İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ AĞIRLIK BETON BARAJLAR VE BUNLARIN AĞIRLIK BETON BARAJLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Ahmet Serdar SÜRMELİ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : SU MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2002

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ AĞIRLIK BETON BARAJLAR VE BUNLARIN AĞIRLIK BETON BARAJLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ahmet Serdar SÜRMELİ
(501001451)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Nisan 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Mayıs 2002

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Necati AĞIRALİOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Cevat ERKEK (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Hayrullah AĞAÇÇIOĞLU (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2002

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu tez çalışmasının daha fikir aşamasından itibaren gelişmesine sınırsız yardımda bulunan, gerekli yerlerde yaptığı yönlendirme ve ışık tutan bakış açılarıyla hedef edilen çalışmanın ortaya çıkmasını sağlayan kıymetli bilim adamı, sayın hocam Prof. Dr. Necati Ağıralioğlu'na teşekkürü borç bilirim. Çalışmam sırasında bana devamlı olarak manevi destek sağlayan aileme ve üniversitedeki arkadaşlarıma da özellikle teşekkür ederim.

Haziran 2002 Ahmet Serdar SÜRMELİ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **vi**
TABLO LİSTESİ **vii**
ŞEKİL LİSTESİ **viii**
SEMBOL LİSTESİ **ix**
ÖZET **xi**
SUMMARY **xii**

1. GİRİŞ **1**
1.1 Konunun Önemi ve Çalışmanın Hedefi 1
1.2 Çalışma Metodu 1

2. RCC BARAJ TİPLERİ **3**
2.1 Genel 3
2.2 Zayıf RCC (RDLC) Baraj 5
2.3 Yüksek Yapıştırıcı Oranlı RCC Baraj 6
2.4 Silindirle Sıkıştırılmış Baraj (Japon Metodu, RCD) 7

3. RCC GENEL ÖZELLİKLERİ **10**
3.1 Genel 10
3.2 Mukavemet 10
3.2.1 basınç mukavemeti (f_c') 11
3.2.2 çekme mukavemeti 12
3.2.2.1 direkt (doğrudan) çekme mukavemeti (f_{dt}) 12
3.2.2.2 büzülme derzi direkt çekme mukavemeti 12
3.2.2.3 bölme çekme mukavemeti 13
3.2.2.4 eğilme mukavemeti 15
3.2.2.5 dinamik çekme mukavemeti 15
3.2.3 kayma mukavemeti 15
3.2.3.1 ana bölüm kayma mukavemeti 16
3.2.3.2 büzülme derzi kayma mukavemeti 16
3.3 Poisson Oranı 17
3.4 Elastisite 17
3.5 Birim Hacim Ağırlık 18
3.6 Sünme 18
3.7 Geçirimlilik 20
3.8 Termal Özellikler 21
3.9 Donma-Çözülme 22
3.10 Hacim Değişimi 24
3.10.1 kuruyarak büzülme 24

3.10.2 otojen hacim değişimi 25
3.11 Erozyona ve Aşınmaya Karşı Direnç 25
3.12 RCC Maliyeti 25
3.13 RCC İnşa Hızı 26

4. RCC KARIŞIM TASARIMLARI VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI 28
4.1 RCC için Karışım Oranlarını Tayin Metodları 28
4.1.1 spesfik kıvam limitlerini dikkate alarak yapılan RCC tasarımı 28
4.1.1.1 agrega oranı 29
4.1.1.2 çimento ve puzolan 31
4.1.1.3 karma suyu 32
4.1.1.4 RCC karışım hesabı 33
4.1.1.5 örnek karışım hesabı 35
4.1.2 agrega/çimento kombinasyonlarının en ekonomiği için deneme karışım testlerine dayanan tasarım 37
4.1.3 zemin sıkıştırma kabulleri kullanılarak yapılan tasarım 38

5. RCC BARAJ TASARIM VE İNŞA İLKELERİ 39
5.1 Genel 39
5.2 Tasarım Felsefesi 40
5.3 Temel Özellikleri 43
5.4 Yapısal Tasarım 45
5.4.1 tasarım yükleri 46
5.4.2 yükleme durumları 47
5.4.3 kuvvet ve moment eşitliği 48
5.4.4 emniyet durumu 48
5.4.5 kayma stabilitesi 49
5.4.6 devrilme stabilitesi 50
5.4.7 ağırlık metodu 51
5.5 Çatlama Kontrolü 51
5.5.1 RCC yapılarında görülen çatlamalar 51
5.5.2 sıcaklığa bağlı olan çatlama 51
5.5.3 temel sebebiyle çatlama 53
5.5.4 girintili köşe çatlaması 53
5.5.5 su tutucular 53
5.6 Geçirimlilik Problemi 53
5.6.1 kaplamalar 55
5.6.1.1 kaplama maddeli prekast paneller 55
5.6.1.2 betonarme 56
5.6.1.3 demirsiz beton 57
5.6.1.4 çekilmiş beton bordür 57
5.6.1.5 sıkıştırılmamış şev 58

5.6.1.6 kalıplı RCC yüzeyler 58
5.7 Tabaka Yüzeyleri 58
5.8 Galeriler 59
5.9 Dolusavaklar 59
5.10 Çıkış Yapıları ve İlave Yapılar 60
5.11 Üstten Su Aşmasına Karşı Dolgu Barajların RCC ile Korunması 61

6. RCC BARAJ YAPIMINDA DÜNYADAKİ ÖNEMLİ GELİŞMELER 63
6.1 Genel 63
6.2 Türkiye'de RCC Baraj Yapımı 65
6.2.1 Karakaya barajı'nda RCC kullanımı 65
6.2.2 Atatürk Barajı'nda RCC kullanımı 65
6.2.3 Berke Barajı ve HES memba batardosunda RCC kullanımı 66
6.2.4 Kürtün Barajı'nda RCC kullanımı 67
6.2.5 Sır Barajı'nda RCC kullanımı 68

7. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA BETON BİR BARAJLA KLASİK BETONLA YAPILMIŞ BİR BARAJIN UYGULAMAYLA YAPISAL YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI 70
7.1 Giriş 70
7.2 RCC Manyas Barajı Özellikleri 70
7.2.1 Manyas Barajı kesiti 72
7.3 CGDA Programında Gözönüne Alınan Durumlar 73
7.4 Stabilitenin sağlandığı durumların karşılaştırılması 75

8. SONUÇLAR 77

KAYNAKLAR 79

EKLER 82

ÖZGEÇMİŞ 96

KISALTMALAR

RCC	: Roller Compacted Concrete
RCD	: Roller Compacted Dam
SSB	: Silindirle Sıkıştırma Beton
RDLC	: Roller Dry Lean Concrete
GE-RCC	: Grout Enjected Roller Compacted Concrete
VC	: Vibration Compaction Time
CGDA	: Concrete Gravity Dam Analysis
ACI	: American Concrete Institute
USBR	: United States Bureau of Reclamation
USACE	: Unites States Army Corps of Engineers

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1.	Klasik Kütle Betonu Mukavemet Değerleri	14
Tablo 3.2.	Silindirle Sıkıştırma Beton, Uygun Kıvam ≤ 30 Saniye Vebe Titreşimi için Mukavemet Değerleri	14
Tablo 3.3.	Silindirle Sıkıştırma Beton, Uygun Kıvam > 30 Saniye Vebe Titreşimi için Mukavemet Değerleri	14
Tablo 3.4.	Zintel Canyon Barajında RCC özelliklerinin zamanla değişimi	18
Tablo 3.5.	Sağlamlık Faktörü Kriterleri	24
Tablo 4.1.	Beton hacmine oranla çakıl mutlak hacimleri	31
Tablo 4.2.	Maksimum müsaade edilebilir ince dane oranı	31
Tablo 4.3.	Maksimum tane çapına göre karışım suyu değerleri	35
Tablo 4.4.	Maksimum tane çapı, bağlayıcı, su ve sürenin beton basınç dayanımına etkisi	37
Tablo 5.1.	RCC barajlar için birim maliyetler	41
Tablo 5.2.	RCC barajlar için maliyetlerin karşılaştırılması	42
Tablo 5.3.	Uyarlanan yükleme durumları	48

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	**:**Üzerinden su aşmayan RCC bölümünün tipik bir kesiti	4
Şekil 2.2	**:**RCC dolusavağın tipik bir kesiti	4
Şekil 3.1	**:**(1 N/mm^2) Birim Gerilme için, RCC'de geliştirilen Sünme Eğrileri	19
Şekil 3.2	**:**RCC barajlarla klasik beton barajların geçirimlilik katsayılarının, çimento içeriğine göre karşılaştırılması	21
Şekil 3.3	**:**Betonlama hızının ısı artışına etkisi	22
Şekil 3.4	**:**RCC ile klasik kütle betonunun maliyet karşılaştırılması	26
Şekil 3.5	**:**RCC baraj inşa hızı	27
Şekil 4.1	**:**İri agrega hacminin sıkışmaya olan etkisi	30
Şekil 4.2	**:**Su miktarı ve vibrasyon süresinin uçucu küllü RCC beton yoğunluğuna etkisi	33
Şekil 5.1.a	**:**Kayma mukavemeti ve normal gerilme arasındaki doğrusal ilişki.	44
Şekil 5.1.b	**:**Temel kayasında düzensizlikler bulunması durumunda Kayma mukavemeti	44
Şekil 5.2	**:**Bir baraja etkiyen tasarım yükleri	46
Şekil 5.3	**:**Kuvvet, Momentum ve kesme mukavemetleri yön kabulü	51
Şekil 5.4	**:**Prekast beton panelli kaplama	56
Şekil 5.5	**:**Betonarme kaplama	56
Şekil 5.6	**:**Demirsiz beton kaplama	57
Şekil 5.7	**:**Goose Pasture Baraj Dolusavağının RCC ile Modifikasyonu	62
Şekil 5.8	**:**Goose Pasture Baraj Dolusavağında RCC sıkıştırılması	62
Şekil 6.1	**:**Atatürk Barajı dolusavak şut kanallarındaki agrega dağılımı	66
Şekil 6.2	**:**Berke Barajı ve HES memba batardosu enkesiti	67
Şekil 6.3	**:**Sır Barajı ve HES memba batardosundaki RCC uygulamasının ilerleme hızı	69
Şekil 7.1	**:**Manyas Barajındaki RCC tabaka hacmi ile baraj yüksekliği ilişkisi	71
Şekil 7.2	**:**Manyas Barajı'nın bir kesiti	72

SEMBOL LİSTESİ

A_h : Değme veya kayma yüzeyi düzleminin alanıdır
a : Agrega Birim Hacim AğırlığıKohezyon
C_1 , W : Sabitler
C_v : Beton Birim Hacmi
c : Kohezyon
D : Sağlamlık ve Dayanıklılık Faktörü
D_{max} : En İri Dane Çapı
E : Elastisite Modülü
F_0 : Devrilmeye karşı emniyet faktörüdür
F_{LE} : Limit eşitliği faktörü
F_s : Kaymaya karşı emniyet faktörünün
F_{sf} : Kayma sürtünmesi faktörü
F_{ss} : Kayma faktörü
F(J) : Sünme Oranı
F/C : Hacim Olarak Uçucu Kül/Çimento Oranı
f_c' : Basınç Mukavemeti
f_{dt} : Direkt Çekme MukavemetiPlak eğilme rijitliği
f_{st} : Bölme Çekme Mukavemeti
H_1 : Yatay silt basıncıdır
H_2 : Memba yüzüne etkiyen su yükünün hidrostatik basıncı
H_3 : Mansap yüzüne etkiyen su yükünün hidrostatik basıncı
H_4 : Memba yüzündeki buz yükü
H_5 : Havza suyunun membaya etkiyen eylemsizlik kuvveti
H_6 : Havzasuyunun mansaba etkiyen eylemsizlik kuvveti
H_7 : Deprem boyunca barajın eylemsizlik kuvveti
K : Geçirimlilik Katsayısı
M : Deneyin Son Bulduğu Devir Sayısı
N : Elastisite modülünün belli bir yüzde azaldığı devir sayısı
n : Enine Temel Frekans
n_0 : Deneyin Başlangıcındaki Enine Temel Frekans
n_1 : Deneyin Sonu Enine Temel Frekans
P_V : Hacim Olarak Şerbet/Harç Oranı
p : Normal Birim Gerilme
S : Kayma Mukavemeti
s : Birim Kayma Mukavemeti
t : Yükleme Sonrası Geçen Gün Sayısı
V_1 : RCC baraj ve ilave yapılarının ağırlığından oluşan ölü yük
V_2 : Membanın eğimli kısımlarına etkiyen su ve/veya siltin ağırlığı
V_3 : Mansabın eğimli yüzeylerine etkiyen su ve/veya siltin ağırlığı
V_4 : Baraj boyunca herhangibir düzlemde veya barajın tabanındaki kaldırma basıncıdır

$\mathbf{V_5}$ **:** Bir depremde baraj kütlesinin eylemsizlik kuvveti
$\mathbf{V_c}$ **:** Çimento hacmi (m^3)
$\mathbf{V_{ca}}$ **:** İri agrega hacmi (m^3)
$\mathbf{V_f}$ **:** Uçucu kül veya puzzolan hacmi (m^3)
$\mathbf{V_{fa}}$ **:** İnce agrega hacmi (m^3)
$\mathbf{V_m}$ **:** Havasız harç hacmi (m^3)
$\mathbf{V_p}$ **:** Hava katkısı bulunmayan şerbet hacmi (m^3)
$\mathbf{V_w}$ **:** Karma suyu hacmi (m^3)
VC **:** Sıkıştırma Değerleri
W **:** Birim hacim Ağırlık
W/(F+C) **:** Hacim olarak su/bağlayıcı
$\boldsymbol{\sigma}$ **:** Dik Gerilme
$\boldsymbol{\phi}$ **:** Kayma Mukavemeti Açısı
$\boldsymbol{\xi}$ **:** Poisson Oranı
$\boldsymbol{\varepsilon}$ **:** Spesifik Sünme

SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ AĞIRLIK BETON BARAJLAR VE BUNLARIN AĞIRLIK BETON BARAJLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

İnsanlık geliştikçe ve dünya üzerindeki nüfus arttıkça hayatın en temel öğesi olan suyun önemi de hızla artmaktadır. Günümüzde su biriktirme yapıları olan barajların da dünyanın gitmekte olduğu gidiş gözönüne alındığında önemi daha iyi anlaşılır. Su kaynaklarından en iyi şekilde faydalanmak için mali kaynakların sınırlı olduğu durumlarda biriktirme yapılarını daha az maliyetle yapmak istenir. Bunun için dünyada yeterli emniyeti sağlayacak çeşitli baraj malzemeleri ve baraj tipleri araştırılmaktadır. Bu fikirden yola çıkılarak maliyeti çok düşük, dayanıklılık ve birçok özellik bakımından beton barajlar seviyesinde barajların yapılabilineceği düşünülmüş ve silindirle sıkıştırma beton barajlar geliştirilmiştir. Kısıtlı imkanlarla dahi oldukça sağlam olan bu baraj metodu ülkemiz için de oldukça uygun düşmektedir.

Bu çalışmada ilk olarak konunun önemi ve amaçlanan hedef belirtilmiştir. İkinci bölümde bu tip barajların dayandığı felsefeler ve tipleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde fiziksel, dayanımsal özellikler belirtilerek klasik beton barajlarla maliyet dahil tüm bu özellikler karşılaştırılmıştır. Dördüncü bölümde karışım özellikleri ve laboratuvar çalışmaları çok büyük öneme sahip olduğu için anlatılmıştır. Beşinci bölümde silindirle sıkıştırma beton baraj tasarım ve inşa ilkeleri belirtilmiştir. Altıncı bölümde silindirle sıkıştırma beton barajın dünyanın çeşitli ülkelerinde nasıl kullanıldığı hakkında tipik örnekler verilip Türkiye'de kullanılan yerler hakkında da özet bilgi sunulmuştur. Yedinci bölümde CGDA adlı bilgisayar tahkik programı kullanılarak Manyas'ta yapılması düşünülmüş silindirle sıkıştırma beton ağırlık baraj dataları tetkik edilmiştir. Ayrıca aynı programa tipik bir klasik beton barajın ortalama sınırlar içindeki dataları girilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son bölümde ulaşılan sonuçlar verilmiştir.Ek bölümünde dünyada ve Türkiye'deki silindirle sıkıştırma beton barajlarla ilgili örnek kesitler ve fotoğraflar, ayrıca yapılan tahkik sonuçları sunulmuştur.

ROLLER COMPACTED GRAVITY CONCRETE DAMS AND COMPARISION WITH GRAVITY CONCRETE DAMS

SUMMARY

The most important thing for human life, water becomes more important while world's population is increasing and human being is progressing. Today dams which are water collecting structures, will be more satisfying known if we care world's trend. When financial resources are limited, for benefiting optimum from water resources, water collecting structures must be built cheaper. For this reason dam materials and dam types which have sufficient safety are researched specially. Therefore a type of dam which costs less than conventional concrete dam and has similar durability and other properties; is researched, so roller compacted concrete dam has been progressed. This method is very suitable for our country because of limited financial resources.

In this work firstly importance of subject and target has been mentioned. In second chapter philosophy of this kind of dams and their types have been mentioned. In third chapter physical,financial and durability properties have been mentioned and comparision with conventional gravity concrete dams have been given. In fourth chapter mixing properties and laboratory properties have been mentioned. In fifth chapter principles of roller compacted concrete dam design and construction have been mentioned. In sixth chapter roller compacted concrete dam applications in the different countries of the world and short information about some examples in Turkey have been given. In seventh chapter datas of roller compacted dam which was designed to built in Manyas, have been examined by using CGDA computer program. Also an application of conventional dam which has average values have been examined and a comparision has been given. In the last chapter conclusions have been given.In additional part some cross-sections and photos of roller compacted dams around the world and Turkey. Also conclusions of computer application have been given.

1. GİRİŞ

1.1 Konunun Önemi ve Çalışmanın Hedefi

Dünya çapında teknolojinin gelişimiyle, hemen hemen insan unsurunun hayal edebildiği her konuda önü alınamayan bir ilerleme gözlenmektedir. Her konuda potansiyeli olan ama bunu yeterince ve/veya bazı konularda da hiç değerlendiremeyen ülkemiz için de baş döndüren bu değişimin dışında kalmak asla kabul edilemez. Teknik ilerlemenin olduğu bir çok konuda maliyetler de gelişmeyle birlikte artmaktadır. Yapım maliyetinin daha düşük olduğu ve aynı zamanda eski metodlardan daha üstün olan inşaat metodları azdır. Zaten her durumda da dünya üzerindeki doğal zenginlikler kısıtlıdır. En büyük doğal zenginlik olan sudan en düşük kayıpla yararlanmak yurdumuz için çok önemli bir konudur. Bunun için dünyadaki tüm baraj teknolojileri yakından izlenmelidir. En son teknolojilerden biri de Silindirle Sıkıştırma Beton Baraj Metodudur. Bu yolla hem en az normal beton barajlarınki kadar sağlamlık elde edilebilir hem de maliyet çok büyük oranlarda düşürülebilir. Bugün sadece gelişmekte olan ülkelerde değil gelişmiş ülkelerde de maliyeti en aza indirmek için bu metod hızla yaygınlaşmaktadır. Son yıllarda A.B.D. ve İngiltere'de birçok baraj, Japonya'daki beton barajların tümü bu şekilde yapılmıştır. Bu çalışmada yurdumuzda yapılacak barajlarda da bu metodun kullanılabileceği ve bu şekilde daha fazla baraj yapılabileceği iddiası ve ümidiyle bu yeni baraj metodu hakkında etraflıca bilgi verilmiştir.

1.2 Çalışma Metodu

Bu çalışmada öncelikle bu metodun kavramsal açıdan neyi ifade ettiği, kendi içindeki çeşitliliği ve bu çeşitlilik içinde dayandığı farklı felsefeler anlatılmaya çalışılmıştır. Bu metodla yapılan barajların diğer normal betonla yapılan barajlara göre farklarının da karşılaştırıldığı özellikler verilmiştir. Bu özellikler üzerinden çeşitli saptamalar yapılarak ve bu sayede silindirle sıkıştırma beton baraj tekniği hakkında daha çok bilgi verme amacı güdülerek çalışma tamamlanmıştır.

Dünya üzerinde silindirle sıkıştırma beton konusu yeni gelişmekte olan bir konu olduğundan ve farklı ülkelerin çıkardıkları farklı silindirle sıkıştırma beton baraj metodları bulunduğundan dolayı dünyaca kabul görmüş standartlar bulunmamaktadır. Bununla birlikte her görüşün ileri sürdüğü ilkeler mümkün olduğu ölçüde anlatılmaya çalışılmıştır.

Daha sonra silindirle sıkıştırma beton barajlar için yapılan laboratuvar çalışmaları hakkında kısa bir bilgi verilmiştir.Ayrıca bu baraj tipine ait baraj tasarım ve inşa ilkeleri anlatılmıştır.

Dünya ve Türkiye'de bu metodla yapılan barajlara örnekler gösterilerek metodun avantajları açıklanmaya çalışılmıştır. Dünya üzerinde yapılmış silindirle sıkıştırma beton barajların maliyet ve birçok açıdan değerlendirildiği tablolar üzerinden bu metodun daha iyi kavranmasına çalışılmıştır.

Çalışmada sadece tek başına RCC baraj metodu anlatılmamış aynı zamanda eski toprak veya kaya dolgu barajların yetersiz dolusaklarında yapılan, silindirle sıkıştırma beton kullanılması suretiyle taşkın hacmi büyütülmesi metodu hakkında da açıklayıcı bilgi verilmiştir.

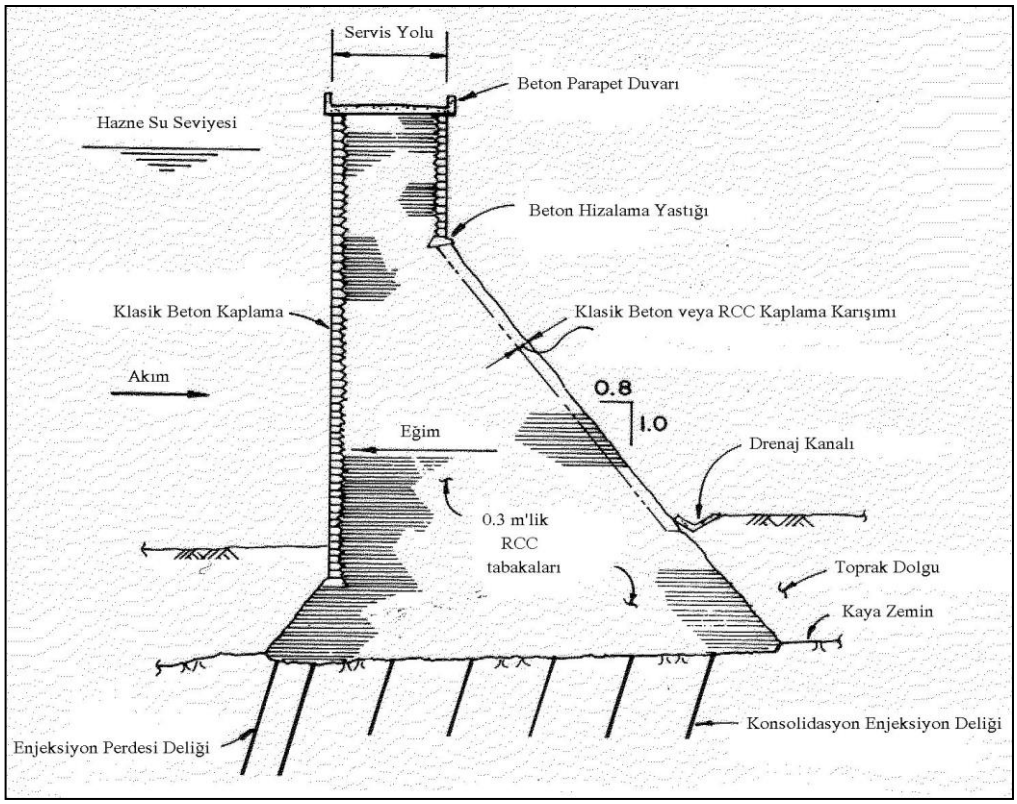
Son bölümde bilgisayarda yapılan küçük bir sayısal uygulamayla klasik betonla, silindirle sıkıştırma beton baraj kavramının arasındaki fark somut bir şekilde gösterilmiştir.

2. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA BETON (RCC) BARAJ TİPLERİ

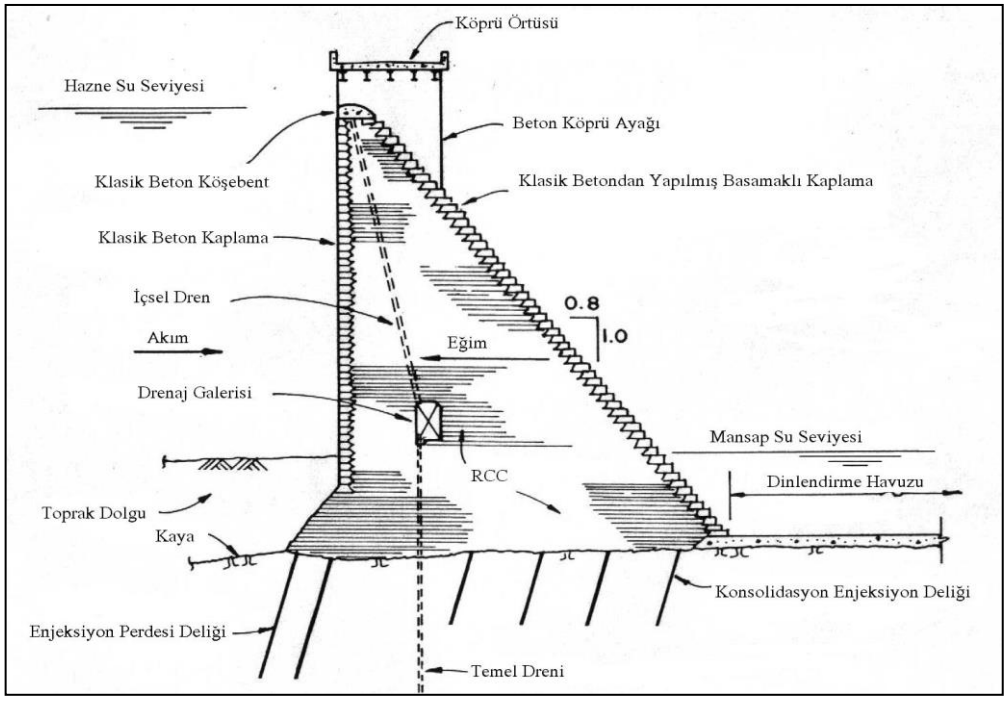
2.1 Genel

Silindirle sıkıştırma beton baraj metodu; geleneksel granüler dolgu veya kütle betonu agregasının, çimento ile zenginleştirilmesi ve klasik dolgu ekipmanları kullanılarak taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması yoluyla tek veya çok tabakalı olarak tatbik edilen bir baraj inşa metodudur. Bu şekilde yapılan barajlardaki beton aynı zamanda RCC (roller compacted concrete), SSB (silindirle sıkıştırma beton), rolkrit (rollcrete) veya kru gro beton (dry lean concrete) olarak da adlandırılabilmektedir. Bu tip betonlar sıkı kıvamı ve kum-çakıl malzemesi görünümü ile normal betondan ayrılır. Katı kıvamı sayesinde ancak vibratörlü silindirle sıkıştırılabilir.

Barajlarda kullanılmakta olan RCC (roller compacted concrete) karışımları; portland çimentosu, su, agrega ve eğer istenirse puzolan içeren karışımlardır. Karışımda oranlar öyle bir şekilde sağlanmalıdır ki üzerinden geçecek titreşimli bir silindirin ağırlığına dayanabilen, sıfır çökmeli karışım elde edilebilsin. RCC karışımları genelde 0.3 ile 0.6 m arasındaki kalınlıkta katmanlar halinde yerleştirilir ve sıkıştırılır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Sertleşmiş RCC'nin fiziksel özellikleri; kullanılan agregaların özelliğine göre, çimento ve puzolan içeriğine göre, sıkıştırma derecesine göre ve inşa süresince yapılan kalite kontrol gibi birçok duruma göre geniş bir aralıkta değişir. Malzeme seçimi ve RCC karışımının özellikleri; tasarımın gereksinimleri, malzemenin uygunluğu ve yerleştirme işlemine bağlıdır. Bir RCC karışımı, sıkışabilen ve stabil olan kütleleri oluşturabilecek şekilde dizayn edilmelidir. Özellikle bu kütle sertleştiğinde mukavemetini bulmalı, gereken sağlamlık ve sızma koşullarını yerine getirmelidir. Şekil 2.1'de ve şekil 2.2'de üzerinden su aşan ve üzerinden su aşmayan, RCC karışımıyla yapılabilecek barajların tipik kesitleri verilmiştir(Zipparro ve Hansen, 1993).



Şekil 2.1 Üzerinden su aşmayan RCC bölümünün tipik bir kesiti



Şekil 2.2 RCC dolusavağın tipik bir kesiti

İki farklı felsefeye göre çeşitlilik gösteren RCC baraj tasarım tipleri genelde üçe ayrılır:

1. Zayıf (Zayıf Yapıştırıcı Oranlı) RCC Baraj

2. Yüksek Yapıştırıcı Oranlı RCC Baraj

3. RCD (Roller Compacted Dam,Japon Metodu) Baraj

Bu baraj tiplerinin dayandığı farklı felsefeler ise şunlardır:

1. Dolgu Baraj Görüşü: Bu görüş zayıf RCC baraj metodunu içerir.

2. Beton Baraj Görüşü: Yüksek yapıştırıcı oranlı RCC baraj metodu ve Japon silindirle sıkıştırılmış baraj metodunu içerir. İki beton yaklaşımlı metod da zayıf RCC karışıma göre daha yüksek yapıştırıcı oranına sahip olduğundan daha fazla sıvı kıvama ve işlenebilme özelliğine sahiptir.

İlk RCC baraj tasarım ve inşaatı, United States Army Corps of Engineers tarafından 1982'de zemin yaklaşımı uygulanarak A.B.D. Oregon'da Willow Creek Barajı'nda yapılmıştır. 1980'ler boyunca yüksek yapıştırıcı oranlı beton yaklaşımına doğru hızlı bir kayma oluşmuştur. Bu yaklaşım Malcolm R. Dunstan tarafından bulunmuş ve 1988'de biten A.B.D'deki Upper Stillwater Barajı inşaatında United States Bureau of Reclamation tarafından geliştirilmiştir. Günümüzde çağdaş tasarımlar, zemin ve beton yaklaşımlarının bir karması olarak düşünülmektedir ve orta derecede yapıştırıcı oranlı RCC olarak adlandırılmaktadırlar. Ama hala bütün yaklaşım ve metodlar da büyük oranda kullanılmaktadırlar.

2.2 Zayıf RCC (RDLC, Rolled Dry Lean Concrete) Baraj

Zayıf RCC karışım tasarımı, bünyesinde Proctor'un zemin sıkıştırma prensiplerini içeren maksimum yoğunluk felsefelerini birleştirir (Moffat, Novak, Nalluri ve Narayan, 1997). Belirli agrega ve çimento oranları için, uygulanan bir sıkıştırma kuvvetinde RCC karışımında maksimum yoğunluğu sağlayacak optimum nem oranı tanımlanmıştır. Agrega parçacıklarını karıştırmak ve yeterli mukavemetli sertleşmiş RCC üretmek için çimento içeriği yeterli olduğunda, sıkıştırma sonrasında bütün boşlukları doldurmaya yetecek yapıştırıcı oranı oluşmaz. Bu yüzden de bir baraj yapısında donma-erime zararına karşı yeterli dayanıklılık oluşmaz, yapı daha geçirimli olur ve sızmayı önlemek için ek tedbirler gerekir. Zayıf RCC barajların

mansabına geçirimsiz bir yüzey yapmak yaygın bir uygulamadır ve bu sayede donma-erime zararını önlemek için en az 0.3 m RCC sarf edilir.

Sızmayı azaltmak için tabakaların yüzeylerinde düzleme harcı veya memba yüzeyinde klasik beton kaplama gibi önlemler almak gerekir. Düşük dayanıklılık ve yüksek geçirimliliğe dayanarak bir zayıf RCC barajı aynı zamanda katman yüzeylerinde daha düşük bağlanma mukavemetine sahiptir. Zayıf RCC baraj, klasik beton barajlara veya beton baraj yaklaşımıyla yapılan RCC barajlara göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan stabilitenin sağlanması için daha fazla kütleye ihtiyaç duyulur.

Zayıf bir RCC baraj için tipik çimento oranı 45 ile 150 kg/m^3 arasında değişmektedir(Zipparro ve Hansen, 1993). Adiyabatik ısı oluşumu, zayıf RCC karışımlar için genellikle bir problem oluşturmamakla birlikte çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül gibi puzolanlar kullanılabilir. Kaba agrega parçacıkları arasında direkt teması önlemek için yeterli miktarda kum ve ince malzeme kullanılmalıdır. 200 nolu elekten geçen nonplastik ince dane miktarı yüzde 5 ile 10 arasında genelde sınırlandırılmıştır.

Zayıf RCC yaklaşımı kullanımının avantajları: hidratasyona bağlı ısı yayılımını azaltmak için puzolan kullanmaya gerek göstermez, bitmiş barajlar düşük elastik modül ve yüksek sünme oranı gösterir, çatlama potansiyeli azdır ve düşey derz ihtiyacı da çok azdır. A.B.D'deki Willow Creek ve Monskville Barajları bu çeşidin tipik örneklerindendir.

