agrega sınıflarını ve agrega deneylerini detaylıca incelemiştir. Bu agrega detaylı çalışmalarda laboratuvarda taze beton ve sertleşmiş beton üzerinden değerlendirmelerini ifade etmiştir. Baraj betonlarında uzun ömürlü ve ekonomik esaslarını göz önünde bulundurmuş, aynı zamanda ulaşılması kolay, aşınma direncinin de yüksek değerli agregaların kullanımının esas olduğunu vurgulamıştır.

Beton işlenebilirliği açısından da barajlar üzerinde agregaların değişim gösterdiği sonucuna varmıştır. Agrega seçiminin ve kalitesinin beton kalitesindeki olası değişimler üzerine de fikir sunmuştur.

Güman (2019), silindirle Sıkıştırılan Baraj (SSB) örneği olarak İhsaniye Barajı'nı incelerken barajları sınıflandırmış ve dünyadaki SSB barajları da incelemiştir. Aynı zamanda, Türkiye'deki barajları da ayrı ayrı ele almıştır. Baraj beton karışımına giren malzemeleri, çimento (sülfata dayanıklı), %1 oranında bentonit, kum, su, her betonda eser miktarda kullanılan kimyasal katkılar, kalafat malzemesi adı altında bir malzeme karışımı ve çeşitli enjeksiyon şerbetleri kullanıldığını ifade etmiştir. Çeşitli beton ve agrega deneylerinin oranlarını da incelemiş ve optimum düzeyde olduğunu bu şekilde imal edildiğini de sunmuştur. Barajın son durumda oturma, taşıma gücü, sıvılaşma ile ilgili risklerin oluşmayacağı şekilde tasarlandığını ve baraj rezervuar alanının tasarlanan beton ile geçirimsiz konuma getirildiğini de ifade etmiştir.

Şen (2021), Ilısu Barajı'nın yapım aşamalarını ayrıntılı olarak incelemiş, baraj bölümlerini ayrıntılı tablolar halinde teze eklemiştir. Baraj yapımına başlamadan önce derivasyon tüneli ile nehir suyunun yönünün değiştirildiğini ve şantiyede rahat çalışılabilmesi için yine memba batardosu inşa edildiğini de belirtmiştir. Deney parametrelerini sunmuş ve yapı analizi için SAP2000 programını kullanarak modelleme yapmıştır. Ana baraj dolgu malzemesi özelliklerini de program tablolaştırılması yardımıyla sunmuş ve bu parametreler doğrultusunda baraj tasarımının yapıldığını ifade etmiştir.

# 3. BARAJLAR

## 3.1 Baraj Tanımı

Barajlar, akarsu barındıran vadilerde suyu tutabilmek ve kullanabilmek için yapılan yapılardır. Baraj yapımında tek fayda düşünülerek tasarım yapılmaz. Çünkü barajların bir değil birden fazla yararı bulunmaktadır. Baraj kelimesi su sağlamak ve temin etmek amacıyla oluşturulan bent, engel, set şeklinde tanımlanabilmektedir.

Eski dönemlerden beri su temini için farklı yöntemler kullanılmıştır. Su temin etmekteki en önemli etmenlerden biri suya düzenli ve kesintisiz ulaşma ihtiyacıdır. Barajlaşma ve su yapılarındaki ilerleme sürekli olarak değişim ve gelişim göstermiştir Teknoloji ve yapılaşmanın da gelişmesiyle günümüz baraj sistemleri dizayn edilmiştir. Dünya üzerindeki ilk barajın Mısırlılar tarafından yapıldığı bilinmektedir. Nil Nehri üzerine M.Ö. 4000 yılında baraj inşa eden Mısırlılar suyu tutabilmeyi ve sudan yararlanabilmeyi amaçlamışlardır. 12 m yükseklik ve 110 m uzunluğa sahip Sadd-el Kafara barajından sonra günümüze kadar dünyada pek çok baraj inşa edilmiş ve her inşa edilen baraj da bir sonraki baraj için geliştirici konumda yer almıştır.

Ülkemizin ilk barajı Cumhuriyet Döneminde inşa edilen Çubuk Barajı'dır. Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'ün talimatı ile 1930 yılında yapımına başlanmıştır. Çubuk Barajı aynı zamanda ülkemizin ilk betonarme barajıdır. 1994 yılından sonra işlevini yitirmiş olan baraj 2021 yılında tekrardan su tutmaya başlamıştır.

Barajlar gelişmekte olan ülkeler için ayrıca önem taşır. Baraj yapımının esas amacı çevre bölgelerin ve hatta geniş alana yayılmış bir alanın suyu kullanmasını sağlamaktır. Barajların en önemli faydalarından biri hidroelektrik santralleri ile enerji katkısıdır. Bu da ülkeler için ekonomik açıdan çok önemli avantaj sağlamaktadır.

### 3.1.1 Barajların yapım amaçları

1. Tarımsal alandan en iyi verim sağlama.
2. Su kullanım alanını genişletme.
3. İçme suyu ve kullanma suyunu zaman gözetmeksizin temin etme.
4. Sanayi için gerekli su kullanımı temini.
5. Mesire alanı oluşturmada etken.
6. Taşkın kontrolü için kontrolör yapı.
7. Yer altı su seviyesi (YASS) için kontrolör yapı.
8. Sediment ve taşınım maddeleri için kontrolör yapı.
9. Bölgenin su yönü ve debi kontrolü.
10. Su altı yaşam çeşitliliği ve bölgesel yayımı için ekosistem oluşumu.
11. Balıkçılık ve su turizm, taşımacılığı yaparak bölge halkına ekonomik katkı.
12. Hidroelektrik santraller ile elektrik üretimi şeklinde sıralanabilmektedir (Hatipoğlu 2018).

### 3.1.2 Barajların yararları

1. Tarımsal alan ve ürün verimliliği sağlar.
2. Sudan yararlanan bölge alanını genişletir.
3. Enerji üretimini sağlar ve elektrik temini sağlar.
4. Belli koşullar sağlandığı takdirde erozyon için olumlu sonuç oluşturur.
5. Sanayi suyu kullanımı sağlayarak iş ve işçi kalkınması sağlar.
6. İçme ve kullanma suyunu kesintisiz kullanım sağlar.
7. Taşkın kontrolü, akış kontrolü, yer altı su seviyesi kontrolü sağlayarak teknik veriler ile bölgenin daha güvenli ve verimli su ihtiyacına karşılık verir.
8. Sediment taşınım madde kontrolünü sağlayarak barajdan yararlanan bölgelerin bu tür sorunlardan ötürü sular altında kalmasını engelleyebilir.
9. Bölgenin iklim ve ekosisteminde olumlu yönde çeşitlilik oluşturur.
10. Bölge halkının istihdamı için çeşitli iş kolları getirir (Taşdemir 2014).

### 3.1.3 Barajların zararları

Barajların yararlı etmenleri sıralanabilir ancak olumsuzlukları da bulunmaktadır. Her baraj için ayrı ayrı değerlendirilmesi gereken bu unsurlar fayda-zarar öngörüsü için önemlidir. Unutulmaması gereken önemli husus ise zararların ne ölçüde olduğudur. Baraj yapımını büyük ölçüde etkileyen zararlar var ise ya da oluşabilecek durumda bir tasarım yapılmış ise projelendirilmede bunlar göz önüne alınıp kararlaştırılır.

Genelde bahsi geçen zararlar göz ardı edilebilecek oranda oluşmaktadır. Birden fazla olsa dahi oran önemlidir. Bu unsurlar incelenmiştir.

1. Sediment taşınım maddesi oluşumunu engelleyerek uzun vadede ova oluşumunu engelleyebilir.
2. Baraj hizmete geçtikten sonra proje alanında var ise yerleşim ve tarım arazilerinin su altında kalması,
3. Barajın hizmet ömrünü tamamlamadan yapının çökmesi olasılığı ile oluşabilecek yıkılma gibi felaketler (Bozkuş ve Bağ 2011),
4. YASS (Yer altı su seviyesi) kontrolü sağlanamadığı takdirde yer çöküntüleri ya da kaymalar,
5. Ekosistem farklılığının doğal olarak değişmesinden ötürü biyolojik kayıplar,
6. Baraj hizmete açılması sonucunda yeni şebeke hatlarının yapımından ötürü doğaya verilebilecek zararlar şeklinde sıralanabilmektedir (Taşdemir 2014).

## 3.2 Baraj Bölümleri

**1. Kret**

Barajın yapısal olarak en üst tabakasında bulunan kısımdır. En yüksek kota sahiptir, baraj gövdesine paralel ve akarsu yatağına göre dik konumda bulunur. Baraj kretinde çoğunlukla insan ve araç hareketi sağlanabilecek kadar alan mevcuttur.

**2. Ambatman**

Vadinin baraj inşa edilen ve barajın oturduğu iki taraflı eğimli bölgenin yüzeyidir. Yalnızca barajlarda değil inşa edilen tüm yapılar için kullanılan bir terimdir.

**3. Baraj gövdesi**

Akarsu vadisini tamamen kapatan ve suyu tutan bölmenin tamamıdır. Sabit olan ana gövdedir. Baraj gövdesi çeşitli dolgu malzemeleri ile inşa edilebilir. Önemli olan ana gövde olarak tut tutması ve vadiye oturmasıdır.

**4. Baraj temeli**

Barajın üzerine oturduğu ve üzerine inşa edildiği temel yapısıdır. Baraj yükünü ana kayaya ya da oturması gereken zemine sağlıklı bir şekilde yerleşmesini sağlar ve baraj gövdesinin sabit bir şekilde kalmasını sağlar.

**5. Memba**

Akarsuyun baraja geldiği ve su ile temas ettiği ilk kısımdır. Su akışı yönünde yönlendirilmesi yapılır. Şantiyede ve projelendirilmede nokta yer belirlemede bölge ifadelerinden biridir.

**6. Mansap**

Suyun barajdan ayrıldığı bölgedir, memba giriş mansap çıkış olacak şekilde tasarım yapılır.

**7. Baraj gölü (rezervuar)**

Suyun vadide depo edildiği kısımdır. Akışın yukarısı olarak ifade edilir çünkü akan suyun baraj ile birleştiği bölgede rezervuar alanı oluşturulur. Üç ana kısımdan meydana gelir bunlar; en alt tabakada kalan ölü hacim, ikinci tabaka olan aktif depolama hacmi ve yüzey bölgesini de içine alan taşkın kontrol hacmidir. Ölü hacim genellikle sediment maddeleri ile dolar ve baraj ömrü boyunca boşaltılamaz.

**8. Su alma yapısı**

Barajdan ya da regülatörden (su alma yapısı) gereken durumlarda su temin edebilmek için kullanılan tesistir. Baraja su gelir ve bu bölgede suyu alabilmek için hazır bulunur. Her barajın kendine özgü tasarlanmış su alma yapıları vardır.

**9. Dip savak**

Taşkın olduğu esnada kapasiteyi azaltmak ve mansaba bırakılacak suyun miktarını ayarlamak için kullanılır. Tehlike veya barajda yapılacak büyük bakım durumlarında barajı tamamen boşaltabilecek bir savaklama (suyu tahliye etme) yapabilir. Kapaklı olarak projelendirilir, ihtiyaç durumunda bu kapaklar açılabilir sistem ile oluşur. Genellikle baraj rezervuarına göre gövdenin alt kısımlarındadır.

**10. Dolu savak**

Baraj membasında projede tasarlanan maksimum su seviyesinin aşılması durumunda kontrolü sağlayan kısımdır (T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü DSİ 4. Bölge Barajlar ve HES Şube Müdürlüğü barajlar tanıtım çalışması, 2015). Seviyeyi aşan miktardaki suyun alınıp güvenli olarak mansap yani barajın çıkış kısmına bırakılmasını sağlar. Çoğunlukla baraj gövde kısmının üstünde veya barajın tek ya da çift yanında yapılır.

Baraj tabanında veya rezervuar alanında, yamaçlarda da tasarlanabilir. Su baraj üzerinden aktarmalı, kapaklı, kuyu gibi şekillerde projelendirilebilir, her baraj için bu tasarımlar farklılık göstermektedir.

**11. Batardo**

Baraj gövdesinin şantiyesine başlanmadan önce akarsu yönünü değiştirmek ve bu şekilde kuru bir ortam içinde çalışmak için yapılan kısımdır. Akış yönündeki akarsuyu yönlendirir yani yönünü değiştirip çevirme yapısı olan tünele aktarılmasını sağlar. Baraj gövdesi tamamlandıktan sonra da çoğunlukla bu yapı yıkılmaz çünkü olası beklenmeyen akış durumunda taşkın önlenmesini sağlar. Taşkın önlemesini baraj gövdesine gelen suyun ilk aşamada enerjisini kırarak ve set oluşturarak baraj gövdesine vurmasını engelleyerek sağlar.

**12. Galeriler**

Baraj gövdesinin içinde bulunur ve baraj eksenine dik, paralel veya eğik gibi konumlandırılabilir. Galerilerin temel görevleri baraj sızıntı kontrolü, drenaj ya da baraj enjeksiyonu yapmaktır. Bu alanlar kontrol için en efektif ve önemli konumdadır.

**13. Derivasyon (çevirme) tesisleri**

Baraj şantiyesinin kuru ve sağlıklı ortamda yapılabilmesi için suyun tahliye edildiği tesislerdir. Suyun gövde inşaatına gelmesini önleyen batardolardan direkt olarak tünel sistemi ile mansap yani gövdeden çıkış bölgesine iletilmesini sağlar. Bu yapılar açık sistem ya da kapalı tünel sistem şeklinde projelendirilebilir.

**14. Diğer yardımcı tesisler**

Baraj şantiyesinde; çalışma ofis büroları, bakım atölyeleri, depo, laboratuvar, enerji santralleri, arıtma tesisleri, konveyörler, balık geçidi gibi yapılar bulunmaktadır.

## 3.3 Baraj Sınıflandırması

Baraj sınıflandırmasını yapabilmek için en önemli unsur neye göre sınıflandırılacağının belirlenmesidir. Birçok unsura göre sınıflandırılma yapılabilmektedir.

### 3.3.1 Büyüklüğüne göre sınıflandırma

Asıl olan ana tema burada gövde yüksekliğidir. Gövde yüksekliği baraj büyüklüğünü sınıflamaktadır:

- 50 metreden kısa baraj gövdesine sahip barajlar - Alçak baraj
- 50 m-100 m aralığındaki gövdeye sahip barajlar - Orta Yükseklik Sınıfına sahip baraj
- 100 m'den yüksek barajlar - Yüksek baraj olarak sınıflandırma yapılabilmektedir (Çataklı 1967).

### 3.3.2 Yapılış amacına göre sınıflandırma

Su temini amaçlı yapılan barajlar, enerji sağlama amaçlı barajlar, taşkın ve sediment kontrolü sağlama amaçlı barajlar, iklimsel yarar sağlama amaçlı barajlar, turizm ve kalkınma sağlama amaçlı barajlar gibi sınıflamalar yapılabilmektedir ve amaç doğrultusuna göre bu sıralama geliştirilebilir (Çataklı 1967).

### 3.3.3 Fonksiyonlarına göre baraj sınıflandırması

- Su biriktirme barajı
- Kabartma
- Taşkın geciktirme

### 3.3.4 Gövde malzemesi ve projelendirilmesine göre sınıflandırma

En yaygın ve genel olarak kullanılan sınıflama tipidir. Çoğu baraj çalışmalarında malzeme ya da projelendirilmeye göre karakteristik isimlendirilme oluşturulur.

#### 3.3.4.1 Beton barajlar

Kaya yapısı sağlam ve iyi olarak nitelendirilen zeminler üzerine inşa edilmesi tercih edilir. Bu tip barajlar erozyona karşı nispeten dayanıklıdırlar. Büyük oranda 19.yy'da niteliğini kazanmıştır ve günümüzde hala tercih edilen yapı türüdür.

**1. Beton ağırlık barajlar**

Suyun itme kuvvetine karşı ağırlığı yani yalnızca kütlesi ile karşıt kuvvet oluşturan baraj türüdür. Yer şekli olarak geniş vadi ve sağlam ana kaya üzerine inşa edilirler (Ulamış 2018). Taban üzerinden devrilme veya kaymaya karşı direnç gösterir. Eksenel olarak doğru bir eksen ya da memba yönüne doğru kavis alan baraj tasarımıdır. Tercih edilen arazi türü genelde çok geniş vadilerdir. Beton ağırlık barajlarda taban ve yükseklik oranı (taban/yükseklik) 0,7-0,8 aralığındadır.

**2. Beton kemer barajlar**

Kemer Barajlar güvenlik açısından en güvenli barajlar sınıflandırmasına girmektedir. Baraj aksı eğriseldir. Kavisli olarak projelendirilen yapının amacı gövdeye gelen su basıncını yamaçlara aktararak dağıtmaktır (Erkaya vd. 2004).

Böylece beton gövdenin güvenliğinin sağlanması amaçlanır. Tek ve bütün beton olarak inşa edilmektedir. İnşa edileceği alanın litolojik özelliklerine göre ve zemin açısından sağlam olmasını gerektirir.

Genişlik/yükseklik oranı bu tip barajlarda 0,1-0,25 aralığındadır. Bu oran beton ağırlık barajlara göre oldukça düşüktür. Yusufeli Barajı da Çift Eğrilikli Beton Kemer Baraj olarak sınıflandırılmaktadır.

### 3. Payandalı barajlar

Payandalı barajlar iki kısımdan oluşur. İlk kısım barajın yapılacağı vadi eksenine paralel olacak konumda tasarlanan beton duvarlar, ikincisi ise bu tasarlanan beton payandalar arasındaki bentlerdir. Suyun itme kuvvetini karşılayan ve karşı koyan yapı bu payandalardır. Payandalar su gücüne karşı mukavemet sağlar ve payandaların hepsi ayrı ayrı bir ağırlık barajı dilimi gibi hesaplanarak tasarım oluşturulur.

Baraj profilleri genellikle üçgene benzerdir. Baraj kalınlığı ince tutulursa yukarı yüzeyleri aşırı eğimli tasarlanır.

Ağırlık tipi barajlarına göre nispeten daha az beton imalatına ihtiyaç duyulur. Yamaç eğimleri düşük ya da geniş vadiler dışında V tipi vadiler için de tasarlanabilen baraj türüdür. Ancak, V tipi vadilerde dip savak baraj içerisinde kalacak şekilde tasarlandığı zaman daha ekonomik bir tasarım haline dönüşmektedir (Balı 2021).

