

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



SAYI: 104

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adına
Haydar KOÇAKER

Sorumlu Müdür

Dr. Vehbi ÖZAYDIN

Yayın ve Hakem Kurulu

İsmail GÜNEŞ
Hüseyin AKBAŞ
Oğuz Ünal KAYAPINAR
Nurettin KAYA
Servan YILDIRIM
Kemal ŞAHİN

Haberleşme adresi

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

Tel (312) 399 2793
Faks (312) 399 2795
bulten@dsi.gov.tr

Basıldığı yer

İdari ve Mali İşler Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik - Ankara

SAYI : 104

YIL : Temmuz 2008

Yayın Türü

Yaygın süreli yayın
Üç ayda bir yayınlanır

ISSN

11012 - 0726 (Baskı)
1308 - 2477 (Online)

İÇİNDEKİLER

ÜÇ KONİLİ MATKAPLAR Cevdet CANPOLAT	1
ERZURUM YÖRESİNDE İÇME SULARINDA NİTRAT, NİTRİT KİRLENME DÜZEYLERİ Berrin Zeliha KARAKAYA CAN, Nuri KALİ	8
KÜTLE BETONU TASARIMI VE UYGULAMA ESASLARI 16 Aydın SAĞLIK, M. Fatih KOCABEYLER	16
YERALTISUYU YAPAY BESLENİMİ Müfit Şefik DOĞDU	36
GEÇİRİMLİ ZEMİNE OTURAN SU ÇEVİRME (REGÜLATÖR) YAPILARI Şefik COFCOF	45
BETONDA ELASTİSİTE KURAMI VE BARAJ KÜTLE BETONLARI İÇİN SATATİK E MODÜLÜNÜN KOMPOZİT MODELLERLE TAHMİNİ Ali UĞURLU	52
BASAMAKLI KASKAT HAVALANDIRICILARIN OPTİMAL TASARIMI Tamer BAĞATUR	63
GÖMÜLÜ ÇELİK BORU TASARIMI Köksal Buğra ÇELİK	70

DSİ TEKNİK BÜLTENİ'NİN AMACI

DSİ Teknik Bülteninde, konusu DSİ faaliyetlerini yakından ilgilendiren ve gönderilen bildirimler arasında Yayın Kurulu tarafından seçilmiş mühendislik bildirimleri yayınlanır. Telif bildirimlerinin, daha önce, DSİ teknik personelinin büyük kısmının veya tamamının okuması muhtemel yayın organlarında yayınlanmamış ve bu hususun yazar tarafından beyan edilmiş olması gereklidir.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ BİLDİRİ YAZIM KURALLARI

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

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı

06100 Yücepepe ANKARA

Tel (312) 399 2793

Faks (312) 399 2795

E-posta bulten@dsi.gov.tr

Web http://www.dsi.gov.tr/kutuphane/dsi_teknik_bulten.htm

ÜÇ KONİLİ MATKAPLAR

Cevdet CANPOLAT
Jeoloji Mühendisi, DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yüce-tepe ANKARA
cevdetcanpolat@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 15.01.2008, Bildirinin kabul tarihi: 18.02.2008)

ÖZET

Üç konili matkaplar sondajcılık sektöründe en çok kullanılan matkaplardır. Kimyasal olarak on çeşit elementin farklı miktarlardaki karışımıyla oluşturulan malzemeden imal edilmişlerdir. Üç bacağı bir araya getirilip kaynaklanması ile yapılmışlardır. Bacakların alt kısmında yataklar bulunur. Bu yataklar üzerinde koni denilen konik parçalar yerleştirilmiştir. Koniler üzerinde kullanılan zemine göre değişen şekil ve boyutta kesici ve öğütücü dişler vardır. Her formasyon için ayrı bir matkap üretilebilir. İsimlendirmede standartlık sağlamak için IADC (International Association of Drilling Contractes) 1992 (a) sınıflandırması yapılmıştır. Bu sınıflandırmada harf ve rakamlardan oluşan isimler bulunur. Matkabın deformasyon şekline bakılarak kullanım hataları belirlenebilir.