2.3 Yüksek Yapıştırıcı Oranlı RCC Baraj

Yüksek yapıştırıcı oranlı RCC karışımlar ilk defa 1970'li yıllarda Tennessee Valley Authority tarafından bulunmuş ve sonraları İngiltere'de Malcolm R. Dunstan tarafından geliştirilmiştir. Dunstan, yüksek mukavemet özelliklerini kazanmak için düşük yüzdeli hava boşluğu olan bir yoğunluk elde edilmesini düşünmüş ve bunun da yüksek yapıştırıcı/harç oranıyla elde edilebileceğini bulmuştur. Bu oran bağlayıcı hacminin (çimento, su ve eğer kullanılıyorsa giren hava), harç (bağlayıcı ve ince daneli malzeme) hacmine oranıdır. Sıfır çökmeli ve üzerinden geçecek olan titreşimli silindiri taşıyabilecek şekilde düzenlenen karışımlar arasında yüksek yapıştırıcı oranlı RCC, toprak dolgu baraj görüşündekine göre daha fazla sıvı kıvam özelliği

gösterir. Agregaların arasındaki tüm boşlukları doldurmak için kullanılan bağlayıcı madde yeterli miktarda olmalıdır, bu sayede karışımın işlenebilme özelliği artar. Yüksek yapıştırıcı oranlı karışımların en belirgin özellikleri: yoğun ve geçirimsiz sertleşen RCC oluşturması, katmanlar arasındaki yüzeylerde sızmayı önlemek için çok fazla bağlayıcı mukavemetine (kohezyon) sahip olması. Bağlayıcı mukavemetler, zayıf RCC'dekinden daha büyüktür çünkü yüksek yapıştırıcı oranlı karışım daha iyi şekil alabilir ve soğuk derz haricinde hiçbir kısımda düzleme harcı kullanılmaz. Ayrıca yüksek yapıştırıcı oranlı RCC'nin diğer bir farkı da yüzleme karışımıyla birlikte barajlarda sızıntıya karşı bariyer oluşturur. Genelde bu şekilde barajlarda iç kısımlarda geçirimsiz olan yüksek yapıştırıcı oranlı RCC kullanılır, kaplamalarda ise hava girişli klasik beton kullanılır. Bu sayede donma-çözülmeye karşı dayanıklılık arttırılmış olur.

Karışımın işlenebilme özelliği Vebe metoduyla test edilir. Bu sayede su muhtevası ile istenilen kıvam arasında bir ilişki bulunmaktadır. Vebe testinde ağırlıkla birlikte titreşimli masa kullanılır ve fazla çimento bağlayıcısı kullanılarak RCC karışım yüzeyinin yükselmesi için geçmesi gereken zaman ölçülür.

Yüksek yapıştırıcı oranlı RCC'de tipik çimento bağlayıcı oranları genelde 150 kg/m^3'ü aşar. Maliyeti azaltmak için ve çimento hidratasyonuna bağlı içsel ısı yayılımını kontrol etmek için, çimento malzemesinin yüzde 60 ile 80'ine kadarı uçucu kül gibi puzolan içerebilir. Mesela yeterli geçirimlilik sınırları içinde 50 m'lik bir barajdaki tipik bir karışımda 50 kg/m^3 çimento ve 100 kg/m^3 uçucu kül kullanılabilir. Daha yüksek barajlarda artacak olan su basıncına daha fazla dayanabilmek için çimento oranı artırılmalıdır.

Yüksek çimento oranı sayesinde, zayıf RCC yaklaşımına göre daha yüksek elastik modül ve daha düşük sünme oranı elde edilir. Bu yüzden baraj boyunca termal gerilmeler yüzünden çatlama potansiyeli fazladır ve termal analizlerden elde edilen yerlerde büzülme derzi ihtiyacı doğar (Forbes, Lichen, Guojin ve Kangning, 1999). A.B.D'deki Upper Stillwater Barajı tipik bir yüksek yapıştırıcı oranlı RCC barajdır.

2.4 Silindirle Sıkıştırılmış Baraj (Rolled Compacted Dam)

1960'larda İtalya'da ortaya çıkan Alpe Gera inşa metodunun geliştirilmiş halidir. 1970'lerde Japonya tarafından geliştirilen bu metod sayesinde beton yerleştirme hızı

arttırılmış ve beton barajlardaki maliyet önemli ölçüde azaltılmıştır. Japonya'da deprem riskinin fazla olması, topoğrafik ve hidrografik koşullardan dolayı barajların çoğunda beton kullanılır.

RCD metoduyla yapılan barajların yüksek yapıştırıcı oranlı karışımlarla yapılan barajlardan belli başlı farkları vardır. RCD metodunda serilen tabaka kalınlıkları 0.5 ile 1 m arasında değişirken yüksek bağlayıcı oranlı RCC'de bu kalınlıklar genelde 0.3 m olmaktadır. Japonlar ardarda serilen katmanların yerleştirilme süresini 4 günle sınırlandırmışlardır. Bu sayede çimento hidratasyonundan gelecek ısı önlenir. Bunun için bir sonraki tabaka serilmeden önce tabaka yüzeylerine düzleme harcı sürülerek bütün tabaka yüzeylerinin soğuk derz gibi davranması sağlanır.

Bu metotta geçirimsizliği sağlamak için, kalıp ve taze yerleştirilen RCD arasına klasik betondan yapılmış memba ve mansap kaplamaları yerleştirilir. Daha sonra RCD karışımıyla dalgıç vibratör yardımıyla birleştirilir. Bu klasik beton kaplamalar 3 m veya daha fazla kalınlıktadır. Bununla birlikte enine büzülme derzlerinin de bulunduğu ayrıntılı bir derz sistemi, baraj uzunluğu boyunca 15 m'lik aralıklarla yerleştirilmelidir. Derzler memba yüzeyi başlangıcından mansap yüzeyi sonuna doğru kesilir.

RCD tasarımında önemli bir konu da sıcaklık kontrolüdür. Çimento tipi ve miktarı belirlemek, karışımı soğutmak, tabaka kalınlığını ve yerleştirme programını iyi ayarlamak gibi hususlar ısı dağılımını kontrol altına almak için önemlidir.

Bir RCD karışımı nemli, ince daneli malzemeyi fazlaca içeren ve beton yaklaşımını izleyen bir görüştür. Bu yaklaşımda kıvam, titreşimli kompaktör zamanıyla ölçülür. Genelde çimentolu malzeme içeriği 125 kg/m^3 olur ve yüzde 20-30 arası uçucu kül kullanılır. Agregalar ise iyi derecelenmiş, yaklaşık yüzde 30 kum içeren işlenmiş kayadan oluşur. RCD'nin tipik örnekleri Japonya'daki Shimajigawa ve Tamagawa Barajlarıdır. Bu inşa metodu, klasik ağırlık beton barajdan %10 ile 15 arası daha hızlıdır ve işgücü ağırlıklı olduğundan diğer RCC metodlarına göre daha pahalıdır.

Ayrıca daha dik mansap yüzeye sahip yüksek yapıştırıcı oranlı RCC barajlar da bu sayılan 3 tipten ayrıca bir metod olarak kabul edilebilir. Upper Stillwater Barajı bu şekilde yapılmıştır.

Son senelerde RCC baraj tiplerinin enjeksiyonla takviyeli bir şekilde kullanımı hızla dünyada yaygınlaşmaktadır. Enjeksiyonla zenginleştirilmiş RCC (GE – RCC, Grout

Enjected Roller Compacted Concrete), ilk olarak Çinde geliştirilmiştir (Forbes, 1999). Klasik silindirle sıkıştırma beton gibi tabakalar halinde beton serilir. RCC sıkıştırılmadan önce üzerine çimento şerbeti dökülür. Birkaç dakika içinde sulandırılmış çimento şerbeti iyice nüfuz eder. Vibratör yardımıyla şerbet iyice dağıtılır ve GE – RCC düşük çökmeli klasik beton gibi konsolidasyona uğrar. Daha sonra tabaka üstüne düzleme harcı sürülür. Bu metod çimento oranı 120 kg/m^3'ü aşmayan orta yapıştırıcı oranlı RCC'lerde ve yüksek yapıştırıcı oranlı RCC'lerde kullanılır. Katılan şerbetin su – çimento oranı sayesinde karışımın mukavemeti belli sınırlarda kontrol altında tutulabilir.

3. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA BETONUN (RCC) GENEL ÖZELLİKLERİ

3.1 Genel

Silindirle sıkıştırma beton (RCC) karışımları; mukavemet, geçirimlilik, elastik özellik ve basınç dayanımı gibi birçok karakteristik özelliğe sahiptir. Özelliklerdeki farkın sebepleri ise RCC'nin düşük su muhtevası, hava boşluğu oranı ve malzeme değişikliğinden oluşur. RCC'nin agrega kalitesi, düşük çimento dozajı ve kullanılan mineral tamamlayıcı maddesine dayanarak RCC özellikleri klasik betona göre daha geniş bir aralıkta değişir. Eğer uygun sıkıştırma yapılıp uygun malzeme de kullanılırsa klasik betona göre daha sağlam ve kaliteli RCC elde edilebilir.

3.2 Mukavemet

Yüksek yapıştırıcı oranlı RCC, eğer klasik betonla aynı su ve çimento oranına sahip ve aynı agrega malzemesine sahipse klasik betona benzer özellikte basınç mukavemeti gösterir. Zayıf RCC'de ise tüm boşlukları dolduracak kadar yeterli miktarda yapıştırıcı olmadığından mukavemet klasik betondan farklı olacaktır. Zayıf RCC'de basınç mukavemeti, agregaların birbirine değmesinden oluşacak kırma mukavemetine bağlıdır.

Genelde çekme mukavemetleri karşılaştırıldığında RCC'nin çekme mukavemeti, klasik betona göre daha düşüktür. RCC karışımlarda ancak yüksek kaliteli agrega ve yüksek yapıştırıcı oran kullanılırsa çekme mukavemeti açısından klasik betonla aynı seviyelere gelinebilir. RCC'de agrega kalitesi,yaş, çimento oranı gibi özelliklere göre çekme mukavemeti/basınç mukavemeti oranı yüzde 7 ile 13 arasında değişir. Bu orana rağmen çekme mukavemeti, laboratuvar testi yapılmadan sadece RCC tasarımından bulunamaz. RCC kayma ve bağlanma mukavemeti, tabaka yüzeylerindeki kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlıdır. RCC tabakalarının birbirlerine bağlanmalarına etkiyen başlıca faktörler: yüzey durumu, taze betonun şekil alma özelliği ve betona etkiyen sıkıştırma kuvvetidir(Demirci,1996).

Taze RCC dökülmeden bir önceki tabaka yüzeyinin temizlenmesi önemlidir çünkü büzülme derzleri ve tabaka yüzeylerinde mukavemet en düşük değerdedir. Tabaka

yüzeyi nemli,temiz ve gevşek malzemeden arınmış olmalıdır. Bu koşulların tersi yüzeyde oluşursa soğuk derz oluşur. Bu durumda bir sonraki tabaka serilmeden önce soğuk derz olan yerlere özel uygulamalar yapmak gerekir. Bu uygulamalardan bazıları: yüzeye su püskürterek temizleme ve taze RCC tabaka dökülmeden önce yüzeye klasik beton düzleme harcı yayılmasıdır. Yüksek yapıştırıcı oranlı RCC'de ise soğuk derz oluşmadığı müddetçe düzleme harcına ihtiyaç yoktur.

Zayıf RCC'de düşük yapıştırıcı içeriğinden dolayı düzleme harcı, tabaka yüzeylerindeki bağlanmayı artırır ve suyu daha az geçirecek bir derz oluşturur. En fazla konsolüdasyonu sağlamak için gereken sıkıştırma kuvveti, test dolgu bölümü inşası süresince bulunabilir. Titreşimli silindirlerle geçilecek pas sayısı, kullanılan ekipmana ve RCC karışımı tasarımına bağlıdır. Ön tasarım değerleri için genel değerler kohezyon için 0.07 kg/cm^2 ve sürtünme katsayısı için 1 alınabilir. En son tasarımda geçerli olan değerler ise yerleştirme testindeki delinen çukurlardan elde edilir.

3.2.1 Basınç Mukavemeti (f_c')

Klasik betonda da görüldüğü gibi basınç mukavemeti, silindirle sıkıştırma betonun da tüm mukavemeti hakkında fikir sağlayan bir ölçü olarak algılanmaktadır. Tasarım yükleri içinse genelde dikkate alınan ana öğe çekme mukavemeti olmasına rağmen çok az da olsa bazı zamanlarda basınç mukavemeti de önem taşır. Basınç mukavemeti; karışımın işlenebilirliğini göstermek, tasarım özelliklerinin tam doğru olduğunu kanıtlamak ve bazı diğer amaçlar için inşaat sırasında ölçülebilir. Basınç mukavemeti genelde sıkıştırma derecesinden, agrega kalite ve derecelendirmesinden, çimento malzeme kalitesi ve karışım içeriğinden etkilenir. İyi sıkıştırılmış RCC karışımında da bu etkiler klasik betona yaptığı tesirlerin aynısını gösterir. Eğer RCC karışımı az sıkıştırılmış veya tüm boşlukları doldurmak için yeterince bağlayıcı malzeme kullanılmamışsa, elde edilecek mukavemet değerini sıkıştırma derecesi belirleyecektir. Genelde RCC karışımlar, bir yıl sonunda 69 kg/cm^2 ile 276 kg/cm^2 arasında bir basınç mukavemetine ulaşırlar. Çoğu RCC projede ise 90 günlük ile bir yıllık değerler 138 kg/cm^2 ile 207 kg/cm^2 arasında alınır. Tasarım açısından dayanıklılığın tam olması için basınç mukavemetinin en alt sınırı 138 kg/cm^2 alınır. Sismik bölgelerde ise yüksek çekme ve kayma mukavemetinden dolayı duruma göre daha yüksek basınç mukavemeti değeri alınması gerekmektedir(US Army Corps of Engineer, 2000).

3.2.2 Çekme Mukavemeti

Çekme mukavemeti; doğrudan germe metodu (CRD – C 164), bölme gerilme metodu (ASTM C 496), eğilme testi ve kırılma modülü metodu (ASTM C 78) ile ölçülebilir. Tüm çekme mukavemeti deneyleri; su muhtevasına, yaşa ve yükleme oranına bağlıdırlar. Bu deneylerden çıkan sonuçlar birbirinin aynısı olmaz. Genelde silindirle sıkıştırma betonun çekme mukavemeti; tabaka yüzeylerinin durumu, karışımın sıkıştırılma derecesi, çimento içeriği, bağlayıcı malzemenin yapıştırıcı özelliği ve kullanılan agreganın mukavemetine bağımlıdır. RCC'de en zayıf noktalar büzülme derzleri olduğundan, bu yerlerdeki çekme mukavemeti değerleri baraj açısından kritik bir özellik sayılabilir. Büzülme derzinin çekme mukavemeti açısından doğrudan çekme mukavemeti testi, uygun çekme mukavemeti testidir. Bölme gerilme metoduyla da bu değer belirlenebilse de çekirdekteki derzlerin tam olarak tanımlanması va bu sayede sağlıklı bir sonuç elde edilmesi oldukça zordur. Başka bir metod da basınç mukavemetinden yola çıkılarak çekme mukavemetinin tahmin edilmesidir. Agregaya göre çekme mukavemetinin basınç mukavemetine oranı % 5 ile % 15 arasında değişir ama bu durumda da elde edilecek sonuçlar tam gerçekçi değildir. Cannon 1995'te bu oranlarla ilgili çeşitli araştırmalar yapmıştır(Cannon, 1995). Cannon'a göre belirli mukavemet düzeylerine göre bu oranlar değişir, mesela mukavemet düzeyi arttığında çekme mukavemetinin basınç mukavemetine oranı azalmaktadır.

3.2.2.1 Direkt (Doğrudan) Çekme Mukavemeti (f_{dt})

Silindirle sıkıştırma betonda da aynen klasik betondaki gibi direkt germe test sonuçları, bölmeli çekme testi sonuçlarından % 25 ile 30 arasında düşüktür. Aynı zamanda bu sonuçlar betonun çekme mukavemeti özellikleri hakkında en alt düzeyde bilgi verir. Direkt germe testi, diğer teste nazaran numunenin kuruması ve üzerinde görülecek mikro çatlaklardan daha çok etkilenir. Bu yüzden genelde silindirle sıkıştırma betonda etkin çekme mukavemetini bulmak için bölmeli çekme testi daha çok kullanılagelmiştir. Buna rağmen çekme gerilmesi açısından en kritik noktalarda yani büzülme derzlerinde ise direkt germe testi daha uygundur.

3.2.2.2 Büzülme Derzi Direkt Çekme Mukavemeti

Cannon tarafından yapılan bölmeli germe testinden alınan, kullanılmak üzere derz direkt çekme mukavemetleri için öntasarım değerleri tablo 3.1 ve tablo 3.3'te

verilmiştir. Klasik betondaki gibi RCC'de de büzülme derzleri bölgelerinde direkt çekme mukavemeti, diğer bölgelere nazaran daha düşüktür. Derz bölgelerindeki mukavemetin değişen yapısından dolayı ortada biraz belirsiz bir durum oluşmaktadır. Buradaki çekme mukavemeti için tasarım değerlerinin belirlenmesinde belirsiz durumdan dolayı; inşaat yöntemi, katman yüzeylerinde düzleme harcı kullanılma durumuna ve karışıma göre bazı istatistiki kabuller yapılır. Eğer konsolidasyon zayıf olursa, segregasyon olursa veya tabaka yüzeyleri yeterince temizlenememişse tabakaların sınırları boyunca direkt çekme mukavemeti çok azalır. Derzlerde iyi derecede bağlayıcı mukavemet elde etmek için düzleme harcı kullanılmalı, derzlerin üstü hızlı bir şekilde diğer tabakalarca kapanmalı, iyi kalitede agrega kullanılmalı, karışım uygun olmalı ve iyi bir sıkıştırma sağlanmalıdır. Düzleme harcı hem üste gelen tabakayla bağlanmayı sağlar hem de yüzeyde kalan girintili kısımları doldurur. Testlerden elde edilen verilerin yetersiz olduğu durumlarda tablo 3.2 ve tablo 3.3'ten kabul edilebilir öntasarım değerleri alınır.

3.2.2.3 Bölme Çekme Mukavemeti (f_{st})

Bölme çekme mukavemet testlerini gerçekleştirmek, direkt çekme testlerine göre daha kolaydır ve sonuçları daha doğrudur. Buna rağmen bu sonuçlar bile gerçeğe uygun olması açısından 0.75 olan azaltma faktörüyle çarpılır. Bu sayede direkt çekme testlerinden çıkacak sonuçları da yansıtmış olur. Klasik betonun bölme çekme mukavemetinin tipik oranları tablo 3.1'de, RCC için olanlar ise tablo 3.2 ve tablo 3.3'te gösterilmiştir. Öntasarım için bölme çekme testlerinden tahmin edilen derz çekme mukavemetleri için tablo 3.2 ve tablo 3.3 kullanılabilir (Cannon, 1995). Son tasarım değerleri için testlerin devamı gerekmektedir. Bölme çekme testinde kuvvet uygulanan yüzey numunenin uzun ekseni boyunca dar bir alan oluşturur. Bu sayede bölme çekme testi, direkt çekme testinden büyük değerler oluşturur.

Tablo 3.1 Klasik Kütle Betonu Mukavemet Değerleri

		Bölme Çekme Mukavemeti			Büzülme Derzi Tasarım Çekme Mukavemeti	
Maksimum Dane çapı	Maks/Min	≤ 207 kg/cm^2	>207 kg/cm^2	Çevirme Faktörü	≤ 207 kg/cm^2	>207 kg/cm^2
≤ 75 mm	Maksimum	0.15 f_c'	0.664 $(f_c')^{1/2}$	0.56	0.085 f_c'	0.3735 $(f_c')^{1/2}$
	Minimum	0.10 f_c'	0.498 $(f_c')^{1/2}$	0.56	0.055 f_c'	0.2822 $(f_c')^{1/2}$
> 75 mm	Maksimum	0.15 f_c'	0.664 $(f_c')^{1/2}$	0.50	0.075 f_c'	0.332 $(f_c')^{1/2}$
	Minimum	0.10 f_c'	0.498 $(f_c')^{1/2}$	0.50	0.050 f_c'	0.249 $(f_c')^{1/2}$

Tablo 3.2 Silindirle Sıkıştırma Beton, Uygun Kıvam ≤ 30 Saniye Vebe Titreşimi için Mukavemet Değerleri

	Düzleme harcı durumu		Bölme Çekme Mukavemeti			Büzülme Derzi Tasarım Çekme Mukavemeti	
Maks. Dane çapı	E H	Maks/Min	≤ 241 kg/cm^2	>241 kg/cm^2	Çevirme Faktörü	≤ 241 kg/cm^2	>241 kg/cm^2
≤ 75 mm	-	Maksimum	0.17 f_c'	0.7055 $(f_c')^{1/2}$	0.53	0.090 f_c'	0.3735 $(f_c')^{1/2}$
	-	Minimum	0.08 f_c'	0.4565 $(f_c')^{1/2}$	0.53	0.040 f_c'	0.2407 $(f_c')^{1/2}$
> 75 mm	E	Maksimum	0.17 f_c'	0.7055 $(f_c')^{1/2}$	0.47	0.080 f_c'	0.3320 $(f_c')^{1/2}$
	E	Minimum	0.08 f_c'	0.4565 $(f_c')^{1/2}$	0.47	0.040 f_c'	0.2158 $(f_c')^{1/2}$

Tablo 3.3 Silindirle Sıkıştırma Beton, Uygun Kıvam > 30 Saniye Vebe Titreşimi için Mukavemet Değerleri

	Düzleme harcı durumu		Bölme Çekme Mukavemeti			Büzülme Derzi Tasarım Çekme Mukavemeti	
Maks. Dane çapı	E H	Maks/Min	≤ 241 kg/cm^2	>241 kg/cm^2	Çevirme Faktörü	≤ 241 kg/cm^2	>241 kg/cm^2
≤ 75 mm	E	Maksimum	0.17 f_c'	0.7055 $(f_c')^{1/2}$	0.35	0.060 f_c'	0.2490 $(f_c')^{1/2}$
	-	Minimum	0.08 f_c'	0.4565 $(f_c')^{1/2}$	0.35	0.030 f_c'	0.1577 $(f_c')^{1/2}$
> 75 mm	E	Maksimum	0.17 f_c'	0.7055 $(f_c')^{1/2}$	0.32	0.055 f_c'	0.2241 $(f_c')^{1/2}$
		Minimum	0.08 f_c'	0.4565 $(f_c')^{1/2}$	0.32	0.025 f_c'	0.1411 $(f_c')^{1/2}$
≤ 75 mm	H	Maksimum	0.17 f_c'	0.7055 $(f_c')^{1/2}$	0.18	0.030 f_c'	0.1245 $(f_c')^{1/2}$
		Minimum	0.08 f_c'	0.4565 $(f_c')^{1/2}$	0.18	0.015 f_c'	0.0830 $(f_c')^{1/2}$
> 75 mm	H	Maksimum	0.17 f_c'	0.7055 $(f_c')^{1/2}$	0.16	0.025 f_c'	0.1162 $(f_c')^{1/2}$
		Minimum	0.08 f_c'	0.4565 $(f_c')^{1/2}$	0.16	0.015 f_c'	0.0747 $(f_c')^{1/2}$

3.2.2.4 Eğilme Mukavemeti

Kırılma modülü olarak da adlandırılan eğilme mukavemeti, çekme mukavemetinin bir ölçütüdür. Eğilme mukavemeti, silindirle sıkıştırma barajlarda kritik nokta olan büzülme derzlerindeki çekme mukavemetini hesaba katmaz. Bu yüzden genelde RCC baraj analizlerinde eğilme mukavemeti kullanılmaz.

3.2.2.5 Dinamik Çekme Mukavemeti

Hızlı yükleme koşulları altında silindirle sıkıştırılmış beton az da olsa teste tabi tutuluyorsa da ortaya çıkan sonuçlar klasik betonunkinden pek de farklı değildir. Raphael dinamik yüklemenin betonun çekme mukavemetine etkisini incelemiştir (Raphael,1984). Basınç mukavemeti için olduğu gibi betonun çekme mukavemeti için de gerilme oranı kullanılarak ilişki kurulabilir. Yüksek gerilme oranı testlerinden oluşan çekme mukavemet değerleri, gerilme oranı çok yavaşken yapılan testlerdeki değerlerden en az % 50 fazla bulunmuştur. Bu sebeple silindirle sıkıştırma betonlarda dinamik çekme mukavemeti, direkt çekme mukavemetinin 1.5 katına eşit alınabilir. Bu büyütme katsayısı derzlerde de ana malzemelerde de geçerlidir. Hatta direkt germe, bölme germesi veya kırılma modülü testlerinin hepsi için geçerlidir.

3.2.3 Kayma Mukavemeti

Kayma mukavemeti, içsel sürtünme ile kohezyon arasındaki Mohr zarfı ilişkisiyle temsil edilen ve RCC baraj tasarımı için hayati bir fonksiyon taşıyan bir özelliktir.

$$S = c + \sigma \tan\phi \qquad (3.1)$$

Burada,

S = Kayma mukavemeti, kg/cm^2

c = Kohezyon

σ = Dik gerilme, kg/cm^2

ϕ = Kayma Mukavemeti açısı

Sınırlandırılmış enine kayma mukavemeti için test metodu olarak adlandırılan CRD– C 90 kullanılarak, delinen çekirdek kısmında veya alınan numunelerde bu özellik ölçülebilir. Genelde üç taraftan etkiyen minimum basınç altında ve silindirle sıkıştırılmış betonun derzler de dahil olmak üzere tüm kesimlerinde bu testler yapılır. Barajlar için tahmin edilen yukarıdan etkiyecek basınç, en azından barajın

maksimum yüksekliğini temsil etmelidir. Diğer bölümlere nazaran katman yüzeyleri boyunca kayma mukavemeti daha düşüktür. Çekme mukavemetinde olduğu gibi, kayma mukavemetinde de tabaka yüzeylerinin mukavemeti tasarımı etkileyecek en önemli olgudur. Silindirle sıkıştırılmış betonun kayma mukavemeti, laboratuvardaki silindirlerden, kesilen silindirle sıkıştırma beton bloklarından, delinen test bölgelerinden ve silindirle sıkıştırma beton yapısından çıkarlan örneklerden bulunabilir. Ön tasarım açısından düşünürsek genelde silindirle sıkıştırma betonun kayma mukavemeti testlerden ve zamansal datalar kullanılarak bulunabilir, ayrıca büzülme derzlerindeki kayma mukavemeti de bulunan değerlerin geliştirilmesiyle bulunabilir. Barajlardaki son tasarım için test bölgelerinden alınan numunelerin labotatuvardaki testlerinden mukavemet bulunur.

3.2.3.1 Ana Bölüm Kayma Mukavemeti

Kohezyon, karışım oranlarına göre değişik değerler alır. Sürtünme açısı ise genelde kohezyonu etkileyen şeylerden etkilenmez, agrega cinsi ve şeklinden etkilenir. Ana bölümdeki RCC'de kohezyon genelde 5 kg/cm^2 ile 41 kg/cm^2 arasında değer alır (McLean ve Pierce, 1988). c / f_c' (kohezyonun basınç mukavemetine oranı), basınç mukavemetinin % 20'sine kadar çıkabilir. 30 saniyeden uzun Vebe zamanına sahip karışımların kohezyon değerleri, basınç mukavemetinin % 10'undan azdır. Silindirle sıkıştırma betonların sürtünme açıları 40 ile 60 derece arası değişmektedir.

3.2.3.2 Büzülme Derzi Kayma Mukavemeti

Bu bölümdeki kayma mukavemeti, tasarım için kritik önem taşıyan bir değerdir. Büzülme derz bölgelerindeki kayma mukavemetleri, RCC'de klasik betona göre daha düşüktür. Silindirle sıkıştırılmış betonun bir tabakasıyla öbür tabakası arasında kayma mukavemeti çok farklılık gösterebilir ama kayma mukavemeti açısı hemen hemen sabit kalır. Kohezyonsa genelde yapıştırıcı ve çimento oranı, derz hazırlanması ve oluşturulması ile değişik değerler alır. Düzleme harcı kullanarak veya bu problemleri düzelterek kohezyon değeri artırılabilir. Kayma mukavemeti açısı genel olarak kohezyonun etkilendiği sebeplerden etkilenmez, agrega tipi ve şeklinden etkilenir. McLean ve Pierce öntasarım için c = 0.1f_c' geçerli olmasa bile sürtünme açısının 45º olmasının uygun olduğunu ileri sürmüştür(McLean ve Pierce, 1988). Yataklanmamış tabaka derzleri için c/f_c' oranı 0.03 ile 0.06 arasında değişir. Yataklanmış tabaka derzleri için ise bu aralık 0.09 ile 0.15 arasındadır. Her iki

durumda da sürtünme açısı değişmez. Birbirine tabakalar bağlandığında gerçek duruma yaklaşmak için kohezyon sayısı düşültülebilir. Birbirine bağlanmış tabaka derzi iyileştirilmesi, yataklanmamış tabaka derzi öngören projelerde %2 ile %38 arasında değişir. Bu oran yataklanmış tabaka derzi öngören projelerde ise %65 ile %85 arasında değişir. Düzleme harcı kullanılacak tabaka derz yüzeylerinde öntasarım için $c = 0.05f_c'$ denkliği uygundur, tersi bir durumda ise 0 değeri kabul edilir. Küçük projelerde her bölüm için kayma mukavemeti açısı 458 alınabilir.

3.3 Poisson oranı

Poisson oranı, ζ üniform olmayan eksenel bir gerilme uygulandığı zaman oluşan yanal yer değiştirmenin eksenel yer değiştirmeye oranıdır. RCC için poisson oranı değerleri 0.17 ile 0.22 arası değişmektedir ve klasik beton değerlerine yakın değerdedir. Daha düşük mukavemette ve ilk yaşlarda poisson oranı daha düşük olur. Tasarım için alınabilecek örnek bir değer 0.2 olabilir(Demirci,1996).

3.4 Elastisite

Young modülü olarak da bilinen elastisite modülü, bir malzemenin elastik limit altındayken gerilme farkının yerdeğiştirme farkına oranıdır. Elastisite modülü, malzemeye belirli miktar yük yüklendiğinde o malzemenin deformasyona karşı ne kadar direnebileceğinin bir ölçüsüdür. Klasik beton için elastisite modülü, birim hacim ağırlık ve sıkıştırma mukavemetiyle doğru orantılıdır. E şu formülle belirlenir:

$$E=2.31W^{1.5}\sqrt{f_c}\ kg/cm^2 \qquad (3.2)$$

RCC'nin elastik özelliklerine etkiyen etmenler: yaş,basınç mukavemeti, agrega tipi, su/çimento oranı ve çimento içeriğidir. Yüksek kaliteli agrega ve yüksek çimento oranı kullanılırsa elastiklik bakımından klasik betona benzer özellikler elde edilir. Zayıf RCC kullanılarak veya düşük kaliteli agrega kullanılarak yapılan bir kütle beton baraj daha düşük bir modüle sahip olur ve yüksek yapıştırıcı oranlı RCC baraja göre çatlama potansiyeli daha az olur.

Betonun elastisite modülü, çimento miktarı ve yaşla birlikte artar. Ayrıca karışımdaki boşluk oranı azalıp yoğunluk arttıkça da elastisite modülü büyür. Silindirle sıkıştırma betonda elastisite modülü 2,5 kgf/m^2 değerine bir yılda çıkabilmektedir.

Zintel Canyon Barajı'nda kullanılan silindirle sıkıştırma betonun üzerinde uygulanan test sonuçları tablo 3.4'te (Demirci, 1996) verilmiştir:

Tablo 3.4 Zintel Canyon Barajında RCC özelliklerinin zamanla değişimi

Çimento miktarı kg/m^3	Ağırlıkça su/çimento oranı	Yaş (gün)	Basınç dayanımı kgf/cm^2	Elastisite modülü kgf/m^2	Poisson oranı
		3	15.5	0.22	-
		7	23.9	0.49	-
59.3	1.95	28	42.9	0.92	0.20
		91	76.6	1.51	0.21
		365	111	1.81	0.17
		3	61.9	0.95	-
		7	82.3	0.95	-
118.7	0.98	28	135	1.55	0.20
		91	160	1.74	0.17
		365	224	2.36	0.21

3.5 Birim Hacim Ağırlık

RCC'nin birim ağırlığı; düşük su içeriği, giren hava miktarının az olması ve yerleştirme sırasında sıkıştırma sayesinde klasik betonunkinden daha fazla olur. Birim hacim ağırlık genelde 2400 kg/m^3'ü aşar.