### 4. Silindirle sıkıştırılmış beton baraj (SSB)

RCCD-Roller Compacted Concrete Dam olarak literatüre giren SSB barajlar beton içeriği incelendiği zaman düşük su içeriğine sahiptir bu sebepten ötürü birim ağırlık daha yüksektir.

Tasarımda baraj gövdesinin hacmi diğer beton barajlara nazaran daha düşük hacim ile projelendirilir. Beton karışımında çimento içeriği daha düşüktür. Bundan ötürü daha ekonomiktir ve daha hızlı imal edilmektedir (Demirci 1995).

Projelendirmede ve ön analiz çalışmalarında dikkat edilen en önemli unsurlardan biri barajın oturacağı zemin dayanımıdır. Taşıma gücünün yeterli olabilmesi için anakayanın tamamında eşit ve lineer oturma olabilmesi gerekir. Aynı zamanda, agrega gradasyonu ve beton karışımının da hassasiyet ile yapılması gereklidir. Tasarımı ve deneyleri tamamlanan sağlıklı beton, serme işlemi ve vibrasyonlu silindirler tarafından imal edilir.

SSB barajlarda baraj gövdesinin maliyeti ve inşaat süresi üçte iki oranında azaltılabilmektedir. SSB tipi betonun mukavemeti, standart sistem ile üretilip imal edilen beton ile aynı olmasına rağmen maliyeti standart yol ile imalatı yapılan betona göre çok daha düşüktür. SSB, barajların yanı sıra yol, hava limanı, fabrika gibi yapıların yapımında da kullanılmaktadır (Mardani-Aghabaglou vd. 2020).

Dünya üzerinde oldukça yaygın olarak inşa edilen bu SSB baraj tipi ilk kez 1960'lı yıllarda İtalya'da bulunan Alpe Gere olarak kayıtlara geçmiştir. 1970-72 yıllarında ABD California'da Temel ve Mühendislik konferansında 'Ekonomik Beton Baraj' olarak tabir edilen ve sunulan bildiride Silindirle Sıkıştırılan Beton Baraj üzerine akademik veriler bulunmaktadır.

Türkiye'de son yıllarda oldukça yaygınlaşmış SSB türündeki projelendirilmeler tamamlanmaktadır. Adnan Menderes Barajı gövdesi SSB tipindedir, 120 m yüksekliği ile 2010 yılında işletmeye açıldığı dönemde Avrupa'nın en yüksek SSB barajı olarak tamamlanmıştır. Günümüzde bu unvanını halen korumaktadır. Her iki baraj da projelendirilmede ilgili şartnameler doğrultusunda tasarlanmıştır (T.C. Tarım Orman Bakanlığı Baraj Projesi Yapım Teknik Şartnamesi).

#### 3.3.4.2 Dolgu barajlar

Dolgu barajlarda genel olarak agrega birleşimini çeşitli gradasyon ve özelliklerde toprak, asfalt, çakıl, kil, siltten oluşturmaktadır. Yerleştirme ve sıkıştırma olarak iki aşamalı inşa edilmektedir.

Kullanılan malzeme cinsine göre toprak dolgu ve kaya dolgu barajlar olarak ikiye ayrılır. Toprak ve kaya birleşimi ile birlikte tasarlanan toprak-kaya dolgu tipindeki barajlar da mevcuttur.

**1. Toprak dolgu barajlar**

Toprak tabakalarının sıkıştırılması ile imal edilir, malzemenin yarısı-%50'si toprak malzemedir. Geçirimi oldukça düşük baraj türüdür.

Orta bölümünde çekirdek ismi verilen geçirimsiz tabakalar bulunur ve bu tabakalar kil ya da betondan oluşur. Geniş akarsu vadilerine projelendirilirler. Yükseklikleri genellikle 15 m ve 95 m arasında tasarlanır. Malzeme cinsine göre zonlu gövdeli ve homojen gövdeli toprak baraj olarak sınıflandırılır. Baraj gövdesi baz alındığında homojen olarak kabul görmez. Türkiye'de 512'den fazla toprak dolgu baraj hizmete açılmıştır.

**2. Kaya dolgu barajlar**

Kaya dolgu barajlar, toprak dolgu barajlara nazaran daha büyük inşa edilir. Baraj gövdesinin yarısından fazlası kayadan oluşmalıdır. Bu kaya sınıfının kullanılabilmesi için baraj inşa edilecek alana yakın konumda rezerv ve yatak bulunması gerekir. Baraj gövdesinin çekirdeğinde geçirimsizliği sağlamak için asfalt, kil veya beton tabaka oluşturulur.

Dünyada görülen örneklerinde baraj gövdesinin su ile temas yüzeyinin olduğu kısımlar çelik vb. tabakalar ile kaplanabilmektedir.

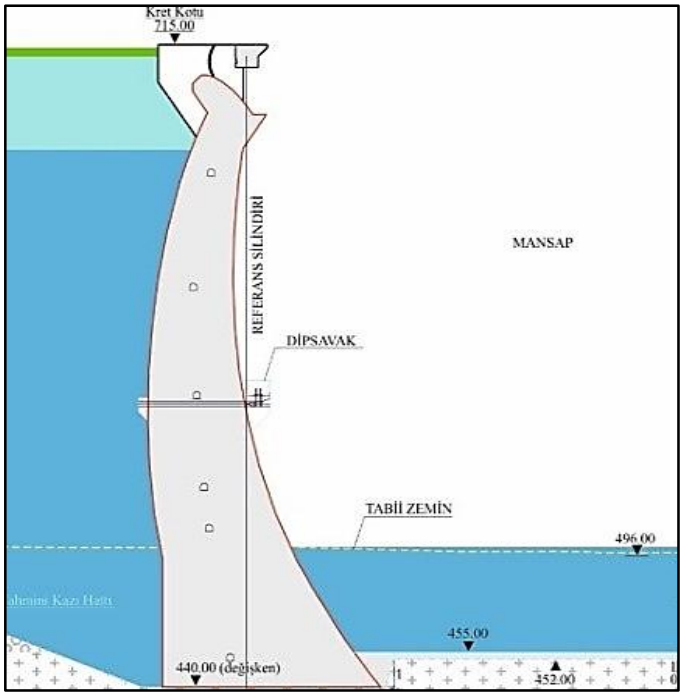
Ülkemizin önemli barajlarından Atatürk barajı da Kaya Dolgu Baraj sınıfına girmektedir. Keban barajı da 207 m uzunlukta kaya dolgu ve beton karışımlı bir barajdır.

# 4. MATERYAL VE METOT

## 4.1 Yusufeli Barajı

Yusufeli Barajı ve HES Projesi, Doğu Karadeniz Bölgesi DSİ Çoruh Projeleri ve 26. Bölge Müdürlüğü Artvin bünyesinde projelendirilmiştir. Baraj, Artvin ilinin 106 km güneybatısında bulunan Yusufeli ilçe sınırları içerisindedir. Baraj aksı projelendirmesi, Çoruh nehri ve Oltu çayı birleşimine yaklaşık 800 m mesafededir.

Baraj 275 m yüksekliğinde ince beton kemer olarak tasarlanmış ve toplam depolama kapasitesi 2,3 milyar $m^3$'tür (Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2). Barajın kreti 715 m kotundadır (Şekil 4.1). Santral binası 3 ünitelidir ve toplam kurulu gücü 558 MW'tır. Yıllık enerji üretimi 1 milyar 888 milyon kWh/yıl olarak belirlenmiştir. Yusufeli Barajı kemer baraj olması nedeniyle baraj gövdesine gelen su yükü ile birlikte baraj yükünün bir bölümünü oturduğu mesnetlere aktarır. Yüksek su yükü ve beton kemer gövde yükünü karşılamak için bu tip baraj tasarımı yapılmıştır. Kemer etkisi ile yükünü aktardığı şevlerde güçlendirme yapılmıştır.




**Şekil 4.1** Yusufeli Barajı proje kesiti

**Çizelge 4.1** Baraj rezervuarına ait veriler

| | |
|---|---|
| **Toplam depolama hacmi** | 2.130,0 $hm^3$ |
| **Aktif depolama hacmi** | 1.080,0 $hm^3$ |
| **Rezervuar yüzey alanı** | 33,63 $km^2$ (710 kotunda) |

**Çizelge 4.2** Baraj gövdesine ait kot bilgileri

| | |
|---|---|
| **Barajın tipi** | Çift eğrilikli beton kemer |
| **Kret kotu** | 715,00 m |
| **Talvegten yüksekliği** | 220,00 m |
| **Temelden yüksekliği** | 275,00 m |
| **Kret uzunluğu** | 490,00 m |
| **Kret genişliği** | 8,00 m |
| **Gövde beton hacmi** | 4.000.000 $m^3$ |
| **Dolusavak net düşüşü** | 207,00 m |

Derivasyon tüneli uzunluğu 894,95 m'dir. Barajda dip savak ve dolu savak vardır. Baraj 3 tribünlüdür ve 640 m-715 m kotu arasındaki su seviyesinde elektrik üretebilmektedir.

Yusufeli Barajı beton imalatı anolara bölünmüş ve kısım kısım yapılmıştır. Toplamda 29 adet ano olarak parçalara bölünüp imal edilmiştir. Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5'te baraja ait diğer veriler ele alınmıştır. Bu imalatın yapılabilmesi için 9 $m^3$'lük hava hatlı kova sistemi kullanılmıştır.

**Çizelge 4.3** Derivasyon tesislerine ait veriler

| | |
|---|---|
| **Yeri** | Sol sahil |
| **Adedi** | 1 adet |
| **Kesit tipi** | Dairesel |
| **İç çapı** | 11,30 m |
| **Uzunluğu** | 901,60 m |
| **Derivasyon kapasitesi** | 1.518,00 $m^3/sn$ |

**Çizelge 4.4** Dolusavak verileri

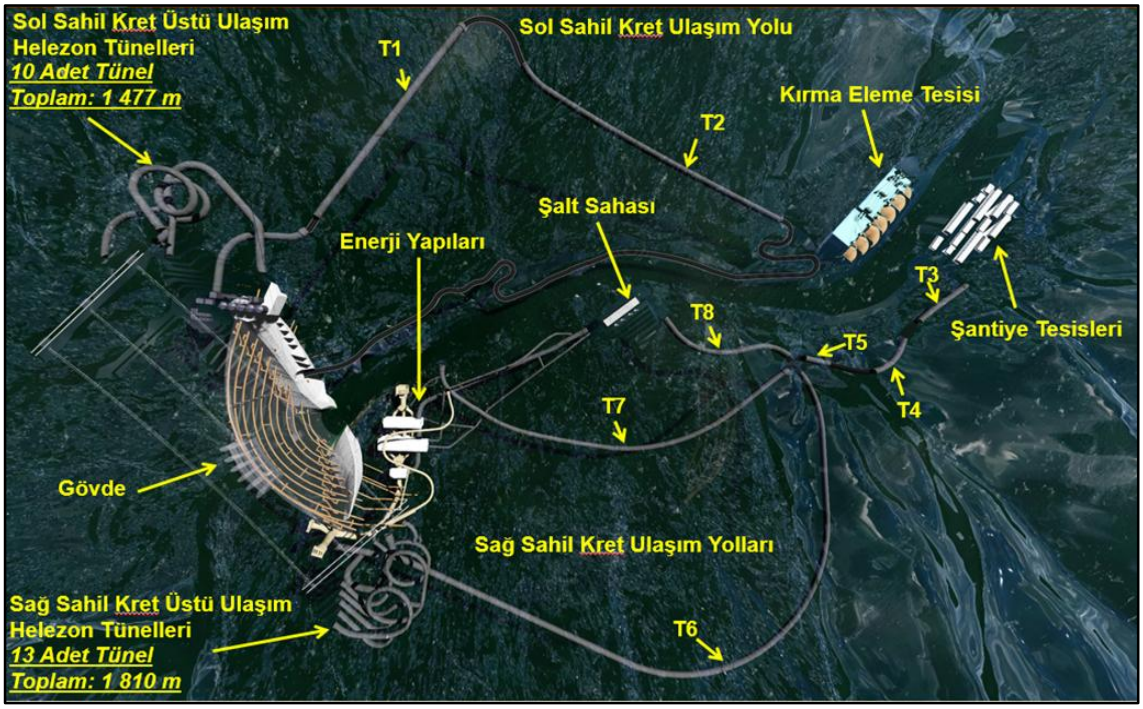
| | |
|---|---|
| **Yeri** | Baraj gövdesi |
| **Tipi** | Karşıdan alışlı |
| **Radyal kapak adedi** | 5 adet |
| **Boşaltma debisi** | 5.084,00 m |
| **Eşik kotu** | 702,00 m |
| **Kapak üst kotu** | 710,50 m |

**Çizelge 4.5** Dipsavak verileri

| | |
|---|---|
| **Adedi** | 4 adet |
| **Yeri** | Baraj gövdesi |
| **Dipsavak kapasitesi** | 4 x 142,00 m³/sn |
| **Dipsavak çapı** | 2,10 m |
| **Giriş kotu** | 560,00 m |
| **Kapak tipi** | Düşey sürgülü kapak |
| **Kapak boyutları** | 1,40 m x 2,10 m |

Gövdenin 15 ve 16 anolarında 560 m kotunda 4 tane dip savak ve gövdenin 715 m kret kotunda 5 tane dolu savak olacak şekilde tasarlanmıştır. Gövde de toplam 12 galeri projelendirilmiştir.

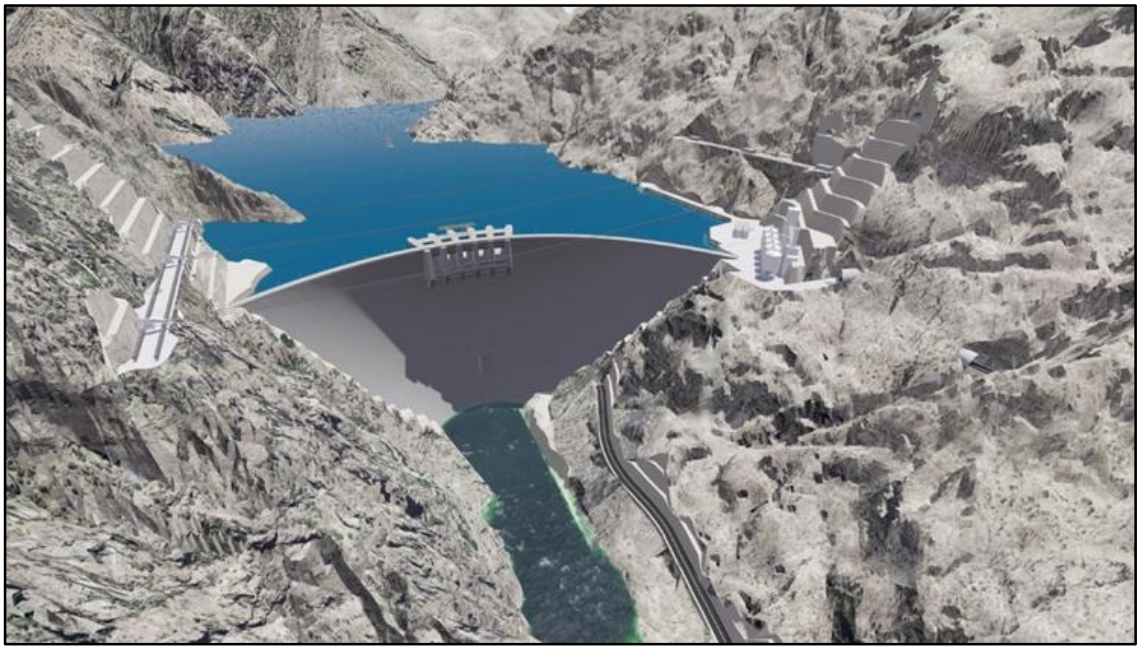
Vadide jeolojik olarak heterojen bir yapı hâkimdir ve projelendirmede baraj sahası alanı bu hususa göre projelendirilmiştir (Şekil 4.2). Baraj yapımına başlanmadan önce vadinin jeolojik bir haritası çıkarılmıştır. Bu hususta güçlendirme için ön gerilmeli ankraj sistemi uygulanmıştır. Bu sistemin amacı barajın oturacağı zemini dayanımlı hale getirmektir. Ankraj sistemi için 80 metre delgi yapılmış, delgilerin içine halat sistemi yerleştirilmiştir. Halat sistemi içerisinde 15 çelik halat her bir delgiye monte edilmiştir. Kök bölümüne yapılan enjeksiyon ile birlikte ankraj montesi tamamlanmıştır. Bu sistemlerde 240 ton öngerme uygulanmıştır. Baraj gövdesinin yükünü taşıyan şev bölgeleri bu şekilde güçlendirilmiştir. Toplamda 207000 metre 6500 adet ankraj ile işlem sonuçlanmıştır.




**Şekil 4.2** Yusufeli Barajı ve HES yapıları

Gövdeye mesnetlik yapacak sağ ve sol sahildeki kaya zemin yapısı kırıklı yapıda olduğu için bu bölgelere de öngerilmeli ankraj yapılmıştır. Fakat daha güvenli olması amacıyla gövdenin zeminle birleştiği kısımda yastık betonu dizayn edilmiştir (Şekil 4.3, Şekil 4.4). Bu betonun amacı, baraj gövdesinden gelen kuvveti daha geniş alana yayarak birim alana gelen kuvveti veya gerilmeyi azaltmaktır.

Baraj yapımında gövde temel kazısına gelebilecek yer altı su sızıntısının gövde dayanımında hasar oluşturmaması için baraj projesine özgü bir çözüm dizayn edilmiştir. Yer altı su sızıntısını engellemek için memba ve mansap bölgesine geçirimsizlik perdesi (slurry trench) inşa edilmiştir. Yusufeli Barajı mansap batardosu bölgesinde geçirimsizlik perdesi (3131,74 $m^2$), memba batardosu bölgesinde ise ön batardo ve geçirimsizlik perdesi (2934,63 $m^2$) yapılmıştır. Zemin sınıfına uygun olarak seçilen makineler ile 50 metre derinlikte, toplam 2700 $m^2$ geçirimsizlik perdesi inşa edilmiştir.



**Şekil 4.3** Yusufeli baraj gövdesi mansap görünümü



**Şekil 4.4** Yusufeli baraj gövdesi membadan görünüm

Yusufeli Baraj şantiyesinde iki adet beton santrali ile beton üretilmiştir. Bu santraller, sabit ve mobil santrallerdir.