Anahtar Kelimeler: Zemin, sondaj, matkap, üç koni.

THREE CONE DRILL BITS

ABSTRACT

Three-cone drill bits are the most used drill bits in the drilling sector. They are manufactured by a material formed with the mixture of different amounts of ten different elements. They are made by welding of three legs. Cone shaped components are placed on the bearings which are placed within the lower part of those legs. The size and shape of the cutter and grinder tooth on the cone alters with respect to soil. A different drill bit can be produced for every formation. IADC (International Association of Drilling Contractes) 1992 (a) classification has been defined in order to provide a standard in denomination. In this classification, names are formed by letters and figures. Utilization errors can be determined by examining the deformation type of the drill bit.

Key words: Soil, drilling, bit, three cone.

1 GİRİŞ

Konili matkaplar 1909 yılından itibaren kullanılmaya başlanılmıştır. Matkaplar sondaj teknolojisinin gelişmesi ile birlikte delgi ve kesme işlemini daha ekonomik yapacak hale getirilmişlerdir. Konili matkapların özel amaçlı kullanılan tek konilileri olduğu gibi iki, üç, dört konili olanları da vardır. Fakat en çok kullanılan üç konili olanlarıdır.

Üç konili matkaplarda üç ünite bir araya getirilerek matkap oluşturulur. Konili matkaplar; gövde, koniler ve koni yataklarından meydana gelir.

Her matkap özel bir amaca hizmet için yapılmıştır.

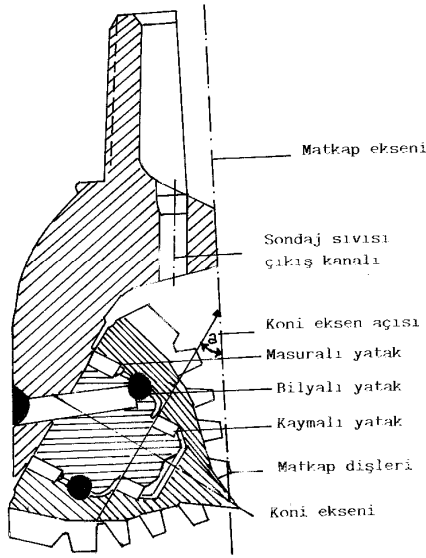
Daha önceleri her firma kendi ürettiği her cins matkaba değişik harf ve rakamlar vererek isimlendirmişlerdir. 1992 yılından sonra ise IADC (International Association of Drilling Contractes) sınıflandırması kullanılmaya başlanılmıştır.

2 ÜÇ KONİLİ MATKABIN ÖZELLİKLERİ

Konili matkaplar gövde, koniler ve koni yataklarından meydana gelir (Şekil 1).

Gövde, uçlarında koni yatakları bulunan üç bacağın birbirine kaynaklanması ile oluşturulur. Gövdenin yapıldığı çelik Fe, C, Mn, S, Si, P, Ni, V, Mo, Cr elementlerinin değişik oranlardaki karışımlarından oluşturulmuş özel bir alaşımdır.

Kullanılan çeliğin kolay işlenmesi ve ısı işlemlere üniform cevap vermesi gerekmektedir.



Şekil 1 - Konili birimin yapısı (Göktekin,1983)

Matkap gövdeleri ve konilerinde kullanılan malzemenin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1 - Çok Sert Formasyon Matkabı Kimyasal Analiz Sonuçları

	C	Si	S	P	Mn ₂
Gövde	0,195	0,255	0,024	0,024	0,839
Koni	0,151	0,313	0,003	0,011	0,424
	Ni ₁	Cr ₁	Mo	V	Fe
Gövde	0,570	0,627	0,253	0,005	97,25
Koni	2,944	0,084	0,227	0,010	94,84