3.6 Sünme

Sünme, bir yükleme durumu için zamana bağımlı oluşacak yer değiştirme olarak tanımlanabilir. Birim gerilme etkidiği zaman oluşan sünmeye ise spesifik sünme denir. Uzun zamanlı yükleme durumundaki sünme yer değiştirmede bir artışa sebep olur. Bu durumda artış devamlı olarak artmaz, artış hızı yavaşlayarak artar ve bu durumun oluşması için gerilmenin sabit tutulması şarttır. Sünme; betonun sıkıştırma mukavemetine ve elastisite modülüne yani malzeme özelliklerine ve karışım oranına bağımlıdır. Bu yüzden sünme yükleme durumundaki betonun daha sonraki zamanla değişecek olan durumunun da bir fonksiyonudur. Yüksek mukavemetli betonlar ve yüksek elastisite modülüne sahip betonlar daha düşük sünme gösterirler, yani daha yüksek iç termal(ısısal) gerilmeye sahip olurlar. Buna rağmen silindirle sıkıştırma beton ağırlık barajlarda basınç gerilmeleri çok büyük değerlere ulaşmadıkça sünme oranları da herhangibir sorun oluşturmaz. Tam tersine düşük mukavemetli ve düşük elastisite modüllü karışımlar daha fazla sünme gösterir. Temel baskısı, termal ve dış yüklemelere bağlı olarak oluşan gerilme ve yer değiştirme artışını yavaşça azaltmak

için yüksek sünme tercih edilen bir durumdur. Sünme için şöyle bir formül verilmiştir:

$$\varepsilon = (1/E) + F(J) \ln (t + 1) \qquad (3.3)$$

ε = spesifik sünme, Mpa(10 kg/cm^2) başına düşen toplam yer değiştirme

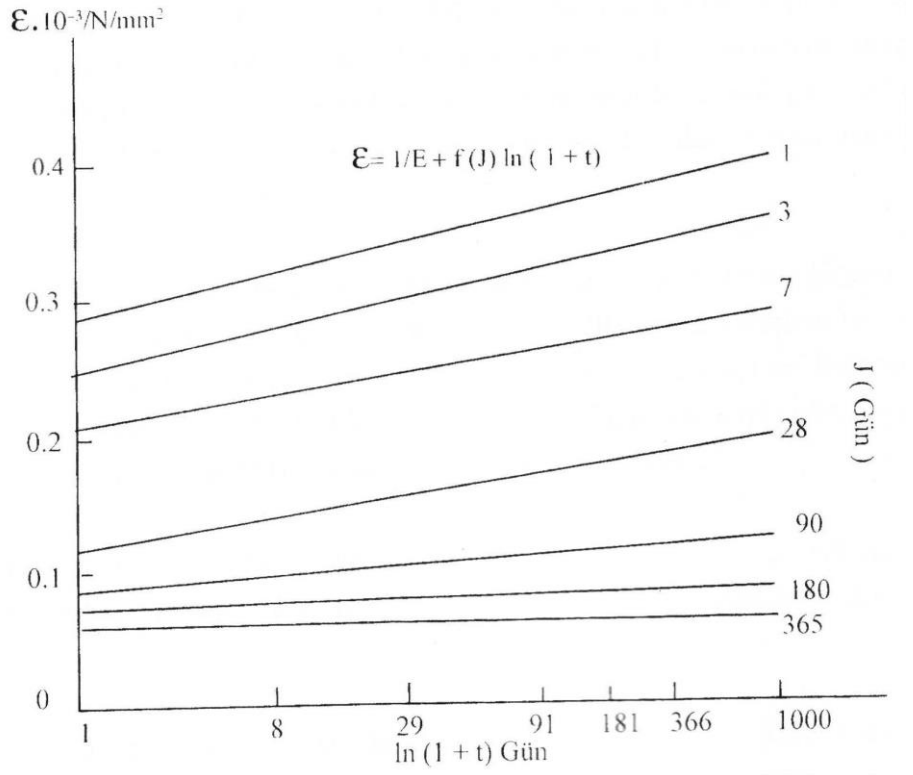
E = statik elastisite modülü

F(J) = sünme oranı

t = yükleme sonrası geçen gün sayısı, olarak tanımlanmıştır.

Bu formüldeki (1/E) kısmı yüklemeden oluşacak birincil elastik yer değiştirmeyi belirtir, ikinci kısımsa yüklemeden sonraki uzun dönem etkilerini temsil eder.

Genelde F(J) değerleri Mpa(10 kg/cm^2) başına 1.5 milyon ile 29 milyon arası değişir, daha düşük sıkıştırma mukavametine sahip karışımlar olursa daha yüksek değerler elde edilir. Sünme etkileri, yükleme boyunca ölçülen güçlendirilmiş elastisite modülü kullanılarak da anlaşılabilir. Şekil 3.1'de birim gerilme için RCC'de geliştirilen sünme eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 3.1 1 N/mm^2 Birim Gerilme için, RCC'de geliştirilen Sünme Eğrileri

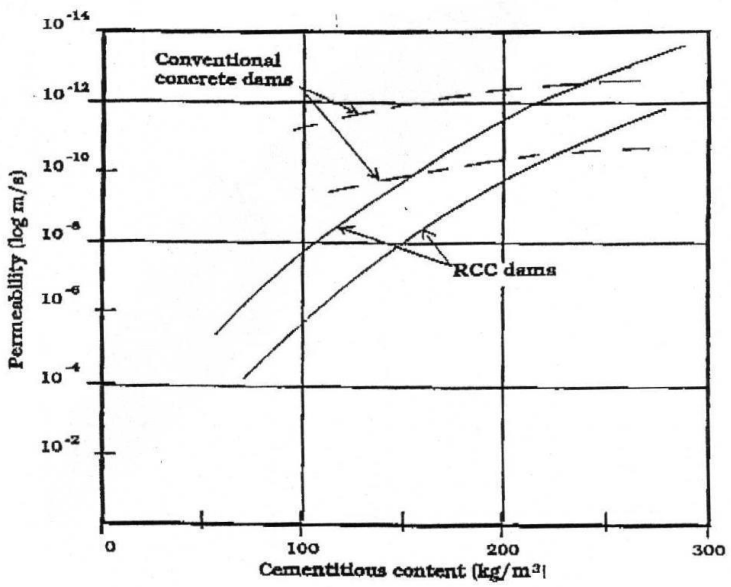
3.7 Geçirimlilik

Bir kütle beton baraj geçirimsizliği, hidrate olmuş çimento hamuru porozitesi ve hava boşluğu içeriğine bağlıdır. Geçirimliliğe yeterli önlem alınmazsa baraj boyunca suyun içeri gireceği bir su kanalı oluşur. Boşlukları doldurmaya yetecek kadar ince daneli malzeme kullanılan ve iyi bir şekilde sıkıştırılan RCC karışımı için RCC'nin geçirimlilik özellikleri klasik kütle betona çok benzerlik gösterir. Şimdiye kadar yapılmış olan RCC barajlara bakarsak klasik kütle beton geçirimlilik özelliklerini elde etmek için yaklaşık olarak 150 kg/m^3 beton dozajı kullanmak yeterlidir. Bu dozaj, orta ile yüksek yapıştırıcı oranlı RCC karışımı arasındaki bir karışımı temsil eder. Zayıf RCC karışımlarında da eğer yeterli miktarda ince daneli malzeme kullanılırsa yeterli geçirimlilik karışım içinde sağlanmış olur. Bu durumda katman yüzeylerindeki bağlayıcı mukavemet az olacağından tüm baraj boyunca geçirimlilik yeterli olmayabilir ve özel önlemler gerekebilir. Bu önlemler: memba kaplaması, klasik beton kaplama veya katmanlar arasında düzleme harcı kullanmak gibi uygulamalardır. Mevcut barajlara bakarsak rezervuarı ilk doldurulduğu zaman çok geçirimli olanlarda, zamanla boşlukların siltle dolması, ısınma ve kireçlenme sebebiyle sızmada büyük miktarda azalma olmuştur.

Geçirimlilik fazla olursa boşluk suyu basıncı ve sızan suyun oluşturabileceği $Ca(OH)_2$'nin ayrışması nedeniyle hidrate olmuş çimento gevşeyerek parçalanır. Bu barajlarda asla olması arzu edilmeyen durumlardan biridir. Silindirle sıkıştırma beton barajlar için geçirimlilik katsayıları genelde şu özellikleri gösterir:

1. RCC için K, geçirimlilik katsayıları genelde:K değeri, 10^{-7} ile 10^{-6} cm/sn arasındadır.
2. K, 0.063 mm'den daha küçük malzemenin artması ile küçülür.
3. K'nın en küçük olduğu zaman, Proktor deneyinde en uygun su muhtevası sağlandığı zamandır.

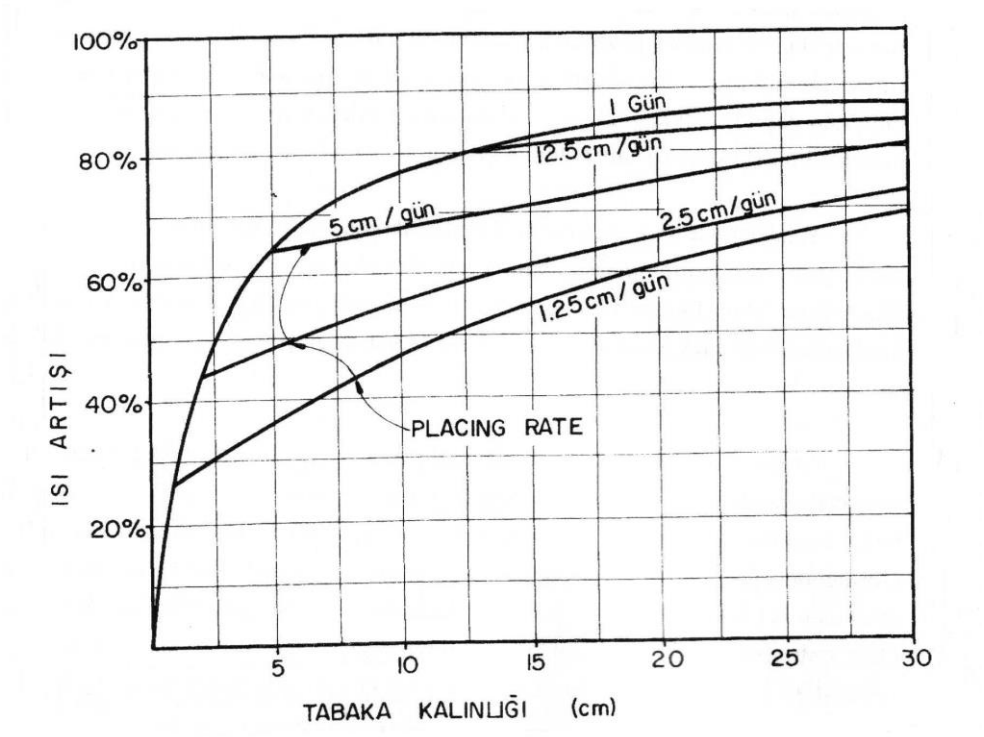
150 kg/m^3 beton dozajını kritik nokta olarak kabul edersek bu noktakinden daha fazla beton dozaja sahip olan silindirle sıkıştırma beton barajlar, klasik beton barajlardan daha geçirimsizdirler. Bu karşılaştırma şekil 3.2'den açıkça görülebilir.



Şekil 3.2 RCC barajlarla klasik beton barajların geçirimlilik katsayılarının, çimento içeriğine göre karşılaştırılması

3.8 Termal (Isısal) Özellikler

Betonun termal özellikleri agrega özelliklerine doğrudan bağımlıdır. Eğer RCC'de de klasik betonda kullanılan agreganın aynısı kullanılırsa, silindirle sıkıştırılmış betonda özgül ısı, genleşme katsayısı ve iletkenlik gibi özellikler klasik betonun değerleriyle benzer özellikler gösterir. Karışımın termal özellikleri, çok farklı türden agrega kaynaklarının kullanılabilme olasılığı olan büyük boyutlu projeler için özellikle önemlidir. Termal genleşme katsayısı gibi ısısal özelliklerin de gözönüne alındığı bir tasarımda, bu açıdan seçilecek agrega tipi sayesinde çok büyük miktarda maliyet düşer (Abifeld ve Johnson, 1991). Genelde silindirle sıkıştırma beton karışımlarında klasik beton karışımlarına göre agrega oranı daha fazla olduğundan termal genleşme katsayıları da klasik betona göre biraz daha düşüktür. Hem RCC hem de klasik beton için termal genleşme katsayıları C° başına 7 ile 17 milyon arası (F° başına 4 ile 8 milyon arası) değişmektedir. RCC öntasarım çalışmaları için C° başına 9 milyon (F° başına 5 milyon) kullanılması uygun bir değerdir. Şekil 3.3'te serilen tabaka kalınlıkları ile ısı artışları arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 3.3 Betonlama Hızının Isı Artışına Etkisi

Sililindirle sıkıştırma beton, üst üste katmanların sıralanması suretiyle yapıldığından tabakalar arası üniform ısı yayılımı kaçınılmazdır. Bu ısı yayılımı çatlakların azalması yönünde etki gösterir. Isı artışınını azaltmak için sabit döküm hızında tabaka kalınlığını azaltmak gerekir. Erken çatlak oluşmaması için dökülen betonla çevre arasındaki ısı farkı küçük olmalıdır. Eğer ısı farkı büyük olursa beton dışarıdan ısı absorbe edeceğinden çatlamalar kaçınılmaz olacaktır.

3.9 Donma-Çözülme

RCC karışımlarında genelde bilinçli şekilde bir hava girişi olmadığından, RCC karışımları kritik suya doyma noktasında donma-çözülmeye karşı yeterli direnç gösteremez. Ama birçok arazi tecrübesi göstermiştir ki silindirle sıkıştırma beton eğer kritik doyma noktasında değilse iyi bir direnç gösterir. RCC ile ilişkilendirilen ASTM C 666 – İşlem A (hızlı donma ve çözülmeye karşı beton direncinin standart test metodu) uygulamada çok zayıf kalmaktadır. Hava girişine izin veren karışım katkıları uygulamada çok kullanışlıdır ve laboratuar ve birkaç proje üzerinde de RCC karışımlarının hava gişine izin vermesi mükemmel bir performans oluşturmuştur. Bu yöntem Zintel Canyon Barajı, Nickajack Barajı, Santa Cruz Barajı, Lake Robertson

Barajı ve dünya üzerinde diğer birçok örnekte başarıyla uygulanmıştır. Hava girişine izin veren katkıların RCC karışımına eklenmesi yoluyla ASTM C 666 testinden bile çok iyi sonuçlar elde edilmektedir. Şu da bir gerçektir ki çoğu silindirle sıkıştırma beton karışımı, yüksek dozajda hava girişini sağlayan katkılara ihtiyaç duyar ve bu şekildeki RCC'ler klasik betona nazaran daha dayanıklı olur.

Sadece silindirle sıkıştırma betona özgü donma-çözülme için dayanıklılık faktörünü bulmak için metod bulunmamaktadır. Genelde klasik betonlarda kullanılan metod uygulanmaktadır. Yani deney numuneleri birbirinin peşi sıra donma-çözülme devrelerine maruz bırakılır. Bu noktadaki en önemli problem ise doğadaki şartlar tamamen laboratuvarla aynı olmayacağından, laboratuvar ortamındaki numunelerin sonuçlarının doğada da aynı çıkması kesin değildir. Ama en azından geliştirilen standartlar sayesinde laboratuvar ortamında dayanıksız çıkan numunelerin arazide de dayanamıyacağı kabul edilir. Betonun donma-çözülme saykıllarına dayanabilmesi için sağlamlık faktörü adlı faktör kabul edilmiştir. Genelde silindirik şekilde olan numunenin başlangıçtaki ağırlık, boy ve elastisite modülü belirlenir. Elastisite modülü şu formül kullanılarak bulunur:

$$E = C_1 W n^2 \qquad (3.4)$$

Buradaki terimler, C_1W : Sabitler

n : Enine temel frekans

E : Dinamik elastisite modülü, olarak tanımlanmıştır.

Numuneler için 1.5 saat dondurma ve 1.5 saat çözme olmak üzere 3 saati bir devre sayılmak üzere deneyler ard arda tekrarlanır. 50 devir sonunda deney durdurulur ve numunelerin yeni ağırlık, boy değişimi, elastisite modülü ve gözlenen hasarlar tesbit edilir. Aynı şekilde deneye devam edilir. Numune ilk ağırlığının % 25'ini kaybettiğinde deney bitirilir. Deney bitimine kadar geçen devrelere göre sağlamlık faktörleri tesbit edilir.

$$D = n_1.N/(n_0.M) \qquad (3.5)$$

Burada, D : Sağlamlık ve dayanıklılık faktörü

n_0 : Deney başlangıcındaki enine temel frekans

n_1 : Deney sonu enine temel frekans

N : Elastisite modülünün belli bir yüzde azaldığı devir sayısı

M : Deneyin son bulduğu devir sayısı, olarak tanımlanmıştır.

Donma-çözülme deneyi, hızlı ve yavaş olmak üzere iki türde yapılmaktadır:

1. Hızlı deney

a. Su içinde donma ve çözülme

b. Havada donma ve su içinde çözülme

2. Yavaş deney

a. Su içinde donma ve çözülme

b. Havada donma ve su içinde çözülme

Bu deneyler sonucu ortaya çıkan dayanıklılık faktörleri genelde beşe ayrılır. Çıkan sonuçlar ortam şartlarının farklılığından dolayı ancak bir fikir verme boyutunda kullanılabilir. Bu faktörler ve nitelikleri tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Sağlamlık Faktörü Kriterleri

	% 25 AĞIRLIK KAYBI VEREN DEVRE ADEDİ	SAĞLAMLIK	KULLANIŞ DURUMU
A	1000'den fazla	Çok iyi	Katkı ilavesiyle elde edilir.
B	500-1000	İyi	Her yerde kullanılabilir.
C	300-500	Zararsız	Donma-çözülmeye maruz yerlerde kullanılabilir. Düşük W/C önerilir.
D	150-300	Zayıf	Ilıman iklim için uygundur. Şiddetli dış etkiyle karşılaşmamalıdır.
E	150'den az	Çok kötü	Ilıman iklim için bile uygun değildir.

3.10 Hacim Değişimi

3.10.1 Kuruyarak Büzülme

Kuruma sebebiyle büzülme genelde agrega özellikleri ve su muhtevası durumuna göre oluşur. Silindirle sıkıştırma betonlarda bu şekilde büzülme klasik betona göre ya benzer durum gösterir ya da daha az büzülür. Bunun sebebi de su muhtevasının az kullanılmasıdır.

3.10.2 Otojen Hacim Değişimi

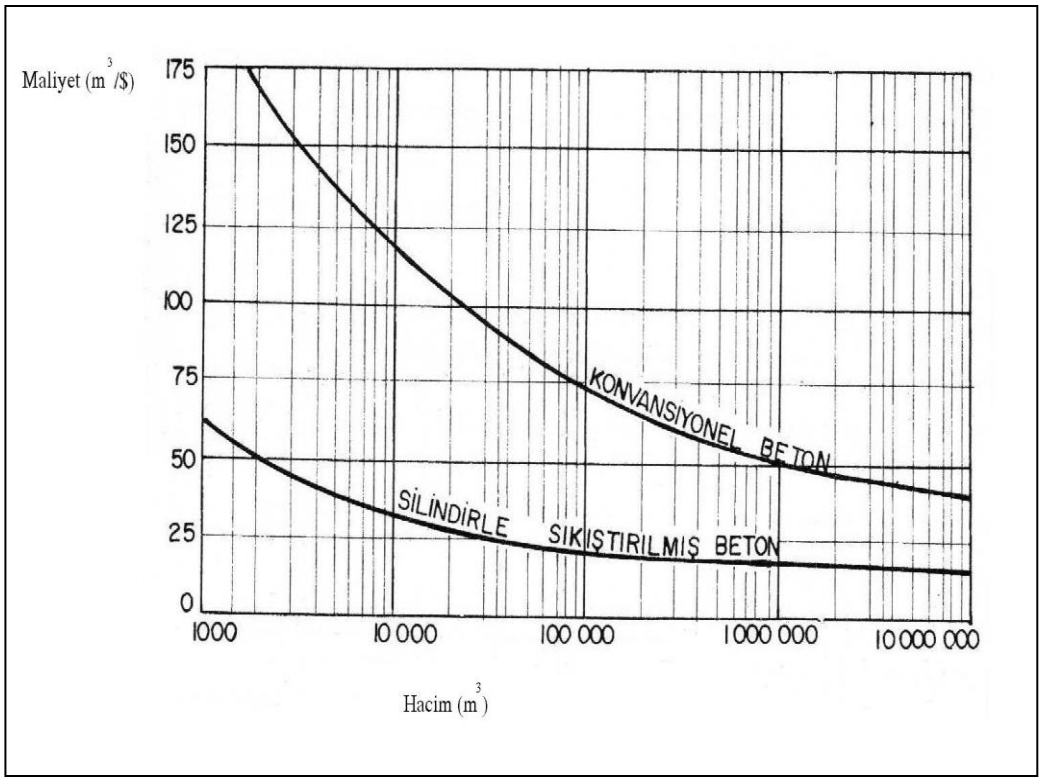
Otojen büzülme diye de adlandırılan bu durum, çimento miktarı artırılmadan veya su azaltılmaksızın çimentonun hidratasyona uğrayıp hacimde bir azalmaya neden olmasıdır. Bu şekilde bir hacim değişimi genelde büyük kütle betonlarda görülür ve çok büyük bir önemi vardır. Bu tip bir hacim değişimi, karışımdaki oranlardan ve agrega özelliklerinden doğrudan etkilenir. Ayrıca kuruyarak büzülmeden daha uzun zamanda oluşur.

3.11 Erozyona ve Aşınmaya Karşı Direnç

Bu özellik genelde silindirle sıkıştırma betonun basınç mukavemetine ve kullanılan agrega kalitesine bağlıdır. RCC'nin de klasik betonun da erozyona karşı direncinin ölçülmesi için ASTM C 1138 (betonun erozyona karşı direnci için standart test metodu) kullanılır. Bu metotta 12'şer saat arttırılarak 72 saat sonundaki hacim azalması bulunur. İyi bir RCC için 72 saat sonunda hacim kaybı % 3-15 arasında değişir. Bu metottaki datalar ve kabul edilen yüksek hızlı akımlar, test sonuçları ile arazideki durum arasında tam bir kolerasyon kurmak için yeterli değildir. Schrader ve Stefanakos'un 1995'te geliştirdiği gibi gözleme dayalı testlerin de yapılması gerekir. Bu testte ise orta ve yüksek hızlı akımlar için RCC direnci iyiden mükemmele kadar çıkabilir. Eğer benzer içerenler kullanılırsa düşük çimento oranlı ve iri agregali RCC karışımları da klasik betonun erozyon direncine eşit bir direnç gösterir.

3.12 RCC Maliyeti

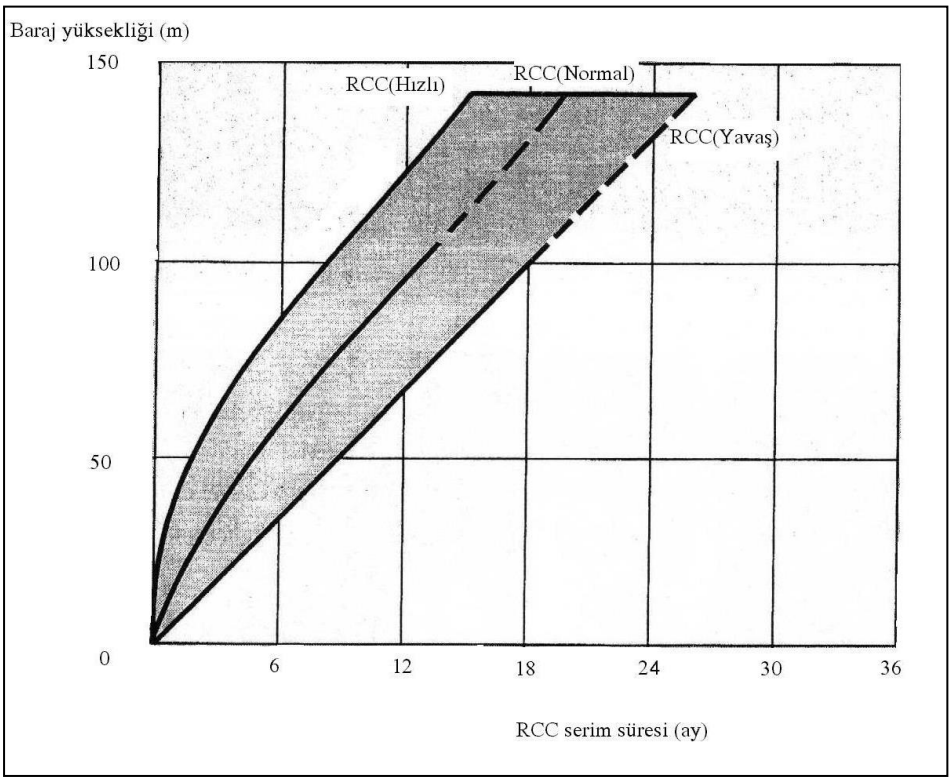
Fazla gövde hacimli barajlar için RCC sayesinde yapılan tasarruf maksimum seviyede olur. Özellikle geniş vadiler için RCC'nin sürekli serim metodu çok uygundur. Zayıf yapıştırıcı oranlı RCC metodu da çimento ve puzolan temininin zor olduğu bölgelerde veya mali yapının bunların fazla kullanılmasına elvermediği durumlar için çok uygundur. Klasik kütle betonu ile RCC maliyetleri genel olarak şekil 3.4'te karşılaştırılmıştır (USACE, 2000). Klasik beton ile yapılan barajlarla kıyaslandığında RCC kullanılarak yapılan barajlar %70'e kadar varan oranlarda daha az maliyete çıkmaktadır. Projenin büyüklüğüne göre tasarruf büyüklükleri azalıp çoğalmaktadır. RCC, Japonya'da üretim oranlarını %24 ile %80 arasında artırmıştır. A.B.D.'de ise bu oranlar daha da yüksektir.



Şekil 3.4 RCC ile klasik kütle betonun maliyet karşılaştırılması

3.13 RCC İnşa Hızı

Hız, RCC barajların diğer baraj çeşitlerine göre üstün olduğu en önemli özelliklerden biridir. Zayıf RCC barajlarda haftada 2 – 2.5 m kadar, yüksek yapıştırıcı oranlı RCC barajlarda haftada 1 – 1.5 m kadar tabaka yükselme hızı vardır. Zamandan en az %30 tasarruf yapılmış olunur. Mesela A.B.D'de 34000 m^3 RCC içeren ve 46 m yükseklikteki Stagecoach barajı 37 gün gibi kısa bir zamanda tamanlanmıştır. Yine A.B.D'deki 42 m yükseklikte ve 96000 m^3 RCC içeren Grindsine Canyon ve 51 m yükseklikte ve 161000 m^3 RCC içeren Galesville barajları on haftada tamamlanmıştır. Şekil 3.5'te RCC seriminin yükseklik ve zamanla ortalama olarak nasıl bir değişim gösterdiği verilmiştir.



Şekil 3.5 RCC baraj inşa hızı

4. RCC KARIŞIM TASARIMLARI VE LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

4.1 RCC için Karışım Oranlarını Tayin Metodları

Dünya çapında RCC için tamamen heryerde kullanılan tek bir standart bulunmayıp, bütün karışım oranlarını tayin metodları başarıyla uygulanmaktadır. Farklı metodların uygulanması tamamen RCC barajın mevkisine, yapısal stabilitesine, inşaat tekniğine, hedeflenen zamana ve kullanılan malzemeye bağlıdır.

Üç değişik karışım tasarımı prosedürü vardır:

1. Spesifik Kıvam Limitlerini Dikkate Alarak Yapılan RCC Tasarımı
2. Deneme Karışım Testlerine Dayanan Tasarım
3. Zemin Sıkıştırma Kabulleri Kullanılarak Yapılan Tasarım.

4.1.1 Spesifik Kıvam Limitlerini Dikkate Alarak Yapılan RCC Tasarımı

Bu metotta optimum sıkışmayı tayin için Vebe sıkışabilme testi uygulanır. Belli bir yükseklikteki ve belli bir frekansta titreyen bir masa ve kap kullanılmaktadır. Kaba gevşek RCC numunesi konur, ek yükleme yapılır ve numune konsolide oluncaya kadar titreşim uygulanır. Tam bir konsolidasyona ulaşıncaya kadarki zaman ölçülür ve inşaat sahasındaki titreşimli silindirlerle yapılan testlerle karşılaştırılır. Hedeflenen zaman, yoğunluk testleri ve karot numunelerinden çıkan sonuçlarla bulunur. Titreşim zamanı; karışım oranlarından, agrega derecelendirmesinden, su muhtevasından, en iri dane çapından ve 75 μm'den küçük danelerin oranından etkilenir. 3.8 cm'lik maksimum dane çaplı agrega içeren karışımlar sıkışmak için 15 ile 30 saniye titreşim zamanı içerir. Elk Creek barajındaki testlerde 7.6 cm maksimum dane çaplı agrega ve 75 μm'den küçük gerekli miktardan fazla malzeme varken sıkıştırma için 10 saniye ölçülmüştür.

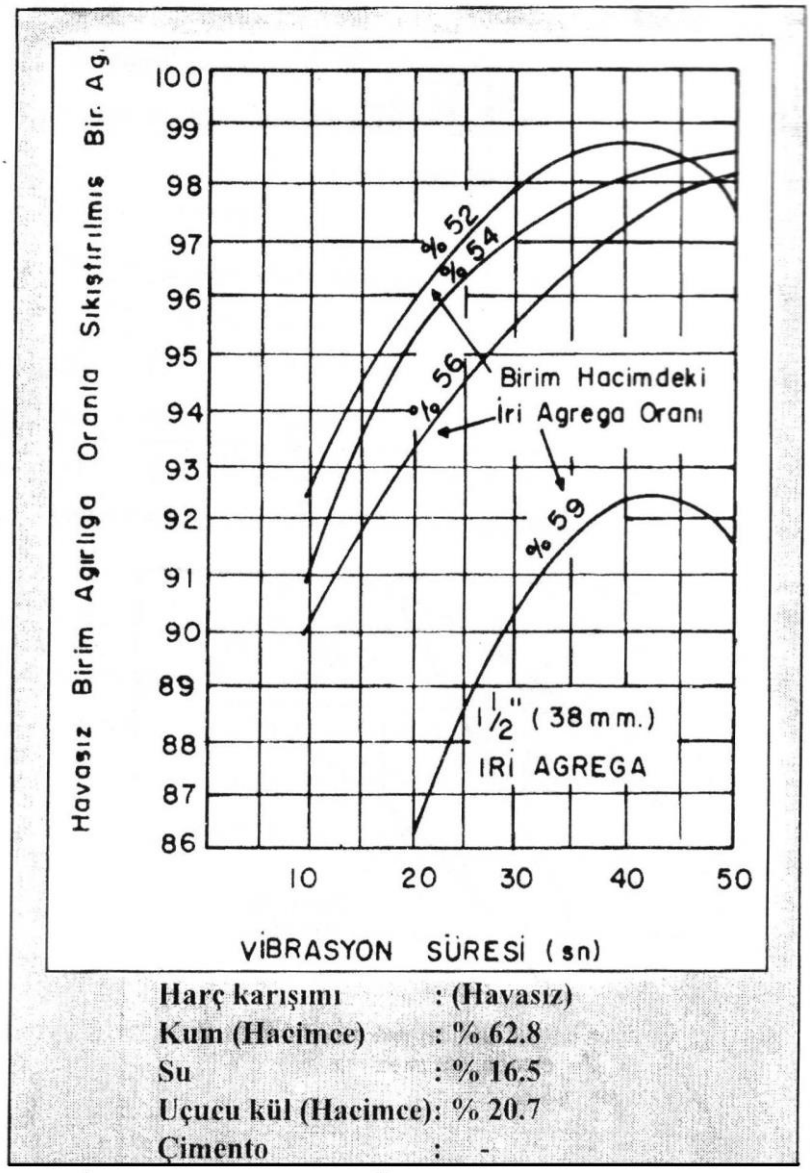
RCD metodunda ise 3.8 cm'lik çap için değişik bir titreşim testi uygulanır. Maksimum dane içeren karışımlar, işlenebilirliğinin ifade edilmesi açısından sıkıştırma değerleri (VC) diye adlandırılır. Ek A1'de sıkıştırma değerleri ile su muhtevası değişimi gösterilmektedir. Sıkıştırma değerleri, birim su muhtevasıyla ters oranda değişim gösterir. Genelde büyük kaplar için 60 saniye, küçük kaplar için de

20 saniye düşünülür. Su muhtevası düşükse öyle bir nokta gelir ki, bundan sonra su/bağlayıcı oranı düşse bile mukavemet artmaz. Bunun sebebi artık agregalar arasındaki boşlukların bağlayıcıyla daha fazla dolamamasıdır ve bu kısımlara hava dolar. Ek A1'de ayrıca su muhtevası ile mukavemet arasındaki ilişki de gösterilmiştir.

Daha yüksek mukavemetli karışımlar elde edilmesi için daha fazla çimento kullanılmalıdır. Artan ısı yayılımını azaltmak için de daha fazla puzolan kullanılmalıdır. Belli bir çimento içeriği için belli bir devirdeki beton mukavemeti, agregalar arası boşlukları dolduran bağlayıcı hacmi minimum olduğunda en yüksek değerine ulaşır.

4.1.1.1 Agrega Oranı

Silindirle sıkıştırma beton çok kuru bir kıvama sahiptir. Klasik betonda kullanılma ihtimali bulunmayan dere ve ocak malzemesi rahatlıkla kullanılabilir. Karışımda bulunan maksimum dane çaplı agrega oranı kontrolsüz bir şekilde fazla olursa hava boşlukları azalıp kuru birim hacim ağırlığı artacaktır. Ayrıca tüm agregaları yüzey alanları toplamı da azalacaktır. Kübik ve yuvarlak şekilli agregalarda sıkışma kapasitesi daha fazla olur. Yıkanabilir madde oranı ise %8 ile %10'a kadar müsaade edilmektedir. Bu ince maddelerin rolkrit dayanım ve permeabilitesinde olumlu etki yaptığı saptanmıştır. Agrega dayanımının yüksek olması pek aranmaz. Ancak agrega incelik modülünde aşırı oynamalar karma suyu ve bağlayıcı ihtiyacını değiştireceği için pek arzu edilmez. Şekil 4.1'de iri agrega hacminin sıkışmaya olan etkisi verilmiştir (U.S. Department of The Interior Bureau of Reclamation, 1987).