### 4.1.1 Beton dizaynı

Yusufeli barajı gövde betonu 3 kısımdan oluşmaktadır. Yusufeli barajında 5 tane beton santralinde üretim yapılmıştır. Şantiyede agrega ve beton için hat, konveyör kova döküm gibi sistemler mega boyutlarda kullanılmıştır.

Memba tarafına dökülen beton, mansap tarafına dökülen beton ve memba mansap arasında kalan beton olmak üzere 3 kısımdan oluşmaktadır. Baraj gövdesinde galeriler içerisinde soğutucu (post-cooling) boruların vanaları ve bu sistem ile beton imalatı yapılmıştır. Barajda 4 çeşit enjeksiyon kullanılmıştır. Bu enjeksiyonların amacı kütle ve part-döküm (Şekil 4.5) betonlar arası aderansı sağlamak içindir. Her kısmın beton özellikleri farklılık göstermektedir. Bir anoya yaklaşık 2800 $m^3$ beton dökülmüştür.



**Şekil 4.5** Anolar ile bölünmüş gövde betonu imalatı (2019)

Gövdeye günde yaklaşık 8300 $m^3$ beton taşınarak ilerlenmiştir. Bu betonu sağlamak için aynı anda 3 beton tesisi birden çalışmıştır. Her 100 $m^3$'te numune alınmıştır. C20, C25, C30, C35 ve C40 sınıfı beton imalatları hava hattı ile sağlanmıştır.

Gövde betonu numuneleri 7, 28, 90, 180, 365 günlük testlere tabi tutulmuştur. Beton cinsi ve $D_{maksimum}$ birleşimine göre betondaki agrega oranları değişkenlik göstermiştir.

Gövde betonunda 5 çeşit agrega kullanılmıştır. Bunlar; 0-4 mm kırma kum, 4-12 mm çakıl, 12-30 mm çakıl, 30-63 mm çakıl, 63-120 mm çakıldır. Şekil 4.6'da depo edilen agrega sınıfı örneklendirilmiştir.



**Şekil 4.6** Agrega konkasör tesisinde 63-120 mm agrega depo alanı (2019)

Memba bölgesinde $D_{maksimum}$ 60 mm, mansap bölgesine $D_{maksimum}$ 30 mm, orta bölgeye ise $D_{maksimum}$ 120 mm tane çapı olan agregalardan beton dizayn edilip üretilmiştir. Beton santralinde 4 sınıf depolama yapılmıştır.

Bunların ilk ikisinde kum, üçüncüsünde 5-12 mm agrega (ince mıcır), dördüncüsünde 12-30 mm agrega (kaba mıcır) olarak ayrılmıştır. Kabaca beton dizaynındaki agrega oranı, %50 kum, %25 ince agrega, %25 kaba agrega kullanılmıştır. Beton numuneleri ile dayanım testlerinde; tek eksenli basınç dayanımı, nokta basınç dayanım, çekme basınç dayanımı gibi yöntemler kullanılmıştır. Küp numune basınç dayanım testinde ise pres makinesi kullanılmıştır. Numune 610 KN yükte kırılmıştır. Basınç dayanımı ise 27 MPa olarak kaydedilmiştir. C30 sınıfı beton için son dayanım 28 günlük kür sonucunda ortalama 30 MPa değerine ulaşmıştır. TS500'de C30 sınıfı betonun karakteristik basınç dayanımı 30 MPa'dır. Numuneler bu şartı sağlamaktadır. Şekil 4.7'de beton basınç dayanım testi örneklendirilmiştir. Basınç dayanımı ve pres değerleri her beton sınıfı için ayrı ayrı ölçülmüş ve standardize olarak üretimi yapılmıştır.




**Şekil 4.7** Numunelerin basınç dayanım mekanizmasında tayini (2019)

Akışkanlaştırıcı, su geçirimsiz katkı, uçucu kül, priz hızlandırıcı, hava sürükleyici etki yapan kimyasal katkı maddeleri beton karışımında kullanılmıştır. C20/60-120 beton sınıfında betonun hidratasyon ısısını düşürmek için uçucu kül dizayna oranlarınca eklenmiştir. Uçucu kül betonda hidratasyon ısısını düşürüp dayanımı artırıcı etki yapmıştır. Kullanılan uçucu külün %30'u zamanla çimento gibi tepki vermektedir. Akışkanlaştırıcı katkı, betonun yerleşimini kolaylaştırmıştır.

Su geçirimsiz katkı rezervuardaki suyun baraj gövdesinde oluşturabilecek tahribatı önlemek amacıyla beton dizaynına eklenmiştir.

Hava sürükleyici katkılar, donma çözünme dayanımını artırıcı etkiye sahiptir. Dökülen beton gövdede paletli dozer yardımıyla anoya yayılmıştır. Ekskavatör ucuna takılan 8'li vibratör ile beton yerleştirilmiştir.

### 4.1.2 Betonda kür

Beton imalatı yapılmadan önce belirli aralıklarla mikserlerden numune alınmıştır. Bu numuneler laboratuvara getirilmiş ve laboratuvarda kompresör yardımı ile kalıplardan çıkarılarak kür havuzlarına yerleştirilmiştir. Kür işleminin amacı çimentonun hidratasyonu ilerlerken betonun ısı ve nem altındaki davranışını tayin etmek ve kontrol altında tutmaktır. Bu işlem kür havuzu ismi verilen içi su dolu havuzlarda yapılmıştır (Şekil 4.8). Yusufeli Barajı ve HES Projesi'nde sol sahilde 12 adet kür havuzu içeren kalite kontrol laboratuvarları inşa edilmiş ve deneyler burada yapılmıştır. Kür havuzlarının sıcaklığı 20 ± 2 °C olarak sabit tutulmuştur. Numuneler, bu kür havuzlarında 7-28-90-180-365 gün bekletilmiştir. Gereken süreyi günü dolduran numuneler gün sonunda kırım yapılarak gereken testler gerçekleşmiştir.



**Şekil 4.8** Silindir numune kür havuzu ve kürlenen numuneler (2019)

### 4.1.3 Çimento özgül ağırlık tayini (Le Chatelier deneyi)

Çimento bir hidrolik bağlayıcıdır. Su ile reaksiyona girerek sertleşir. Beton dizaynına giren maddeleri birleştirmeyi sağlar. Çimentonun ana maddeleri kil ve kireçtaşıdır (kalker). Özel fırınlarda pişmiş kil ve kalkerin karışımına klinker adı verilir. Klinker soğutulur. Belli oranlarda su eklenir. Türüne göre katkı eklenerek ve öğütme türüne göre öğütülerek hazır hale getirilir.

Baraj gövdesinde kullanılan çimento türleri standartlara göre tayin edilip beton dizaynı yapılmıştır. Her kullanım için farklı özellik ve sınıfta çimento türü seçilmiştir. 5 Ana çeşit çimento tipi vardır. Bunlar; CEM-I Portland çimentosu, CEM-II Portland kompoze çimento, CEM-III Yüksek fırın cüruflu çimento, CEM-IV Puzolanik çimento, CEM-V kompoze çimentodur (TS-EN 197-1) (EK 2) (Yeğinobalı ve Ertün 2011).

Çimento yoğunluk tayininin amacı, ENV 197-1 standardının kapsamış olduğu tüm çimentoların yoğunluk tayininin TS EN 196-6 standardın göre belirlenme yöntemini

kapsar. Çimento yoğunluğunu tayin edebilmek için ilk olarak belli bir kütle çimentonun bir sıvı içerisinde (reaktif olmamalı) hava boşluğu alınarak hacmi belirlenir. 1 $cm^3$ hacimli boşluk içermeyen çimentonun kütlesinin gram cinsinden tespit edilmesiyle tayin edilir. Katı yoğunluğu ölçümünde içindeki boşluklar ile reaksiyona girmemesi için gaz yağı kullanılır.

Le Chatelier deneyi yapılırken; Le Chatelier balonunun içi gaz yağlı bir bez ile öncelikle temizlenmiştir. Balon haznesi reaksiyona girmeyen gaz yağı ile 0-1 ml kadar doldurulup kapağı kapatılmıştır. Le Chatelier balonunun sıcaklığının stabil bir hale gelmesi için 20±°C sıcaklığında bulunan kür havuzuna yerleştirilmiştir. Balon 30 dakika kür havuzunda bekletilmiştir. 30 dakika sonunda balon çıkarılıp gaz yağı seviyesi okunmuştur. 64 g, 42,5 MPa çimento, hassas terazide tartılmış ve yavaş bir şekilde balonun içine eklenmiştir.

Çökme işleminin tamamlanması için beklenmiş ve ardından Le Chatelier balonu 20±°C sıcaklığındaki kür havuzuna tekrardan yerleştirilmiştir. Tekrardan 30 dakika kür havuzunda bekleyen balon çıkarılıp ikinci bir okuma yapılmıştır. Sabit ölçüm 22 ml değerinde okunmuştur. Tartılan numuneler altına ve üstüne olmak üzere iki adet filtre kâğıdı yerleştirilip Blaine cihazına konumlandırılmıştır. Bu deneyde 1 gram çimentonun içinde bulunan tanelerin yüzey alanları toplamı hesaplanmıştır. Deney makinesinin teknik prosedürü gereğince en üstte bulunan parçacıklar alt konuma gelene kadar vakum tuşuna basılmış ve bu esnada da manometre içerisinde bulunan su yükselmiştir. Deneyler her defasında ikişer kez tekrarlanmıştır (Şekil 4.9).

Deney sonucunda;
Çimento 64 gram,
Kullanılan filtrenin geçirgenlik katsayısı = 0,6

Denklem (3.1) özgül ağırlık denklemidir ve Denklem (3.2) olarak yazılmıştır. Denklem (3.3) ile hacim elde edilmiş ve Denklem (3.4) olarak sonuç özgül ağırlık elde edilmiştir (Kızılcık ve Damlı 2019).

$$D = m / V \quad (3.1)$$

$$M = d*V \quad (3.2)$$

d: özkütle, $g/cm^3$
m: kütle, g
V: hacim, $cm^3$

$$22,6- 0,6 = 22\ cm^3 \text{ işlemi hacim (V)} \quad (3.3)$$

Denklem (3.2) formülü uygulandığı taktirde

$$64\ g / 22\ cm^3 = 2,909\ g/cm^3 \quad (3.4)$$

$d=2,909\ g/cm^3$ özgül ağırlık değeri bulunmuştur. Standart çimento özgül ağırlığı 3.12 $g/cm^3$'tür. Çimento özgül ağırlık deneyinin en az 2,9 $g/cm^3$ olması istenmiştir. Yapılan deney parametreleri ve deney koşullarına göre çimento özgül ağırlığı değişkenlik gösterebilmektedir. Bu deneyde hacim 74,135 $cm^3$ ve 0,5 katsayısı özgül ağırlık ile çarpılarak kütle bulunmuştur. Kütle 107,83 gr hesaplanmıştır. Sonrasında deney aletinde çimentoya hava basılıp saniye değeri hesaplanmıştır. Havanın çıkması için geçen süre 73,7 saniyedir. Deney sonucunda incelik değeri elde edilmiştir. Blaine aletinde 1 $cm^2$ alanda hesaplanan tanecik değeri 3734 g elde edilerek deney sonuçlandırılmıştır. Blaine incelik değeri en az 3500 $cm^2/g$ olması istenmiştir.




**Şekil 4.9** Le Chatelier deneyi ekipmanları ve deney aşamaları (2019)

### 4.1.4 Çimento kıvam yoğunluk tayini vicat deneyi

Deneyin amacı çimento kıvamı ve priz süresini saptamaktır. Vicat sondası ile çimento kıvamını, vicat iğnesi ile de çimentonun priz (sertleşme) başlama ve bitiş süreleri tayin edilir. Deneyin yapılacağı ortamın 20 ± 2 °C olması gerekir.

Yusufeli Barajı'nda R tipi yani hızlı priz alan çimento sınıfı tercih edilmiştir ve çimento testleri 2 günlük, 28 günlük olarak basınç dayanım kontrolleri sürekli yenilenmiştir. Gövde betonunda CEM-I R tipi kullanılmış ancak gövdeye yapılan perde enjeksiyonunda CEM-IV daha ince öğütülmüş çimento kullanılmıştır. Çimento tiplerinin büyük çoğunluğu 20-30 µm tane boyutu arasındadır. Ancak fabrikada öğütülme farklılığına göre 6,5-90 µm arasında çimentolar da üretilebilmektedir. Çimento, hidratasyonunun erken olan aşamalarında dayanım için ince öğütülmesi önem taşır. Hidratasyon sonucunda yüksek dayanım oluşturması için çimento inceliği ve çimento tanelerinin aktifliğine ihtiyaç duyulur. Çimento taneleri inceldikçe hidratasyon artar. Ayrıca hidratasyona uğrayan çimento kısmının dayanımı fazla olur. Bu nedenle gövdede perde enjeksiyonunda ince öğütülmüş çimento ile enjeksiyon yapılması dayanım gelişimini olumlu yönde etkilemiştir.

Kalıntı analizleri 45-90-200 mikro eleklerden geçmiştir. Çimentonun iyi elenmesindeki husus hidratasyona daha kolay girmesine yardımcı olmasıdır. Standart kıvam tayininde

amaç ENV 197-1 standardının kapsadığı tüm çimento sınıflarının gerekli olan su miktarının TS EN 196-3 standardına göre belirlenmesidir.

500 g çimento ve bu çimento değerinin %27,5'i kadar su ile çimento hamuru karıştırma kabında karıştırılmıştır. Çimento mikser aletinde 3 dakika sürmüştür işlem ve sonrasında 1,5 dk'da durdurulup kenarları temizlenmiştir. Vicat sondası sıfırlanıp sabitlenmiştir (Şekil 4.10). 32,5R ve 42,5R çimento tipi kullanılmıştır. Sonrasında deneyin yapılacağı hazne camı ve ring kalıbı yağlanmıştır.



**Şekil 4.10** Çimento karıştırma makinesi (cement mixer) ve vicat iğnesi (2019)

Kullanılacak sondanın çapı 10 ± 0,05 mm olmalıdır. Kalıp vicat sondasının ucu cama temas edecek şekilde sıfırlanmıştır. Sonraki işlemde karışım ringe dökülmüştür.

Vicat sondasının ucu, karışımın üst bölgesine gelecek şekilde sabitlenmiş ve birden açılmıştır. Değer 6 ± 2 mm olarak ölçülmüştür. Priz başı ve sonu deneyinde ise çimentonun 1 saatten önce priz almaması ve 10 saati de geçmemesi istenir. Vicat sonrasında sıfırlanmış ve prize bırakılmıştır. Prize bırakılma süresi 30 dakika aralıklarla kontrol edilecek şekildedir.

Yaklaşık 2 saat sonra istenilen değere ulaşmıştır. Sınır değeri 4-6 mm olan deney sonucunda 5,5 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.11).




**Şekil 4.11** Vicat deneyi yapım aşamaları (2019)

### 4.1.5 Metilen mavisi deneyi

Deneyin amacı agreganın kirlilik oranını tespit etmektir. Gövde betonu için kullanılan ve tasarlanan betonun agrega numuneleri ile çalışılmıştır. Numune 2 mm elekten geçirilerek 110°C sıcaklığındaki etüvde ovendry (fırın kurusu) olarak deneye hazır hale getirilmiştir.

Deneyde kullanılan malzemeler; karıştırıcı, kronometre, 1 L'lik beher, baget, metilen, şırınga ve turnusol kağıdıdır. Metilen maddesinin ömrü 28 günlüktür ve ışık geçirmeyen ortamlarda saklanır.

200 g agrega numunesi 500 ml saf su ile karıştırılmıştır. Bu karışım işlemi makinede 600 devirde ve 5 dk sürmüştür. 5 dk sonunda karışıma 5 ml metilen maddesi eklenmiştir. Karışım metilen maddesi ile 1dk daha karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittiğinde baget ile karışımdan numune alınmış ve süzgeç kağıdına damlatılmıştır.

İkinci aşamada 5 ml metilen maddesi daha karışıma eklenmiş 400 devirde 1 dk daha karıştırılmış ve sonunda yine numune alınmıştır.

Bu karışım ve damlatma yöntemi mavi renk damlanın etrafı dağılıp yeşil olana kadar devam etmiştir. Lekeler tam oluşana kadar 5 dk kuruması beklenmiştir. Kuruduktan sonra oluşan lekeler incelenmiştir. İşlem adımları 5 olduğunda mavi denk damlanın etrafındaki yeşil leke 1 mm genişliğine ulaşmıştır. Deney burada sonlanmıştır (Şekil 4.12). Deney sonucunda her damla 0,25 mm değere eşittir.

Malzemenin temiz olması için (beton agregası) damlaların etrafındaki lekeler 2,0 mm'yi aşmamalıdır. Aşması agreganın kullanılmayacak kadar kirli olduğu anlamına gelir.

Denklem (4.1) metilen mavisi deneyinde kullanılan ana denklemdir (Kabataş 2022). Denklem (4.2)'de deneyin denkleme uyarlanması verilmiş ve Denklem (4.3)'te Denklem açılarak Denklem (4.4) karşılaştırılması ile deney sonuçlanmıştır.

$$MB = (V1 / M1) \times 10 \quad (4.1)$$

$$(5 \text{ mm etilen} \times 5. \text{ damlatma}) / (200\text{gr malzeme}) \times 10 \quad (4.2)$$

$$(25/200) \times 10 \quad (4.3)$$

$$0{,}125 \times 10 = 1{,}25 \text{ ml} \quad (4.4)$$

1,25 ml < 2,0 ml olarak temiz agrega olduğu tayin edilmiştir.



**Şekil 4.12** Metilen mavisi deneyi uygulanmış deney filtreleri (2019)

### 4.1.6 Elek analizi

Elek analizi yapılmasının iki ana nedeni vardır. Malzemenin standartlara uyup uymadığını kontrol etmek ve gradasyonda beton dizaynını sağlamak içindir.

Konkasörden veya santralden gelen malzeme yıkanarak temizlenir ve daha sonra kurutulur. Dökülen malzeme elekler ile sarsılarak her elek üzerinde ve altında kalan kısım hesaplanmıştır. Geçen malzeme kümülatif olarak toplam agrega miktarına oranlanmıştır (Şekil 4.13). Bu şekilde agrega granülometri eğrisi elde edilmiştir.