Şekil 4.1 İri agrega hacminin sıkışmaya olan etkisi

İnce agregalar duruma göre % 34 ile 42 arasında boşluk içerir. Deneydeki hata payından dolayı gerçek boşluk oranı daha düşüktür. Karışımda minimum şerbet oranını bulmak için belirli oranlarda çimento şerbeti hazırlanır. Buna önceden tartılmış ağırlıkta kum ilave edilir ve bu suretle birim hacim ağırlığa ulaşılır. Daha sonra yavaş yavaş ek kum miktarı fazlalaştırılır. Parabolden en fazla birim hacim ağırlığını veren kum miktarı bulunur. Uygulamada yani kütle betonunda %5 – 10, düzleme harçlarında %20 – 25 oranlarında çimento şerbeti artırılır. İri agrega hacimi bulunması çalışmaları aşağıda tablo 4.1'de sunulmuştur (ACI, 1988). Tablo 4.2'de ise ACI(American Concrete Institute)'e göre müsaade edilebilir ince dane oranları gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Beton hacmine oranla çakıl mutlak hacimleri

Maksimum tane çapı	mm	152	114	76	38	19	95
Çakıl hacmi (%)		63-64	61-63	57-61	52-56	46-52	42-48

Tablo 4.2 Maksimum müsaade edilebilir ince dane oranı

Likit limit	Plastiklik İndeksi	200 no'lu elekten geçen maksimum değer
0 – 25 0 – 25 0 – 25 0 – 25 0 – 25	0 – 5 5 –10 10 – 15 15 – 20 20 – 25	10.0 9.0 4.0 3.0 1.5
25 – 35 25 – 35 25 – 35 25 – 35 25 – 35	0 – 5 5 –10 10 – 15 15 – 20 20 – 25	9.0 8.0 6.5 5.0 1.5
35 – 45 35 – 45 35 – 45 35 – 45 35 – 45	0 – 5 5 –10 10 – 15 15 – 20 20 – 25	8.5 5.5 4.0 2.0 1.5
45 – 55 45 – 55 45 – 55 45 – 55 45 - 55	0 – 5 5 –10 10 – 15 15 – 20 20 – 25	5.5 5.0 3.5 3.0 1.5

RCC betonda en büyük dane çapı, dökülecek tabaka kalınlığının 1/3'ünden küçük seçilir. Maksimum dane çapı büyük seçilerek hidratasyon ısısında %15'lik bir azaltım mümkündür.

4.1.1.2.Çimento ve Puzolan

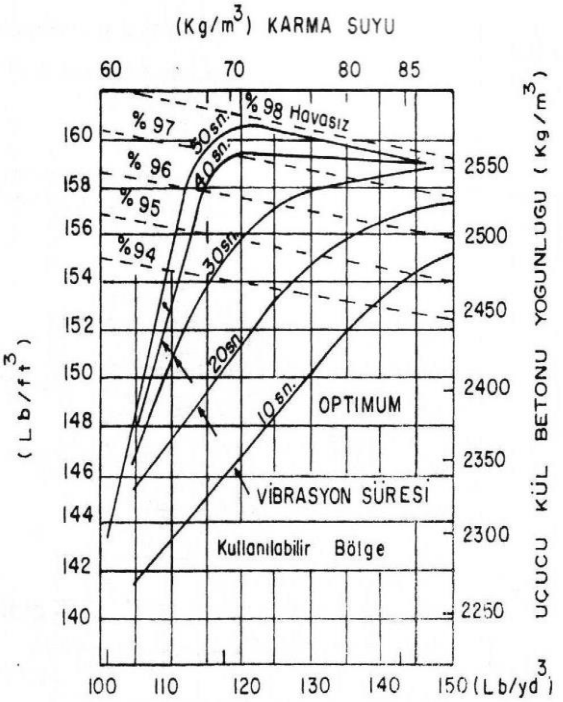
RCC'de malzeme seçimi genelde geniş bir seçenek sunsa da puzolanlar için de diğer malzemelerde olduğu gibi uygunluk testleri, kullanılıp kullanılmama konusunda en son kararı verir. Agregalar arasındaki kum incelik modülü fazla ise agregalar

arasındaki boşluklar kum tarafından doldurulamayacaktır. Bu durumda agregalar arasındaki hacmin bir kısmını su ve hava boşlukları işgal edecektir. Bu tasarım açısından kesinlikle arzu edilmeyen bir durumdur ve mukavemetin azalmasına sebep olur. İşte bu su ve hava boşluklarının oluşmasını engellemek ve bunların işgal edeceği hacmi doldurabilmek için uçucu kül ve cüruf kullanımı çok yaygın bir uygulamadır. Yapılan araştırmalar puzolan maddelerinin hidratasyon ısısını azalttığı, zamanla mukavemet artışında etkisinin de bulunduğunu göstermiştir. Silindirle sıkıştırma betonun klasik betona göre diğer bir avantajı da düşük kaliteli puzolanların da gerektiğinde kullanılabilmesidir. Çimento ve puzolan suyla birlikte beton mukavemetini en çok etkileyen etmenlerdir.

Aynı fabrikadan farklı parti çıkan çimentolarda bile dayanım farklılık gösterir. Ama yine de genel bir fikir vermesi için ACI tarafından yapılan ve tip I ve tip II çimentolarıyla puzolan maddesi olarak uçucu kül kullanılarak yapılan araştırma sonuçları Ek B1'de verilmiştir.

4.1.1.3 Karma Suyu

Karışımda kullanılacak karma suyu miktarı; kullanılan agreganın özgül yüzeyi ile inceliğine, bağlayıcı tipi ve miktarına bağlıdır. 152 kg/m^3 uçucu kül ile maksimum tane çapı 38 mm olan kırmataş agrega kullanılarak yapılan araştırmada 77 kg/m^3 optimum su miktarı bulunmuştur. Çimento ve gradasyon aynı kalmak koşuluyla 110 kg/m^3 su miktarı bulunmuştur. Bununla ilgili çalışmalar şekil 4.2'te sunulmuştur (U.S.B.R., 1987). Bu şekil kullanılarak başka veriler olması halinde bile kullanılacak su miktarı bulunabilir. Bir karışım için optimum su miktarı, değişiminde tamamen konsolidasyonun sağlanması için gereken sıkıştırma kuvvetine etkisi en az olan su muhtevasıdır. Titreşim zamanı ve su muhtevasının uçucu kül içeren RCC'e ve sadece çimento içeren RCC'e olan etkileri şekil 4.2 ve Ek B1'de görülmektedir. Diğer puzolan çeşitlerinin şekilleri, F tipi puzolanların azalttığı su miktarını etkiler. Kullanılan malzemede su ihtiyacı hacimsel olarak su/bağlayıcı oranında minimum bir alt sınır oluşturur. Ek B1'de ACI'e göre katkılı bir RCC karışımda kullanılabilecek maksimum uçucu kül/çimento oranı ve minimum su/bağlayıcı oranları gösterilmiştir.



BİLEŞENLER	AĞIRLIK	HACİM(m^3)
Çakıl	1159	0.410
Kum	616	0.220
Uçucu kül	152	0.066

D_{max}= 38 mm, kırmataş agrega

Şekil 4.2 Su miktarı ve vibrasyon süresinin uçucu küllü RCC beton yoğunluğuna etkisi

4.1.1.4 RCC Karışım Hesabı

Karışım hesabında izlenen yöntem şöyledir:

C_v : Beton birim hacmi (1 m^3)

F/C : Hacim olarak uçucu kül/çimento

P_V : Hacim olarak şerbet/harç

V_c : Çimento hacmi (m^3)

V_{ca} : İri agrega hacmi (m^3)

V_f : Uçucu kül veya puzzolan hacmi (m^3)

V_{fa} : İnce agrega hacmi (m^3)

V_m : Havasız harç hacmi (m^3)

V_p : Hava katkısı bulunmayan şerbet hacmi (m^3)

V_w : Karma suyu hacmi (m^3)

W/(F+C) : Hacim olarak su/bağlayıcı, olmak üzere

İlk olarak en uygun minimum şerbet oranı tesbit edilir. Kütle betonu için 0.38 yataklama betonu veya düzleme harcı için 0.42 alınması uygundur.

Ek B1'deki eşit dayanımlı beton için orantı eğrilerinden F/C (Uçucu kül hacmi/Çimento Hacmi) ve W/(F+C) (Su Hacmi/Bağlayıcı Hacmi) seçilir.
Tablo 4.1'den iri agrega hacmi tesbit edilir.
Hava %2 kabul edilip havasız harç hacmi hesaplanır:

$$V_m = C_v (1 – 0.02) - V_{ca} = C_v (0.98) - V_{ca} \quad (4.1)$$

Hava katkısız şerbet hacmi daha evvel belirlenen oran kullanılarak bulunur:

$$V_p = V_m * P_v \quad (4.2)$$

Daha sonra ince agrega hacmi (V_{fa}) bulunması için 4.3 ve 4.4 denklemlerinden 4.5 eşitliği çıkar:

$$V_{fa} + V_p = V_m \quad (4.3)$$

$$V_{fa} + V_m * P_v = V_m \quad (4.4)$$

$$V_{fa} = V_m * (1 – P_v) \quad (4.5)$$

Karma suyu hacmi (V_w) tesbit edilir :

$$V_w = (W / (W + F + C)) * V_p \quad (4.6)$$

4.6 denklemi farklı şekilde yazılırsa 4.7 denklemi elde edilir:

$$V_w = (W / (C + F)) / (1 + (W / (F + C))) * V_p \quad (4.7)$$

Bu işlemden sonra çimentonun mutlak hacmi (V_c) tesbit edilir :

$V_c = V_w * C / W$ (4.8)

4.8 denklemi farklı şekilde yazılırsa 4.9 denklemi elde edilir:

$V_c = V_w / ((W / (C + F) (1 + F / C))$ (4.9)

Bir sonraki işlemse uçucu kül ve puzolan hacmini belirlemektir :

$V_f = V_c * (F / C)$ (4.10)

Özgül ağırlıklar ile bileşen hacimleri çarpılarak RCC' deki 1 m^3'lük bileşen ağırlıkları tesbit edilir.

En kısa vibrasyon süresindeki en fazla sıkışmış birim ağırlık için karışım kıvamı bulunur.

İlave iki karışım daha yapılır. Bunlarda iri agrega oranları ile daha fazla ve az hacim olarak su/bağlayıcı [W / (F + C)] oranları kullanılır. Dayanım deneyleri sonucuyla da karışım oranlarının son seçimi yapılır.

Aşağıdaki tabloda katkı maddesiz ve kırmataş kullanılarak oluşturulan silindirle sıkıştırma betonlarda karma suyu miktarlarının yaklaşık değerleri verilmiştir(Demirci, 1996):

Tablo 4.3 Maksimum tane çapına göre karışım suyu değerleri

Karışım tipi	KARIŞIM TANE ÇAPI (mm)					
	9.5	19	38	76	114	152
	Su Miktarı (kg / m^3)					
Kütle Betonu	116	107	98	86	80	77
Yataklama Betonu	128	119	110	-	-	-

4.1.1.5 Örnek Karışım Hesabı

Verilenler :

Bağlayıcı : Katkılı Portland Çimentosu 32,5 N/mm^2 (TS-500, 1985)

c = 3.15 gr / cm^3

Agrega : Kırmataş, D_{max} = 50 mm, a = 2.87 gr / cm^3

Seçilenler :

$P_v = 0.38$

F / C = 0, Ek B1'den W / (F + C) = 2.3 bulunur.

$V_{ca} = 0.57$ (Tablo 4.1'den)

Hesaplananlar :

$V_m = C_v (1 – 0.02) – V_{ca} = 1 (1 – 0.02) – 0.57 = 0.41$ m^3 havasız harç hacmidir.

Hava katkısız şerbet hacmi :

$V_p = V_m * P_v = 0.41 * 0.38 = 0.1558$ m^3

İnce agrega hacmi :

$V_{fa} = V_m * (1 – P_v) = 0.41 * (1 – 0.38) = 0.2542$ m^3

Karma suyu hacmi :

$V_w = V_p * \{ (W / (F + C)) / (1 + (W / (F + C))) \}$

$V_w = (2.3 / (1 + 2.3)) * 0.1558 = 0.1085$ m^3

Çimento hacmi :

$V_c = V_w / \{ (W / (F + C) * (1 + F / C) \}$

$V_c = 0.1085 / (2.3 * 1) = 0.0472$ m^3

Çakıl ağırlığı : $0.5700 * 2.87 = 1.636$ t / m^3

Kum ağırlığı : $0.2542 * 2.87 = 0.730$ t / m^3

Çimento ağırlığı : $0.0472 * 3.15 = 0.149$ t / m^3

Su ağırlığı : $0.1085 * 1.00 = 0.109$ t / m^3

RCC birim ağırlığı : = 2.624 t / m^3

Su / bağlayıcı = 0.73

Tablo 4.4'de bu yaklaşımla hazırlanmış değişik karışımlara ait özellikler sunulmuştur (Demirci, 1996):

Tablo 4.4 Maksimum tane çapı, bağlayıcı, su ve sürenin beton basınç dayanımına etkisi

MAX TANE ÇAPI (mm)	Çimento (kg)	Puzolan (kg)	Su (kg)	ince agrega (kg)	iri agrega (kg)	Yaş (gün)	Basınç dayanımı (kgf/cm^2)
76	55.8	77	77	605	1649	138	232
114	139	0	80	618	1174	72	262
76	139	0	86	683	1691	66	231
76	139	0	83	676	1602	120	231
76	41.5	78	83	676	1602	120	162
38	75.3	164	89	745	1426	90	268
38	44.5	178	84	727	1438	90	181
38	116	139	103	657	1438	90	420

4.1.2 Agrega/Çimento Kombinasyonlarının En Ekonomiği için Deneme Karışım Testlerine Dayanan Tasarım

Çeşitli RCC yapılarının karışım oranları, numunelerin çeşitli fiziksel test sonuçlarına göre ayarlanır. Burada agrega derecelendirmesi sabitken, çimento değeri değiştirilerek çeşitli denemeler yapılır. Bu sonuçlar elde edildiktan sonra çimento oranı sabit ve agrega derecelendirmesi değişken olacak şekilde denemeler yapılmalıdır. Daha sonra bütün bu kombinasyonlardan ekonomik ve yapısal olarak en uygunu seçilir.

Deneme karışımındaki su muhtevasından beklenilen yeterli sıkışmayı sağlamasıdır. Öyle bir nem seviyesi sağlanmalıdır ki taze betonun inşa sırasındaki dalgalanma kıvamındakinden biraz düşük, segregasyona yol açacak kadar kuru bir kıvamdan daha yüksek olsun. İnşa süresince su muhtevası kontrolü, optimum kompaksiyon araştırması ve nükleer yoğunluk testlerinden çıkan sonuçlara göre belirlenir.

İlk deneme karışımları katkı kullanılmadan çimento kullanılarak yapılır. Daha sonraki deneme karışımlarında çimento ve puzolan aynı miktarlarda kullanılır. Bunlara ek olarak puzolan miktarının değiştirildiği ve bu şekilde yapısal ve ekonomik olarak optimum durumun arandığı, deneme karışımları yapılır. Gerçek durumda yeterli miktarda ince daneli malzeme bulunabiliniyorsa, çimento ve katkıyı

azaltmak amacıyla deneme karışımlarında da kullanılır. Genelde deneme karışımlarında % 3, eklenen agrega için %1 çimento azaltılabilir.

RCC'lerdeki ince daneli malzeme oranı %35 ile 50 arasında değişir ve bu oran genelde klasik kütle beton karışımlarındakinden daha fazladır. RCC'de bu oranın yüksek olma sebebi, sıkışma sırasında segregasyonu önlemek ve agrega kırılmasının önüne geçmektir. Eğer ince daneli malzeme plastik kıvamda değilse tablo 4.2'deki oranlardan yüksek değerler kabul edilebilir. Bu metod için laboratuvar çalışmalarından bazı grafikler geliştirilmiştir (Ek C1). Gereken çimento içeriği belli mukavemet ve yaş için bulunabilir.

4.1.3 Zemin Sıkıştırma Kabulleri Kullanılarak Yapılan Tasarım

Bu metodla yapılan RCC karışım tasarımlarında genelde agrega boyutu daha küçük ve çimento oranı yüksektir. Geliştirilmiş Proctor sıkışma metodu kullanılarak maksimum kuru birim hacim ağırlık bulunur. Aynı şekilde Proctor'a göre optimum su muhtevası bulunur. 10.16 – 11.68 cm'lik kalıplar yerine geliştirilmiş Proctor deneyinde 15.24 – 30.48 cm'lik kalıplar kullanılarak sıkışma numuneleri oluşturulur. Sıkışma uygulanan kuvvete bağımlıdır. Bu kuvveti 2.71 N/mm^2 değeriyle uygulanır.

Optimum su muhtavasının altına düşüldükçe veya üstüne çıkıldıkça mukavemet azalır. Su muhtevası agrega kuru ağırlığının belli bir yüzdesi olarak ifade edilebilir. Bu yüzden malzemelerin özgül ağırlıkları ve absorbe yetenekleri önem taşır. Gerçek su muhtevası, hidratasyon, buharlaşma, katkı maddeleri ve absorpsiyondan etkilenir.

Çimento oranı, farklı karışımların optimum su muhtevasında gösterdiği basınç mukavemetlerine göre belirlenir. Çimento oranı genelde karışımın katı malzemelerinin kuru ağırlığının % 7 ila 15'i arasında değişir.

5. RCC BARAJ TASARIM VE İNŞA İLKELERİ

5.1 Genel

Silindirle sıkıştırılmış beton barajlar tasarlanırken önce bir tasarım felsefesi seçilir daha sonra bu felsefe yönünde stabilite, temel özellikleri, termal durum, sızma kontrolü ve baraja ilave yapılar hakkında çalışmalar yapılır. RCC baraj tasarımı açısından genelde ağırlık tipi kabul görmektese de son zamanlardaki yeni bir eğilim de RCC ile kemer ağırlık baraj yapımıdır. Genelde RCC ağırlık barajları iki boyutlu ağırlık yapısı olarak tasarlanmışsa da yüksek barajlar ve uygun olmayan temel şartları için üç boyutlu sonlu eleman metodu kullanmak daha uygundur. Baraj yüzeyleri dikey, eğimli veya basamaklı olabilir.

RCC baraj yapısının bulundurması istenilen özelliklerini seçebilmek için birçok kritik etken vardır. Yapının mevkisi ve ölçütleri, yapının tipi, uygun malzeme, her projeye has olan özel koşullar ve projenin maliyetini etkileyen etmenler düşünüldüğünde optimum seçim yapılmalıdır. Ayrıca inşa edilecek barajın yıllık bakım durumu, barajın bölge ahalisine etkisi, inşa mevsiminin ne kadar süreceği, bu zaman sürecindeki iklim etkileri ve barajın tüm topluma etkisi de iyi analiz edilmelidir.

Klasik bir beton ağırlık barajda yapısal yükseklik, maksimum su seviyesi ve temelin zemine kadar olan derinliğine göre belirlenir. Maksimum su seviyesi açısından bakarsak havapayı için en az 1.2 m'lik parapet yapılmalıdır. Uygulanan yükler ve yapısal yükseklik stabilite ve gerilmeler açısından gereken kalınlığı etkiler. Memba genelde diktir, mansap yüzeyi ise USBR(United States Bureau of Reclamation)'e göre 0.7:1.0 veya daha dik şevli olmalıdır. Kret genişliği, ihtiyaç duyulan ulaşım yolu genişliğine göre belirlenir. Tek bir enkesit şekli, dolusavak hariç bütün baraj ilave yapılarında geçerlidir. Eksen, plan üzerinde vadinin en dar bölümü boyunca ilerler (USBR, 1987). Klasik betonda kullanılan bu tasarım yöntemleri RCC'de de bazı özel varyasyonlar katılarak kullanılır. Memba yüzeyi dikey olmalıdır. Ancak 0.1:1 değeri alınırsa kaplama betonu ile kütle betonunun birbirine bağlanması açısından daha fazla garanti sağlanmış olur. Bu durum için mansap şevi, stabiliteye

hiçbir zarar vermeden 0.6:1.0'a kadar indirilebilir. Sismik bölgeler için mansap yüzeyi şevi kretten tabana kadar heryerde aynı olmalıdır. Temelde ve tabakalar arasındaki yeraltısuyu basıncı hazne yüksekliğinin 1/3'ündeki ve barajın memba yüzünden 1/4'ü uzaklığındaki noktalara yerleştirilecek drenaj sistemleri vasıtasıyla azaltılabilir. Buna göre barajın temel genişliğinin, barajın yüksekliğinin yaklaşık olarak 0.7'si olması gerekmektedir. Bugüne kadar inşa edilen birçok RCC barajda bu değer 0.8 olmuştur.

Geleneksel betonarme barajların beton kütle boyutları, limitli ve kalıba dökülerek yapılır. Silindirle sıkıştırma beton barajda ise yerleştirme ve sıkıştırma işlemi yatay tabakalar halinde yapılır. Tabaka kalınlıklarının çoğunlukla sıkıştıktan sonra 30 cm olması istenir. Bu uygulamada düşey derze ihtiyaç duyulmaz ve yatay derzlerde de iyi bir kaynaşma sağlanarak tüm gövdenin yekpare bir şekilde çalışması sağlanır.

Kırmataş agrega veya en büyük tane çapı 38 mm'den fazla karışımlar kullanıldığı durumlarda yatay derzlerde sıkça birleşim kusurları görülür. Bu kusurları minimuma indirmek için iletim, döküm ve serme aşamalarında segregasyonu önlemek amacıyla bazı ilave tedbirlere başvurmak gerekir. Bu tedbirler, esas olarak segregasyonu önleyici tedbirlerdir. Fakat segregasyon önlenmemiş ise iri agrega birikintilerinin dağıtılması veya ince agrega ile takviyesi gerekebilir. Bu birleşim bozuklukları hasarını önceden tahmin ederek projedede bazı önleyici tedbirler de alınabilir. RCC memba ve gereğinde RCC mansap yüzlerinde belirli bir genişlikte normal beton dökümü veya Karakaya Barajı memba batardosundaki uygulamada olduğu gibi ince bir filtre (1 m) ve bir kil tabakası (1 m) oluşturması gibi önlemler olabilir.

Teorik ve pratik bakımdan tam donanımlı proje müdürü, proje özelliklerini formülasyona dökebilecek tasarımcı grubu ve diğer teknik elemanların oluşturduğu bir tasarım takımı önce tasarımsal öngörü halinde projenin özelliklerini ortaya koyar. Sonra yapısal tasarımcı ve malzeme konusundaki mühendisler yapıdaki mukavemet gereksinimiyle karışımın bu mukavemete nasıl erişebileceğini bulur. Tasarım takımı için barajın gereksinimleri ile eldeki imkan ve malzeme arasında optimum bir denge sağlanmalıdır.

5.2 Tasarım Felsefesi

Tasarım felsefesi açısından hangi felsefenin kullanılacağına tasarıma başlanmadan evvel karar verilmelidir. Yani dolgu baraj yaklaşımı veya beton baraj

yaklaşımlarından biri tercih edilmelidir. Başka bir deyişle zayıf RCC karışımları, yüksek yapıştırıcı oranlı RCC karışımları ya da RCD karışımlarından biri amaç ve ekonomiye uygun olarak seçilmelidir. Zayıf RCC barajlar, 30 m'den alçak, beton baraj yaklaşımıyla yapılan RCC barajlara göre daha ekonomiktir (USBR, 1987). Sızmanın sorun olduğu bölgelerde zayıf RCC barajın memba yüzüne bir de koruyucu katman yapılır. Beton yaklaşımıyla yapılan barajlarda ise ayrıca katmana gerek yoktur, barajın tüm gövdesi sızmaya karşı bariyer görevi yapar. Tasarım felsefesi seçiminde son kararı verirken faydanın maliyete oranı, seçilen felsefenin üstünlük ve eksikliklerinin tamamıyla idrak edilmesi, yapılacak barajın yapılma nedenleri, istenen su geçirimsizliğini sağlayabilmek, inşa programı ve süre, malzeme temini, oluşacak son görünüm ve bakım masrafları düşünülerek karar verilmesi lazımdır.

RCC yapılan bir barajda maliyet mutlaka klasik beton ağırlık, kemer, kaya ve toprak barajdan daha düşük olması sağlanmalıdır, zaten tersi alışılmadık bir durumdur. Bir barajın yeterli emniyet durumu sağlandıktan sonra, ne tip bir baraj olacağını en düşük maliyeti hangi tipin sağladığı belirler. Tasarım açısından düşük mukavemetli karışımlar daha yatay eğim sağlar, yüksek mukavemetli karışımlarla ise daha dik eğimli tasarımlar yapılabilir. Tablo 5.1 ve 5.2' de maliyet ve özellikler açısından bazı barajlar karşılaştırılmıştır (Demirci, 1996).

Tablo 5.1 RCC barajlar için birim maliyetler

	inşa tarihi	m^3	Çimento dozajı (kg/m^3)	Puzolan dozajı (kg/m^3)	Çimento ve Puzolan Maliyeti ($/m^3$)	Toplam Maliyet ($/m^3$)
Willow Creek	1982	308000	70	23	9,67	24,70
Galesville	1985	210000	61	31	7,21	72,44
Monskville	1985	189000	65	-	4,58	21,48
Upper Stillwater	1985	1044000	79	176	15,08	30,95

Tablo 5.2 RCC barajlar için maliyetlerin karşılaştırılması

	Bölge Yüksekliği (m)	Eksen boyunca ayak başına düşen hacim (m^3/m)	Toplam Maliyet, eksen boyunca ($/m)
Willow Creek	61	1490	28500
	91	3350	63800
Galesville	61	1490	31500
	91	3350	70800
Monskville	61	1490	24700
	91	3350	55400
Upper Stillwater	61	1110	26700
	91	3350	60000

RCC yapılarında donatı fazla kullanılmadığından bu yapılarda basınç altında bulunan betonun mukavemeti önem kazanır, dışarıdan kesme ve germe yüklerine karşı konulduğu gibi üniform olmayan sıcaklıktan dolayı da içsel gerilmelere de karşı konulur.

Hangi felsefe ve hangi RCC baraj çeşidi yapılırsa yapılsın tasarımcının dikkat edeceği en önemli hususlardan biri de projenin detaylarına kadar mümkün olduğunca basit tasarlanmasıdır. Çünkü silindirle sıkıştırma betonun uygulanma sebeplerinden biri de zamandan tasarruf ve kolay inşa metodudur. Oluşacak RCC kalitesi çabuklukla artmaktadır, tam tersine RCC maliyeti çabuklukla azalır. Yavaş veya ara verilmiş serim sonucu düşük yoğunluklu beton ve kötü kaliteli tabaka yüzeyleri ortaya çıkar. İnşaat metodu da öyle ayarlanmalıdır ki minimum işçilik olsun ve ekipmanın kapladığı yer miktarı minimum olsun. Burada basit olmayan tasarımlar, ulaşılmak istenen hedefler açısından çok güzel sonuçlar ortaya çıkarmaz.

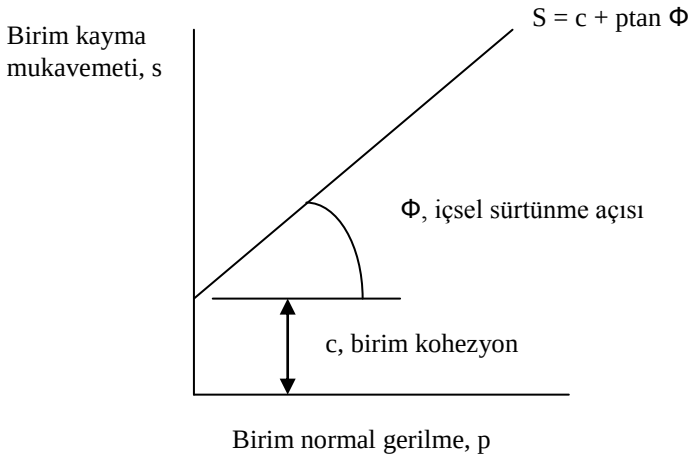
5.3 Temel Özellikleri

Genel bir perspektif olarak klasik beton barajların temelleri için sağlanan şartlar, silindirle sıkıştırma beton barajlar için de uygundur. Ama RCC için en uygun olanı temelin; diferansiyel oturması olmayan, barajın altında su geçirmez bariyer oluşturmak üzere enjeksiyona uygun yapıdaki sağlam kaya üstüne yapılmasıdır. Temel şeklinde düzensizlikler varsa barajın yükleri düzensiz bir şekilde temele iletilir ve bu durum klasik beton barajda kullanılan iki boyutlu analizle çözülemez (Mekboul, Chraibi ve Saidsallam, 1999). Bu durum için gerçek koşulları en iyi temsil edeceği düşünülen sonlu eleman analiziyle çözülür. RCC barajlarda eğer uygulanabiliyorsa temelin düzensiz kısımları, kazılarak veya o kısımlara klasik beton döküp doldurarak düzenli hale getirilebilir.

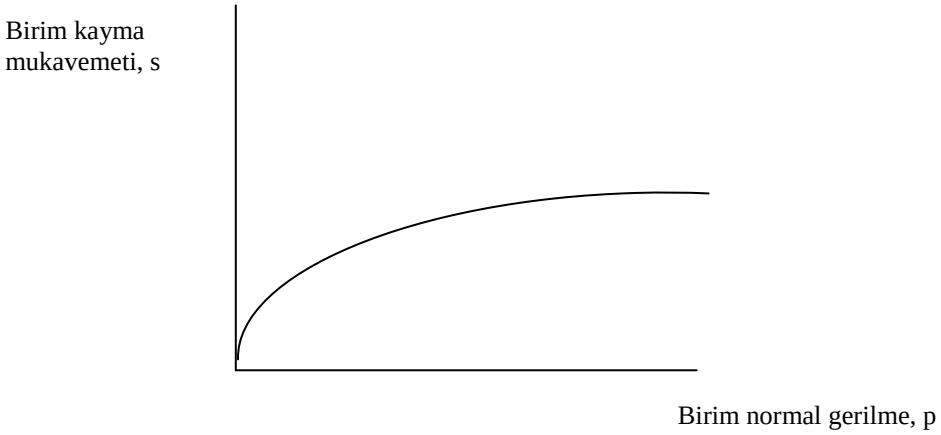
Temel zemininin kritik özelliklerini öğrenmek için titiz bir temel araştırma programı uygulanmalıdır. Bu sayede basınç ve kayma mukavemeti, yer değiştirme modülü, Poisson oranı ve geçirimlilik durumu belirlenir.

Temele etkiyen yüklerin oluşturduğu temel basıncı, laboratuvar testlerinden elde edilen temel taşıma basıncını kesinlikle aşmamalıdır. Bu yüzden temelin basınç mukavemeti, RCC barajının temel genişliğini belirlemede hayati bir önem taşır.

Temel zemininin kayma mukavemetinin tayini, temel kayasının bozulmamış durumda olması ve süreksizliğe sahip olmamasına bağlı olarak değişir. Temel kayasındaki düzensizlikler çatlaklar, kaymalar, derz durumu oluşması olarak özetlenebilir. Eğer temel kayası düzensizlikler içermiyorsa kayma mukavemeti Coulomb denklemiyle bulunabilir. Şekil 5.1.a'da kayma mukavemetiyle normal gerilme arasındaki ilişki gösterilmiştir. Temel kayasının düzensizlikler içerdiği durumda ise malzeme üzerinde yapılacak fiziksel bazı testler sonucu kayma mukavemeti bulunur. Bu testler sonucu şekil 5.1.b'deki gibi normal yüke karşı kayma mukavemetinin oluşturduğu eğriye benzer bir şekil oluşur. Elde edilen son değerlere uygun emniyet faktörleri uygulanarak izin verilen sınır değerler elde edilir.



Şekil 5.1.a Kayma mukavemeti ve normal gerilme arasındaki doğrusal ilişki.



Şekil 5.1.b Temel kayasında düzensizlikler bulunması durumunda kayma mukavemeti

Tahmin edilen oturma derecesini tesbit etmek için yer değiştirme modülünün bilinmesine ihtiyaç vardır. Burada önemli olan tek bir modül değerini bulmak değildir, amaç deformasyon modülünün baraj temel alanı boyunca nasıl bir değişim gösterdiğini kavrayabilmektir. Öyle ki ani deformasyon değişimleri, büyük diferansiyel oturmalara yol açıp barajda çatlamalar oluşturur. Bu yüzden baraj temellerindeki kayalarda düzenli bir düşük yer değiştirme modülü, değerinde büyük değişimler gösteren bir modül kadar tehlikeli değildir.

Silindirle sıkıştırımış beton barajda da tüm barajlardaki gibi sızdırmazlıkla ilgili problem oluşması istenilmezken temel zemininin geçirimli olması ise en istenmeyen durumdur. Temel kayası yeterli kalitede değilse sızma kontrolü için enjeksiyon

perdesi yapılabilir. Barajın memba yüzüne yakın bölgelerde 3'er m'lik aralıklarla tesbit edilen noktalara 38 ile 75 mm arasındaki çaplarda delikler delinip bu deliklerin oluşturduğu hat boyunca enjekte işlemi yapılır. Zayıf kalitedeki kaya temeller için enjeksiyon perdesinin yüksekliği su yükünün %70'i kadar, yoğun kaya temeller için enjeksiyon perdesinin yüksekliği su yükünün %40'ı kadar belirlenir. Sonuçta hidrostatik yükle temel kayası şartları enjeksiyon perdesi derinliğini belirler.

Genelde üç boyutlu sonlu eleman analizinin kullanılması gereken özel durumlarda Poisson oranı kullanılabilir, genelde ise bu oranın kullanılmasına ihtiyaç duyulmaz.

5.4 Yapısal Tasarım

RCC barajları ağırlık yapıları olduğu için stabilite açısından iki tehlikeye karşı tasarlanır: devrilme ve kayma. Genelde oluşabilecek zararların sebebi temel ve temel şartlarıdır. Şimdiye kadar yapılan barajlarda şu görülmüştür ki hiçbir beton ağırlık barajında betonun temel üzerine çöküp devrilmek suretiyle barajın yıkıldığı olmamıştır. Oysa temel malzemesinin yer değişimi veya temeldeki bazı yüzeylerin kayması sonucu yıkılan birçok beton baraj vardır. RCC baraj tasarımında kontrol edilmesi gereken şeyler şunlardır:

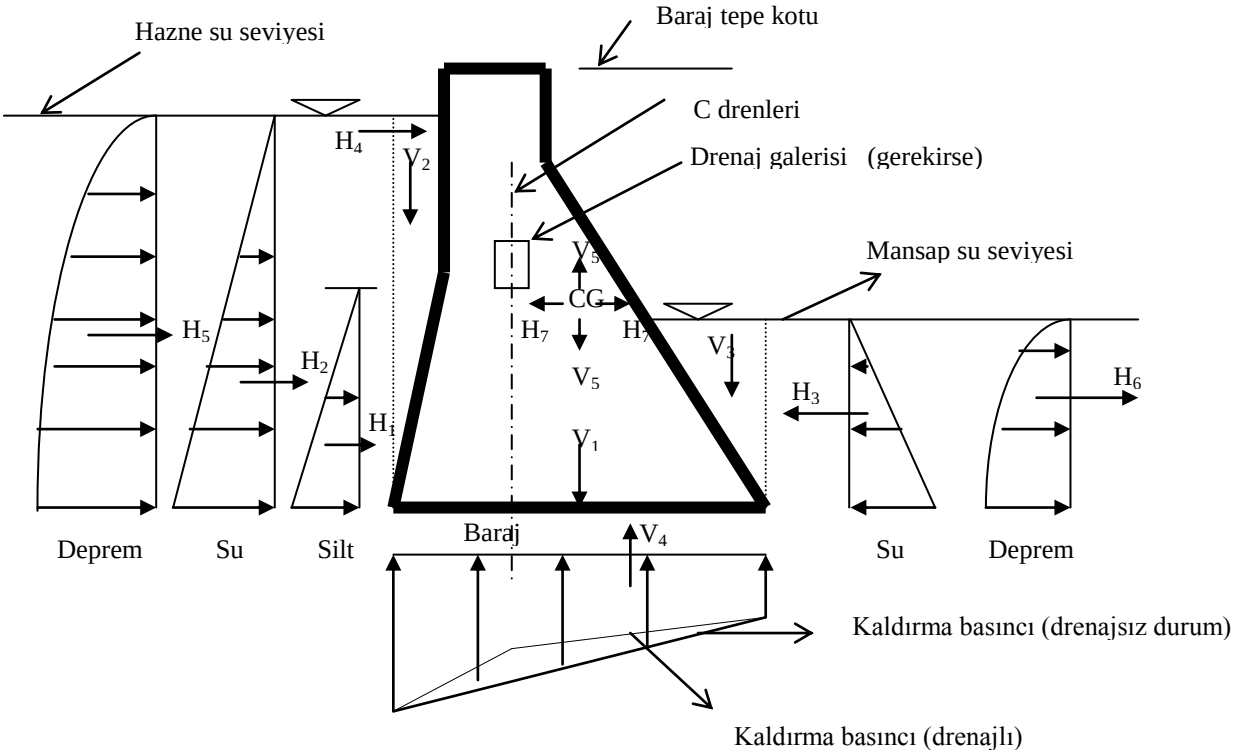
- Baraj boyunca herhangibir yüzeyde kaymadan dolayı oluşabilecek yıkılmaya karşı barajda yeterli emniyet faktörü bulunmalıdır.
- Baraj kesitleri öyle boyulandırılmalıdır ki hem temel hem de silindirle sıkıştırma beton için müsaade edilen gerilme sınırları aşılmasın.
- Teorik olarak barajda özellikle de memba yüzünde çekme gerilmesi oluşmamalıdır. Eğer çekme gerilmesine ihtiyaç duyuluyorsa karışım buna göre ayarlanmalı ve serim işlemlerinde de dikkatli bir kalite kontrol işlemine tabii tutulmalıdır.

RCC tipi barajlar genelde üçgen şeklinde ve memba yüzü de dik veya dike yakın yapılır. Bu sayede barajın ölü yükünün çoğunluğu memba kısmına yakın olur. Alttan kaldırma kuvvetlerine karşı yeterli dayanıklılık gösterilerek çekme gerilmesi etkisi engellenir. Genelde kret genişliği baraj inşasında kullanılan ekipmanların çalışması ve trafiğin sağlanması açısından 15 ile 30 m arasında seçilir. Mansap eğimi ise genelde yatay-dikey oranı 0.6 ile 1 arasında seçilir. En çok kullanılan değer ise 0.8'dir. Eğer baraja entegre üstünden su taşıran dolusavak varsa bu dolusavağın bir

bölümü inşayı kolaylaştırması açısından su aşmayan bölümlere benzer yapılır. RCC'lerde dolusavak tipini basamaklı şekilde yapmak giderek yaygınlaşan bir uygulamadır. Bu şekilde enerji kırıcı görevi de yaparak dinlendirme havuzu boyutları küçülür, ayrıca yatay tabakalı inşa metodu sebebiyle RCC için de çok uygundur. Basamaklı dolusavaklar, üzerlerinden aşan suyun tüm enerjisinin %70'ini kırarlar. Yüksek barajlarda mutlaka drenaj galerilerine ihtiyaç duyulur, 30 m'den düşük yükseklikteki barajlarda ise ihtiyaç duyulmaz çünkü kaldırma basıncının azaltılmasına ihtiyaç duyulmaz. Galeri inşası ise RCC yerleştirmesinde durmaya sebep olur.

5.4.1 Tasarım Yükleri

Ağırlık RCC barajlara şekil 5.2 'deki şu yükler etkimektedir (Yanmaz, 2001):



Şekil 5.2 Bir baraja etkiyen tasarım yükleri

Düşey Yükler:

V_1 RCC baraj ve ilave yapılarının ağırlığından oluşan ölü yük. Tasarım açısından RCC birim hacim ağırlığı 2400 kg/m^3 veya bundan daha fazla bir değer alınabilir.

V_2 Membanın eğimli kısımlarına etkiyen su ve/veya siltin ağırlığı.

V_3 Mansabın eğimli yüzeylerine etkiyen su ve/veya siltin ağırlığı. Suyun birim hacim ağırlığı 1000 kg/m^3, suya doygun siltin birim hacim ağırlığı 1925 kg/m^3 civarında bir değer alınabilir.

V_4 Baraj boyunca herhangibir düzlemde veya barajın tabanındaki kaldırma basıncıdır. Eğer hiç dren yapılmamışsa bu basıncın değeri memba yüzündeki tüm su yüküne karşı gelir. Ayrıca doğrusal olarak membadan mansaba doğru azalma görülür. Drenli durumda ise basınç değeri azalır.

V_5 Bir depremde baraj kütlesinin eylemsizlik kuvveti.

Yatay Yükler:

H_1 Yatay silt basıncıdır. 1360 kg/m^3 alınabilir.

H_2 Memba yüzüne etkiyen su yükünün hidrostatik basıncı.

H_3 Mansap yüzüne etkiyen su yükünün hidrostatik basıncı.

H_4 Memba yüzündeki buz yükü. Eğer uygulanması mümkünse su yüzeyinin 30 cm altında m başına 7450 ile 14900 kg arası buz yükü alınması uygundur.

H_5 Havza suyunun membaya etkiyen eylemsizlik kuvveti.

H_6 Havzasuyunun mansaba etkiyen eylemsizlik kuvveti. H_5 ve H_6'nın şiddetleri Westergard Teorisiyle bulunur.

H_7 Deprem boyunca barajın eylemsizlik kuvveti.

5.4.2 Yükleme Durumları

USBR'e göre üç çeşit yükleme durumu vardır. Normal yükleme durumu, gerçek hayatta çoğu zaman karşılaşılan durumdur. Beklenmedik yükleme durumu ise ara sıra olan taşkınlardaki yük artışını dikkate alır. Ekstrem durumda ise muhtemel maksimum deprem etkisini dikkate alan bir normal yükleme durumu sözkonusudur. Normal, alışılmadık ve ekstrem durumlar için olan yükleme kombinasyonları, çoğu RCC baraj için yeterlidir. Tablo 5.3'te bu kombinasyonlar gösterilmiştir (Kennard, Owens ve Reader, 1996). Bu tablodaki yükleme durumları evrensel olarak heryerde uygulanabilir türden değildir. Çünkü tasarımcı için birçok belirsiz durum ve başka koşullar da bulunmaktadır. Sıcaklık rejimi, tahmin edilen akım değerleri ve barajın işletim koşulları bu yüzden çok iyi etüd edilmelidir.

Tablo 5.3 Uyarlanan yükleme durumları

Yük kaynağı	Nitelik	Yükleme durumları		
		Normal	Beklenmedik	Ekstrem
Birincil				
Su	Tasarım taşkını seviyesinde		✔	
	Normal maksimum seviyede, dolusavağın bilinen maksimum seviyesinde	✔		✔
Mansap suyu	Maksimum mansap suyu seviyesi	✔		✔
	Minimum		✔	
Kendi ağırlığı	-	✔	✔	✔
Kaldırma	Drenler çalışırken	✔	✔	
	Drenler işlev dışıyken		-	✔
İkincil				
Silt	-	✔	✔	✔
Buz	İsteğe bağlı	✔	✔	✔
Beton	Minimum normal	✔		✔
Sıcaklık	Olayın olma zamanındaki minimum		✔	
İstisnai				
Sismik	Maksimum deprem için			✔

5.4.3 Kuvvet ve Moment eşitliği

Statik eşitliği oluşturmaya yarayan bütün koşulları sağlamak için, uygulanan yüke karşı temel ve ilave yapılarda oluşan reaktif kuvvetler de hesaba katılmalıdır. Sonuçta her yapıdaki gibi şu koşullar sağlanmalıdır:

$$\Sigma H = \Sigma V = 0 \qquad (5.1)$$

$$\Sigma M = 0 \qquad (5.2)$$

5.1 ve 5.2 eşitliklerinde yatay ve düşey, aktif ve reaktif kuvvetlerinin eşitliğini ve bu kuvvetlerin herhangibir noktaya göre momentinin sıfırı sağlayacağını belirtir. İlk eşitlik hiçbir yerdeğiştirici hareketin oluşmadığını ifade eder. İkinci eşitlikde ise rotasyonel bir hareketin oluşmadığı belirtilmektedir.

5.4.4 Emniyet Durumu

Baraj rezervuarının tamamen boş olduğu durum da dahil olmak üzere her türlü olasılıkta ağırlık barajı profili şu üç durum için yeterli emniyeti sağlamalıdır:

1. Dönme ve devrilme

2. Kayma

3. Gerilme sınırının aşılması ve malzeme çökmesi

Birinci ve ikinci durumlar profildeki bütün yatay düzlemlerde ve temelde sağlanması gereken bir koşulu ifade eder. Üçüncü koşul kaya temeller ve baraj betonu için geçerlidir.

Gerilme analizi yapılabilmesi için şu kabuller yapılmıştır:

1. Beton izotrop, homojen ve elastiktir.

2. Bütün yükler, dikey paralel kenarlı konsolların oluşturduğu ağırlık hareketiyle taşınır.

3. Haznedeki su yükünden dolayı baraja ve temele etkiyen diferansiyel bir hareket oluşmaz.

Emniyet faktör değerleri, bunları tayin eden kurumlara göre bazı farklılıklar göstermektedir. USBR (United States Bureau of Reclamation)'e göre temeldeki gerilmelerin emniyet faktörleri normal, beklenmedik ve ekstrem durumlar için sırasıyla 4.0, 2.7 ve 1.3'tür. Federal Enerji Düzenleme Komisyonu 'na (FERC) göre aynı durumlar için 3.0, 2.0 ve 1.0 değerleri tayin edilmiştir.

5.4.5 Kayma Stabilitesi

Barajlarda F_s olarak gösterilen kaymaya karşı emniyet faktörünün üç ayrı tanımı vardır:

1. Kayma faktörü, F_{ss}

2. Kayma sürtünmesi faktörü, F_{sf}

3. Limit eşitliği faktörü, F_{LE}

Barajlardaki herhangibir düzlemde kaymaya karşı oluşacak direnç, kütle betondaki kesme direncinin bir fonksiyonudur. Yatay büzülme derzleri kritik içsel düzlemleri oluşturmaktadır. Taban kısmında kritik etmenler ise iç yüzey kayma mukavemeti ve beton ile kayanın bağlanma durumudur.

RCC barajlarda kayma sürtünmesi faktörü, genelde F_{sf} kullanılarak emniyet tetkik edilir. F_{sf} bir yüzeydeki kesme ve kayma direncinin tüm yatay yüklere oranı olarak tanımlanır. Formül olarak şu şekilde ifade edilir:

$$F_{SF} = S/\Sigma H \qquad (5.3)$$

Burada S maksimum kayma direncidir. S şu şekilde ifade edilir:

$$S = c.A_h / [\cos\alpha(1 - \tan\phi.\tan\alpha)] + \Sigma V\tan(\phi+\alpha) \qquad (kN\ m^{-1}) \qquad (5.4)$$

A_h, burada değme veya kayma yüzeyi düzleminin alanıdır (İki boyutlu bölümde kalınlık olarak düşünülür.) 6.4 denklemi yatay bir düzlem durumu için ($\alpha = 0$) daha da basitleşir:

$$S = c.A_h + \Sigma V\tan(\phi+\alpha) \qquad (5.5)$$

5.3 eşitliğindeki ifadeleri yerlerine koyarsak standart bir ifade elde etmiş oluruz:

$$F_{SF} = [c.A_h + \Sigma V\tan(\phi+\alpha)] / \Sigma H \qquad (5.6)$$

RCC barajlarda sürtünme faktörü $f = \tan(\phi)$ değeri baraj gövdesi boyunca 1.0, RCC ile temeldeki kayaların birleştiği yerlerde 0.75 kabul edilir. Silindirle sıkıştırma beton barajların tasarımında $c = 1$ alınır. Tasarım aşamasında c ve ϕ değerleri için yapılan kabuller mutlaka sertleşmiş RCC'nin test edilmesi suretitle kontrol edilmelidir.

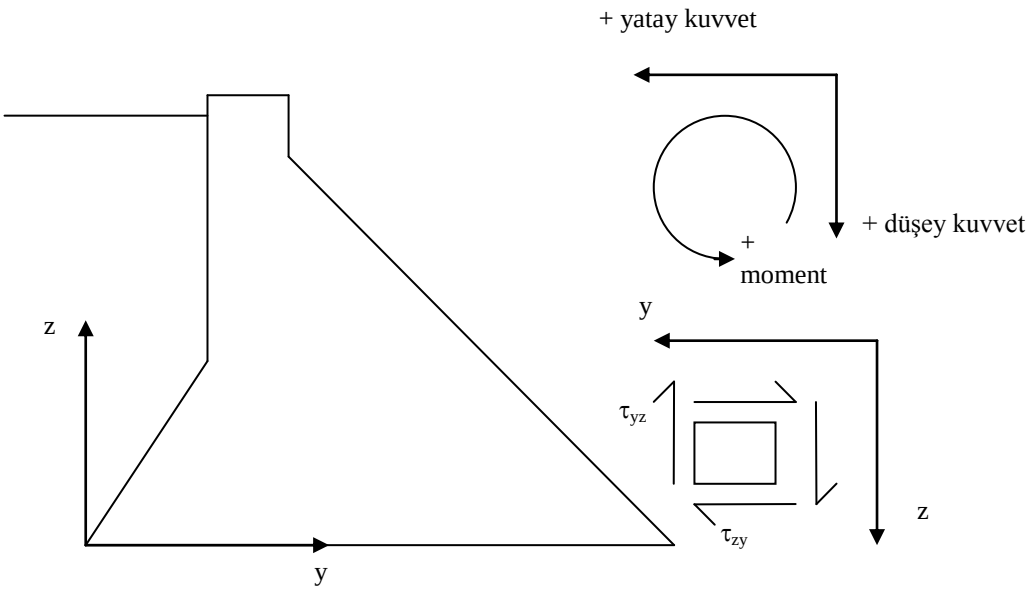
5.4.6 Devrilme Stabilitesi

Baraj gövdesindeki herhangibir yatay yüzeyin mansap topuk noktasına göre momentleri alınırsa, devrilmeye karşı koyan momentlerin devirme yönündeki momenlere oranı devrilmeye karşı emniyet faktörüdür (F_0). Şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_0 = \Sigma M_+ / \Sigma M_- \qquad (5.7)$$

F_0'ın 1.25'ı aşması kabul edilebilir bir durumdur ama istenen $F_0 \geq 1.5$ olması esas istenen durumdur (Kennard, Owens ve Reader,1996).

Şekil 5.3'te kuvvet, momentum ve kesme kuvvetleriyle ilgili 5.7 eşitliğinde kullanılabilecek yön kabulü verilmiştir.



Şekil 5.3 Kuvvet, Momentum ve kesme mukavemetleri yön kabulü

5.4.7 Ağırlık Metodu (Gerilme Analizi)

Bu metod silindirle sıkıştırma beton barajlar için uygun bir metod değildir. Genelde bu metod ağırlık barajlarda kullanılmasına rağmen, monolitik tabakaların yatay derz kullanılarak bağlanması yoluyla yapılan barajlara uygulanamaz. Ama bu durumlarda da bazı geliştirilmiş analitik metodlar uygulanabilir.

5.5 Çatlama Kontrolü

5.5.1 RCC Yapılarında Görülen Çatlamalar

Bütün beton yapılar gibi RCC barajlarda da çatlamaların olması kaçınılmazdır. Çatlamaların sonuçları basit bir sızıntıdan yapının stabilitesinin kaybolmasına kadar geniş bir aralıkta değişir. Çatlama çoğunlukla RCC yüzeylerindeki kısa dönemde oluşan soğuma veya yapının uzun dönemdeki soğumasından oluşan, kütle betonunda oluşan hacim değişimleri sonucu meydana gelir. Oluşabilecek diğer çatlama çeşitleri RCC'e gömülen girintili köşelerden yayılan yüksek gerilmeler ve temel düzeyindeki ani değişmelerdir.

5.5.2 Sıcaklığa Bağlı Olan Çatlama

Silindirle sıkıştırılmış beton barajların termal çatlama potansiyeli klasik beton barajlara göre daha azdır. Bunun en önemli sebebi kullanılan çimento oranının azlığı ve çimento yerine kısmen uçucu kül kullanımıdır. Bu şekilde adiyabatik ısı yayılımı büyük oranda azaltılır. Ayrıca 0.3 ile 0.6 m arasındaki RCC tabakalarının çok çabuk

şekilde serilebilmesi ve bu sayede tabaka yüzeylerinin daha yüksek ısı yayması için gereken zaman kısaltılması barajda üniform bir ısı yayılımı oluşturur. Eğer iyi bir termal analiz sonucu termal çatlama olasılığı çok az çıkarsa, RCC baraj düşey büzülme derzi olmadan da yapılır. Bu ekonomik açıdan da uygun olur çünkü düşey derz oluşturulması RCC'nin basit inşa metodunu daha da karmaşıklaştırmaktadır. Baraj kesitleri boyunca geçici ısı dağılımını açıklayabilmek için birtakım bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bunların ortak yanı RCC'nin sürekli olarak yerleştirilmiş kabulu yapılmasıdır. Bu programlardan biri THERM adlı sonlu eleman programıdır. Bu program Californiya Üniversitesi tarafından yazılmış ve U.S. Army Corps of Engineers tarafından daha da geliştirilmiştir. RCC barajın termal analizinde birçok kabul yapılmaktadır. Tabakaların yerleştirilmesi sonucu ısı yayılımı, yerleştirme oranı, RCC karışımın sıcaklığı, difüzyon özelliği, iletkenlik, termal genleşme katsayısı, adiyabatik ısı artışı, elastisite modülü, sünme katsayıları ve çekme mukavemeti bu kabullerde kullanılan parametrelerdir. Sonuçların doğruluk oranı da tamamen kabullerin doğruluk derecesine bağlıdır. Bu yüzden termal analizden önce agrega biliniyorsa yapılacak kabuller, laboratuvardan çıkan RCC karışımının test özellikleriyle çatışmamalıdır.

Sıcaklığa bağlı olan çatlamalardan korunmak için üç metod vardır:

1. Silindirle sıkıştırma beton malzemesindeki ısı tutma kapasitesini sınırlayarak hacim değişimini sınırlamak.

2. Büzülme derzi sayısını uygun bir seviyede belirleyerek hacim değişimini optimum seviyede olmasını sağlamak.

3. Malzeme ve karışım oranları, gösterdiği termal özelliklere göre seçilmelidir.

İnşa sırasında alınabilecek bazı tedbirler ise şunlardır:

- Güneş etkisinden korunmak için RCC'nin gece serimi.
- İnşaatın soğuk mevsimlerde yapılması.
- RCC karışımına karma suyu yerine buz parçacıkları koymak veya karışıma sıvı azot enjekte edilmesi.
- Kış boyunca agregaları depo ederek veya üzerlerine su püskürterek soğutmak.

Termal analiz sonuçları baraj boyunca oluşan çekme gerilmelerinin şiddetlerini ve yerlerini belirtir. Elde edilen sonuçlar sayesinde düşey derz ihtiyacı ve nereye yerleştirilmeleri gerektiği bulunabilir.

5.5.3 Temel Sebebiyle Çatlama

Böyle bir çatlama oluşmaması için baraj temeli düzeyinde ani değişimler önlenmelidir. Büzülme derz dişi yakınında enine derz yapılırsa çatlama yayılması önlenir.

5.5.4 Girintili Köşe Çatlaması

Dipsavak, su alma kulesi, drenaj ve giriş galerileri, dolu savak gibi birçok özellikli yapı barajla birlikte yapılır. Bu yapıların oluşturacağı keskin köşelerin zararını azaltmak için betonarme kullanımı, yatay derz yapımı ve tasarımda geometrik olarak bazı ek önlemler alınabilir.

5.5.5 Su Tutucular

Eğer su toplayan yapılarda enine büzülme derzleri kullanıldıysa, memba yüzeyi yakınındaki derzlerin iç bölümlerinde su tutucular yapmak şarttır. Su tutucular ve derzlerdeki drenler, klasik beton barajdakine benzer şekilde doldurulur. Her zaman derzlerde su tutucular kullanılmaz. Memba yüzeyi kaplama teknolojisindeki gelişmeler sayesinde artık derzlerin hareket ettikleri durumda bile yüzeyin sürekli durumu bozulmamaktadır. Çift katlı kaplama ve genleşme çukuru gibi değişik teknikler uygulanabilmektedir.

5.6 Geçirimlilik Problemi

Sızma tüm hidrolik yapılarında olduğu gibi silindirle sıkıştırma beton barajlarda da çok önemli bir problemdir. Sızma fazla olursa yapısal stabilite yönünden, barajın uzun dönem mukavemeti açısından, mansap tarafında oluşacak olumsuz görüntü ve kontrol edilemeden giden suyun ekonomik maliyeti durumundan birçok zarar oluşur. RCC barajda suyun sızabileceği çeşitli yollar vardır: temel düzensizlikleri, temellerdeki RCC'nin zayıf konsolide edilmesi, dayanak yerleri, ankastre kısımlar, termal hacim değişiminden oluşan çatlaklar. Suyun sızabileceği en etkili yol ise RCC tabakaları arasındaki büzülme derzleridir.

Tabaka yüzeyleri arası bağlayıcılığı etkileyen faktörler şunlardır (USACE, 1997):

1. Bir Önceki Tabaka Yüzeyinin Durumu
2. Ardarada Tabakalar Serilirken Gecikme Zamanı
3. Serilen RCC'nin Şekil Alabilme Özelliği
4. Serilen RCC'nin Sıkışma Derecesi

Tabaka yüzeyleri RCC seriminden önce temiz ve gevşek malzemeden arındırılmış olmalıdır. Bir önceki tabaka yüzeyi nemli tutulmalıdır. Arada geçecek zamanda soğuk derz oluşmamalıdır. Soğuk derz ölçüsü, derz olgunlaşması olarak adlandırılır ve iki çeşit yolla tanımlanabilir:

1. °F cinsinden tabaka yüzeyindeki hava sıcaklığı ile saat cinsinden olayın oluşma zamanı çarpılarak derece – saat terimleriyle tanımlanabilir. Bu değerler 500 ile 2000 derece – saat arası değişmektedir.
2. Bir önceki tabaka seriminden sonra geçen saat cinsinden zaman açısından tanımlanabilir. Bu değerin doğru bulunabilmesi için laboratuvar ve saha testleri gereklidir. Beton yaklaşımıyla yapılan barajlarda derz olgunlaşması, saat olarak tanımlanır. Eğer bu değer 24 saatten fazla 72 saatten az olursa tabakalar arasına klasik betondan düzleme harcı yapılır. 72 saat de aşılıyorsa düzleme harcından önce su püskürtülerek yüzey temizlenir. Zayıf RCC barajlarda ise soğuk derzden korunma önlemi her koşulda diğer tabaka serilmeden düzleme harcı yapılmasıdır.

RCC barajlarda sızmayı kontrol altına almak için çok farklı metodlar geliştirilmiştir. Çoğu RCC barajda suyun baraj boyunca sızıp mansaba kadar ulaşmasını önleyen ve donma – çözülme zararını engelleyen drenaj sistemleri bulunur. Drenaj, barajın ek yapılarından, çatlaklardan, derz aralıklarından, tabaka aralarından gelecek sızma suyunu toplar. Büyük barajlarda zemindeki suyun yukarı çıkmasını engellemek için özellikle temel drenajı yapılır. Temel drenajı bir manifold sisteminin içinden, galeri içinden veya mansaba doğru uzayan boru şebekesinden geçebilir. İçsel drenajda ise genelde yüzey drenleri kullanılır. Derz drenleri, RCC serimi süresince su tutucu derzleriyle birlikte mansap tarafına yapılır. RCC tabakaları arasındaki ve RCC ile kaya yüzeyi arasındaki suyu toplamak için çok çeşitli yollar geliştirilmiştir: yarım ağızlı boru sistemi kullanımı, yer döşeme sistemi, çakıl katmanı oluşturulması ve delikli boru sistemi kullanımı.

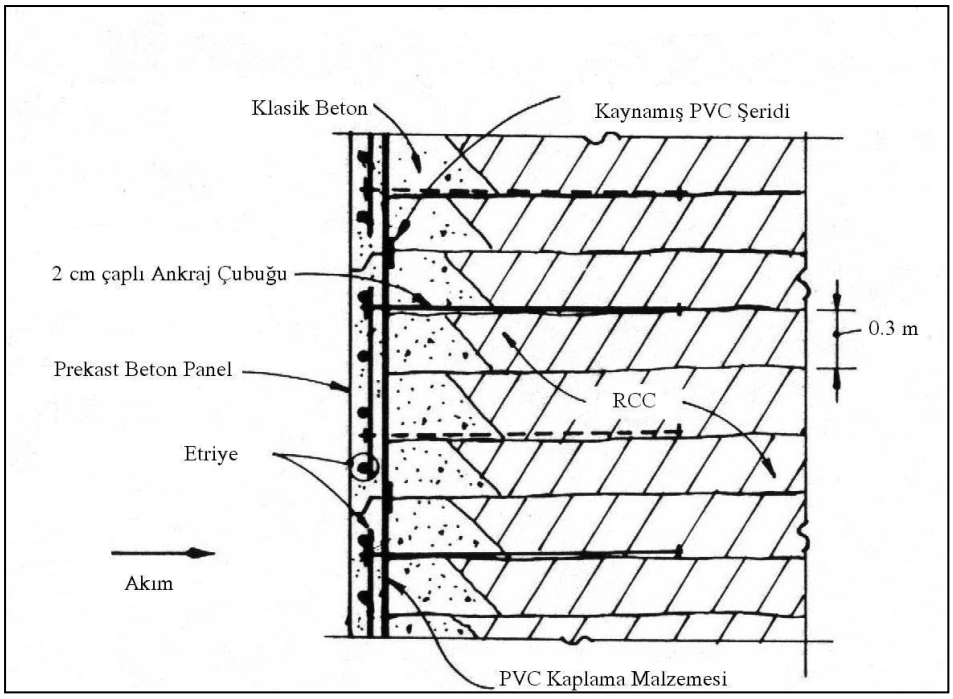
5.6.1 Kaplamalar

RCC barajlarda memba yüzeyine prekast beton paneller veya klasik beton kaplama kullanmak suretiyle donma – çözülme zararına karşı koyabilecek bir katman elde edilir.Yüksek yapıştırıcı oranlı RCC barajın gövdesi aynı zamanda sızmaya karşı bariyer görevi yapar. Bu şekilde kullanılabilmesinin sebebi bu felsefeyle yapılan betonun çok geçirimsiz ve yoğun olmasıdır. Ayrıca tabakalar arası bağlayıcılık özelliği çok iyi olduğundan buralardan su fazla sızamaz. Zayıf RCC barajlarda ise tabakalar arasındaki bağlayıcı kuvvet az olduğundan mutlaka memba yüzünde ayrı sızma bariyeri yapılmalıdır. Kaplamalar sızma ile birlikte şu sebeplerden dolayı kullanılmaktadır:

1. Sızma Kontrolü.
2. RCC için kalıp görevi görme: silindirle sıkıştırma betonun granüler malzemesi kendi başına dağılmaksızın duramayacağından kalıp görevi görecek ekipmana ihtiyaç duyulur. Kaplamalar bu görevde kullanılır ve bu sayede zaman ve maliyetten tasarruf edilmiş olunur.
3. Hidrolik performans: dolu savak ve çıkış yapıları bu yolla yapılarak suyun aşırı hızlı aktığı yerlerde RCC'nin üstünde bir sağlamlığa ulaşılabilir.
4. Sağlam bir yüzey gereksinimi
5. Estetik.

5.6.1.1 Kaplama Maddeli Prekast Paneller

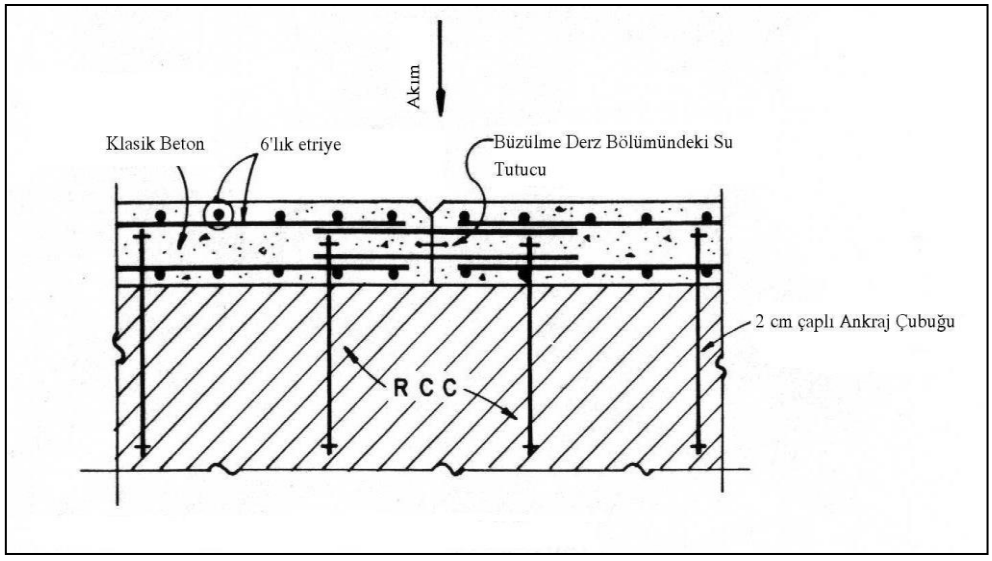
Bu çeşit bariyerlerde PVC (polivinil klorit) yapıştırılmış prekast beton perdeler kullanılır. Standart kullanılan ölçüleri 1.3 m yükseklik, 5.3 m uzunluk ve 10 cm kalınlıktır. Paneller arasındaki tüm düşey ve yatay derzlerde PVC, panele sıcaklık kullanılarak kaynaştırılmıştır. Bu sayede sürekli bir zar elde edilir. Sağlamlık açısından panelden çıkan ankastre çubuklar silindirle sıkıştırma betonun içine doğru saplanır. Bu sistem ilk olarak A.B.D.'nin Kentucky eyaletindeki Winchester Barajı'nda kullanılmıştır. Bu paneller, sızmayı önlemekten başka RCC seriminde kalıp görevi de görür. Bu metod kullanılan özel kaplama maddesinden dolayı pahalıdır ayrıca derzleri tıkarken de özel bir dikkat gerektirir. Şekil 5.4'te bu tip kaplamaların genel bir şekli gösterilmiştir (Zipparro ve Hansen, 1993).



Şekil 5.4 Prekast beton panelli kaplama

5.6.1.2 Betonarme

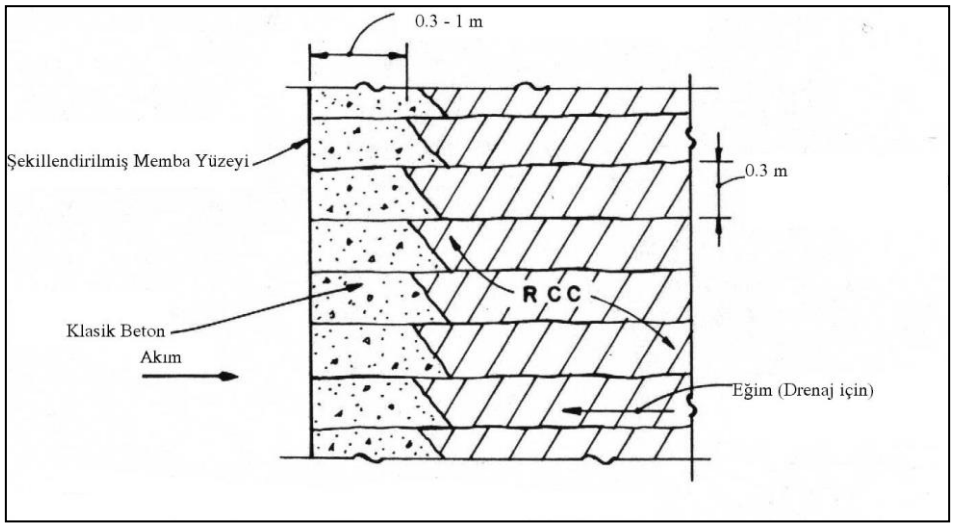
Barajın memba yüzüne, RCC serilmesinden 30 gün sonra ve yayılan ısı pik noktayı geçip düşmeye başladığı devrede betonarme kaplama yerleştirilir. Kullanılan demirlerin yatay ve düşey kullanımı suretiyle çatlama genişlikleri kontrol altında tutulur ve derz bölümlerinde su tutucuları yapma imkanı bulunur. Ankastre çubukları desteği sağlamak için sertleşmiş RCC'nin içine kadar girer. Şekil 5.5'te betonarme kaplama şekli gösterilmiştir (Zipparro ve Hansen, 1993).