Doygun kuru yüzey (DKY) için agrega özgül ağırlığı hesaplanmıştır. DKY agreganın yapısında bulunan boşlukların su ile dolu olduğu ancak yüzeyinin kuru olduğu durumdur.

Agreganın havadaki ağırlığı 5706 g bulunmuştur.

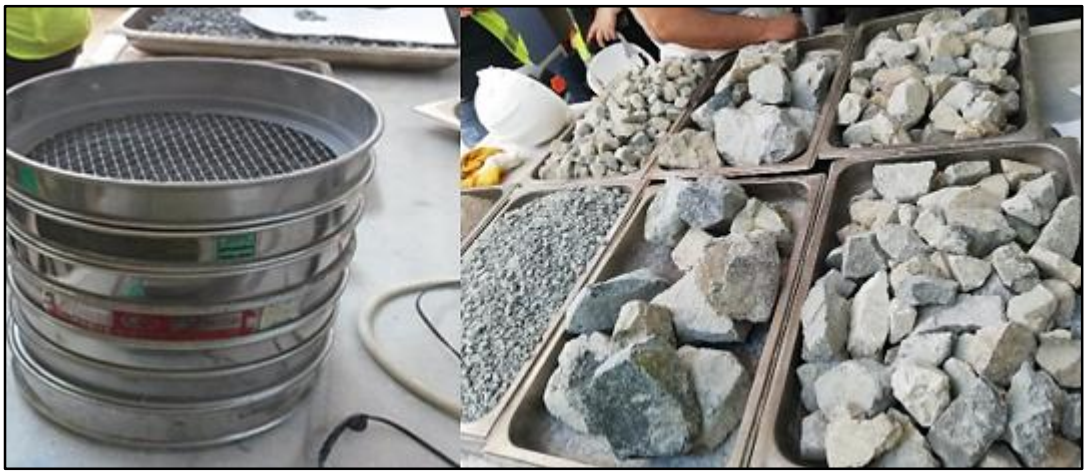
Sonrasında agrega suda tartılmış 3685 g değeri bulunmuştur.

Denklem (4.5) doygun kuru yüzey özgül ağırlık formülüdür (TS EN 1097-3), Denklem (4.6) olarak formül genişletilmiştir. Denklem (4.7)'de deney verileri yerleştirilerek agreganın özgül ağırlığı elde edilmiştir. Çizelge 4.6'da agrega verileri incelenmiştir.

$$\delta_{DKY} = M_{DKY} / (M_{DKY} - M_{SUDA}) \quad (4.5)$$

Havadaki ağırlık / (Havadaki ağırlık - Sudaki ağırlık) (4.6)

$$5706 / (5706 - 3685) = 2{,}82\ g/cm^3 \quad (4.7)$$



**Şekil 4.13** Agrega ve elek analizinde kullanılan ekipman (2019)

**Çizelge 4.6** Elde edilen agrega verileri

| VERİ ÖZELLİĞİ | 5-12 mm | 12-30 mm | 30-60 mm | 60-120 mm |
|---|---|---|---|---|
| Malzeme kuru ağırlık g | 3977 mm | 6410 mm | 6100 mm | 7595,5 mm |
| DKY ağırlık g | 4011 mm | 6453 mm | 6125 mm | 7625 mm |
| DKY suda ağırlık g | 2555 mm | 4127,5 mm | 3953 mm | 4933 mm |
| Kuru özgül ağırlık g | 2,731 mm | 2,756 mm | 2,808 mm | 2,822 mm |
| DKY özgün ağırlık g | 2,755 mm | 2,775 mm | 2,820 mm | 2,832 mm |
| Su emme % | 0,85 | 0,67 | 0,41 | 0,39 |

### 4.1.7 Slump deneyi

Slump çökme deneyi taze betonun akıcılığını, akışkanlığını ve kıvamını bulmak için yapılmaktadır. Yusufeli barajı gövde betonu slump deneyinde tayin yapabilmek için gövde betonu C-200/120 beton karışımı incelenmiştir. C-200/120 ifadesinin anlamı silindir numune için 200 kgf/cm$^2$ ve $D_{maksimum}$ 120 mm betondur. $D_{maksimum}$ ifadesi ise agreganın maksimum danesinin çapını ifade eder.

Slump deneyinden elde edilmesi gereken sonuçlar, farklı yapılarda farklı değerlerde olabilmektedir. Daha sık donatılı alanlar için daha akışkan ve slump değeri yüksek beton kullanılmalıdır. Baraj ve tünel gibi yapıların betonlarında daha düşük slump değerli beton sınıfları tercih edilir.

Deney yapımında slump hunisi alt tablası ile birlikte düz bir zemine yerleştirilmiştir. Beton numunesi 3 aşamada huniye aktarılmış ve yerleştirilmiştir. Her beton aktarımında 16 mm uzunluklu metal şiş ile 25 kez şişlenerek yerleşmesi sağlanmıştır. Deney aşamaları Şekil 4.14'te verilmiştir. Şişleme işlemi bittikten sonra huninin yüzeyi mala ile düzlenmiştir. Huni yavaş bir şekilde kaldırılmış ve çökmesi metre ile ilk düzey referans alınarak ölçülmüştür. Çökme sonucu 3 cm olarak tespit edilmiştir. Gövde betonunda dökülen betonun slump değeri 3 cm ve 5 cm arasında değişkenlik göstermektedir. S1 kıvam sınıfı betonlar için çökme değeri 10 mm- 40mm aralığındadır. S2 kıvam sınıfı için çökme değeri ise 50 mm- 90 mm aralığındadır.



**Şekil 4.14** Slump deneyi aşamaları (2019)

### 4.1.8 Los Angeles deneyi

Los Angeles deneyinin amacı agrega malzemesinin aşınma, darbe gibi etkilere karşı dayanıklılığı ölçmektir. Los Angeles deneyi için yapılmış özel makineler vardır ve deneyler bu alette yapılmıştır.

Deneyde kullanılan standartlar TS EN 1097-2 ve ASTM C131 standartlarıdır. Bu aletin iç çapı 71,1 + 0,5 cm olacak şekildedir ve hacmine göre agrega numunesi almaktadır. Deneyde numune ile birlikte çelik bilyeler de hazneye konmaktadır. Alet tamburu döndükçe bu bilyeler numuneler üzerinde vurarak aşındırma yapmaktadır. Bu şekilde agreganın dayanıklılığı ölçülmektedir.

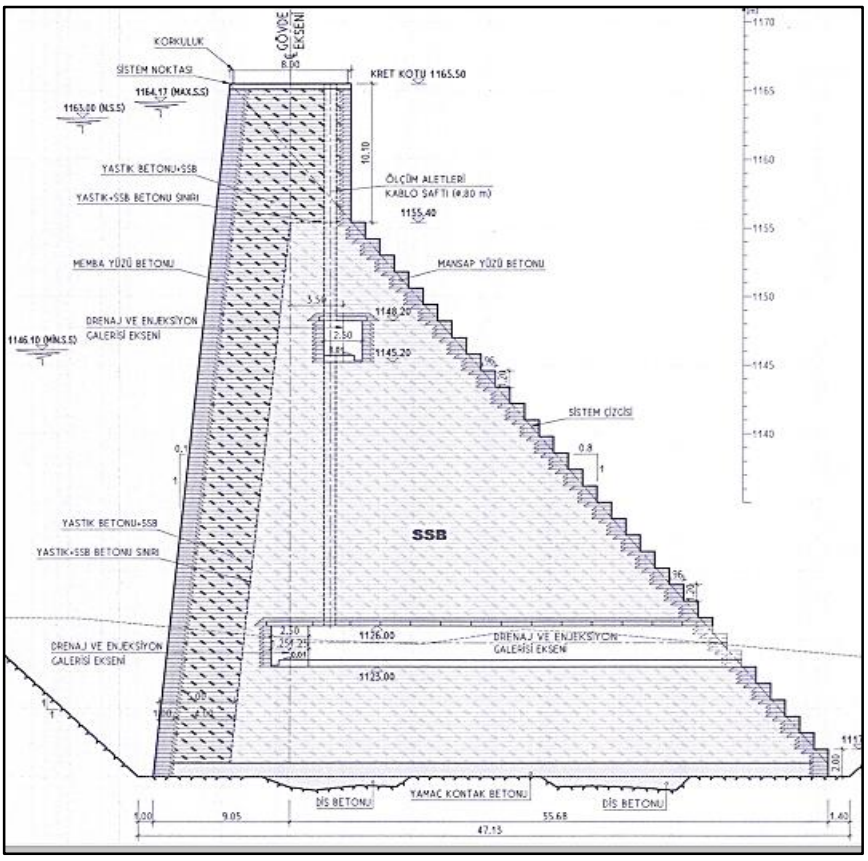
Deneyde elek analizi yapılan ve 10 mm-14 mm aralığı gradasyonuna sahip agrega kullanılmıştır. 5 kg agrega tamburun içerisine yerleştirilmiş ve 12 adet demir bilyeler de eklenmiştir (Şekil 4.15). Eklenen bilyelerin ağırlığı 390 g ve 445 g arasında olmalıdır. Eklenen bilyeler ile bu standart sağlanmıştır. 500 tam tur dönen makine, 15 dk boyunca aşınma sağlar. Bu aşınma 12 numaralı elekten geçen kısımdır. Kayıp yüzdesi ise %8,2 bulunmuştur. Sınır değer ise en fazla %30'dur.



**Şekil 4.15** Los Angeles deneyi tamburu ve agrega numuneleri (2019)

## 4.2 Handırı Barajı

Baraj, Çankırı iline 22 km uzaklıkta Handırı Köyü'nde inşa edilmiştir. Günümüzde sıklıkla kullanılan teknik olan SSB türü barajdır. Talvegden 42,50 m olmak üzere kret yüksekliği 50,5 m'dir. Kret uzunluğu ise 174 m'dir. Proje kesiti Şekil 4.16'da verilmiştir.




**Şekil 4.16** Handırı Barajı proje kesiti

Barajın 2,3 milyon metreküp su depolama kapasitesi vardır. Çizelge 4.7'de baraj hidrolik verileri tablolaştırılarak incelenmiştir. 6840 dekar tarım arazisini sulamak ve çevre bölgelerin içme suyunu karşılamak amaçlı yapılmıştır. Dizaynda SSB tipi baraj seçilmesinin en önemli nedenlerinden biri su içeriğinin düşük olmasıdır. Birim ağırlığı yüksek olan SSB tipi barajlar diğer dolgu barajlara göre çok daha düşük hacim ile tasarlanabilmektedir. Ekonomik olmasının yanı sıra hızlı imal edilen SSB tipi, Handırı Barajı projelendirmesinde etken oluşturduğu için seçilmiş ve inşa edilmiştir.

**Çizelge 4.7** Baraj hidrolik verileri

| | |
|---|---|
| **Drenaj alanı** | 37,84 $km^2$ |
| **Yıllık gelen su** | 5300 $hm^3$ |
| **$Q_{50}$ yıllık taşkın piki** | 39,16 $m^3/s$ |

Çizelge 4.8'de baraj göleti alanı, Çizelge 4.9, Çizelge 4.10, Çizelge 4.11, Çizelge 4.12'de proje karakteristik verileri ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yıllık 5.000.000 TL gelir artışı sağlaması planlanmıştır. DSİ 5. Bölge 52. Şube Müdürlüğü tarafından yaptırılmıştır. 2016 yılında sözleşmesi imzalanan baraj, 2019 yılı şubat ayında hizmete açılmıştır. Çankırı Merkez Handırı Barajında 15 Haziran 2020 tarihinde su maksimum seviyeye ulaşmış olup dolu savak üzerinden tahliye çalışmaları yapılmıştır (Şekil 4.17). 2019 yılından günümüze hala hizmet vermektedir.




**Şekil 4.17** Handırı Barajı (DSİ, 2021)

**Çizelge 4.8** Gölet alanı özellikleri

| | |
|---|---|
| **Minimum su seviyesi** | 1145,10 m |
| **Maksimum su seviyesi** | 1164,17 m |
| **Normal su seviyesi** | 1163 m |
| **Normal su seviyesinde göl hacmi** | 1.016 $hm^3$ |
| **Maksimum su seviyesinde göl hacmi** | 2.179 $hm^3$ |
| **Maksimum su seviyesinde göl alanı** | 135.935 $m^2$ |

**Çizelge 4.9** Baraj gövdesinin teknik özellikleri

| | |
|---|---|
| **Tipi** | Silindirle sıkıştırılmış beton dolgu |
| **Talveg kotu** | 1123 m |
| **Temel kotu** | 1015 m |
| **Kret kotu** | 1165,50 m |
| **Talvegden yükseklik** | 42,50 m |
| **Temelden yükseklik** | 50,50 m |
| **Kret uzunluğu** | 174 m |
| **Kret genişliği** | 8 m |
| **Gölet gövde hacmi** | 109.500 $m^3$ |
| **Memba şevi** | 0,10 Yatay/1,0 düşey |
| **Mansap şevi** | 0,80 Yatay/1,0 düşey |

**Çizelge 4.10** Dolusavak tünelinin teknik özellikleri

| | |
|---|---|
| **Tipi** | Karşıdan alışlı kontrolsüz dolusavak |
| **Yeri** | Gövde üzerinde |
| **Yaklaşım kanalı kotu** | 1162,50 m |
| **Eşik yükseltisi** | 1163 m |
| **Eşik genişliği** | 30 m |
| **Dolusavak su yükü (HO)** | 1,17 m |
| **Maksimum su seviyesi** | 1164,17 m |
| **Boşaltım kanalı genişliği** | 30 m |
| **Tasarım debisi ($Q_{1000}$)** | 79,05 $m^3/s$ |

**Çizelge 4.11** Derivasyon tünelinin teknik özellikleri

| | |
|---|---|
| **Yeri** | Sağ sahil |
| **Tipi** | Kare kesitli konduvi |
| **Eğimi** | %0,07 |
| **10 Yıllık Taşkın Debisi ($Q_{10}$)** | 18,85 $m^3/s$ |
| **25 Yıllık Taşkın Debisi ($Q_{25}$)** | 29,91 $m^3/s$ |
| **Boyutlar** | 2,0x2,0 $m^2$ |
| **Konduvi Uzunluğu** | 82,65 m |
| **Derivasyon Giriş Kotu** | 1126,26 m |
| **Derivasyon Çıkış Kotu** | 1120,68 m |

**Çizelge 4.12** Dipsavak geçişinin teknik özellikleri

| | |
|---|---|
| **Yeri** | Gövde içinde |
| **Tipi** | Çelik boru |
| **Amacı** | Sulama ve dereye deşarj |
| **Vana tipi** | Kelebek/Küresel sürgülü vana |
| **Cebri boru çap** | 0,80 m |
| **Sulama modülü** | 0,44 Lt/s/ha |

Handırı Barajı enerji tesisi teknik özellikleri EK 1'de incelenmiştir.

### 4.2.1 Beton dizaynı

SSB üretimi yapılırken ilgili şartnameler doğrultusunda kontrol ile imal edilmiştir (T.C. Tarım Orman Bakanlığı Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) İnşaat Teknik Şartnamesi). Beton dökümü sırasında hazır beton olarak SSB betonu ilk önce, mikser iş makinaları ile döküm işlemi gerçekleşmiştir. Daha sonra silindir ismi verilen ağırlık sahibi iş makinaları ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Batardo haricinde proje tek gövde beton olarak projelendirilmiştir. Gövde betonunun tümü SSB ile inşa edilmiştir.

Belirlenen karışım tasarımları şantiyede doğrulama yapmak amacıyla üretilmiş ve belirli sayıda numuneler alınarak basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kesme dayanımı ve elastisite modülü ile geçirgenlik deneyleri yönünden araştırılmıştır.

Beton numuneleri şantiye laboratuvarında ayrı olarak testlere tabi tutulmuştur. Bu testler 7-28-90-180-365 günlük numuneler ile düzenli olarak sağlanmıştır.

C30 sınıfı 7 günlük numuneden alınan beton numunesi ile basınç dayanım deneyinde beton dayanımı ortalama 26,78 N/mm$^2$ bulunmuştur. Beton basınç dayanımının referans değer ile karşılaştırılması betonda kür başlığı altında ayrıntılı olarak da incelenmiştir. Barajın ilk biten bölümü batardodur. Bunun nedeni baraj şantiyesinden suyu uzak tutmak ve sağlıklı inşaat yapmaktır. Baraj temeline başlanmadan önce alt temel kaya olarak sağlam zemine kadar kazı yapılmıştır. Temel çalışmaları bu sağlam kaya üzerine yapılmıştır.

Baraj tasarımında dolu savak olarak barajın orta bölmesinden tahliye sağlanacak şekilde görsel olarak da estetik bir tasarım yapılmıştır (Şekil 4.18).



**Şekil 4.18** Handırı Barajı gövde yapımı (2019)

Betonda kullanılan maksimum dane çapı $D_{maksimum}$ 63 mm'dir. Beton dizaynında su/çimento oranı w/c 0,49 olarak tespit edilmiştir.

İki çeşit beton sınıfı kullanılmıştır bunlar; C 20/25 (memba ve mansap) ve C 25/30 (dolusavak enerji kırıcı yapıları betonu) olarak deneylere tabi tutulmuştur. Şekil 4.19'da su tahliye edilen enerji kırıcı dolusavak ile tahliye örneklenmiştir. 20 MPa silindir, 25 MPa küp numune dayanımıdır.



**Şekil 4.19** Dolusavak enerji kırıcı (2021)

Betonda CEM I 42,5 R tip çimento kullanılmıştır. Kimyasal katkılar kullanılmıştır ve bu şekilde beton dizaynı oluşturulmuştur. Beton karışım dizaynı Çizelge 4.13'te $D_{maksimum}$ 25,4 mm için incelenmiştir.

**Çizelge 4.13** Bir metreküp beton için karışım dizaynı ($D_{maksimum}$ 25,4 mm)

| **BİLEŞENLER/COMPONENTS** | **1 $m^3$** | **21 $dm^3$** |
|---|---|---|
| **Çimento/Cement** | 335 g | 7035 g |
| **Su/Water** | 137 g | 2874 g |
| **Katkı/ (Arstep 50 S)** | 3,65 g | 76,7 g |
| **Uçucu kül (ÇAYIRHAN)** | 30 g | 630 g |
| **Kum/Sand (0-5 mm)** | 995 g | 20900 g |
| **İnce çakıl (1-12 mm)** | 417 g | 8765 g |
| **Kaba çakıl (12-25 mm)** | 436 g | 9149 g |
| **Toplam/Total** | 49429 g | 2354 g |

Barajda kullanılan beton sınıflarına çeşitlendirilmiş agrega ayrımında maksimum dane çapı 63 mm çakıldır. Agrega sınıfları ayrı olarak agrega bölümünde incelenmiştir.