Şekil 5.5 Betonarme kaplama

5.6.1.3 Demirsiz Beton

Bu şekilde bir kaplama ancak memba yüzündeki kalıplarla RCC arasında kullanılabilir. Klasik beton, dalgıç vibratörler yardımıyla silindirle sıkıştırma beton üstünde titreşime uğratılır. İki farklı karışımın koordineli olması çok önemlidir yoksa soğuk derzler oluşabilir. Bu kaplamalar RCC tabakasından önce veya sonra yapılan olmak üzere iki çeşittir. Çeşitlerine göre kalınlık 0.3 ile 1 m arasında değişir. RCC barajlarda en çok kullanılan kaplama biçimidir. Şekil 5.6'da bu biçime örnek gösterilmiştir (Zipparro ve Hansen, 1993).



Şekil 5.6 Demirsiz beton kaplama

5.6.1.4 Çekilmiş Beton Bordür (Kayar Kalıp)

Bu yöntem Malcolm Dunstan tarafından geliştirilip ilk olarak A.B.D.'deki Upper Stillwater barajında kullanılmıştır. Beton bordürler, lazerle yönlendirilmiş kayar kalıp bordür makineleri yardımıyla memba yüzeyine çekilmiş beton bordür döşenmesine uygun hale getirilirler. Bordür sertleştikten sonra aynı zamanda RCC'nin serimi için doğal bir kalıp görevi de yapar. Bordürler yaklaşık olarak 1 m yükseklikte yapılırlar. Bu sistem küçük barajlar için uygun değildir çünkü enkesitler küçük kret uzunluğu da kısa olduğu için RCC serimi çok sık duracaktır. Kayar kalıp sistemi memba yüzeyinde de mansap yüzeyinde de kullanılabilir. Kayar kalıplar baraj boyunca yer değiştirirler. Barajın kaplamalarının herbir tabakası (bordürü) yeterli mukavemete ulaştıktan sonra bir sonraki bordür döşenmeden baraj boyunca RCC tabakaları serilir. Bu metotta RCC ile klasik beton karıştırılmaz ve memba ile mansap yüzeylerinde düz ve estetik bir görünüm sağlanır. Bu sistem RCC tabakaları

30 cm'den fazla yapılan barajlar için maliyet açısından uygun değildir. Ek D1'de çekilmiş beton bordürün tipik bir kesiti verilmiştir.

5.6.1.5 Sıkıştırılmamış Şev

Eğer RCC serimi sırasında kenar bölümlerin sıkıştırılmasına özen gösterilmezse o kısımlar 45 ile 65° arasında doğal bir şev oluştururlar. Bu şekilde bir barajda sıkıştırılmamış RCC , üzerinden su akmayan mansap yüzeyi oluşturmada kullanılabilir. Bu işlem için de hiçbir özel ekipman ve kalıba ihtiyaç duyulmaz. Bu oluşan sıkıştırılmamış doğal şev, çakıl görünümlü ve sınırlı mukavemette olacaktır.

5.6.1.6 Kalıplı RCC Yüzeyler

Bazı durumlarda RCC, kalıp kullanılmak suretiyle yüzeyde kullanılabilir. Bu şekildeki silindirle sıkıştırma beton kaplamalar, ayrışabilen agrega yapısı ve içerdiği boşluk sebebiyle zayıf kalitede bir yüzey oluşturur. Ama kalıba RCC ile birlikte çok dikkatli bir şekilde düzleme harcı ve normal beton da dökülürse çok güzel görünümlü RCC yüzeyler elde edilir. Son zamanlarda enjeksiyonla birlikte RCC dökümü birçok projede çok sağlam yüzeyler oluşturulmasını sağlamıştır. Bu metotta 0.4 m'lik RCC tabaka yüzeyine düşey kalıp boyunca çimento enjekte edilir. Vibratörler aracılığıyla konsolidasyon sağlandıktan sonra homojen ve geçirimsiz bir yüzey elde edilmiş olunur.

5.7 Tabaka Yüzeyleri

Silindirle sıkıştırma beton tabakalar birbirlerinin üzerlerine serildiği için tabaka yüzeyleri tüm barajın sağlamlığı ve geçirimsizliği açısından hayati bir önem taşımaktadır. Bir RCC tabaka yüzeyi bir sonraki tabakayla iyi bütünleşmek için temiz ve pürüzsüz, yeterli kayma ve çekme mukavemetine sahip olmalıdır. Bu şekildeki tabakalar sıkıştırıldıktan sonra suyun geçmesine engel olurlar.

Derz sayısını azaltıp mukavemeti artırmak için dört RCC katmanının bir tabaka oluşturacak şekilde bir metod geliştirilmiştir. RCC, 15 cm'lik katmanlar halinde serilir. Bütün katmanlar RCC'i yayan dozer tarafından aynı zamanda iyice sıkıştırılmalıdır. Dördüncü katmandan sonra bu katmanların en üstünden titreşimli silindir geçirilir. Daha sonra en üst yüzeye bir sonraki dört katmana hazırlık amacıyla düzleme harcı sürülür.

5.8 Galeriler

30 m'den yüksek yapılan çoğu barajda kullanılmaktadır. Dren açmak,enjeksiyon deliği delmek ve çeşitli etüdler için ulaşım sağlamaya yararlar. RCC baraj yapımını yavaşlatan en önemli etkenlerden biri galerilerin inşasıdır. RCC barajlarda galeri açmanın çeşitli yolları vardır:

1. Klasik kalıp yöntemiyle yapma: galeri uzunluğu kısa ise uygulanır. RCC'nin düzgün şekilli ve görünebildiği yerlerde açılır galeri açılır.

2. Kayarkalıp veya prekast beton galeri birimleri: galeri açmak için çok hızlı bir yoldur ve açılan galeriler nitelikli olur. Bu metod, galeri uzunluğunun çok fazla olduğu yerlerde RCC serim hızının bir günde bir katman veya daha az serimi olduğu zaman uygundur.

3. Dolgu malzemesinin kazımı: bu metodla minimum zaman kaybı ve işin durması sağlanarak galeri açılır. Galeri bölgesine çimentosuz malzeme doldurulur ve yerleştirme işlemi ilerler. Galerinin üzerinde RCC serimi ilerledikçe dolgu malzemesi çıkarılabilir. Galerinin kenarları ve tavanı pürüzlü olur. Ahşap kalıp kullanımıyla daha düzgün bir iç yüzey elde edilebilinir.

5.9 Dolusavaklar

RCC barajlarda barajın fonksiyonu ve büyüklüğü, taşkın frekansı ve savaklanma süresi nedeniyle dolusavak yapımında birçok seçenek bulunur. Bunlar:

1. Doğal Şevli RCC Dolusavaklar.
2. Basamaklandırılmış RCC Dolusavaklar.
3. Basamaklandırılmış Klasik Beton Dolusavaklar.
4. Şevli Klasik Beton Dolusavaklar.

Genelde RCC barajlarda dolusavak gövde üzerinde teşkil edilir ve en sık kullanılan profil çeşidi de Pigeaud profilidir (Bindo, Gautier ve Lacroix, 1993 ; Vittal ve Porey, 1986). Bu tip kesite %70 – 80 nispetinde eğimler ilave edilir. RCC barajların dolusavağı kontrollü veya kontrolsüz yapılabilir. En çok kabul gören tip ise basamaklı (Creager) tipidir. RCC barajlardaki dolusavaklar için de tüm barajlar gibi dolusavak boyutları hidrolik model oluşturulması sonucu belirlenmelidir. RCC kullanılarak yapılan dolusavaklar, genelde düşük miktarda su savaklayan ve çok

yoğun sıklıkta kullanılmayan dolusavaklardır (Sorensen, 1984). Daha önemli durumlarda oluk veya basamakların klasik beton olduğu dolusavaklar kullanılır. Dolusavak tasarımında çözülecek en büyük sorun erozyondur. Beton yüzeylere erozyon şu şekillerde zarar verir:

1. Kavitasyon tipi erozyon: akım hızı 12 m/san civarlarındayken yüzeyde kavitasyon zararı görülür. Klasik beton yüzeyler RCC'e göre daha dayanıklıdır. Ama yine de suyun savaklanabileceği maksimum zaman düşünülmek suretiyle dolusavak tasarımı yapılmalıdır. Ani, kısa süreli ve yüksek hızlı akımlarda mutlaka belirli miktarda kavitasyonun engellenemeyeceği düşünülür. Bu değer tolerans sınırını aşmamalıdır.

2. Sürtünme Aşınması (Abrasyon): dolusavak apronları, dinlendirme havuzları bu yüzden zarar görür. Klasik veya silindirle sıkıştırılmış beton, belli süre devam eden; silt, kum, kaya, çakıl, inşaat artıkları ve suyun getirdiği birikintilerin oluşturacağı sürtünmeden dolayı aşınmaya dayanamaz. Düşük su/çimento oranı ile iri agrega kullanılan RCC karışımların aşınmaya karşı klasik betonla aynı derecede karşı koyacağı varsayılır.

5.10 Çıkış Yapıları ve İlave Yapılar

Bu tip yapıların inşası RCC barajda inşaat programının aksamasına sebep olur. Bu yüzden su alma yapıları RCC barajla birleşik yapılıp çıkış kanalları ise temeldeki kaya bölümünün içerisinden geçirilir. Bu sayede zaman kaybı en az olur. Kanallar, RCC seriminden önce ve klasik betonla yapılır. Klasik betonla, serilen RCC arasına dolgu malzemesi konulur. Su alma yapısı ve kontrol kulesinin memba tarafında olması da zamandan kazanç sağlamaktadır. Çıkış kanalları, baraj veya ilave yapılar boyunca ve hendeklerin içinde bulunurlar.

İlave yapılar genelde klasik betondan yapılır. Su almada kullanılan kule genelde RCC yerleşimi bittikten sonra yapılır. Kontrol kapısı mansap topuk tarafına yapılırsa çıkış kanalları fazla hidrolik basınca uğrar, kanalların tasarımı bu durum da düşünülerek yapılmalıdır. Kontrol yapısının mansap tarafına yapıldığı barajlarda bakım daha kolaydır.

5.11 Üstten Su Aşmasına Karşı Dolgu Barajların RCC ile Korunması

Dikkatli bir inceleme yapılırsa dünyada mevcut birçok dolgu barajın dolusavak kapasitesi, tasarlanan taşkını geçirmeye yeterli değildir. Bir dolusavak gerekenden çok küçükse büyük bir taşkın sırasında hazne seviyesi yükselecek ve dolgu barajın üzerinden sular taşacaktır. Toprak dolgu barajlar üzerlerinden su aşmasına fazla dayanamazlar, su serbest bir şekilde dağılır ve baraj yıkılır.

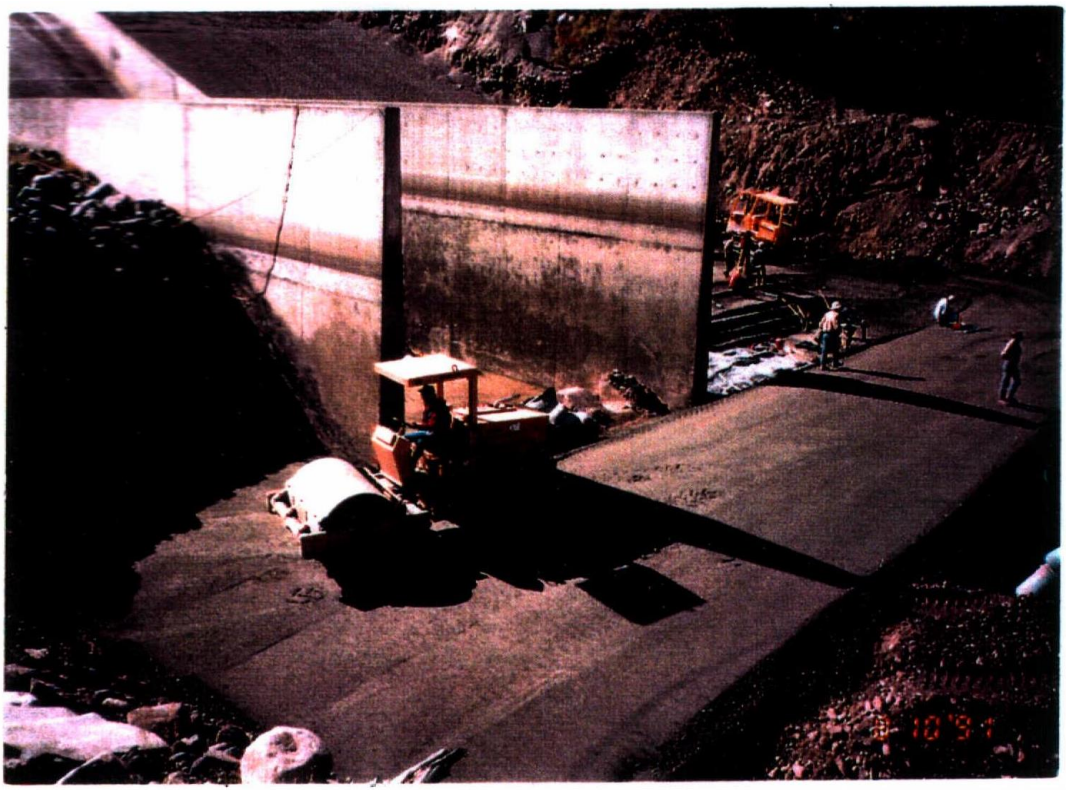
Barajın dolusavağındaki bu noksanlığı gidermek için çeşitli metotlar geliştirilmiştir: mevcuttan başka daha büyük bir dolusavak yapmak, üzerinden su aşacak dolgu kısmını suya karşı dirençli ve erozyona karşı koyabilecek bir malzeme ile kaplamak. Kaplamanın diğer yöntemlere göre avantajları proje maliyeti daha düşük olur, bölgenin hidrolik yapısıyla onarımdan önce ve sonra hiç oynanmamış olur. Maliyetin düşük olmasının sebepleri pahalı olan klasik betonun minimum şekilde kullanılması, suyu kontrol ve batardo ihtiyaçlarının azalması, kısa inşa süresidir. Mevcut yapıda yapılacak modifikasyonlar yüzünden hertürlü akım koşulunda boşaltılan su artar ve yüksek akım peryotları boyunca mansap su seviyesi yükselir. Sınırlandırılan taşkın mevcut dolusavağa akarken dolgunun kret kotunun yükseltilmesi, ek bir taşkın hacmi sağlamak için yapılır (Arnold ve Johnson,1990).

RCC kullanılmak suretiyle A.B.D'de 1980'den beri 50'den fazla dolgu barajın ve 10'dan fazla beton ve kagir barajın dolusavak kapasitesi arttırılmış ve böylece depreme daha dayanıklı duruma sokulmuştur.

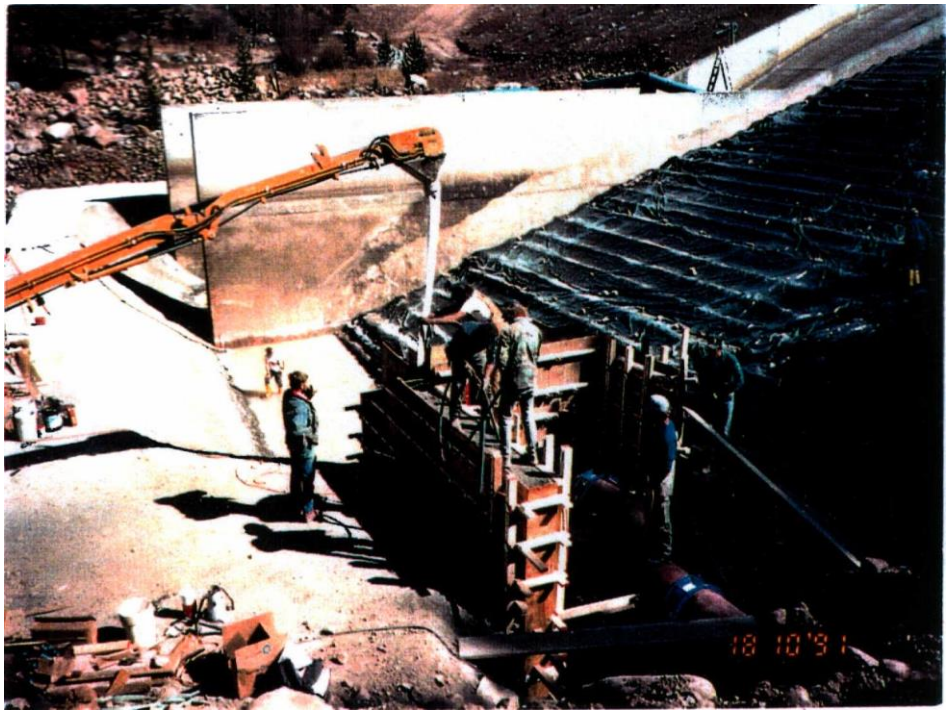
Birçok ağırlık barajın tasarımında basınç mukavemetinin 180 günde erişeceği dikkate alınmasına rağmen, su aşmasına önlem olmak amacıyla tasarlanan RCC'de basınç mukavemetinin 28 günde erişeceği değer alınır. Böyle bir uygulamaya gidilmesinin nedeni kaplama projeleri kısa zaman diliminde tamamlanması gereken projelerdir. Ayrıca tahmin edilenden erken bir zamanda bir donma – çözülme devresi oluşabilir veya fırtına çıkabilir. Mesela A.B.D'de Kerville Ponding barajında 50 yılda beklenen fırtına, son RCC seriminden yalnızca 30 gün sonra çıkmıştır. Üstteki son kısım biraz zarar görse de RCC kaplama mükemmel bir direnç göstermiştir.

1965'te A.B.D. Colorado'da zonlu toprak dolgu olarak yapılan Goose Pasture Barajı'nda yıllar sonra yeterli dolusavak kapasitesine sahip olmadığı için kapasite artırım çalışmaları yapılmıştır. 1965'teki haliyle maksimum bir taşkının ancak % 28'i savaklanabiliyordu. Sonunda 1991 yılında dolusavak, RCC ile modifiye edilmiştir.

Şekil 5.7 ve şekil 5.8'de Goose Pasture Barajı dolusavak modifikasyonunun yapılışı sunulmuştur (Tipton and Kalmbach Inc., 1992):



Şekil 5.7 Goose Pasture Baraj Dolusavağının RCC ile Modifikasyonu



Şekil 5.8 Goose Pasture Baraj Dolusavağında RCC sıkıştırılması

6. RCC BARAJ YAPIMINDA DÜNYADAKİ ÖNEMLİ GELİŞMELER

6.1 Genel

Silindirle sıkıştırma beton kavramı II. Dünya Savaşı öncesinde ortaya atılmıştır. O zamanlar ilk defa havaalanları, apronlar ve otoyolların temelaltlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamaya benzer nitelikte ilk çalışma 1964'te İtalya'da bir barajda yapılmıştır. Bundan sonraki yıllar boyunca çeşitli yaklaşımlar türemiş ve RCC'nin barajlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Tamamen silindirle sıkıştırma beton kullanılarak yapılan ilk baraj 1982'de başlanan A.B.D.'nin Oregon eyaletindeki Willow Creek Barajı'dır. Bu baraj inşası sırasında dünyanın çeşitli ükelerinden 1000 kadar mühendis tekniği incelemek için çalışma yerini ziyaret etmişlerdir, sonrasında dünyada da RCC baraj yapımında çok büyük bir artış sağlanmıştır. RCC barajlar, vibrasyonla sıkıştırılmış klasik beton ağırlık barajlara alternatif olarak ortaya çıkmış, ancak daha önceden kaya dolgu olarak planlanan barajların da yerine inşa edilmeye başlanmıştır.Başlangıçta büyük çoğunluğu taşkın kontrolü ve su temini amacıyla yapılan RCC barajlar, şimdi tüm amaçlar için inşa edilmektedir.RCC baraj metodunun dünya üzerindeki gelişimi tarihsel olarak şu şekildedir:

1960'da Tayvan'daki Shimen Barajı'nın batardosu karışık toprak malzeme içeren RCC ile yapılmıştır (o zamanki tanımlamayla rolkritle).

1964 yılında İtalya'da dolgu baraja benzer bir yöntemle ve kütle betonsuz 172 m yüksekliğinde Alpe Gera beton ağırlık Barajı inşa edildi. Baraj inşa metodu daha çok zayıf beton uygulamasını andırıyordu.

1967'de 18 m yüksekliğinde Sly Creek Barajı, zeminle çimento karışımı yoluyla yapıldı.

1968'de A.B.D. New Meksiko'daki Chochiti Barajındaki çıkış kanallarına destek olması amacıyla temelde rolkrit kullanılmıştır.

1970 yılında Raphael ' The Optimum Gravity Dam' isimli makalesinde serme ve sıkıştırma ekipmanlarını kullanarak çimento ve agrega karışımının serilerek sıkıştırılabileceğini ileri sürdü. Eğer malzemenin kayma mukavemeti arttırılabilinirse

normal dolgu baraja nazaran önemli şekilde enkesitin küçültülebilineceğini ileri sürdü. İri agregalı RCC kullanarak yapılan büyük kütleler o zaman için yeni bir kavram olmamasına karşın Raphael'in bu makalesi ilk defa büyük bir barajın bu şekilde yapılabilirliğini iddia ediyordu.

1970-1972 yıllarında A.B.D. Kaliforniya'da yapılan ''Temel ve Mühendislik'' konulu konferansta teorik düzeyde rolkrit kavramı tartışıldı. ''Ekonomik Beton Baraj İnşaası'' konulu konferansta ise vibratörlü silindirle kütle betonun sıkıştırılması isimli bildiride rolkrit kütle betonu karışımının normal bir kütle betonu agregasında aynı oranda bir eksiltme ile elde edildiği belirtilmiştir.

1972'de Tims Ford Barajında agregaların kamyonlarla taşınıp yükleyici tarafından serilmesiyle ve titreşimli silindirle sıkıştırılmasıyla elde edilen zayıf beton hakkında Cannon, Tennessee Valley Authority'in yaptığı testlerin sonuçlarını açıkladı.

1973'te A.B.D.'de Jackson Barajı'nda Corps of Engineers tarafından tarafından çeşitli araştırmalar yapıldı.

1973'te A.I.B. Moffat tarafından RDLC (Rolled Dry Lean Concrete, zayıf RCC) metodu geliştirildi. 1978'de Moffat ve A.C. Price tarafından bu metod daha da ileri bir safhaya getirildi.

1974'ten 1982'e kadar süren Pakistan Tarbela Barajı'nda dipsavak tamiratında RCC kullanıldı. 350000 m^3'lük beton 42 günde serilerek inşaat süresi açısından tam bir kolaylık sağladı.

1978'te Japon Komite tarafından RCD metodu bulundu. 89 m'lik Shimajigawa Barajı'nda bu yöntem kullanıldı. Aynı yıl İngiltere'de lazer kontrollü kayar kalıp ile fazlaca uçucu kül içeren RCC kullanılarak Wimblebau Barajı yapıldı.

1981'de Malcolm Dunstan tarafından yüksek yapıştırıcı oranlı RCC metodu geliştirildi.

1982'de A.B.D.'de Willow Creek Barajı yapıldı. Bu baraj 5 aydan kısa bir sürede tamamlanmıştır. Dünyada tamamen RCC kullanılarak yapılan ilk büyük barajdır.

1984'de A.B.D.de Winhester Barajı'nda prekast paneller ve PVC malzemesi kullanılarak beton kaplamalı RCC baraj kavramı ortaya çıktı.

1985'te A.B.D.'de Kerville Barajı'ndan su aşmasına rağmen RCC olarak yapılan yapı zarar görmedi.

1988'te Güney Afrika'da dünyanın ilk silindirle sıkıştırma betondan yapılmış kemer ağırlık barajı yapılmıştır.

1993'e gelindiğinde dünya genelinde yapılan büyük RCC baraj sayısı 100'ü aşmıştı.

1995'te Çin'de Longtan Hidroelektrik Projesi kapsamında 216.5 m'lik dünyanın en yüksek RCC ağırlık barajının inşaatına başlandı. Bu barajın depolama kapasitesi $27.27*10^9$ m^3'tür (ASI RCC Inc., 1997; Mid- South Design and Research Institute for Hydroelectric Projects, 2000).

Silindirle sıkıştırma beton baraj metodu dünyada seneden seneye çok büyük hızla yaygınlaşmaktadır. Bunun en önemli sebepleri: yapı boyularının küçültülmesi dolayısıyla malzeme ve işçiliğin azaltılması, düşük çimento miktarı kullanılması, hidratasyon ısısından dolayı özel soğutma sistemlerine gerek duyulmaması, klasik dolgu ekipmanlarıyla yapılabilme imkanı, kısıtlı süreli işlerin çabuk bitirilebilme imkanı ve çok ekonomik bir çözüm oluşturmasıdır.

6.2 Türkiye'de RCC Baraj Yapımı

Ülkemizde baraj yapılarında RCC kullanımı çok geç başlamamakla beraber bütünüyle RCC olarak yapılan baraj sayısı çok azdır. Genelde batardo yapımında veya tamir işlerinde kullanılmaktadır.İlk olarak RCC, Karakaya Barajının memba batardosunda kullanılmıştır.

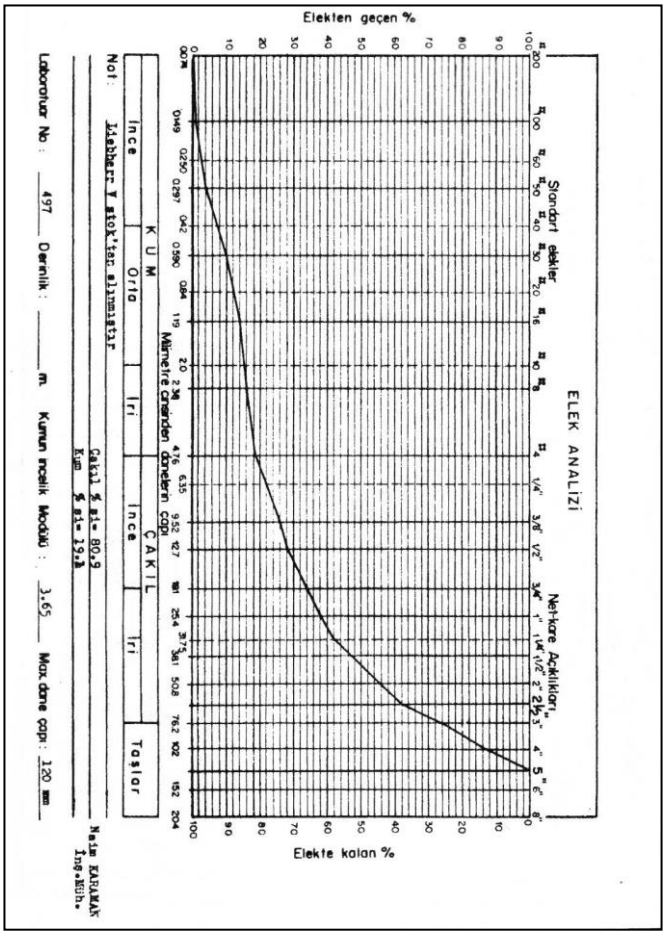
6.2.1 Karakaya Barajında RCC Kullanımı

50 m yüksekliğe sahip memba batardosu ilk olarak kil çekirdekli kaya dolgu olarak tasarlanmıştır. Daha sonra RCC'nin getireceği avantajlar gözönüne alınarak kil çekirdek yerine RCC kullanılması görüşü kabul edilmiştir. RCC serimine 17 Kasım 1982'de başlanılıp 25 Mart 1983'te son verilmiştir. Batardo inşaatında toplam 46000 m^3 RCC kullanılmıştır.

6.2.2 Atatürk Barajında RCC Kullanımı

Atatürk Barajının dolusavağı projelendirilirken tabandaki ana kaya ile şut kanalı döşeme betonu arasındaki bölümün betonla doldurulması tasarlanmıştır. Daha sonra ise doldurulacak kısımda RCC kullanılması uygun bulunmuştur. Şekil 6.1'de dolusavak şut kanallarında kullanılan agrega dane dağılımı gösterilmiştir. Buradaki RCC'de bulunan unsurların oranları şöyle olmuştur: çimento 120 kg/m^3, su 114

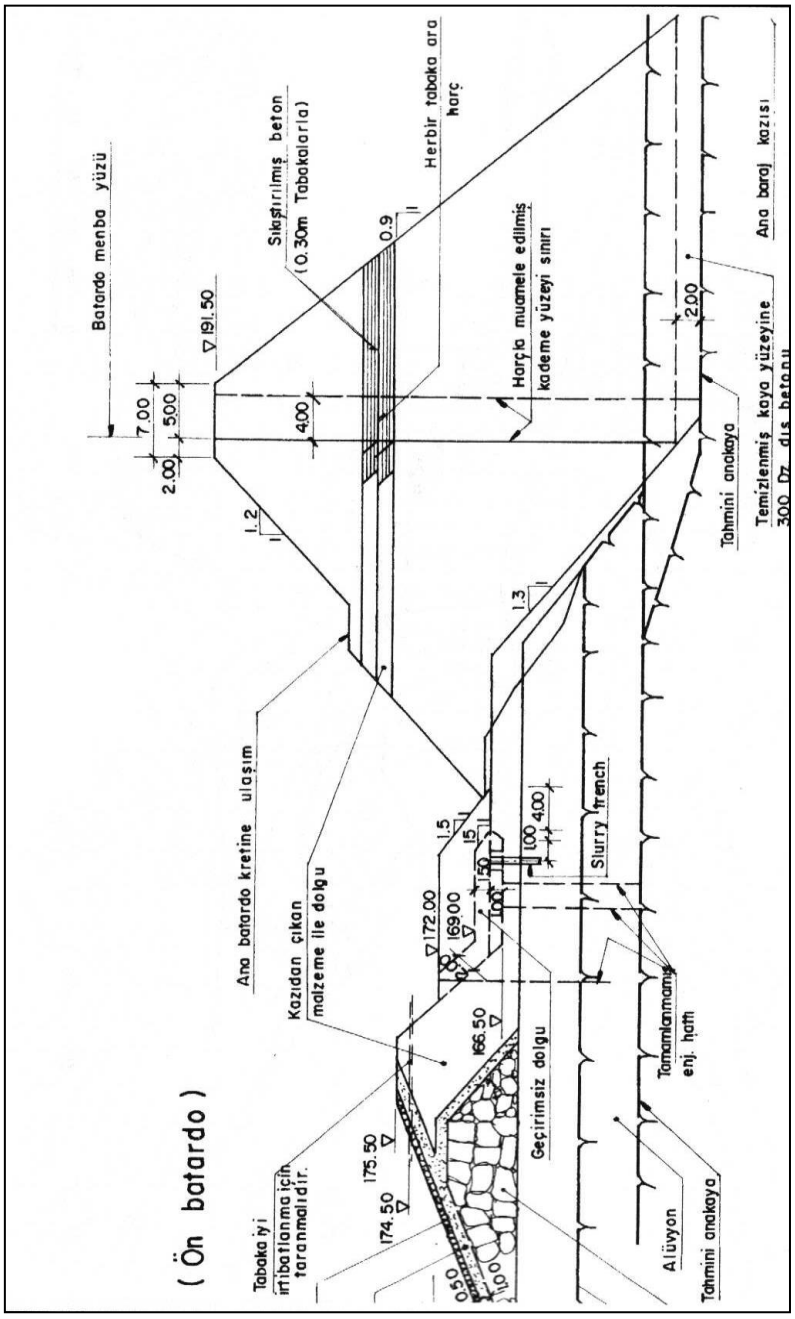
kg/m^3, su/çimento oranı 0.95, agrega 2354 kg/m^3. Dökülmüş olan toplam silindirle sıkıştırma beton hacmi RCC 145000 m^3'tür.



Şekil 6.1 Atatürk Barajı dolusavak şut kanallarındaki agrega dağılımı

6.2.3 Berke Barajı ve HES Memba Batardosunda RCC Kullanımı

Silindirle sıkıştırma betonun serilmesi için uygun bir derinliğe kadar alüvyon malzeme kazılmış ve batardo temeli oluşturulmuştur. Kazı işlemi tehlike oluşturabilecek bölümlerde ana kayaya ulaşılıncaya kadar devam ettirilmiştir. Drenaj boruları ile çalışma ortamının kuru kalması sağlanmıştır. Şekil 6.2'de RCC kullanılan kısımlar gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Berke Barajı ve HES memba batardosu enkesiti

6.2.4 Kürtün Barajında RCC Kullanımı

Türkiye'de RCC uygulamalarının dördüncüsü olan Kürtün Barajı memba batardosu yapımı Sır Barajı örnek alınarak yapılmıştır. Doğu Karadeniz Harşit Projesi dahilindeki Kürtün Barajının memba batardosundaki RCC serimine ait bazı resimler ve bazı kesitler Ek E1'de verilmiştir. Bu batardo inşaatının diğer örneklerinden ayıran en önemli özelliği 25 m'lik bir alüvyon tabakası üzerine yapılmış olmasıdır.

6.2.5 Sır Barajında RCC Kullanımı

Sır Barajının memba batardosu ilk olarak ince beton kemer baraj şeklinde yapılması düşünülmüştür. Daha sonra ekonomik ve zamansal kısıtlamalar da gözönüne alınarak batardonun RCC olarak yapılması kabul edilmiştir. Burada RCC kullanılmasının en büyük sebebi Karakaya Barajı inşaatından elde edilen tecrübelerdir.

Sır Barajı ve HES memba batardosunun memba şevi 1/1.2 , mansap şevi 1/1, temelden yüksekliği 40 m ve kret genişliği 7 m'dir. Batardonun mansap kısmı RCC kullanılarak yapılmış olup memba kısmında ise kaya dolgu kullanılmıştır. Batardoda kullanılan RCC hacmi 38000 m^3'tür. Batardo inşası sırasında kalite kontrol laboratuvarı kurularak RCC ile ilgili kontrol deneyleri yapılmıştır. Sır Barajı memba batardosu için özel olarak hazırlanan şartnameye göre yapılan analizle ortaya çıkan birim fiyat, tüm şartlar aynı kalmak koşuluyla dökülecek klasik beton birim fiyatının % 60'ı kadar olmuştur.

Laboratuvarlarda altı seri sıkışma deneyi yapılmıştır. Su, çimento ve agrega oranları parametre kabul edilip bunların değişimiyle ve farklı agrega ocaklarından malzeme alınmasıyla deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre de maksimum birim hacim ağırlığı tesbit edilmiştir.

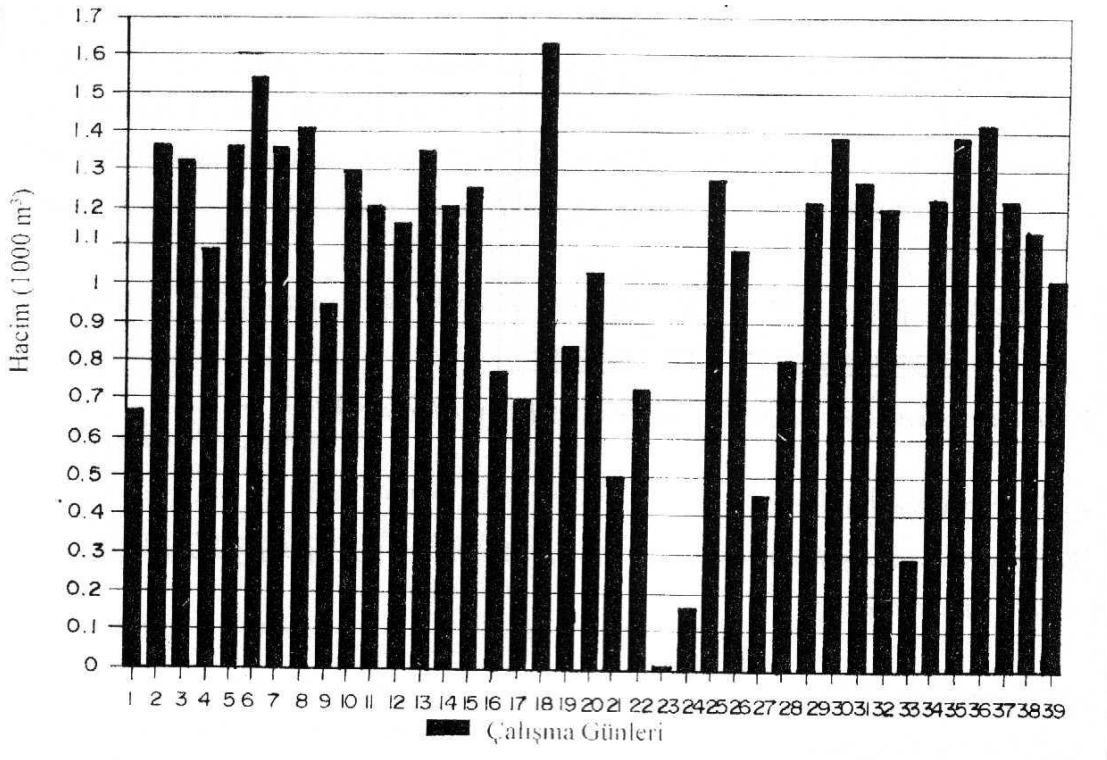
Sır Barajında 32 N/mm^2'lik Katkılı Portland Çimentosu kullanılmıştır. Karışımlarda doygun kuru yüzeyli agrega kullanılmıştır. İki çeşit karışım tasarlanmıştır. Batardo memba kısmında ve temel bölümünde 120 kg/m^3'lük bir karışım, diğer kısımlarda ise 80 kg/m^3' lük bir karışım kullanılmıştır.

Optimum W/C (Su hacmi/Çimento hacmi) için çevredeki çeşitli agrega kaynaklarından örnekler alınarak çeşitli W/C oranları grafikte işaretlenmiş ve optimum oran bulunmuştur. Deneyde 20 cm çaplı ve 40 cm boyunda sıkıştırma kalıpları kullanılmıştır. 20 cm çapında ve 2 cm kalınlığında orta kısmı darbelere karşı güçlendirilmiş ve yuva bırakılmış sıkıştırma plakası kullanılmıştır. Ek F1'de deney sonuçları verilmiştir. Deneyin yapılışı ise şu şekildedir: laboratuvarda hazırlanan karışım 20*40 silindir kalıbın içerisine 1/3 yüksekliğe kadar doldurulur ve tesviye edilerek 26 kg'lık el tabancası ile 60 saniye sıkıştırılır. 2 ve 3. Tabakalar da aynı şekilde sıkıştırıldıktan sonra ıslak birim hacim ağırlığı tesbit edilir.

Arazide de bazı deneyler yapılmaktadır. Sıkışma oranı ve segregasyon kontrolü deneyleri için 20 cm çaplı 30 – 35 cm derinlikte numune çukurları açılarak örnekler alınmıştır. Sonra bu çukur hacimleri kumla doldurularak çukurların kapladıkları hacimler bulunmuştur. Araziden elde edilen birim hacim ağırlık laboratuvarda tesbit edilene bölünerek sıkışma yüzdesi tahmin edilmiştir. Ayrıca numunelerin bir kısmına da elek analizi yapılmış ve segregasyonun önemli ölçüde bulunmadığı tesbit edilmiştir.

Geçirimliliğin bulunması için 20*40 cm'lik el tabancası ile sıkıştırılan numunenin etrafı harçla izole edilmiştir. Daha sonra 5 atmosfer basınç altında su uygulanmıştır. Ortasından yarılan numunedeki su boyu tesbit edilerek 10^{-8} cm/s gibi bir geçirimlilik bulunmuştur.

Sır Barajı ve HES memba batardosunda dolgu ve tesviye betonundan sonra 30 Eylül 1987'de RCC serimine başlanmıştır. 39 gün sonra 28 Kasım 1987'de batardo inşası bitmiştir. Şekil 6.3'te bu durum bir grafikle gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Sır Barajı ve HES memba batardosundaki RCC uygulamasının ilerleme hızı

7. SİLİNDİRLE SIKIŞTIRMA BETON BİR BARAJLA KLASİK BETONLA YAPILMIŞ BİR BARAJIN, BİLGİSAYAR UYGULAMASIYLA YAPISAL YÖNDEN KARŞILAŞTIRILMASI

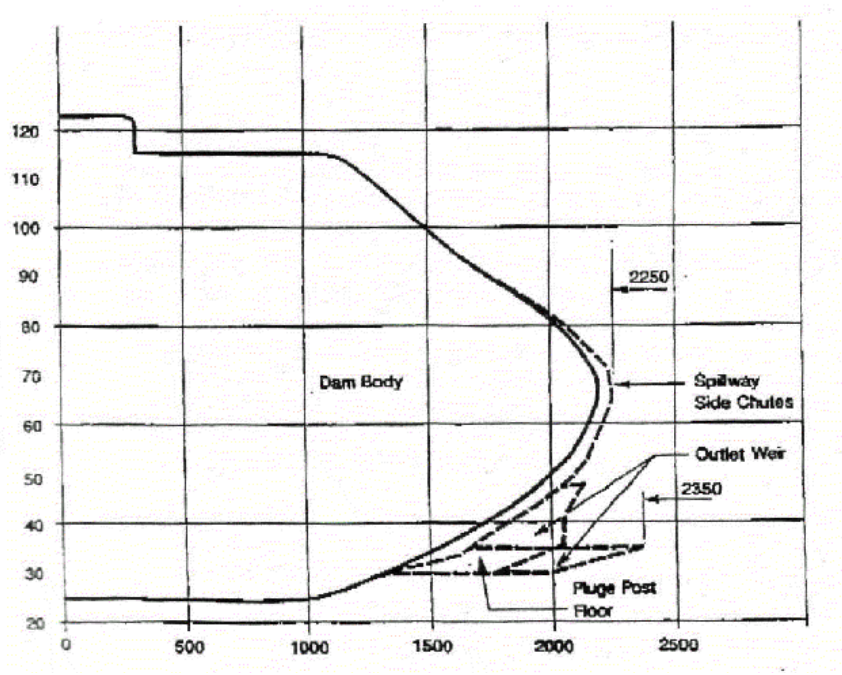
7.1 Giriş

Silindirle sıkıştırma beton ile klasik betonun yapısal ve tasarımsal farklılıklarını ele almak için bu farklılıklarının oluşturduğu farklı parametreler kullanılarak bir uygulama yapılmıştır. Uygulamanın yapıldığı program CGDA (Concrete Gravity Dam Analysis) adlı ağırlık beton barajların yapısal stabilitesini denetleyen bir programdır. Bu program O.D.T.Ü'den Profesör Doktor A. Melih Yanmaz'ın katkılarıyla Hakan Birhan tarafından geliştirilmiştir. Bu bölümde programa RCC ile normal beton özellikleri uygulanarak RCC'nin oluşturacağı fark gösterilmek istenmiştir. RCC baraj uygulaması için kullanılan doneler 1994 yılında Türkiye'de Manyas bölgesinde yapılması düşünülen RCC barajın M.R.H. Dunstan tarafından hazırlanan önraporundan alınmıştır(Dunstan,1994). Yapılması düşünülen RCC Manyas Barajı ise şartnamelerdeki bazı hatalardan dolayı yapılamayıp yerine başka bir baraj tipi inşa edilmiştir. Raporda yapılması düşünülmüş RCC Manyas Barajı ise Avusturalya'daki New Viktorya Barajı inşa metotlarının daha da geliştirimesi ile yapılması düşünülmekteydi.

7.2 RCC Manyas Barajı Özellikleri

Yapılması düşünülen barajda yüksek yapıştırıcı oranlı sıkıştırma beton kullanılacaktı. Burada dört yılda yapılabilecek bir kaya dolgu baraj yerine RCC baraj yapılsaydı inşa süresi üç yıl olacaktı. Ayrıca kazanılan bir sene haricinde maliyet açısından da çok büyük yararlar sağlayacaktı. Manyas'ta vadi şekil itibariyle günde bir RCC katmanı serilecekti. Dolusavak olarak de mansap yüzeyine basamaklı bir dolusavak yapılması öngörülmekteydi. Derivasyon kanalının temel altından geçirilmesi ile fazladan derivasyon tüneline gerek kalmayacaktı.

Türkiye puzolan konusunda çok şanslı ülkelerden biridir. Manyas'ta da yüksek fırın cürufu kullanımı düşünülmekteydi. RCC ise 30 cm'lik tabakalar halinde serilecekti. Tabakaların yüksekliğe göre serim hacmi şekil 7.1'de gösterilmiştir (Dunstan, 1994). Her tabakada enfazla serilebilecek RCC yoğunluğu 2250 m^3 olarak tasarlanmıştı. Baraj yüksekliğinin üçte ikilik kısmında ise 1500 m^3'lük bir hacme ulaşılması öngörülüyordu.



Şekil 7.1 Manyas Barajındaki RCC tabaka hacmi ile baraj yüksekliği ilişkisi

Geoteknik araştırmalardan çıkan sonuçlara göre bu bölgede yapılacak bir RCC barajın temeli 100m'e kadar olan herhangibir baraj yüksekliğini rahatlıkla kaldırabilir. Bunun için havalanmış kaya kısmından 5 m sıyırılması ilave yapıların bulunacağı yer için şart olarak görülüyordu. Nehir yatağındaki kaya kısımda ise 5 ile 7 m arası sıyırma kazısı öngörülüyordu. Vadideki sol taraftaki ilave yapılar ve nehir yatağı topoğrafik olarak yatay bir düzlem boyunca sıyırmayı uygun kılıyordu ama sağ bölümdeki ilave yapılar için bu şekilde bir sıyırma çok büyük miktarda bir kazı gerektirmekteydi. Bu kısımdaki temelin doğal yüzeyi izleyecek şekilde mansaba doğru eğimli yapılması uygun bulunmuştu. Bu şekildeki bir temelde ve barajda yatay temelli bir baraja göre daha yüksek kayma gerilmesi oluşumu kaçınılmaz olur. Ama tasarımdan çıkan değerlere göre bu şekilde yapılacak bir baraja ait değerler bütün

sınır değerlere uygundu. Ayrıca baraj ile temel yüzeyleri arası, potansiyel bir kayma düzlemi oluşturmaması açısından basamaklı şekilde tasarlanmıştı.

Bir RCC baraj için böyle bir bölgede enjeksiyon perdesi klasik betona nazaran daha derin olmalı ve blanket kısmındaki bazı arızalı bölümlerde de özellikle enjeksiyon kullanılmalıdır. Buna rağmen Manyas'a yapılması düşünülen silindirle sıkıştırma beton ağırlık barajda dolusavağın türünden dolayı dolusavakta enjeksiyon ihtiyacı çok az olacaktı.

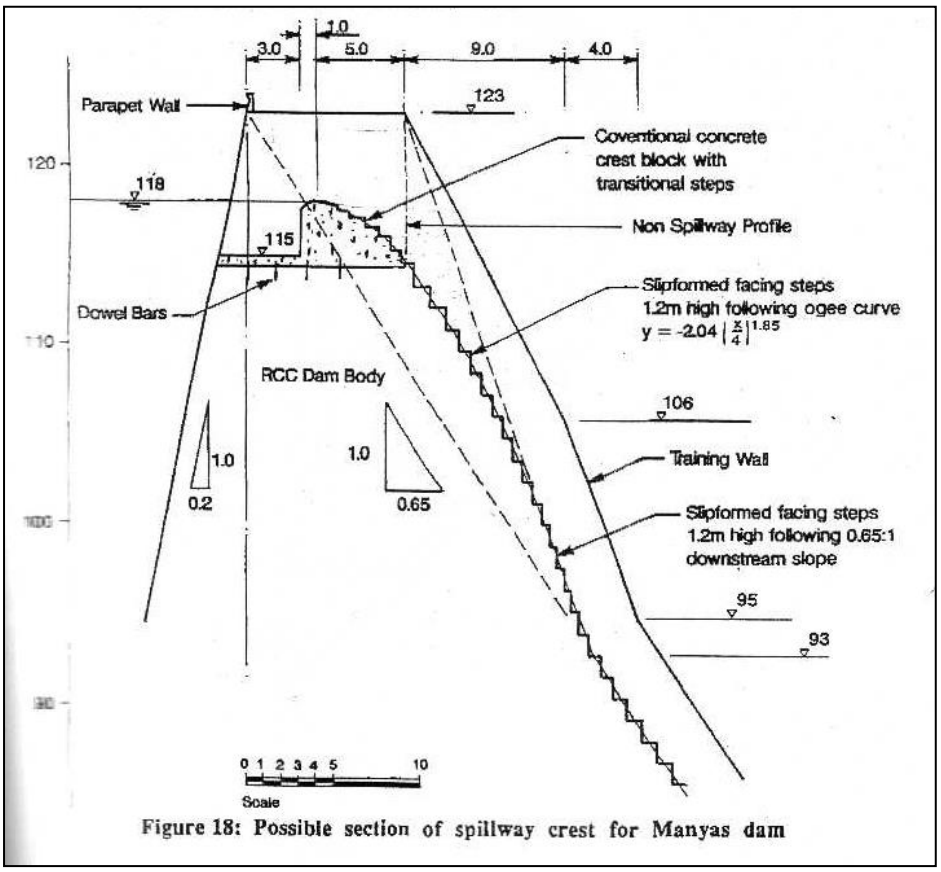
7.2.1 Manyas Barajı Kesiti

Manyas bölgesindeki vadi koşullarına uygun RCC bir baraj için değişik alternatifler hazırlanmıştı. Sonuçta en uygun olanı için şu koşullar ortaya çıktı:

En yüksek su seviyesi: Deniz seviyesine göre 118 m

En düşük işletme kotu: 84.8 m

Şekil 7.2'de tasarlanan kesitlerden bir tanesi verilmiştir (Dunstan, 1994):



Şekil 7.2 Manyas Barajı'nın bir kesiti

Manyas Barajı tasarımı, New Viktorya Barajı örnek alınarak yapıldığından kayar kalıp yüzey elemanlarının arasına RCC bulunacak şekilde bir inşa metodu kullanılacaktı. Bu metottaki etkin çalışma sayesinde vadinin en dar olduğu kesimde yani minimum genişlikte bir RCC baraj yapımı mümkün oluyordu. Galeriler baraj gövdesi ile bitişik planlanmıştı. Alt tarafta bulunan galeri kuyruk suyu seviyesinden yüksek olan 53 m kotunda ve yukarı taraftaki galeri ise 83 m kotunda planlanmıştı.

7.3 CGDA Programındaki Gözönüne Alınan Durumlar

Manyas Barajı Verileri

Programda kullanılan değerler şunlardır:

Memba su derinliği : 88 m

Baraj Yüksekliği : 93 m

Memba tarafındaki eğimli bölgenin taban uzunluğu : 18.6 m

Kret kalınlığı : 9 m

Mansap tarafındaki eğimli bölgenin taban uzunluğu : 60.45 m

Kretin mansap uç noktası ile mansap eğimli bölümünün başlangıç noktası arası dikey uzaklık : 0

Mansap su derinliği : 0

Emniyetli kayma gerilmesi (beton bloklar arası) : 4120 kN/m^2

Emniyetli kayma gerilmesi (baraj gövdesi ve temel arası) : 4120 kN/m^2

Suyun birim hacim ağırlığı : 10 kN/m^3

Betonun birim hacim ağırlığı : 26.2 kN/m^3

Dikey deprem katsayısı : 0.15 (İMO, 1998)

Yatay deprem katsayısı : 0.15

Alttan kaldırma basıncı azaltma katsayısı (beton bloklarda) : 0.6

Alttan kaldırma basıncı azaltma katsayısı (baraj gövdesi ile temel arasında) : 0.6

Sürtünme katsayısı (beton bloklar arası) : 0.1

Sürtünme katsayısı (baraj gövdesi ile temel arasında) : 0.1

Katı madde birikinti yüksekliği : 0

Katı madde birim hacim ağırlığı : 0 kN/m^3

Katı madde tabii şev açısı : -

Etkiyen buz kuvveti : 0

Blok sayısı : 1

İzin verilen basınç gerilmesi (temelde) : 6000 kN/m^2

İzin verilen basınç gerilmesi (bloklar arası) : 5000 kN/m^2

Manyas Barajı proje verileri kullanılarak yapılan uygulama sonuçları Ek G1'de verilmiştir. Gösterilen datalardan tüm stabilite koşullarının sağlandığı görülmektedir. Ayrıca klasik beton baraj için stabilitenin sağlanmadıpı denemeler de verilmiştir.

Klasik Beton Baraj verileri

Eğer Manyas RCC Barajı tasarımı, silindirle sıkıştırma beton yerine klasik beton kullanılarak yapılsaydı barajın boyutları ne şekilde değişebilirdi diye düşünerek bu bölümde bu karşılaştırma da yapılmıştır. Klasik beton özelliklerinin tasarımdan tasarıma değişeceğinden, klasik betonun Manyas'ta da kullanılmadığından dolayı sağlıklı ve bir ölçüde fikir verebilmesi açısından klasik betonun sayısal değerleri ortalama bir yaklaşımla alınmıştır. Ama yine de bu değerler, Manyas Barajı önraporunda belirtilen sınır koşullarına uygun olacak şekilde seçilmiştir.

Klasik beton kullanılması durumundaki değerler:

Memba su derinliği : 88 m

Baraj Yüksekliği : 93 m

Memba tarafındaki eğimli bölgenin taban uzunluğu : 20.6 m

Kret kalınlığı : 9 m

Mansap tarafındaki eğimli bölgenin taban uzunluğu : 62.45 m

Kretin mansap uç noktası ile mansap eğimli bölümünün başlangıç noktası arası dikey uzaklık : 0

Mansap su derinliği : 0

Emniyetli kayma gerilmesi (beton bloklar arası) : 4100 kN/m^2

Emniyetli kayma gerilmesi (baraj gövdesi ve temel arası) : 4100 kN/m^2

Suyun birim hacim ağırlığı : 10 kN/m^3

Betonun birim hacim ağırlığı : 24 kN/m^3

Dikey deprem katsayısı : 0.15

Yatay deprem katsayısı : 0.15

Alttan kaldırma basıncı azaltma katsayısı (beton bloklarda) : 0.6

Alttan kaldırma basıncı azaltma katsayısı (baraj gövdesi ile temel arasında) : 0.6

Sürtünme katsayısı (beton bloklar arası) : 0.75

Sürtünme katsayısı (baraj gövdesi ile temel arasında) : 0.80

Katı madde birikinti yüksekliği : 0

Katı madde birim hacim ağırlığı : 0 kN/m^3

Katı madde tabii şev açısı : -

Etkiyen buz kuvveti : 0

Blok sayısı : 1

İzin verilen basınç gerilmesi (temelde) : 6000 kN/m^2

İzin verilen basınç gerilmesi (bloklar arası) : 5000 kN/m^2

7.4 Stabilitenin Sağlandığı Durumların Karşılaştırılması

Burada ilk olarak RCC baraj boyutlarıyla aynı boyutlar alınarak uygulama yapılmış ve emniyetin sağlanmadığı görülmüştür. Daha sonra boyutlar artırılarak hangi değerlerde stabilitenin sağlanabileceği araştırılmıştır. Memba tarafındaki eğimli bölgenin taban uzunluğu ve mansap tarafındaki eğimli bölgenin taban uzunluğu her denemede 2'er m artırılarak stabilite denenmiş ve sonuçta ilki için 20.6 m ve ikincisi için 62.45 m değeri kullanıldığında klasik beton için stabilitenin sağlandığı görülmüştür. Yani iki uzunlukta da RCC baraja göre büyüklükler artmıştır. Genelde klasik beton barajların mukavemetleri, RCC barajlara göre daha büyük olduğundan klasik beton barajların boyutları daha küçük olur. Ama yüksek yapıştırıcı oranlı RCC barajlar bazı durumlarda klasik beton barajlara nazaran daha yüksek mukavemete

sahip olabilirler. Buradaki uygulamada da böyle bir durum söz konusudur, dolayısıyla boyutlar farklı çıkmıştır.

8. SONUÇLAR

Silindirle sıkıştırma beton baraj metodu, geleneksel granüler dolgu veya kütle betonu agregasının çimento ile zenginleştirilmesi ve klasik dolgu baraj ekipmanları kullanılarak taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması ile tek veya çok tabakalı uygulanan ve sıkıştırma işlemi yapılan bir metottur. Bu tipte yapılan barajlar, vibrasyonla sıkıştırılmış klasik beton ağırlık barajlara alternatif olarak ortaya çıkmış, ancak daha önceden kaya dolgu olarak planlanan barajların yerine de inşa edilmeye başlanmıştır.

Başlangıçta büyük çoğunluğu taşkın kontrolü ve su temini amaçlı olarak inşa edilen silindirle sıkıştırma beton barajlar, şimdi tüm amaçlar için inşa edilebilmektedir.

Hangi felsefe ve hangi RCC baraj çeşidi yapılırsa yapılsın tasarımcının dikkat edeceği en önemli hususlardan biri de projenin detaylarına kadar mümkün olduğunca basit tasarlanmasıdır. Çünkü silindirle sıkıştırma betonun uygulanma sebeplerinden biri de zamandan tasarruf ve kolay inşa metodudur. Oluşacak RCC kalitesi çabuklukla artmaktadır, tam tersine RCC maliyeti çabuklukla azalır. Yavaş veya ara verilmiş serim sonucu düşük yoğunluklu beton ve kötü kaliteli tabaka yüzeyleri ortaya çıkar. İnşaat metodu da öyle ayarlanmalıdır ki minimum işçilik olsun ve ekipmanın kapladığı yer miktarı minimum olsun. Burada basit olmayan tasarımlar, ulaşılmak istenen hedefler açısından çok güzel sonuçlar ortaya çıkarmaz.

Silindirle sıkıştırma beton barajın başlıca avantajları şunlardır:

Zamandan en az %30 tasarruf yapılmış olunur.

En azından normal bir beton baraj kadar sağlamlık elde edilir.

Toprak dolgu bir baraj yapımı hızında beton bir baraj yapılır. Zayıf RCC barajlarda haftada 2 – 2.5 m kadar, yüksek yapıştırıcı oranlı RCC barajlarda haftada 1 – 1.5 m kadar tabaka yükselme hızı vardır.

Toprak dolgu bir baraj yapımı kolaylığında beton bir baraj yapılır. Geleneksel betonarme barajların beton kütle boyutları, limitli ve kalıba dökülerek yapılır.

RCC'de ise yatay tabakalar halinde yerleştirme ve sıkıştırma işlemi yapılır. Klasik dolgu baraj ekipmanı kullanabilme imkanı vardır.

Ekonomik olarak ise proje aşamasında bile %30-40 mertebesinde ekonomik fayda sağlanır.

Teknik olarak sağlanan avantajlardan bazıları temel kazısı azlığı, derivasyon-dipsavak tünellerinin kısalığı, dolusavağın gövde üzerinde masrafsız teşkili gibi kolaylıklardır.

Yapı boyutları dolgu baraja göre küçülür,malzeme ve işçilik azalır.

Kütle betona göre düşük çimento kullanılabilir ve daha fazla puzolan kullanılabilir.

Hidratasyon ısısından dolayı özel soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaz.

Değişik tane dağılımına sahip, doğal ya da kırma agrega ile yapılabilme olanağı ve dolayısıyla kum, çakıl gibi malzemeyi ekonomik kullanma imkanı vardır.

Fazla gövde hacimli barajlar için RCC sayesinde yapılan tasarruf maksimum seviyede olur. Özellikle geniş vadiler için RCC'nin sürekli serim metodu çok uygundur.Klasik betona göre istenildiğinde çok daha fazla uçucu kül kullanılabilir. Yıkanabilir madde oranı ise %8 ile %10'a kadar müsaade edilebilir. Zayıf yapıştırıcı oranlı RCC metodu da çimento ve puzolan temininin zor olduğu bölgelerde veya mali yapının bunların fazla kullanılmasına elvermediği durumlar için çok uygundur.

KAYNAKLAR

Abifadel, N., and Johnson, D., 1991. Evolution of Temperatures in Roller Compacted Concrete Dams Case Study Stagecoach Dam, Woodward-Clyde Consultants., Denver.

ACI Committee 207., 1988. Roller Compacted Mass Concrete, *ACI Materials Journal Committee Report,* **85 – M44.**

Arnold, T., and Johnson, D., 1990. Monitoring and Instrumentation Stagecoach RCC Dam, Woodward-Clyde Consultants., Colorado.

ASI RCC Inc., 1997. Introduction and RCC Project Highlights. Colorado.

Bindo, M., Gautier, J. and Lacroix, F., January 1993. The Stepped Spillway of M'Bali Dam, *Int. Water Power and Dam Construction*.

Cannon, R.V., 1995. Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams; Appendix E Tensile Strength of Roller Compacted Concrete, Engineer Pamphlet 1110-2-12, U.S. Army Corps of Engineers.

Demirci, İ., 1996. Silindirle Sıkıştırılmış Beton ve Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajlar, DSİ Barajlar ve HES Daire Başkanlığı, Ankara.

Dunstan, M.R.H., 1994. Manyas Dam Preliminary Design Report for an RCC Dam, Malcolm Dunstan Associates, Hayford Hall.

Forbes, B.A., June 1999. Grout Enriched RCC: a Hıstory and Future, *Int. Water Power and Dam Construction*.

Forbes, B. A., Lichen, Y., Guojin, T. and Kangning, Y., 1999. Jiangya Dam China Some Interesting Techniques Developed for High Quality RCC Construction, *International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams,* Chengdu, 21–25 April, 716-729.

Hansen, K.D., and Reinhardt, W.G., 1991. Roller – Compacted Concrete Dams, McGraw-Hill, New York.

İnşaat Mühendisleri Odası., 1998. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik. İzmir.

Kennard, M.F., Owens, C.L. and Reader, R.A., 1996. Engineering Guide to The Safety of Concrete and Masonry Dams in U.K., Construction Industry Research and Information Association Report 148, London.

McLean, G. and Pierce, S., 1988. Comparision of Joint Shear Strengths for Conventional and Roller Compacted Concrete, *Proceedings Roller Compacted Concrete II Conference,* ASCE, New York, 61-75.

Mekboul, M., Chraibi, A. and Saidsallam, M., 1999. Aoulouz Dam Additional Treatment of The Foundation, *International Symposium On Dam Foundations Problems and Solutions* , Antalya, Türkiye, 23 September, 105-116.

Mid-South Design and Research Institute for Hydroelectric Projects, Design and Study on RCC Gravity Dam of The Longtan Hydroelectric Project, Ministry of Power Industry., China.

Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. ve Narayan, R., 1997. Hydraulic Structures,E and FN Spon, London.

Raphael, J.M., 1984. Tensile Strength of Concrete, *ACI Journal*, 158-165.

Sorensen, M.R., 1984. Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation, *Journal of Hydraulic Engineering.*, **111.**

Tipton and Kalmbach Inc., 1992. The Modification of Goose Pasture Dam. Colorado.

TS-500, 1985. Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

US Army Corps of Engineers., 2000. Roller – Compacted Concrete Engineer Manual,Washington.

U.S. Army Corps of Engineers., 1993. Engineering and Design Structural Design Using RCC Construction Process ETL 1110-2-343, Washington.

U.S.B.R., 1987. Design of Small Dams. U.S. Government Printing Office, Denver.

U.S. Department of The Interior Bureau of Reclamation., 1987. Guidelines for Designing and Constructing Roller-Compacted Concrete Dams, Colorado.

Vittal, N. and Porey, P.D., 1986. Design of Cascade Stilling Basins for High Dam Spillways, *Int. Journal of Hydraulic Engineering,* **113.**

Yanmaz, A.M., 2001. Applied Water Resources Engineering. Metu Press, Ankara.

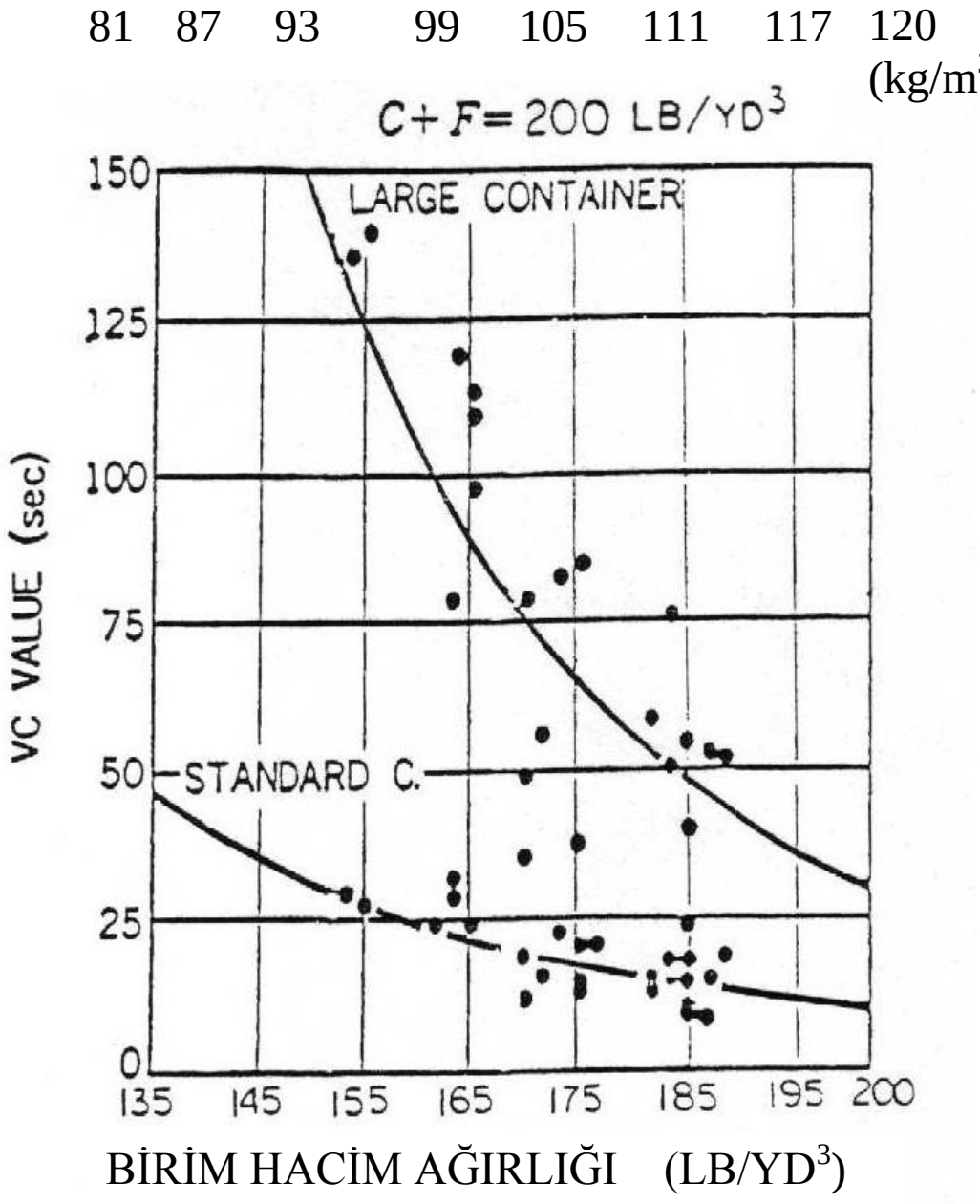
Zipparro, V.J. and Hansen, H., 1993. Davis' Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill, Chicago.