### 4.2.2 Betonda kür

Handırı Barajı'nda beton kürleme işlemi şantiyede bulunan laboratuvarda yapılmıştır. Şantiye laboratuvarında bulunan kür havuzlarında numuneler 7-28-90-360 günlük olarak teste tabi tutulmuştur. C20/25 ve C25/30 beton sınıfından küp ve silindir numuneler dökülmüştür. Betonun hava içeriği %1 olarak laboratuvardan teyit edilmiştir. Taze beton sıcaklığı 24,2 °C'dir.

Silindir numuneler 250x500 mm, küp numuneler ise 150x150 mm'dir. Küp numuneler küp havuzunda bekletildikten sonra basınç mukavemeti ölçülmüştür (Şekil 4.20). Ölçüm sonucu C30 sınıfı beton 7 günlük dayanım ortalama 22,5 MPa, 28 günlük basınç mukavemeti ise yine ortalama 28,9 MPa olarak saptanmıştır. C30 sınıfı beton için TS500'de gereken basınç dayanım değeri 30 MPa karakteristik basınç dayanımı olarak belirtilmiştir.



**Şekil 4.20** Kür havuzunda silindir beton numuneleri (2019)

### 4.2.3 Çimento özgül ağırlık saptama

Özgül ağırlık, maddenin 1 birimi için hesaplanan hacim ağırlığını ifade etmektedir. Özgül ağırlığın saptanması için öncelikle çimento ağırlığının bilinmesi gerekmektedir. Hesaba katılacak diğer bir parametre ise çimento hacmidir. Parametreler sağlandığı durumda yoğunluk formülü ile özgül ağırlık elde edilebilmektedir.

Çimento deneyleri 2-7-28 günlük yapılmış ve bu şekilde kontrol sağlanmıştır. Kg/$m^3$ cinsi üzerinden değer hesaplanmış ve yapılan deneyde ayrıca incelenen çimento cinsi beton tasarımında kullanılan CEM I 42,5 R'dir. Denklem (4.7) ve Denklem (4.8) dönüşümlerinden yararlanılarak özgül ağırlık hesaplamaları aşağıda verilmiştir (Kızılcık ve Damlı 2019).

1 $m^3$ dizayn içerisinde hesaplanan santral değerlerine göre;
324 kg çimento ağırlık
103,85 $m^3$ çimento hacmi

M= d*v formülü kullanılarak (4.7)

d=M/v (4.8)

324 kg / 103,85 $m^3$ = 3,12 $kg/m^3$

### 4.2.4 Agrega birim hacim ağırlık

Agreganın gevşek ve sıkışık haldeki birim hacmini ölçmek için yapılır. Deneyde kullanılan malzemeler; deney ölçü kabı, şişleme çubuğu, hassas terazi, sarsma tablasıdır. Gevşek birim hacim ağırlığını tayin etmek için ilk deney yapılmıştır.

Etüvden çıkarılan kuru malzeme laboratuvara getirilmiş ve 0-5 mm, 5-15 mm, 15-25 mm, 25-63 mm malzemeler 63 mm elekten geçirilmiş ve 63 mm'den büyük agrega olmadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.21'de laboratuvar ortamında hassas terazi ile deneyler için hazırlanan agrega örneklenmiştir.

Agreganın arı olduğu malzeme halinin birim hacim ağırlığına bakılmak için deney adımlarına geçilmiştir. Homojen olan agrega deney numune kabına yaklaşık 20-30 cm yükseklikten agrega doldurulmuştur. Denek aleti üzeri tesviye edilerek düz bir yüzey haline getirilmiştir.

Deney kabı yüzeyi dahi tamamen dolu olacak şekilde ağzına kadar doldurulmuştur. Hassas terazili tartıda ölçümü yapılmıştır. Sonuç 24,494 kg olarak ölçülmüştür.




**Şekil 4.21** Laboratuvarda hassas cihaz ile agrega tartımı (2019)

Bu şekilde gevşek birim hacim ağırlık tayin edilmiştir ancak beton türü SSB (silindirle sıkıştırılan beton) olduğu için bu durumda önemli olan husus agreganın sıkı birim hacim ağırlığıdır. Bu sebepten ötürü sıkı birim hacim ağırlık ince bir hesap ile deneye tabi tutulmuştur.

Agrega sıkı birim hacim ağırlık tayini için etüvden çıkan kurutulmuş malzeme çimento uçucu kül ile birlikte karışım oluşturulmuştur. Homojen karışım 68 kg'dır bu miktar dökülen betonun %3,22'sidir. 82,5 kg olan çimento ve külün de %3,22'si olan 2615 g karışıma eklenmiştir. 130 kg su karışımın %3,22'si olan 4150 g civarı da karışıma eklenmiştir. Tüm karışım homojen hale getirildikten sonra numune kabı üzeri mastarlanarak (yüzey düzeltmesi) sarsma tablasına yerleştirilmiştir.

Numune, numune kabına 3 ayrı parça halinde eklenmiştir (İlk 1/3'lük kısmı, sonra 2/3, daha sonra 3/3). Her ekleme yapılırken şişleme işlemi yapılarak sarsma tablası üzerinde numune kabı doldurulmuştur. Şişleme işlemi her bir katman için 25 defa yapılmıştır (Şekil 4.22). Bu şekilde homojen bir numune elde edilmiştir. En son tartılma işlemi tekrar

yapılmıştır. Tartım sonucu 29,783 kg olarak bulunmuştur. Deney her agrega sınıfı için laboratuvarda tekrarlanmış ve agrega dane çaplarına göre birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.14'te verilmiştir.



**Şekil 4.22** Sarsma tablası üzerinde numune içindeki betonu işleme (2018)

**Çizelge 4.14** Deney sonuçları

| DANE ÇAPI | ÖZGÜL AĞIRLIK |
|---|---|
| 0-5 mm | 2,62 g/cm³ |
| 1,18-12,7 mm | 2,62 g/cm³ |
| 12,7-25,4 mm | 2,62 g/cm³ |
| 25,4-63,5 mm | 2,65 g/cm³ |

### 4.2.5 Elek analizi

Agregalar, büyük dere ismi verilen dere yatağından çıkarılıp agrega yığım alanında depolanmış sonrasında beton santraline gelip SSB betonu yapımı için kullanılmıştır. Agregalar beton imalatı için santrale taşınıp sonrasında deneylere tabi tutulmuştur. 4 sınıf agrega kullanılmıştır. Bunlar;

0-5 mm ince kum, 5-15 mm çakıl, 15-25 mm çakıl, 25-63 mm çakıldır. Elek analizi her sınıf agrega için ayrı olarak deneye tabi tutulmuştur.

15-25 mm çakıl sınıfı agrega için yapılan elek analizi ayrı olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.23). Konkasörden agrega alınmıştır ve tartım sonucu agrega ağırlığı 4535 g olarak kaydedilmiştir (Çizelge 4.15). Sırası ile verilen eleklerden geçirilmiştir.

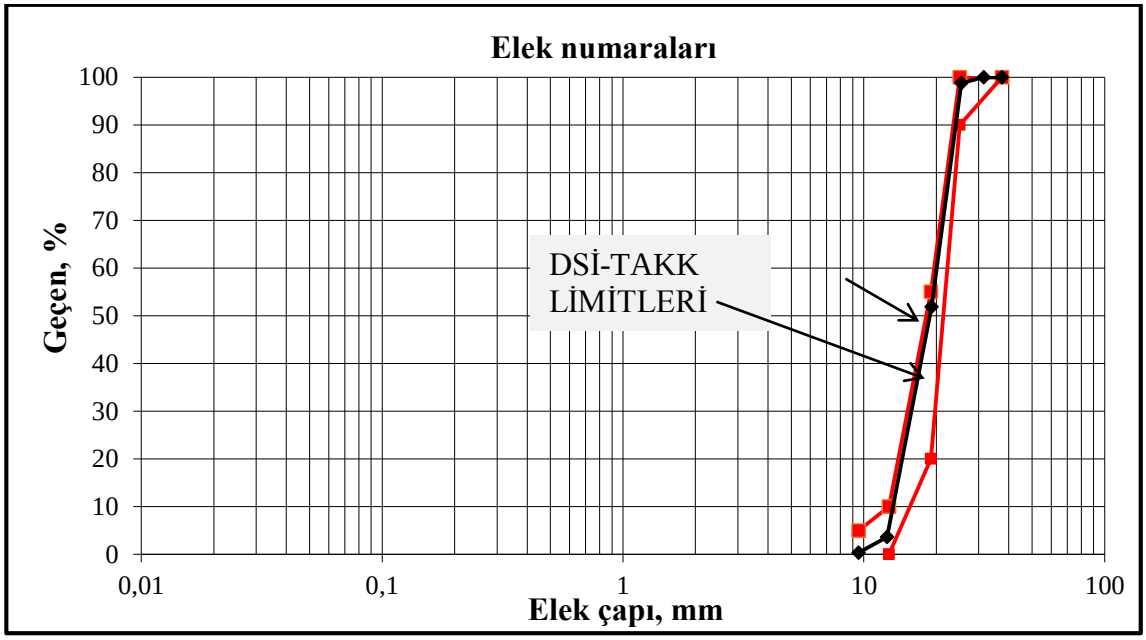


**Şekil 4.23** Elek analizi deneyi (2019)

**Çizelge 4.15** Elek analizi % sonuç verileri

| ELEK ÇAPI | ELEKTE KALAN | KALAN % | TOPLAM GEÇEN | GEÇEN % |
|---|---|---|---|---|
| 37,5 mm | | | 4535,00 g | 100,0 |
| 31,5 mm | | | 4535,00 g | 100,0 |
| 25,4 mm | 56 g | 1,2 g | 4479 g | 98,8 |
| 19,1 mm | 2126 g | 46,9 g | 2353 g | 51,9 |
| 12,50 mm | 2189 g | 48,3 g | 164 g | 3,6 |
| 9,50 mm | 147 g | 3,2 g | 17 g | 0,4 |

Elde edilen elek analizi sonucundan agrega gradasyonu elde edilmiştir. Şekil 4.24'te agrega granülometri eğrisi çizilmiştir.




**Şekil 4.24** Agrega granülometri eğrisi (Siyah ile gösterilen agreganın granülometri eğrisidir; kırmızı ile gösterilen DSİ ve TAKK limit sınır değerleridir)

### 4.2.6 Slump deneyi

Deney yapılırken beton numunesi mikserde alınmış ve çökme hunisi düz tablalı bir zemine yerleştirilmiştir. Huniye numune 3 aşamada yerleştirilmiştir. Her aşamada şişleme çubuğu ile şişlenerek betonun yerleşmesi sağlanmıştır. Numune hunisi tamamen dolduğunda üst yüzeyi düzlenmiştir. Sonrasında huni yavaşta yukarı doğru çekilerek çıkarılmıştır. Şişleme çubuğu huninin üzerine konularak beton üst yüzeyi referans alınmıştır.

Ölçülen değer betonun çökme değeri yani slump değeri olarak kaydedilmiştir. Handırı Barajında SSB beton ile beton dizaynı yapıldığı için beton kıvamı normal imal edilen betonlara göre daha katı projelendirilmiştir. Bunun amacı beton dökümünden sonra dayanımı direkt olarak beton gövdesinde silindirle sıkıştırılan beton ile sağlanmasıdır.

SSB barajlar çökmeyen yani 0 slump değerine sahip çakıl, kum, çimento, su ve katkı malzemelerinin karışımı olan beton türü olarak tanımlanır. Handırı Barajı da 0 slump olarak tasarlanmıştır (Şekil 4.25).



**Şekil 4.25** Slump deneyi sonucu numune (2018)

Slump değeri küçük olduğu için milimetreler ile ölçülebilmiştir. 25,3°C sıcaklıkta beton mikserinden alınan beton numunesinin slump değeri 11,0 mm olarak kayıt altına alınmıştır. Bu Handırı barajı için ortalama bir slump değeridir.

### 4.2.7 Ve-Be deneyi

Ve-Be testi Handırı Barajı şantiye laboratuvarında düzenli olarak yapılmıştır. Deney esnasında Ve-Be deney mekanizmasını sağlayan makine kullanılmıştır.

Deneyde kullanılan ekipmanlar; Ve-Be titreşimli masa, numune kovası, slump hunisi ve şişleme için kullanılan çubuk, şeffaf diskli çubuk kullanılmıştır.

Ve-Be testi SSB gibi kuru, çok kuru ve katı betonların kıvamını ayrıntılı olarak incelemeyi sağlar. Kendiliğinden yerleşen betonlar için yaygınlıkla kullanılır.

ASTM C1170'e göre Prosedür A veya B'ye göre deney prosedürü uygulanmıştır. Ve-Be süresi bu standartlara göre minimum 5 saniye, maksimum 35 saniye olmalıdır. İdeal olan süre ise 20 saniye ve 30 saniye arasında değerdir. Ve-be deneyi esnasında hesaplanan parametreler Çizelge 4.16'da tablolaştırılmıştır.

**Çizelge 4.16** Ve-Be deney sonuç parametreleri

| | |
|---|---|
| **Ve-Be kap darası = (a)** | 7,712 kg |
| **Ve-Be kabı + beton = (b)** | 28,770 kg |
| **Kap içindeki beton kütlesi (c) = (b) - (a)** | 21,058 kg |
| **Ve-Be kabı hacmi = (v)** | 8,670 $m^3$ |
| **Taze beton Ve-Be yoğunluğu = (c) / (v)** | 2,429 $kg/m^3$ |

Deney yapılırken ilk olarak mikserden laboratuvara getirilen beton numunesi slump hunisine yerleştirilip slump değeri kontrol edilmiştir. Slump değerine bakılırken yine her katmanda 25 defa şişleme yapılarak 3 katman halinde huniye yerleştirilmiştir (1/3-2/3-3/3 şeklinde eklenmiştir).

Slump 0 çıkan çökmesiz beton sarsma tablasında, üzerinde Ve-Be deney numunesinde cam diskli çubuk yerleştirilerek hazneye yayılmıştır. Cam diskli çubuk betonun deney ölçeğine yayılımını gerçekleştirmiştir (Şekil 4.26). Çubuk olan metal bölümü ise ağırlıkların üstüne geçirilmesi içindir.



**Şekil 4.26** Ve-Be deneyi (2018)

Bir sonraki aşamada ağırlıklar da çubuk üzerine geçirilerek sarsma tablası sarsma tablası çalıştırılmıştır (Şekil 4.27).



**Şekil 4.27** Ve-Be deneyi ağırlık yükleme (2018)

Daha sonra numune kabının 40 saniye içerisinde dip kısmında bulunan harç kaç saniyede yukarı çıkması kontrol edilmiştir.

Deney sonucu 22 saniye olarak kayda geçirilmiştir. Bu standartta verilen ideal olan süre parametreleri (15-30 sn) içerisindedir.

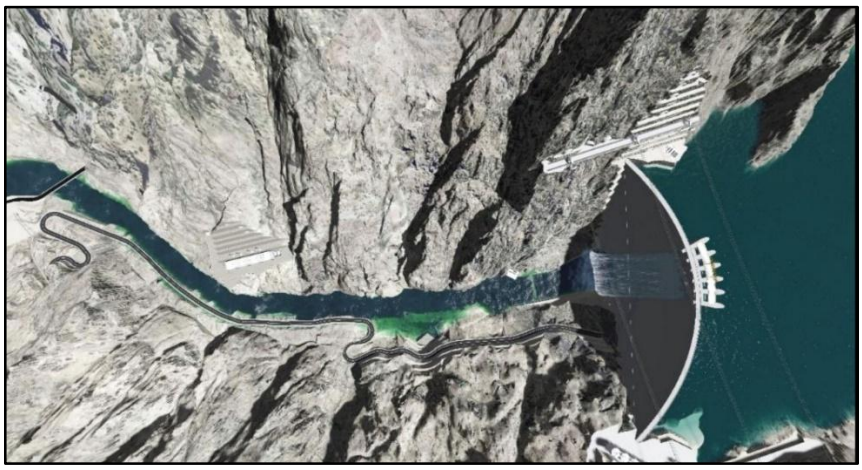
Buradan anlaşılmaktadır ki tasarlanan SSB kendiliğinden yerleşen betonun kıvamı imal edilebilmesi için uygundur.

# 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yusufeli Barajı ve HES Projesi, projelendirilmede etken olan unsurların bazıları ve tasarımın son halini ortaya koyan parametreler tayin edilmiştir. Bu parametreler projenin son halinde; agrega, çimento, beton ve tüm parametrelerin sonucu olarak da barajı oluşturmuştur.

## 5.1 Çoruh Nehri üzerinde Yusufeli Barajı

Yusufeli Barajı, Çoruh Nehri üzerinde kuruludur. Çoruh Nehri Erzurum, Bayburt, Artvin sınırlarından geçmekte ve Gürcistan üzerinden Karadeniz'e dökülmektedir. Çoruh Nehrinin ortalama debisi 278 $m^3$/s'dir. Nehrin toplam uzunluğu 431 km'dir. Nehir yıllık debi olarak Yusufeli Barajı'nın (Şekil 5.1) 1/30'una karşılık gelmektedir. Barajın maksimum işletme seviyesindeki su hacmi 2,3 milyar $m^3$'tür. Gövde betonunda toplam 4 milyon $m^3$ beton kullanılmıştır. Barajın kemer etkisi ile baraj yükü dağlara aktarılmıştır. Baraj gövdesinin ön tarafı basınç, arka tarafı çekme yüklerini karşılayacak şekilde statik projelendirilmiştir. Konsolidasyon enjeksiyonu ile temele güçlendirme yapılmıştır. Temelde zemine iyileştirme gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.1** Yusufeli Barajı şema

Yusufeli Barajı'nın sağ sahil bölgesinin altında enerji yapısı bulunmaktadır. 2 adet dolusavak sistemi yapılmıştır.

İlk dolusavak sisteminde gövde üstünden tahliye edilerek gövde bölümünün altındaki enerji kırıcı havuza aktarılır ve enerji tribünleri burada harekete geçerek elektrik üretir. Şekil 5.2'de yapı üstündeki dolusavak bölümü örneklendirilmiştir.