EKLER

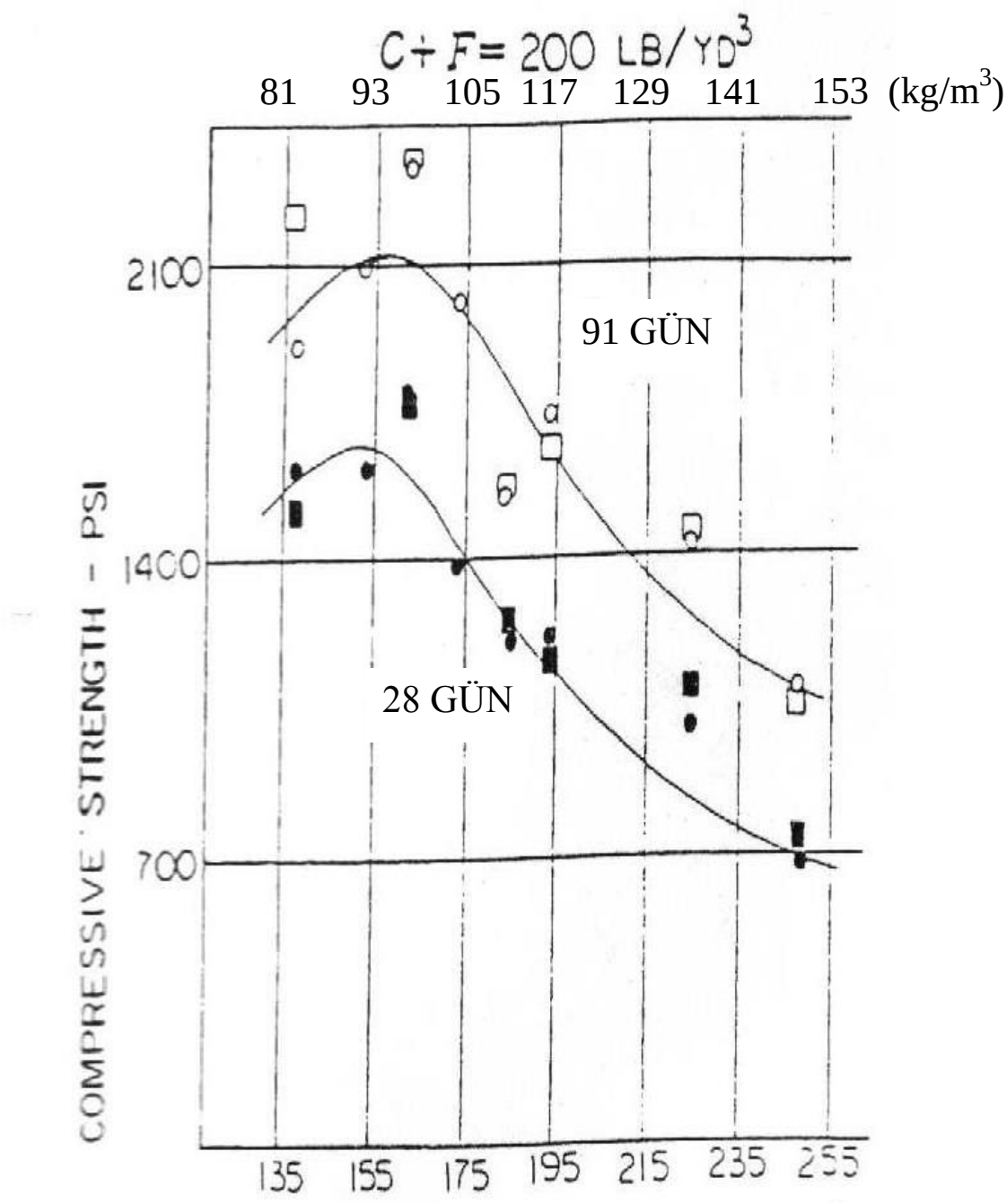
Ek A1 : Birim Hacim Ağırlığı ile VC Değerleri Arasındaki İlişki ve Sabit Çimento İçeriğinde Su Muhtevası İle Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki
Ek B1 : Eşit Dayanımlı Beton için Orantı Eğrileri, Su Miktarı ve Vibrasyon Süresinin Portland Çimentolu RCC Beton Yoğunluğuna Etkisi
Ek C1 : Değişen Çimento Oranlarından Elde Edilen Basınç Mukavemet Değerleri ve Çimentonun Mukavemete etkisi
Ek D1 : Çekilmiş Beton Bordür
Ek E1 : Kürtün Barajı'ndaki RCC Serimi ve Kürtün Barajı Memba Batardosu Enkesitleri
Ek F1 : RCC'nin Karışım Oranları ve RCC'nin Optimum W/C Oranı
Ek G1 : RCC ve Klasik Beton Baraj Tahkik Sonuçları

Ek A1

Birim hacim ağırlığı ile VC değerleri arasındaki ilişki.



Sabit çimento içeriğinde su muhtevası ile basınç mukavemeti arasındaki ilişki

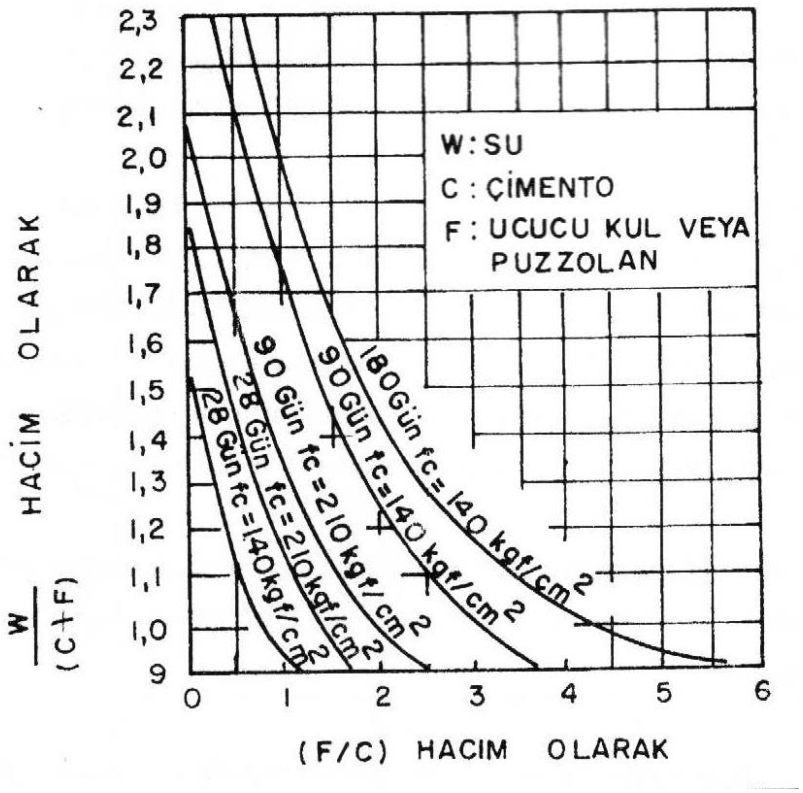


o-● Dakikada 4000 titreşimle sıkıştırılmış

□-■ Dakikada 6000 titreşimle sıkıştırılmış

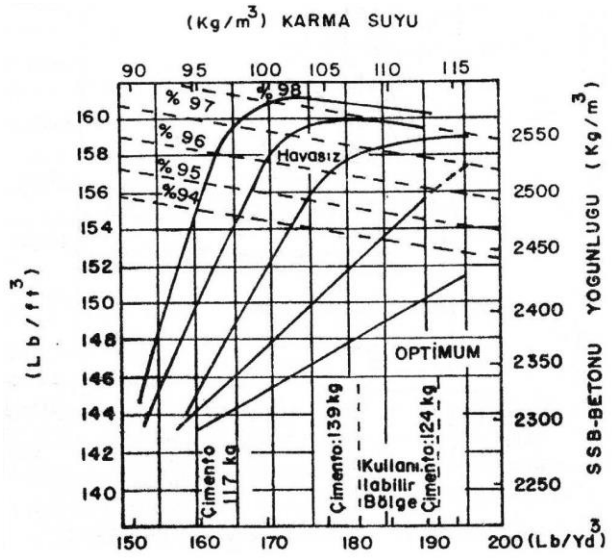
Ek B1

Eşit dayanımlı beton için orantı eğrileri



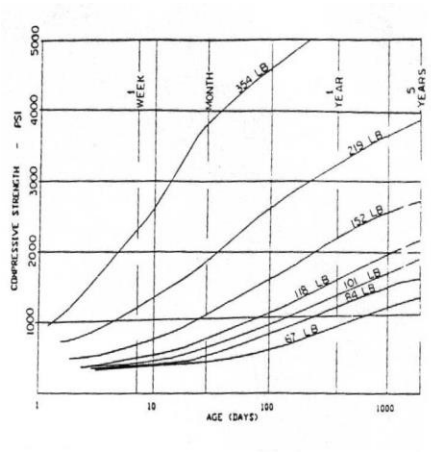
Su miktarı ve vibrasyon süresinin portland çimentolu RCC beton yoğunluğuna etkisi

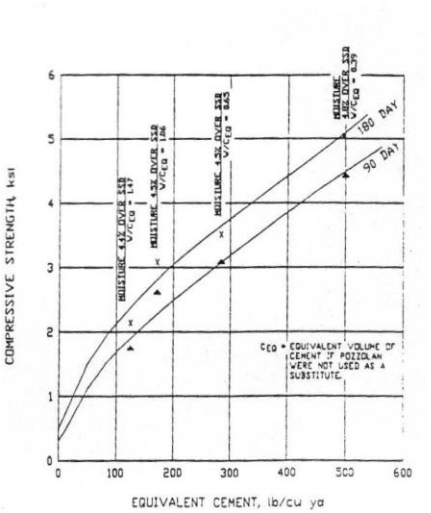
Bileşenler	Ağırlık (kg)	Hacim (m^3)
Çakıl	1159	0.41
Kum	587	0.21



EK C1

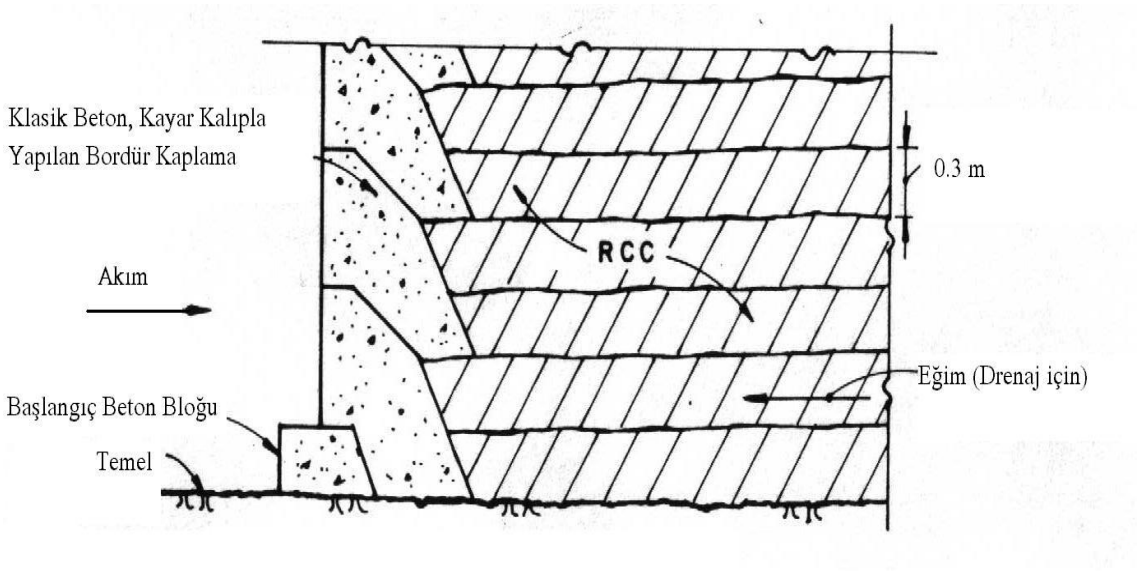
Değişen çimento oranlarından elde edilen basınç mukavemet değerleri ve çimentonun mukavemete etkisi



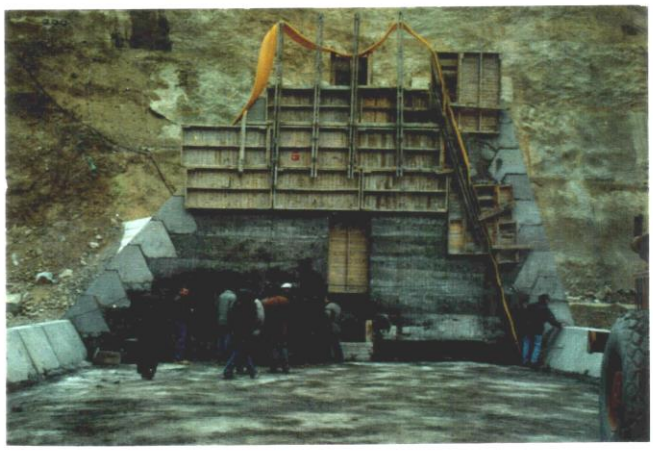


Ek D1

Çekilmiş Beton Bordür (Kayar Kalıp), (Zipparro ve Hansen, 1993)



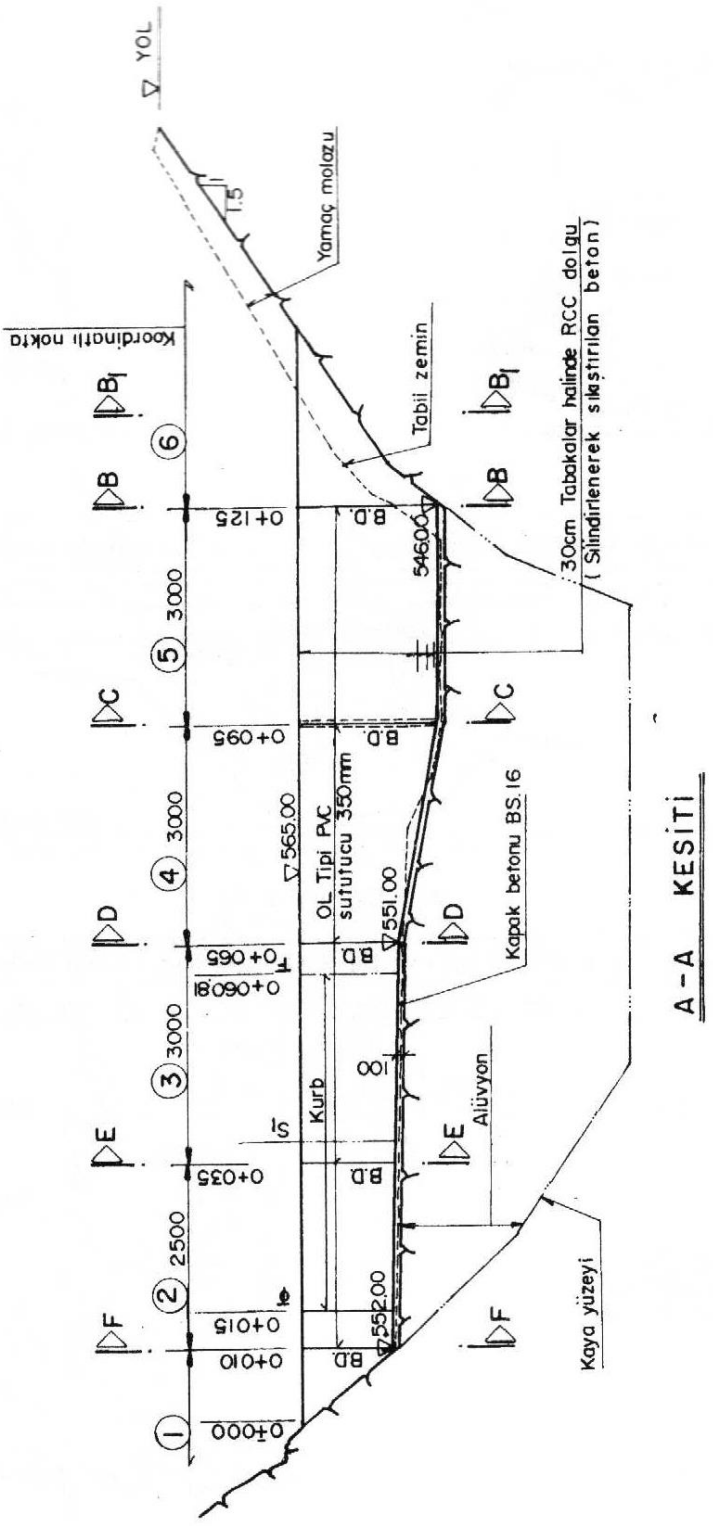
EK E1



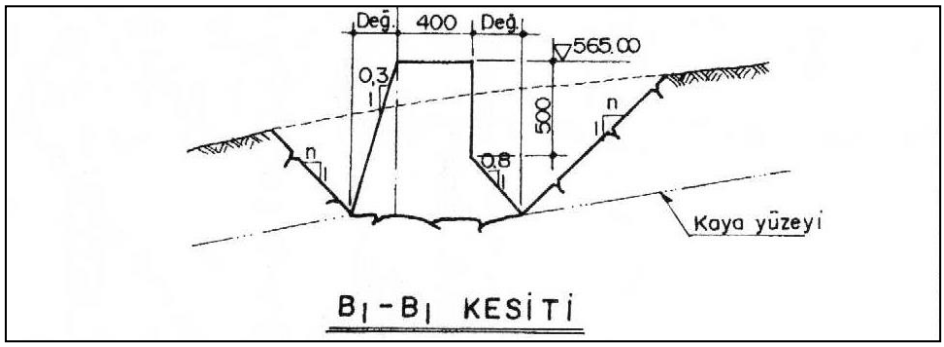




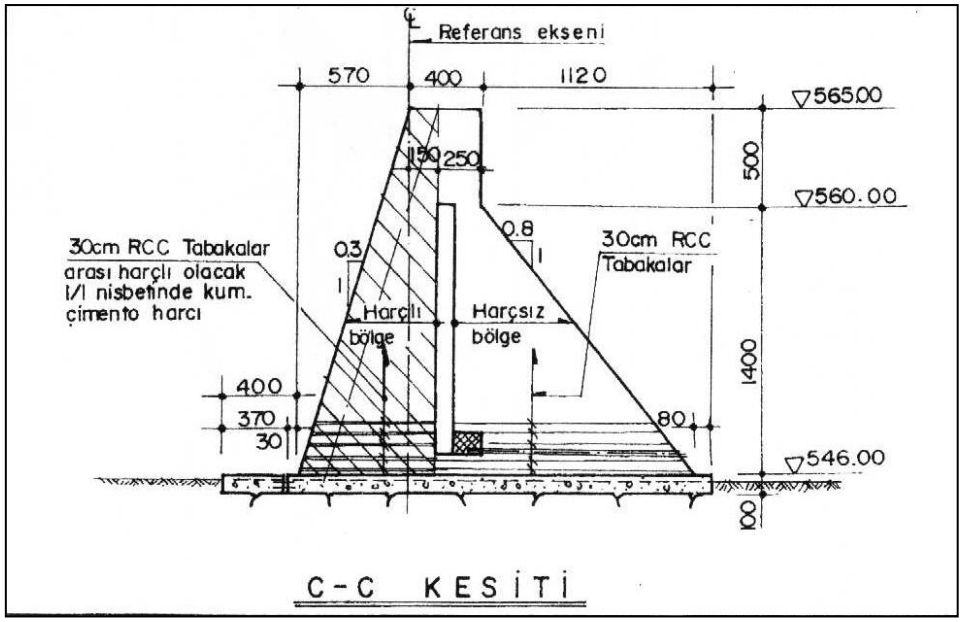
RCC serimi



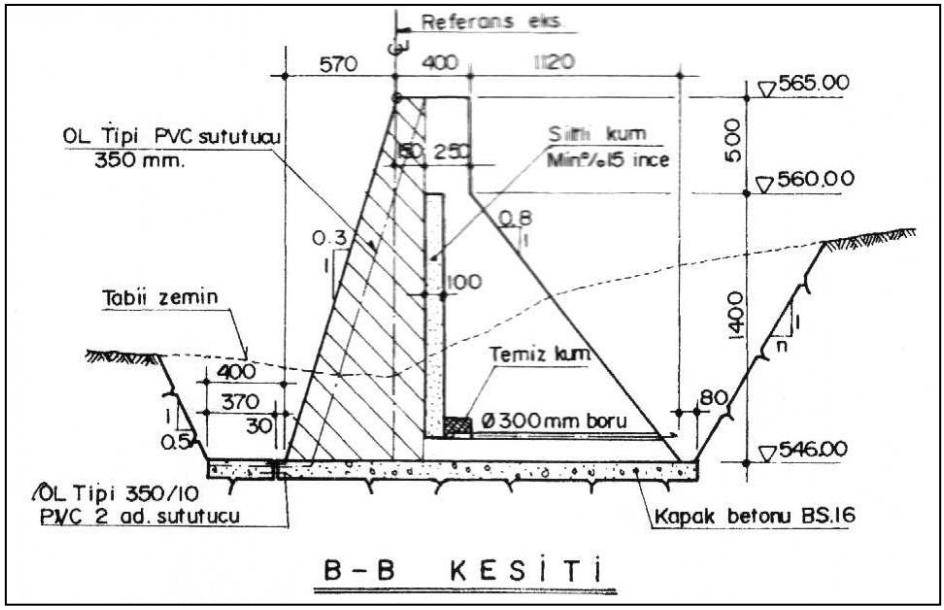
Kürtün Barajı memba batardosu enkesitleri



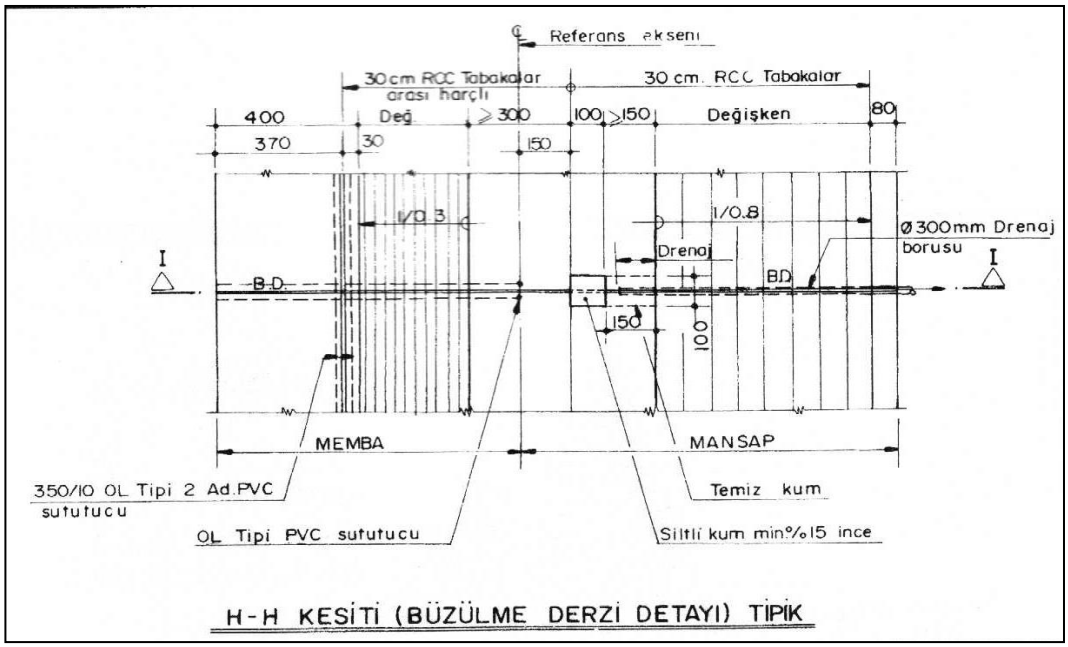
B1 - B1 KESİTİ



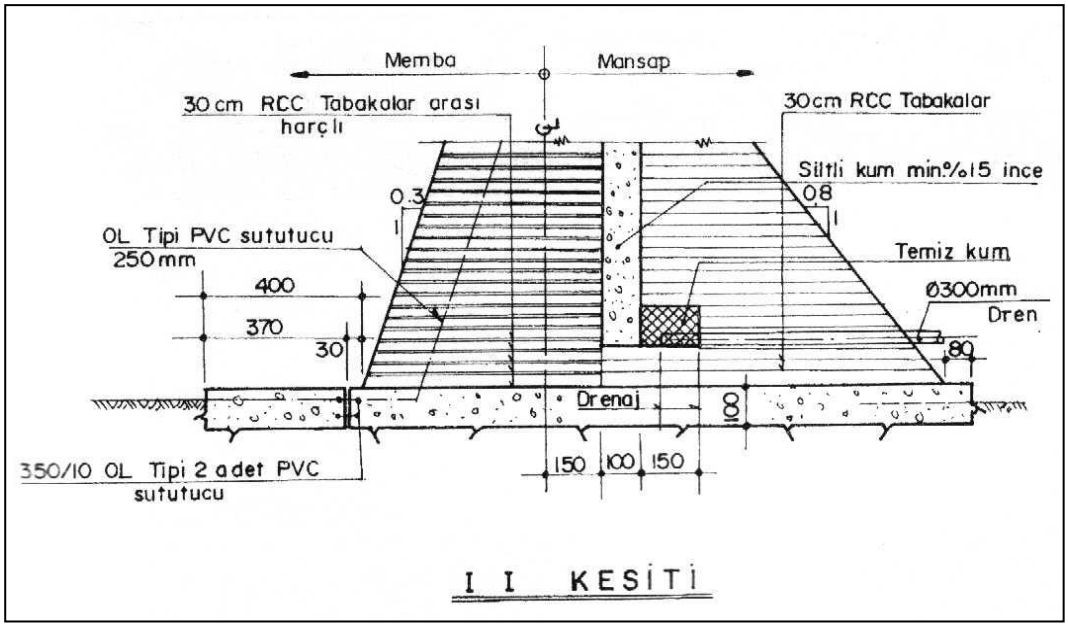
C - C KESİTİ



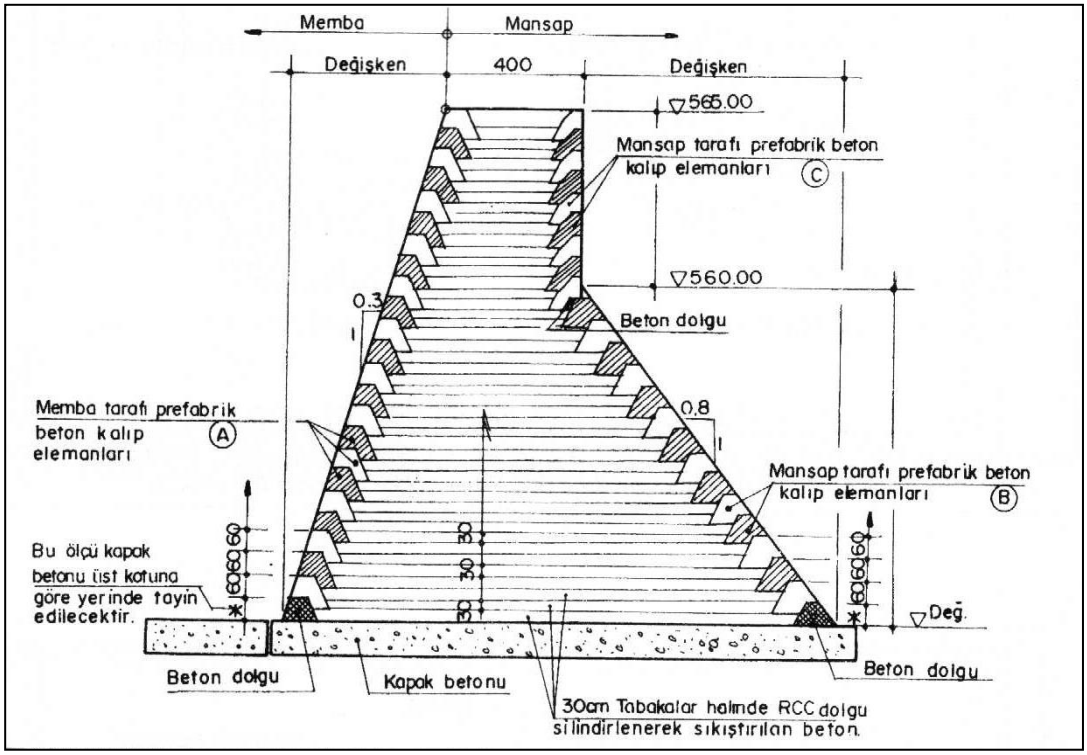
B - B KESİTİ



H-H KESİTİ (BÜZÜLME DERZİ DETAYI) TİPİK



I I KESİTİ

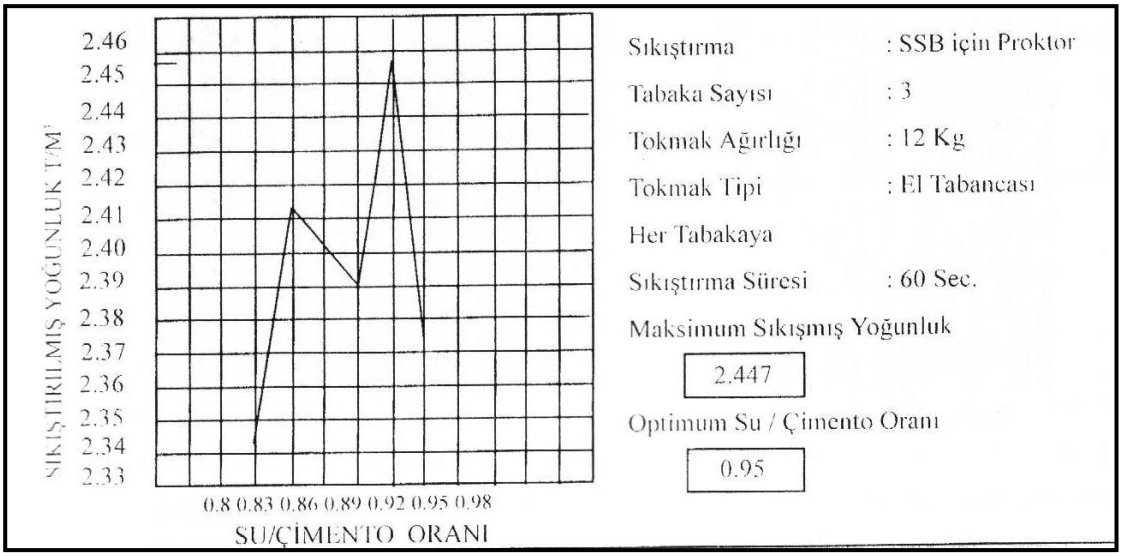


Kürtün Barajı ve HES memba batardosu kalıp elemanları konumu

Ek F1

Agrega Ocağı	Karışımlar						Islak Yoğunluk T/m³	Geçirimlilik M/sec	Basınç Dayanımı Kgf/cm²	
	1 m³ Beton için Ağırlık Esaslı									
	Dane Çapı	Çimento	w/c Oranı	Su	%42 Kg İnce agrega	%52 Kg İri agrega			7 Gün	28 Gün
Borazan Deresi # 1	76.2	100	0.83	83	972	1362	2.331			
# 2	76.2	100	0.86	86	968	1357	2.414			
# 3	76.2	100	0.92	92	959	1347	2.390			
# 4	76.2	100	0.95	95	956	1342	2.374			
# 5	76.2	100	0.98	98	952	1337	2.374			
# 6	76.2	100	0.95	95	956	1342	2.43	$9x10^{-8}$		110

RCC'nin karışım oranları



RCC'nin optimum W/C oranı

Ek G1

RCC baraj için yapılan tahkik sonuçları

NUMBER OF BLOCK = 1 OUT OF = 1

HEIGHT OF DAM (m) = 93
HEIGHT OF WATER (m) = 18,6
BASE LENGHT(m) = 88,05
BASE LENGHT/6 (m) = 14,675

	USUAL L.	UNUSUAL	EXT.(OP)	E(EMP)TOE	E(EMP)HEEL
TOT.V.F.(kN/m) =	102734,82	102319,07	111141,85	95640,65	111141,85
TOT.H.F.(kN/m) =	38720	43245	14188,32	57037,45	14188,32
TOT.R.M.(kNm/m)=	6742943,28	6814436,2	6106515,55	6742943,28	4304165,57
TOT.O.M.(kNm/m)=	2500279,91	2782616,27	847017,6	3497003,28	738876,6
ECCENTRICITY(m)=	2,73	4,62	3,30	10,09	11,95
FSs =	1,99	1,77	5,88	1,26	5,88
FSo =	2,70	2,45	7,21	1,93	5,83
FSss =	6,67	5,97	18,66	4,44	18,66
Smax (kN/m2) =	1383,66	1527,94	1545,88	1832,76	2289,81
Smin (kN/m2) =	949,9	796,17	978,64	339,66	234,71
Max Str. is at =	TOE	TOE	HEEL	TOE	TOE

Klasik Beton Baraj için yapılan tahkik sonuçları (stabilitenin sağlandığı durum)

NUMBER OF BLOCK = 1 OUT OF = 1

HEIGHT OF DAM (m) = 93
HEIGHT OF WATER (m) = 20,6
BASE LENGHT(m) = 92,05
BASE LENGHT/6 (m) = 15,3416666666667

	USUAL L.	UNUSUAL	EXT.(OP)	E(EMP)TOE	E(EMP)HEEL
TOT.V.F.(kN/m) =	97047,29	96668,85	95856,03	80131,52	95856,03
TOT.H.F.(kN/m) =	38720	43245	16915,77	60719,8	16915,77
TOT.R.M.(kNm/m)=	6780719,49	6862933,45	6046962,3	6780719,49	4333681,89
TOT.O.M.(kNm/m)=	2627070,31	2916610,67	1478137,82	4289534,84	1221145,76
ECCENTRICITY(m)=	3,22	5,20	1,64	14,94	13,55
FSs =	2,01	1,79	4,53	1,06	4,53
FSo =	2,58	2,35	4,09	1,58	3,55
FSss	6,88	6,15	15,69	4,16	15,69
Smax (kN/m2) =	1275,89	1406,26	1152,56	1718,04	1961,36
Smin (kN/m2) =	832,68	694,09	930,14	23	121,34
Max Str. is at =	TOE	TOE	HEEL	TOE	TOE

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Serdar SÜRMELİ, 1978'de İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini İstanbul'da tamamladı. 1996 yılında Özel Üsküdar Fen Lisesi'nden mezun oldu. 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Su Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başladı.