**Şekil 5.2** Yusufeli Barajı dolusavak (Şantiyede sitesi inşaat mühendisliği uygulamaları, 2021)

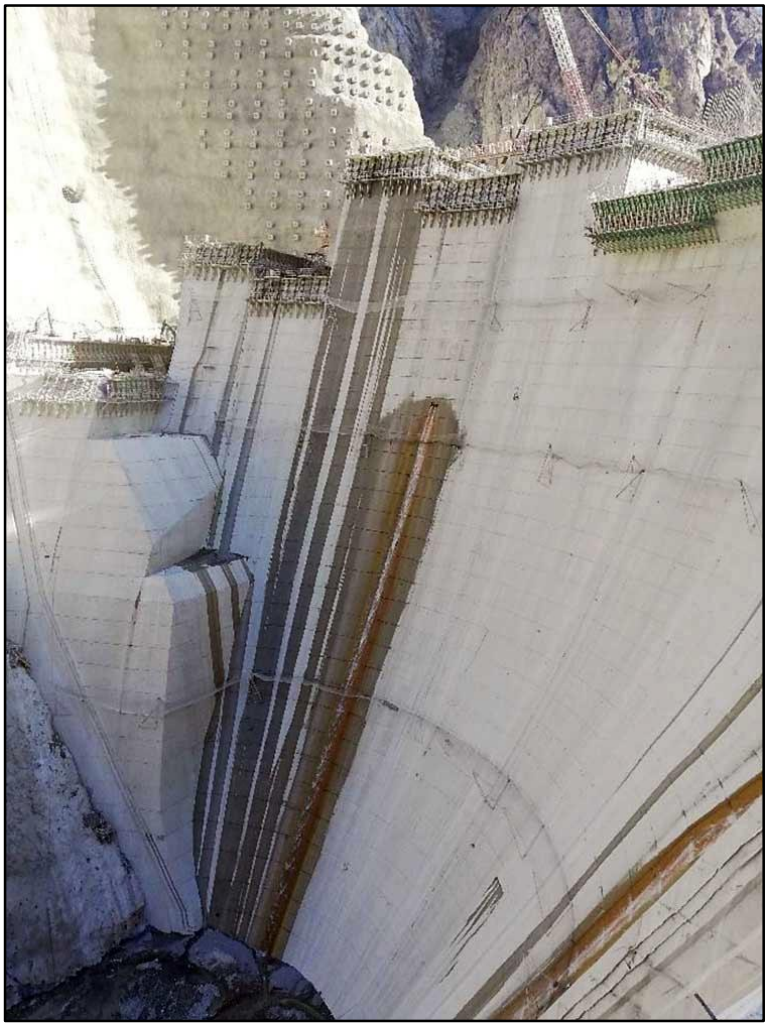
İkinci sistem ise tünelli dolusavak sistemidir. Bu tüneller ile tahliye işlemi gerçekleştirilir. Tüneller, 8,5 m çap ve 2300 m boyundadır.

Yusufeli Barajı ve HES Projesinin uygulanmasında agrega, çimento, beton ve diğer teknik özellikler hassas ve detay olarak incelenmiştir.

### 5.1.1 Beton

Yusufeli Barajı'nın gövdesinin oturacağı bölgelere yastık betonu dökülmüştür. Yastık betonu, ana kaya ve gövde arasındaki elastisite modülünü sağlamak için 4,2 milyon $m^3$ beton dökülmüştür. Beton imalatının yapılabilmesi için yazın soğutma sistemi kışın ise ısıtma sistemi kullanılmıştır.

Yusufeli Barajı gövde betonu anolara bölünmüş ve 28+1 olmak üzere 29 anoda gövde tamamlanmıştır (Şekil 5.3). Her 10 anoda 1 galeri yapılmıştır.



**Şekil 5.3** Anolar ile beton imalatı yapılan baraj gövdesi (2019)

Şantiyede barajın farklı bölümleri için farklı betonlar dizayn edilmiştir. Beton sınıflarına ve çeşitlerine göre karışımlar otomasyon sistemi ile ayarlanmıştır. Otomasyon sisteminde, değerler sisteme girdi yapılmış ve buna göre beton karışımları yapılmıştır. Bu sistem otomatik olarak çalışıp 20 sn karışım yapılıp mikserlere ve konveyör hattı haznesine aktarılmıştır.

Hava sürükleyici katkı hariç beton içerisinde kullanılan katkılar, beton mukavemetini artırıcı etki yapmıştır. Kullanılan uçucu kül ise hidratasyon ısısını düşürmek gibi amaçlar için kullanılmıştı. C20-C40 arası sınıflarda beton imal edilmiştir. Gövde betonu numuneleri 7-28-90-180-365 günlük testlere tabi tutulmuş ve kalite kontrolü bu şekilde sağlanmıştır. Test için kullanılan numune boyutları 15x30 cm silindir ve 20x20 cm küp

numune hazneleri ile sağlanmıştır. Betonların basınç dayanımları standarda uygun şekilde imalat yapılmıştır.

C20 sınıfından düşük olan sınıflar için donatı kullanılmamıştır. C20'den büyük sınıflar için donatılı beton tasarımı yapılmıştır. Her beton sınıfı için dayanım değerleri farklılık göstermiştir ancak standartlarda bu parametreler net olarak incelenmiştir (Çizelge 5.1). Tüm beton dizaynı ilgili yönetmelikler uyarınca tasarlanmıştır (T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Beton İşleri Teknik Şartnamesi).

**Çizelge 5.1** TS500 beton sınıfı parametreleri

| **BETON SINIFI** | **KARAKTERİSTİK BASINÇ DAYANIMI, $F_{CK}$ MPa** | **EŞDEĞER KÜP (150 mm) BASINÇ DAYANIMI MPa** | **KARAKTERİSTİK EKSENEL ÇEKME DAYANIMI, $F_{CTK}$ MPa** | **28 GÜNLÜK ELASTİSİTE MODÜLÜ, $E_C$ MPa** |
|---|---|---|---|---|
| C16 | 16 | 20 | 1,4 | 27 000 |
| C18 | 18 | 22 | 1,5 | 27 500 |
| C20 | 20 | 25 | 1,6 | 28 000 |
| C25 | 25 | 30 | 1,8 | 30 000 |
| C30 | 30 | 37 | 1,9 | 32 000 |
| C35 | 35 | 45 | 2,1 | 33 000 |
| C40 | 40 | 50 | 2,2 | 34 000 |
| C45 | 45 | 55 | 2,3 | 36 000 |
| C50 | 50 | 60 | 2,5 | 37 000 |

Beton ortalama sıcaklığı 10°C-30°C olacak şekilde karışım yapılmıştır. Gerilme oluşmaması için betonda belirlenen maksimum sıcaklık 40°C olarak sınırlandırılmıştır. Çimento sıcaklıkta artışa neden olur. Bu sebeple beton tasarımında çimento miktarı azaltılmıştır. Beton tasarımı için Blain, priz başlangıç-bitiş, özgül ağırlık, kıvam limiti, mukavemet deneyleri yapılmıştır.

C20 dolgu betonu için; CEM I 42,5 R tipi 9800 g çimento, 0-5 mm, 5-12 mm, 12-30 mm agregalar (36,40 g kum, 14,356 g ince çakıl, 21,738 g orta büyüklükte çakıl) 4,672 g su, 0,147gr katkı maddesi olmak üzere 35 litre karışım oluşturulmuştur.

Karışım sıcaklığı 29,5°C ve slump 3 cm'dir. Normal betonda %2 hava içeriğine sahip tasarım yapılırken gövde betonunda bu oran daha yüksektir. Karışımın hava içeriği deney sonucunda %2,5 olarak teyit edilmiştir. Hava içeriği tayin deneyi Şekil 5.4'te örneklenmiştir.




**Şekil 5.4** Beton hava içeriği tayini (2019)

Baraj gövdesinde, akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, uçucu kül, su geçirimsiz katkı gibi çeşitli kimyasal katkılar kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkılar tasarım oranlarınca beton karışımına eklenmiştir.

### 5.1.2 Agrega

Agrega gradasyonuna uygun olarak seçilen agregalar kazı ve patlatma sonucu elde edilen malzemedir. Gövde betonunda büyük dane çapına sahip agregalar kullanılmıştır. 5 farklı boyuta göre agrega depolanmıştır. Kullanılan maksimum agrega dane çapı 120 mm'dir. Haftalık 2 veya 3 kez agrega numune alınmıştır.

Agregalar konveyör hattı ile silolara taşınmıştır. Bu konveyör hatları açık ve kapalı olarak çeşitlilik göstermiştir.

Taşınım sonucu agregalar, işlenmenin yapıldığı konkasör tesislerine getirilmiştir. Kullanılan konkasör kapasitesi 1050 ton/sa'tir. Konkasör tesisleri primer kırıcı, sekonder kırıcı ve yıkama olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır.

İlk olarak gelen malzeme kamyonetlerden çene bunkerinin içine dökülerek sonrasında konik kırıcılar ile kırılıp eleklerden elenmiştir.

Elenen malzemeler depolama alanına götürülmüş ve boyut olarak ayrılıp depolanmıştır. 32 mm eleğin altında kalan malzemeler dik milli kırıcılar ile tekrar kırıma uğratılmıştır.

Her agrega döküm esnasında agreganın üzerindeki tozun atılabilmesi için su serpilmesi işlemi yapılmıştır. Bu işlem konkasörde gerçekleşmiştir ve konkasörler bazı günler 24 saat çalışarak agrega oluşturmuştur (Şekil 5.5). Konkasörden çıkan agregalar; 0-4 mm, 4-12 mm, 12-32 mm, 32-63 mm, 63-120 mm olarak sınıflandırılmıştır. Agrega taşıma işleminin tümü konveyör hattı ile sağlanmıştır.



**Şekil 5.5** Agrega konkasör ve konveyör hatları (2019)

Agrega kalite kontrol tayini için; metilen mavisi, agrega özgül ağırlık deneyi, elek analizi, Los Angeles aşınma deneyi, birim hacim ağırlık deneyi, agrega yassılık indeksi deneyi, don deneyi gibi deneyler şantiye kalite kontrol laboratuvarlarında yapılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda agregaların beton imalatı için standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir. Her agrega deneyi için kullanılması gereken standartlar farklılık göstermektedir.

Hava durumu koşullarına göre sıcak havalarda soğutma sisteminde agregalar da soğutularak beton karışımına eklenmiştir. Agrega deneyleri yapılırken kurutma işlemleri laboratuvardaki etüv isimli fırınlarda yapılmıştır. Deneylerin tümü agrega su içeriği ölçülerek ve dizayna uygun şekilde tamamlanıp beton dizaynına geçilmiştir.

### 5.1.3 Çimento

Baraj şantiyesindeki beton santralinde çimento siloları bulunmaktadır. Bu şekilde depolama sağlanmıştır. Çimento silolarının kapasitesi 100'er tondur. Şantiyede gövde betonu haricinde şev destekleme, enjeksiyon, püskürtme beton (shotcrete) gibi alanlarda da çimento kullanılmıştır. Katkı olarak kullanılan uçucu kül, çimentonun erken dayanımının düşük uzun vadedeki dayanımının yüksek olmasını sağlamıştır. Yusufeli Barajı'nın gövde betonunda CEM-I R tipi hızlı priz alan çimento, kullanılan çimento

türlerinden biridir. Şantiyede CEM-II 42,5 Aşkale, Ünye CEM-I 42,5 R gibi çimentolar kullanılmıştır.

Gövdeye yapılmış olan perde betonunda ise daha ince bir çimento kullanılmıştır. Deneyler üretime göre sıklık göstermiştir.

Çimento standart kıvam tayini deneyi, özgül ağırlık deney, çimento yoğunluk tayini deneyi, blaine deneyi, çimento priz testi (vicat) gibi deneyler şantiye laboratuvarlarında tayin edilmiştir.

### 5.1.4 Baraj gövdesi yapımı

Yusufeli Barajı mega büyüklükte bir proje olduğu için beton dökümü ve serimi parçalara bölünerek yapılmıştır. Bölünen her parçaya ano ismi verilmiştir. 28+1 olmak üzere toplam 29 ano halinde tamamlanmıştır. 29 ano bittiğinde statik olarak tek gövde gibi davranış göstermektedir. Su basıncı ile birlikte gelen yükü baraj gövdesinin oturduğu dağlar (sağ ve sol şev) üzerinden destek sağlayarak mukavemet göstermesi için tasarlanmıştır.

Gövdede tırmanır kalıp sistemi kullanılmıştır. Düşey eksende yukarı doğru hareket ettirilerek kullanılan bir sistemdir. Yüksek yapı olması sebebiyle emniyetli çalışma ortamı sağlar. Raylı sistem ile yükselmesi sağlanır. Geniş anodan destek ile çalıştırılmıştır.

Baraj gövdesinin 560 m kotunda 4 tane dip savak bulunmaktadır. 715 m kotunda 5 tane dolu savak projelendirilmiştir. Şantiye üzerinde hava hattı ile taşınım sağlanmıştır. Hava hattı baraj gövde sahasının sağ sahil ve sol sahilinde kurulmuştur. Sağ sahilde 755 m kotu, sol sahilde 775 m kotundadır.

Gövde betonu dökümü sırasında sol sahilden beton dolu kovalar anolara taşınmıştır. Beton 9 $m^3$'lük kovalar ile dökülmüştür (Şekil 5.6). Gerektiği durumlarda mobil vinçler de kullanılmıştır.



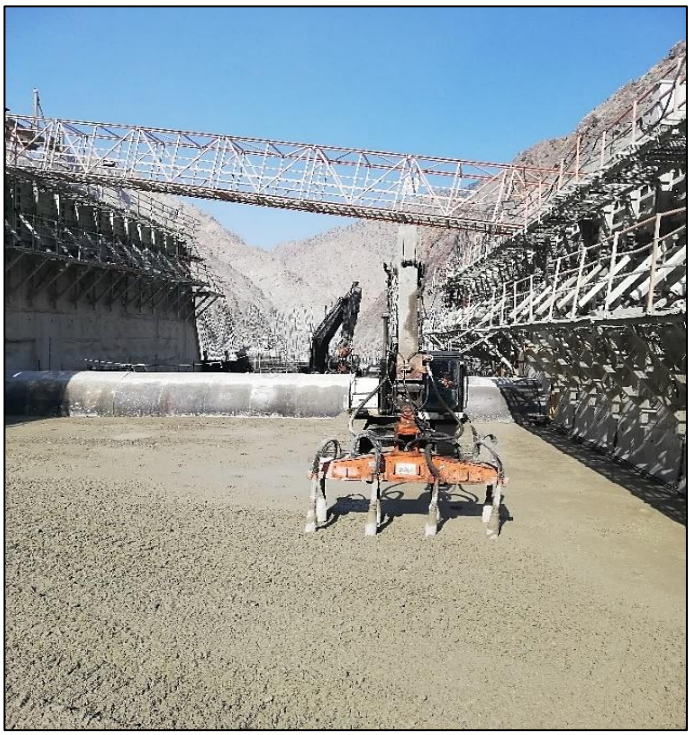
**Şekil 5.6** Hava hattı beton kovaları ile döküm (2019)

Kova ile taşınması sağlanan beton ano üzerine aktarıldıktan sonra serme işlemi yapılmıştır (Şekil 5.7). Serme işlemi yapılırken paletli ekskavatörlerin ucuna 8'li vibratörler çalıştırılmıştır.

Her bir vibratör şişesi 80-120 bar arasında basınç ile çalışmıştır. Vibratörlerin amacı betonun içerisindeki hava boşluklarını yüzeye çıkararak yerleşmesini ve sıkışmasını sağlamaktır. Metre karede 4 kere vibratör işlemi yapılmıştır (Şekil 5.8).



**Şekil 5.7** Beton serimi (2019)



**Şekil 5.8** Paletli ekskavatör ile vibratör işlemi (2019)

Beton dökümü sonrasında betonun priz alması beklenmiştir. Beton priz alma süresi boyunca genleşme, gevşeme açılmalar meydana gelme ihtimali vardır. Betonun yerleştirme sıcaklığı ortalama 18°C'dir.

Oluşan boşluklar, mukavemeti zayıflatır ve beton kütlesinde esneme, sıcaklık dayanımı gibi koşullar karşısında negatif etki oluşturur. Aderansı, verilen enjeksiyonlar sağlamıştır. Enjeksiyon su, kimyasal katkılar ve çimentodan oluşmuştur. Enjeksiyon, gövdede boş bulunan tüm kılcallara girmek üzere yayılmıştır.

Baraj gövdesinde 3 çeşit enjeksiyon işlemi yapılmıştır:

- Derz enjeksiyonu, galeriler arasında yapılır. Gövde anolarının yan yüzeylerinde 3'er metre de bir bulunan enjeksiyon boruları sayesinde yapılmıştır. Bu borular üzerinde vana sistemi bulunur ve kılcal deliklerden sızar.
- Perde enjeksiyonu, membadan mansaba su geçişini engellemiştir. Perde enjeksiyonunda düşey yönde delgilerle geçirimsizlik sağlanmıştır.
- Kontak enjeksiyonu, galerilerde delgi yapılarak bu delgilere enjeksiyon basılır. Enjeksiyon 10-15 bar basınç ile basılmıştır.

Yapılan enjeksiyon galerilerinde anolar arasında soğuk derz bulunur. Soğuk derz farklı zamanlarda priz alan betonlar arasında oluşur (Şekil 5.9).



**Şekil 5.9** Soğuk su boruları ve olgunluk cihazı kabloları (2019)

Soğuk derz bölgelerine ayrı olarak enjeksiyon yapılmıştır. Çünkü soğuk derz beton katmanlarının birleşim yapamadan iki farklı kütle olarak çalışmasına neden olur. Bu durumda yapı ve statik bütünlük için iki bölge arasında aderansın sağlanması gerekir. Galerilerde mansap tarafında aynı zamanda drenaj boruları bulunmaktadır. Galeri içinde kenarlarından soğuk su boruları geçmektedir (Şekil 5.10). Toplanan su baraj mansabından aşağı verilmiştir.



**Şekil 5.10** Galeri içi su tahliye kanalı ve kablolar (2019)

Beton dökümü sırasında betonun sıcaklık ile mukavemetini ölçen olgunluk cihazı konulmuştur. Cihaz kabloları beton içerisine yerleştirilmiştir. Kablonun bağlı olduğu uç ise cihaza bağlanmıştır. Gövdede 5100 noktada 21 ölçüm cihazı konumlandırılmıştır. Bu şekilde beton parametrelerinin takibini 7 gün 24 saat sağlamıştır. Beton parametreleri ayrıca grafiksel olarak takibe alınmıştır.

Priz sonrasında betona su jeti (chipping) işlemi yapılmıştır. Bu işlemin amacı beton yüzeyinin daha pürüzlü hale gelmesi ve aderansı artırmaktır.

Chipping işlemi bittikten sonra soğutma boruları (post cooling) boruları döşenir. Post cooling borularının çapı 3 cm'dir. Beton sıcaklığını 10-12°C ayarına getirmiştir.

Baraj gövdesi içerisinde enjeksiyon galerileri inşa edilmiştir. Gövdede toplam 12 galeri mevcuttur. Enjeksiyon galerilerinin amacı; asansör şaftı bozulduğunda ulaşımı sağlamak ve enjeksiyon yapmaktır. Anolar arası enjeksiyon 28 gün süre sonrasında basılmıştır. Aynı zamanda soğuk su borularının tahliyesini de sağlamıştır ve drenaj görevi yapmaktadır. Şekil 5.11'de gövdenin mansap bölümü görünmektedir ve imalat aşamasında kullanılan su bu bölgeden gövdeden uzaklaştırılmıştır.



**Şekil 5.11** Gövde betonu üstten görünüm (https://www.suyapi.com.tr, 2022)

Soğutma sistemi ve su %70-80 oranında kar tipi buzlar ile yapılmıştır. Buzlar şantiyede kar üretme tesisinde yapılmış ve boru hatları ile taşınmıştır. Enjeksiyon galerilerinde ve ano kenarlarında su tutucu bantlar kullanılmıştır.

Su tutucular OL tipindedir. Galeri çevrelerine su tutucu bantlar yerleştirilmiştir. Böylece enjeksiyonun sızması engellenmiştir.

## 5.2 Handırı Barajı

### 5.2.1 Beton

Handırı Barajı Büyük Dere isimli akarsu üzerine inşa edilmiştir. Büyük Dere Handırı dahil olmak üzere güzergahta 3 köyü de sulamaktadır.

Barajın oturduğu bölge jeolojik açıdan farklı sınıflarda zemin içermektedir. Çalışmalara başlanmadan önce bölgenin jeolojik bir haritası çıkarılmıştır.

Handırı Barajı'nın zemin ile temas ettiği yer ve dağ yamaçlarına oturduğu bölgelere yastık betonu dökülmüştür. Baraj gövdesi statik açıdan tek yapı olarak çalışacak şekilde projelendirilmiştir (Şekil 5.12).




**Şekil 5.12** Handırı Barajı mansap tarafından dolu savaktan su tahliyesi (DSİ,2020)

Gövdede hazır SSB beton kullanılmıştır. Gövde betonu mikserler tarafından taşınmış ve katman katman dökümü yapılmıştır.

SSB ağırlık malzemesi olarak kullanılmıştır çevre bölümüne ise geçirimsizlik amacıyla konvansiyonel beton imal edilmiştir. Konvansiyonel beton baraj gövdesinde 50 cm kalınlığında CVC betondur (Şekil 5.13). Ayrıca gövde içerisinde, su alma yapısı gibi sanat yapılarının etrafı da konvansiyonel beton olarak tamamlanmıştır.



**Şekil 5.13** Baraj etrafı 50 cm konvansiyonel beton (2018)

Betonda Çayırhan uçucu külü ile kimyasal katkılar kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkının işlevleri; betonun soğuk havalarda hızlı priz almasını sağlamış, su azaltıcı etki yapmış su/çimento oranını düşürerek betonun işlenebilirliğini ve mekanik özelliğini artırmıştır ve orta akışkanlaştırıcı etki sağlamıştır. Lignin sülfonat esaslıdır.

Gövde betonu numuneleri 3-7-28-90-180 günlük olarak kalite kontrol laboratuvarında denetime tabi tutulmuştur. SSB Barajlar Teknik Şartnamesine göre SSB betonda hedef dayanım 180 günlüktür. Gövdede projelendirilmeye uygun olarak galeriler imal edilmiştir (Şekil 5.14). Galeri çevre betonları SSB gövdeden farklı olarak konvansiyonel yapılmıştır.



**Şekil 5.14** Kırmızı ile çevrili alanda galeri imalatı (2018)

Test için kullanılan numune boyutları silindir 150x300 mm, küp 150x150 mm'dir. Beton numuneleri uzun vadede testlerde mukavemet artışı göstermiştir.

Baraj gövdesinde iki çeşit beton sınıfı imal edilmiştir. Bunlar C25/30 dolusavak enerji kırıcı betonu ve C20/25 memba-mansap betonudur. C25 betonu, 1 santimetre karesi 250 kilogram yük taşıma kapasitesine sahiptir.

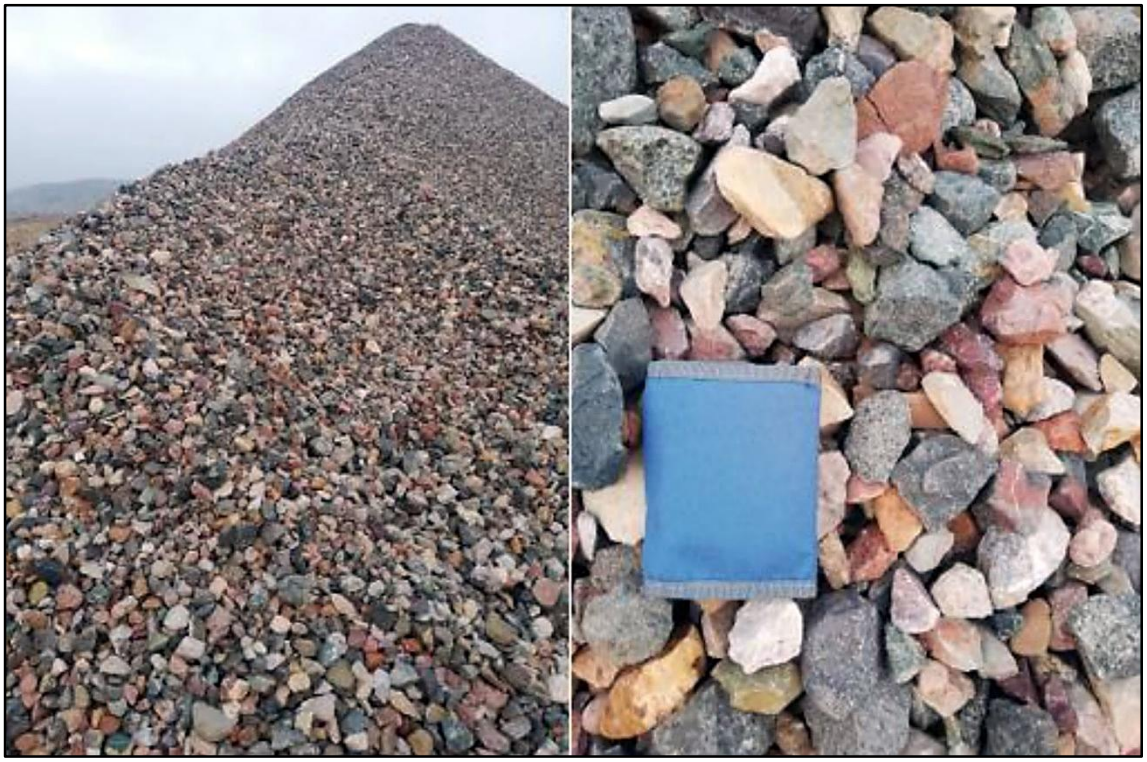
Beton yerleşimi için uygun tabaka kalınlığı 30 cm olarak tayin edilmiş ve bu doğrultuda döküm yapılmıştır. Betonda kullanılan çimento CEM I 42,5 R olarak belirlenmiş ve eklenmiştir. Çimento beton santralinde karışıma dahil edilmiş ve hazır olarak beton karışımı şantiyeye aktarılmıştır.

$D_{maksimum}$ 63 mm 1 $m^3$ beton için;
Taze beton sıcaklığı 14,8°C'de su/çimento dozajı 0,79'dir. Toplam agrega 2108 kg, 83 kg çimento, 83 kg uçucu kül, 1,09 kg kimyasal katkı ve 90 kg su olacak şekilde karışım yapılmıştır. Karışımın incelik modülü 6,23 ve 28 günlük mukavemeti 205,0 KN'dur.

### 5.2.2 Agrega

Baraj gövde betonunda kullanılan agregalar, Handırı Barajı'nın üzerine inşa edildiği Büyükdere isimli dereden temin edilmiştir. Temin edilen agregalar gradasyonuna göre baraj şantiyesi ve beton santrali arasında bir konumda depo edilmiştir (Şekil 5.15). Beton santralinde su içeriğine göre tayin edilip karışıma hazır hale getirilen agregalar beton yapımında kullanılmıştır.

Kullanılan maksimum agrega dane çapı 63 mm'dir. Agregalar beton dizaynı için deneylere tabi tutulmuştur. Bu deneyler standartlarca onaylanış ve agregalar bu şekilde betona eklenmiştir. Bu deneylerin bazıları şantiye laboratuvarında da teyit edilmiştir. Baraj gövdesinde kullanılan agregalar; 0-5 mm, 5-15 mm, 15-25 mm, 25-63 mm olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 5.15).



**Şekil 5.15** Büyük dereden çıkarılan agrega yığını ve agrega dane boyutları (2020)

### 5.2.3 Baraj gövdesi yapımı

Baraj yapımından önce barajın oturacağı ana kayaya kadar temel kazı işlemleri yapılmıştır. Baraj gövdesi sert zemin olan ana kaya üzerine temel atılmıştır (Şekil 5.16). Baraj şantiyesinde ilk olarak memba batardosu ve drenaj için dip savaktan aktarım kanalı yapılmıştır. Memba batardosu ile bağlantılı olan su drene eden kanallarda normal beton ve hasır demir kullanılmıştır. Baraj yapımı esnasında gövdeye gelen suyu uzaklaştırmak için bu işlem önce yapılmıştır. Baraj gövdesi kenar şevler üzerine oturan tek yapı statik ile çalışan bir proje olarak yapılmıştır. Gövde tasarımı sebebiyle basamaklı ve yukarı doğru incelen bir yapıdır (Şekil 5.17).



**Şekil 5.16** Baraj temelinin oturduğu ana kaya ve su tahliye sistemi ve batardo (2018)




**Şekil 5.17** Mansaptan baraj gövdesi (2021)

Baraj betonunun sıcaklığını, su seviyesini ve ilerleyen zamanlardaki durumunu ölçebilmek için parametre ölçerler yerleştirilmiştir. Kontrol odasından ve elektronik takip sisteminden ölçümler düzenli olarak kontrol edilmiş ve edilmeye devam etmektedir. Ölçümler sonucunda piyozometre verileri ile piyozometre eğrileri takibi oluşturmaktadır.

Handırı Barajı SSB baraj olması sebebiyle beton döküm ve serim olarak iki aşamadan meydana gelmiştir. Segregasyon (betonda ayrışma) oluşmaması için karışım hassasiyeti haricinde serim ve vibrasyon aşamasında optimizasyona dikkat edilerek bu aşamalar tamamlanmıştır. Baraj gövdesini inşa etmek için konvansiyonel kalıp kullanılmıştır.

Beton, şantiyeye fabrikadan hazır beton olarak gelmiştir. Şantiyeye hazır beton taşıyan mikserler 11-12 $m^3$ kapasiteli olarak çalışmıştır. Beton sıcaklığı 2-25°C'de iken beton imalatı yapılmıştır (Şekil 5.18). Beton dökümünden sonra serim işlemini paletli dozer yapmıştır. Darbeli silindir ile beton sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüm işlemler malzemenin ayrışmasına engel olacak şekilde ve standartlara uygun olarak yapılmıştır. Beton yapısı itibariyle kendiliğinden yerleşen betondur ancak gerekli durumlarda tesviye işleminde işçiler yardımda bulunmuşlardır.



**Şekil 5.18** Baraj üzerinde SSB beton serimi ve sıkıştırması (2018)

Beton tesviye işlemi tamamlandıktan sonra priz alması için beklenmiştir. Yatay derzlerde manuel chipping işlemi uygulanmıştır.

Barajda soğuk derz için 250/T formülü uygulanmıştır. T burada sıcaklığı ifade eder. Örneğin hava 25°C olduğunda 250/25 = 10 saati geçtiğinde şerbet imalatı yapılmıştır. Bu teknik SSB için kullanılmıştır. İki serim arasında 250/T kadar bir süre geçmişse soğuk derzi engellemek için iki tabaka arasına beton şerbeti dökülmüştür.

Betonda düşey soğuk derz bölgelerinde su tutucu bantlar kullanılmıştır. Su tutucu bantlar aynı zamanda gövde içerisi galeri çevresi, drenaj kanalı soğuk derzlerinde de kullanılmıştır. Su tutucular T olarak birleşim gösterecek şekilde derz boşluklarına eklenmiştir.

Baraj gövdesine dışardan ulaşılabilecek şekilde galeriler inşa edilmiştir. Galerilerin amacı baraj gövdesine ulaşımı sağlamaktır (Şekil 5.19).



**Şekil 5.19** Galeri ve kontrol odası mansap tarafından görünüşü (2019)

Bulgular doğrultusunda Artvin Yusufeli Barajı ve Çankırı Handırı Barajı'nın karşılaştırılması aşağıda tablolaştırılmıştır.

**Çizelge 5.2** Baraj parametrelerinin karşılaştırılması

| **Parametreler** | **Yusufeli Barajı ve HES** | **Handırı Barajı** |
|---|---|---|
| Tip | Çift eğrilikli ince beton kemer | Silindirle sıkıştırılmış beton dolgu (SSB) |
| İnşa süresi | 2014-2022 | 2016-2019 |
| Yükseklik | 275 m | 50,50 m |
| Maksimum su hacmi | 2,3 milyar $m^3$ | 2,179 milyon $m^3$ |
| Maksimum su seviyesi | 713,67 m | 1164,17 m |

| | | |
|---|---|---|
| Beton sınıfları | C20, C25, C30, C35, C40 | C20, C25 |
| Agrega | 5 mm – 120 mm (4 sınıf) | 0 mm – 63 mm (4 sınıf) |
| Çimento | CEM I, CEM II, CEM IV | CEM I |
| Katkı | Uçucu kül, kimyasal katkılar | Uçucu kül, kimyasal katkılar |
| Akışkanlık (slump) | 3 cm- 5 cm | 0 cm |

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Her iki baraj için deney verileri, imalatları incelenmiş ve standart referans değerler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Artvin Yusufeli Barajı ülkemizin en yüksek barajı ve dünya sıralamasında 5. olan projedir. Elektrik üretiminin yılda $1{,}705x10^9$ KWs olması beklenmekte olup, ülke kalkınması için çok anlamlıdır. Handırı Barajı sulama barajı olarak tasarlanmış bir projedir. Bölgede 6840 dekar tarım arazisinin sulanmasını sağlamaktadır ve düzenli sulama ile kalkınmaya katkı ile birlikte tarımda verimliliği artırmak adına önemli bir yere sahiptir. Barajlar aynı zaman dilimleri içerisinde yapılmıştır. Mühendislik çözümleri açısından incelendiğinde barajların ortak teknolojik sistemler kullanılarak inşa edildiği sonucuna varılmıştır. Farklı amaçlara hizmet eden ve farklı tip olarak tasarlanan barajlar güncel sistemlerde benzerlik göstermiştir. Beton üretimi, beton dizaynı, katkı kullanımı ve katkı kullanım amaçlarının çözümleri ortak özellik göstermiştir. Kullanılan ve tasarlanan malzemelerin boyutlarının farklı olmasına karşın tasarımlarının standartlara uyması ile birlikte ortak deneyler yapılmıştır. Tezin amacı doğrultusunda farklı tip, teknik, dizayn ve amaçları olan barajların ortak zaman diliminde inşa edilmesi sebebiyle benzerlik göstermesinin yanı sıra karakteristik özellikleri nedeniyle de özel çözümler üretildiği sonucuna varılmıştır. Yusufeli Barajı proje kapsamında büyük ve elektrik üretimi yapan bir baraj olduğu için gövde yapımının dışında baraj gövdesinin uygun statik ve mekanik davranış gösterebilmesi için öngermeli ankraj, geçirimsizlik perdesi, part döküm sistemleri gibi karakteristik dizaynlar yapılmıştır. Baraj gövdesinde beton imal edilebilmesi için kova sistemi ile beton dökümü, derz enjeksiyonları, soğutma boruları özel beton tasarımı yapılmıştır. Handırı Barajı'nda tasarlanan beton gereği SSB tekniği uygulanmış ve kıvamı çok katı olan 0 slump beton imal edilmiştir. SSB olması sebebiyle gövdede silindirler ile sıkıştırma işlemi yapılmış ve serim tekniği ile ilerlemiştir. Handırı Barajı Yusufeli Barajı'na kıyasla küçük proje olması sebebiyle daha önce hizmete açılmıştır ve amaçlanan milli gelire daha önce ulaşılabilmiştir. Her iki barajda da geçirimsizlik için su tutucu bant tasarımı yapılmış ve imal edilmiştir. Barajların genel yapım tekniği sebebiyle önce batardolar inşa edilmiş ve gövde betonu inşasına başlanmıştır. Mega proje yapılırken ülke çapında dizayn edilen yerel bazlı projenin de bu ileri teknolojiyi izleyerek inşasına devam ettiği anlaşılmıştır. Yusufeli Barajı yapımında kullanılan ileri teknolojilerin dizayn boyutuna göre

ölçeklendirilerek Handırı Barajı'nda kullanıldığı ve bu noktada benzerlik gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ülkemizin en önemli barajı yapılırken akabinde bölgesel olarak çalışan ve yapılan nispeten küçük projelere de aynı yıllar içerisinde devam edilmiştir. Her iki barajda son teknoloji mühendislik ile tamamlanmış ve başarıyla hizmete geçmiştir. Ayrıntılı karşılaştırma maddeler halinde sonuçlandırılmıştır.

1. Yusufeli Barajı debisi çok yüksek olan Çoruh Nehri üzerine inşa edilmesinden ötürü ve tasarımı gereği mega bir projedir. Hidroelektrik Santral olarak inşa edilmiştir. Handırı Barajı'nın amacı sulamadır Büyük Dere üzerine inşa edilmiştir ve Yusufeli kadar büyük çaplı bir proje değildir.
2. Yusufeli Barajı Çift Eğrilikli Beton Kemer barajdır. Ano part döküm sistemi ile inşa edilmiştir. Handırı Barajı Silindirle Sıkıştırılmış Beton barajdır. Gövde orta bölümleri SSB tüm dış kenarlar 50 cm CVC beton olacak şekilde yapılmıştır.
3. Yusufeli Barajı'nın üzerine yapıldığı Çoruh Nehri 25 yıllık pik debisi 1.210,000 $m^3/s$'dir. Handırı Barajının üzerine yapılan Büyük Dere 25 yıllık pik debisi 29,91 $m^3/s$'dir.
4. Yusufeli Barajı toplam depolama kapasitesi 2,3 milyar $m^3$'tür. Handırı Barajı aktif depolama kapasitesi 2,179 milyon $m^3$'tür.
5. Yusufeli Barajı temelden yüksekliği 275 m, kret genişliği 8 m, kret kotu 715 m'dir. Handırı Barajı temelden yüksekliği 50,50 m, kret genişliği 8 m, kret kotu 1165,50 m'dir.
6. Yusufeli Barajı'nın gövde betonunda C20, C25, C30, C35 ve C40 sınıfı betonlar imal edilmiştir. Handırı Barajı gövde betonunda C20 ve C25 beton sınıfları kullanılmıştır.
7. Yusufeli Barajı gövde betonunda kullanılan agrega dane çapları 5-12 mm, 12-30 mm, 30-60 mm, 60-120 mm olarak 4 çeşit dane boyutlamasına göre beton tasarımı yapılmıştır. Maksimum agrega çapı ($D_{maksimum}$) ise 120 mm'dir. Handırı Barajı gövde betonunda 0-5 mm, 5-15 mm, 15-25mm, 25-63 mm olarak 4 sınıf agrega boyutu ile tasarım yapılmıştır. $D_{aksimum}$ 63 mm'dir.
8. Yusufeli Barajı gövde betonu tasarımında kullanılan çimento sınıfları CEM-I 42,5 R, CEM-II 42,5 R ve CEM IV'tür. Handırı Barajı gövde betonunda kullanılan çimento sınıfı CEM-I 42,5 R'dir.
9. Beton tasarımı her iki barajda da yönetmeliklere uygun (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol

Dairesi Başkanlığı Kalite Kontrol Teknik Şartnamesi) beton, agrega, çimento ve tasarım deneyleri yapılmıştır.

10. Yusufeli Barajı yer şekilleri ve tasarım sebebiyle anolara bölünerek imal edilmiştir. Handırı Barajı küçük ve SSB baraj olmasından ötürü katman katman imalat yapılmıştır.
11. Yusufeli Barajı beton yerleştirilmesinde gövde üzerinde paletli dozerler ve şişe çoklu vibratörler kullanılmıştır. Handırı Barajı beton yerleştirilmesinde işçi gücü ve darbeli silindir kullanılmıştır.
12. Yusufeli Barajı gövde betonu büyük agregalı yüksek dayanıma sahip betondur. Handırı barajı SSB gövde betonu kuru, katı bir beton türüdür bundan ötürü iki baraj arasında yerleştirmede farklılıklar mevcuttur.
13. Yusufeli Barajı gövde betonu slump değeri ortalama 3 cm'dir. Handırı Barajı gövde betonu slump değeri yaklaşık olarak 0'dır. Bunun nedeni beton türüdür.
14. Gövde betonunda soğuk derz önleme yöntemleri tasarımlar yönergesinde farklılık göstermiştir.
15. Beton numuneleri standartlara uygun olarak her iki baraj betonunda da 7-28-90-180-365 günlük testlere tabi tutulmuştur.
16. Beton dayanımları iki baraj gövde betonları için beton sınıfları göz önünde bulundurularak farklılık göstermiştir.
17. Her iki barajın gövde betonu için uçucu kül, katkı olarak kullanılmıştır.
18. Yusufeli Barajı gövde betonunda, akışkanlaştırıcı, su geçirimsiz katkı, priz hızlandırıcı, mekanik özellik artırıcı, hava sürükleyici etki yapan kimyasal katkılar kullanılmıştır. Handırı Barajı gövde betonundaki kimyasal katkı işlevsel olarak soğuk havalarda hızlı priz, su azaltıcı, mekanik özellik artırıcı, işlenebilirlik ve akışkanlaştırıcı etki yapmıştır.

Bu tez çalışması, projelerin ileride meydana gelebilecek yapısal ve imalat problemlerinin incelenmesinde bilimsel destek oluşturabilecektir. Her iki barajın kontrol parametreleri DSİ Şubeleri tarafından takip altındadır.

Yusufeli Barajı, gövde ve proje büyüklüğü itibariyle ayrıntılı olarak çalışılabilir projedir. Projede olası problem durumları ayrı ayrı modellenerek barajın statik ve mekanik

davranışı bilimsel olarak incelenebilir. Hizmet ömrü boyunca sediment birikimi barajda takip edilebilir.

Handırı Barajı, sulama barajı olması nedeniyle su kalitesi ve suyun tarıma uygunluğu belirli periyotlar ile incelenebilir. Baraj Büyükdere kaynaklı beslenmektedir. Büyükdere, yayla ve dağlardan yağış ile oluşan akıma sahiptir. Bu nedenle sediment birikimi ve pik debi kontrolü düzenli olarak takip edilebilir.

## KAYNAKLAR


Alçay, S. 2014. Beton kemer barajlardaki deformasyonların jeodezik ve geoteknik yöntemlerle izlenmesi ve Ermenek Barajı örneği. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 110 sayfa, Konya.

ArcGIS Programı, https://www.arcgis.com/ Erişim Tarihi: 11.01.2023.

ASTM C1170. 2014. Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table.

ASTM C131. 2018. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.

Balı, H. 2021. Barajlardaki deformasyonların geoteknik cihazlar ile izlenmesi, Deriner Barajı örneği. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 149 sayfa, Konya.

Bayar, E. 2019. Baraj betonlarında aşınma problemlerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 73 sayfa, Bilecik.

Bozkuş, Z. ve Bağ, F. 2011. Çınarcık Barajının sanal yıkılma analizleri. Teknik Dergi, 22(4): 5675-5688.

Çataklı, O. N. 1967. Büyük bentler. İTÜ İnşaat Fakültesi Ders Notları, İstanbul.

Demirci, İ. 1995. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajlar. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 101 sayfa, Ankara.

Emiroğlu, N. 2009. Yusufeli Barajının çevresel etki maliyet analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 94 sayfa, Trabzon.

Erkaya, H., Hoşbaş, R. G., Gülal, V. E. ve Ersoy, N., 2004. Barajlarda deformasyon ölçmeleri. 1. Ulusal Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Sempozyumu, 1(1): 1-25. Ankara.

Güman, İ. 2019. Silindirle sıkıştırılmış beton baraj örneği İhsaniye Barajı ve enjeksiyon uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71 sayfa, Sakarya.

Hatipoğlu, E. 2018. Baraj jeolojisi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Akademik Veri Yönetim Sistemi, 50 sayfa, Trabzon.

Kabataş, E. 2022. İnce agreganın metilen mavisi değerinin kendiliğinden yerleşen betonun taze hal ve mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 167 sayfa, İzmir.

Kızılcık, H.Ş. ve Damlı V. 2019. Fizik eğitiminde özkütle, yoğunluk ve bağıl yoğunluk terimleri üzerine bir değerlendirme. Avrasya Terim Dergisi, 7 (2): 14-20.

Mardani-Aghabaglou, A., Bayqra, S. H., Özen, S., Faqiri, Z. A. ve Ramyar, K. 2020. Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarda kullanılan malzemelerin özellikleri. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 12(1): 62-72.

Sürmeli, A. S. 2002. Silindirle sıkıştırılmış ağırlık beton barajlar ve bunların ağırlık beton barajlarla karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96 sayfa, İstanbul.

Şantiyede sitesi inşaat mühendisliği uygulamaları, 2021. Web sitesi https://santiyede.com.tr/. Erişim Tarihi: 20.09.2022.

Şen, İ. 2021. Ilısu Barajı projesinin yapım aşamaları ve baraj gövdesinin yapısal analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 75 sayfa, Diyarbakır.

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Beton İşleri Teknik Şartnamesi_R00_20061110, 2014. 223 sayfa, Ankara.

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü DSİ 4. Bölge Barajlar ve HES Şube Müdürlüğü barajlar tanıtım çalışması, 2015. 33 sayfa, Konya.

T.C. Tarım Orman Bakanlığı Baraj Projesi Yapım Teknik Şartnamesi_R00_20061110, 2014. 21 sayfa, Ankara.

T.C. Tarım Orman Bakanlığı Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) İnşaat Teknik Şartnamesi_R00_20061110, 2014. 72 sayfa, Ankara.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Kalite Kontrol Teknik Şartnamesi, Eylül 2020. 18 sayfa, Ankara.

Taşdemir, M. M. 2014. Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) baraj gövdeleri içerisinden geçen kondüvi sistemlerinin tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 78 sayfa, Ankara.

TS 500, 2000. Türk Standartları Enstitüsü betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Ankara.

TS EN 1097-2, 2020. Türk Standartları Enstitüsü agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: parçalanma direncinin tayini için metotlar, Ankara.

TS EN 1097-3, 1999. Türk Standartları Enstitüsü agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler, Bölüm 3: Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini, Ankara.

TS EN 196-6, 2020. Türk Standartları Enstitüsü çimento deney yöntemleri, Bölüm 6: İncelik tayini, Ankara.

TS EN 197-1, 2012. Türk Standartları Enstitüsü çimento standardı, Bölüm 1, Ankara.

Ulamış, K. 2018. Mühendislik jeolojisi baraj yeri ve rezervuarda mühendislik jeolojisi çalışmaları-1. Ankara Üniversitesi JFM319, 16 sayfa, Ankara.

Yeğinobalı, A. ve Ertün, T. 2011. Çimentoda standartlar ve mineral katkılar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar AR-GE, 48 sayfa, Ankara.

Yusufeli Barajı ve HES Projesi, 2022. Web Sitesi https://www.dsi.gov.tr/. Erişim Tarihi: 15.11.2022.

Yusufeli Barajı ve HES, 2022. Web Sitesi https://www.suyapi.com.tr/. Erişim Tarihi: 22.09.2022.

**EKLER**

**EK 1. Handırı Barajı enerji tesisi teknik özellikler (DSİ)**

**EK 2. Çimento sınıfları ve karakteristik mekanik özellikleri (TS EN 197-1)**

## EK 1. Handırı Barajı enerji tesisi teknik özellikler (DSİ)

### Enerji su alma yapısı

| | |
|---|---|
| Yeri | Sağ Sahil |
| Tipi | Yatık Çan Ağzı |
| Kapak Tipi | Düşey Sürgülü Kapak |
| Enerji Tün. Uzun ve Çapı | 457,25 m, Dairesel 9 m çaplı |
| Min. Enerji Net Düşüşü | 175 m |

### Cebri boru

| | |
|---|---|
| Tipi | Gömülü Çelik Kaplama |
| Adedi | 1 Pantolondan Sonra 3 Branşman |
| Çapı | 9,00 m-8,00 m; 4,20 m-380 m |
| Uzunluğu | 103,946 m |
| Pantolona Kadar Kısım | 58,64 m |
| Pantolon-1. Ünite | 56,38 m |
| Pantolon-2. Ünite | 45,306 m |
| Pantolon-3. Ünite | 56,38 m |

### Santral binası

| | |
|---|---|
| Tipi | Yeraltı-Kesiti Mantar Şeklinde |
| Uzunluğu | 110,30 m |
| Genişliği | 30,55 m |
| Yüksekliği | 50,50 m |

### Kuyruk Suyu Tünelleri

| | |
|---|---|
| Tipi | Dairesel-Beton Kaplamalı |
| Adedi | 3 Hattan 1 Hatta |
| Çapı | 5,70 m-8,10 m-10,00 m |
| Kuyruk Suyu Çıkış Kotu | 495 m |

### Türbinler

| | |
|---|---|
| Tipi | Düşey Şaftlı Francis |
| Adedi | 3 adet |
| Maksimum Debi | 3 x 107 = 321 $m^3$/sn |

### Transformatör Salonu

| | |
|---|---|
| Tipi | Yeraltı |
| Kablo Tünelleri Dahil Yükseklik | 21,50 m |
| Genişliği | 20,68 m |
| Uzunluğu | 83,65 m |

### Şalt Sahası

| | |
|---|---|
| Tipi | Gaz Yalıtımlı Şalt (GIS) |
| Kot | 565 m |
| Uzunluğu | 78,30 m |
| Genişliği | 16,50 m |

## EK 2. Çimento sınıfları ve karakteristik mekanik özellikleri (TS EN 197-1)

### Çimento Çeşitleri

| Ana Tipler | Genel Çimento Tipleri | | Bileşim (kütlece[1]) % olarak | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ana Bileşenler | | | | | | | | | | Minör ilave Bileşenler |
| | | | K | S | D[2] | P | Q | V | W | T | L | LL | |
| CEM I | Portlant Çimentosu | CEM I | 95-100 | - | - | - | - | - | - | - | | | 0-5 |
| CEM II | Portlant-Curuflu Çimento | CEM II/A-S | 80-94 | 6-20 | | | | | | | | | 0-5 |
| | | CEM II/B-S | 65-79 | 21-35 | | | | | | | | | 0-5 |
| | Portlant-Silis Dumanlı Çimento | CEM II/A-D | 90-94 | - | 6-10 | | | | | | | | 0-5 |
| | Portlant-Puzolanlı Çimento | CEM II/A-P | 80-94 | | | 6-20 | | | | | | | 0-5 |
| | | CEM II/B-P | 65-79 | | | 21-35 | | | | | | | 0-5 |
| | | CEM II/A-Q | 80-94 | | | | 6-20 | | | | | | 0-5 |
| | | CEM II/B-Q | 65-79 | | | | 21-35 | | | | | | 0-5 |
| | Portlant- Uçucu Küllü Çimento | CEM II/A-V | 80-94 | | | | | 6-20 | | | | | 0-5 |
| | | CEM II/B-V | 65-79 | | | | | 21-35 | | | | | 0-5 |
| | | CEM II/A-W | 80-94 | | | | | | 6-20 | | | | 0-5 |
| | | CEM II/B-W | 65-79 | | | | | | 21-35 | | | | 0-5 |
| | Portlant-Pişmiş Şistli Çimento | CEM II/A-T | 80-94 | | | | | | | 6-20 | | | 0-5 |
| | | CEM II/B-T | 65-79 | | | | | | | 21-35 | | | 0-5 |
| | Portlant-Kompoze Çimento[3] | CEM II/A-M | 80-94 | 6-20 | | | | | | | | | 0-5 |
| | | CEM II/B-M | 65-79 | 21-35 | | | | | | | | | 0-5 |
| CEM III | Yüksek Fırın Cüruflu Çimento | CEM III/A | 35-64 | 36-65 | 0-5 | | | | | | | | 0-5 |
| | | CEM III/B | 20-34 | | 66-80 | | | | | | | | 0-5 |
| | | CEM III/C | 5-19 | | 81-95 | | | | | | | | 0-5 |
| CEM IV | Puzolanik Çimento[3] | CEM IV/A | 65-89 | | - | 11-35 | | | | | | | 0-5 |
| | | CEM IV/B | 45-64 | | - | 36-55 | | | | | | | 0-5 |
| CEM V | Puzolanik Çimento[3] | CEM V/A | 40-64 | | 18-30 | - | 18-30 | | | | | | 0-5 |
| | | CEM V/B | 20-38 | | 31-50 | - | 31-50 | | | | | | 0-5 |

1) Çizelgedeki değerler ana ve minör ilave bileşenlerin toplamı ile ilgilidir.

2) Silis dumanının oranı %10'la sınırlandırılmıştır.

3) Portland kompoze çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanik ÇimentCEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompoze Çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin yanındaki diğer ana bileşenler ana bileşenler çimentoya ait işaretler çimentoya ait işaretle beyan edilmelidir.

K: Klınker, S: Yüksek Fırın curufu, D: Silis dumanı, P: Doğal puzolan, Q: Doğal kalsine edilmiş puzolan, V: Silisli uçucu kül, W: Kalkerli uçucu kül, T: Pişmiş Şist, L: Toplam organik karbon içeriği kütlece %0.50 aşmayan kalker, LL: Toplam organik karbon içeriği kütlece %0.20 aşmayan kalker.

**Kaynak:** TS EN 197-1 Mart 2002

### Çimentoların Karakteristik Değerlerle Verilen Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

| Dayanım Sınıfı | Basınç Dayanımı (Mpa) | | | | Priz başlama süresi (dakika) | Genleşme (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Erken Dayanım | | Standart Dayanım | | | |
| | 2 günlük | 7 günlük | 28 günlük | | | |
| 32.5 N | - | ≥16.0 | ≥32.5 | ≤ 52.5 | ≥75 | |
| 32.5 R | ≥10.0 | | | | | |
| 42.5 N | ≥10.0 | | ≥42.5 | ≤ 62.5 | ≥60 | ≤ 10 |
| 42.5 R | ≥20.0 | | | | | |
| 52.5 N | ≥20.0 | | ≥52.5 | | ≥45 | |
| 52.5 R | ≥30.0 | | | | | |

**Kaynak:** TS EN 197-1 Mart 2002, ICS 91.100.10

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Süeda ERDOĞAN KARACA

### Eğitim

| | | |
|---|---|---|
| Yüksek Lisans | Marmara Üniversitesi<br>Fen Bilimleri Enstitüsü<br>İş Güvenliği Anabilim Dalı | 2022-Halen |
| Yüksek Lisans | Çankırı Karatekin Üniversitesi<br>Fen Bilimleri Enstitüsü<br>İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı | 2020-2023 |
| Lisans | Pamukkale Üniversitesi<br>Mühendislik Fakültesi<br>İnşaat Mühendisliği Bölümü | 2017-2018 |
| Lisans | Yozgat Bozok Üniversitesi<br>Mühendislik Mimarlık Fakültesi<br>İnşaat Mühendisliği Bölümü | 2015-2019 |

### İş Deneyimi

| **Yıl** | **Kurum** | **Görev** |
|---|---|---|
| 2021-Halen | Avrupa Birliği<br>IPARD LEADER | YKS Uzmanı<br>Proje Yöneticisi<br>Çankırı İl Koordinatörü |
| 2020-Halen | Özel Sektör | Şantiye Şefliği |