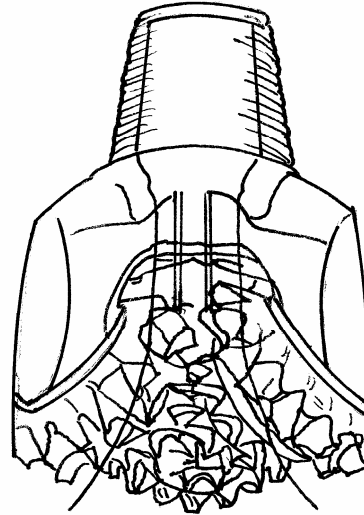
Çizelge 2 - Orta sert Sert Formasyon Matkabı Kimyasal Analiz Sonuçları

	C	Si	S	P	Mn ₂
Gövde	0,211	0,229	0,025	0,007	0,894
Koni	0,159	0,200	0,019	0,009	0,755
	Ni ₁	Cr ₁	Mo	V	Fe
Gövde	0,152	0,595	0,243	0,003	97,64
Koni	0,741	0,534	0,501	0,003	97,08

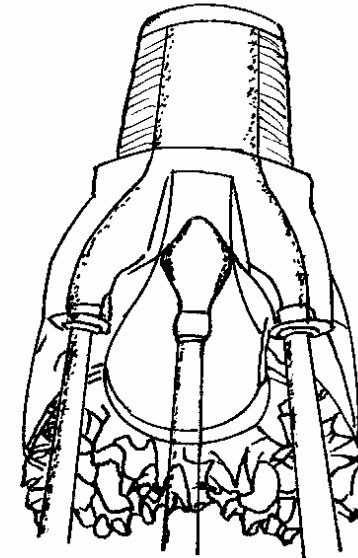
Sondaj dizisinde gövdeye gelen çamur, matkabın ortasından tek bir çıkışla veya kesiti daraltılmış iki veya üç kanaldan geçerek kuyu tabanına ulaşır. Normal matkaplarda, çamur kanalı matkabın ortasındaki geniş bir açıklıktır (Şekil 2.a). Jet matkaplarda ise matkabın ortasındaki bu geniş açıklık bacaklar arasına doğru kesiti daraltılarak yönlendirilir. (Şekil 2.b).

Jet denen silindirik çelik parçalar, jet kanalının çapı ile belirtilir. Yuvaya segmanla veya içi oyuk açılmış vida ile tutturulur. Genel bir kural olarak, jetin tabandan uzaklığı jet çapının altı katından fazla olmamalıdır (Göktekin,1983).

Son zamanlarda yapılan bazı matkaplarda jetler taban yakın uzantılar üzerine takılmakta ve jetin çamur çıkış ucu konilere doğru yönlendirilmektedir. Bu tür jetlerde çamur, koni dişlerinin kayaçla temas ettiği yere püskürtülür. Dişin kayaç ile temasından hemen önce yüzey temizlendiği için aşınmalar azalır ve diş ömrü artar (Kahraman,1995). Bazı matkapların gövde içlerinde sola doğru yönlendirilmiş kanatlar vardır. Bu kanatlar çamuru koniler üzerine yönlendirerek diş aralarının temizlenmesini sağlarlar.



Şekil 2.a - Normal Matkap (Göktekin,1983)

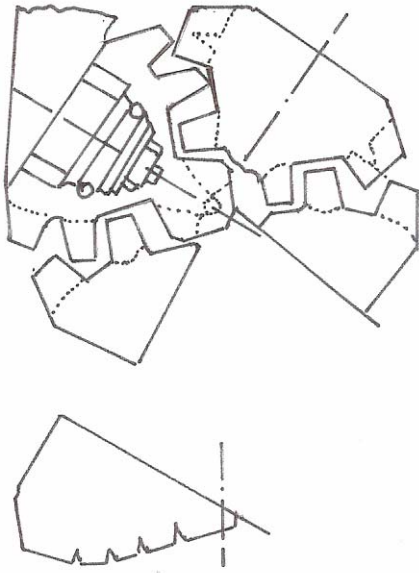


Şekil 2.b - Jet Matkap (Göktekin,1983)

Konilerin üzerinde matkabın kullanılacağı formasyonun sertliğine bağlı olarak değişik şekil ve düzende yerleştirilmiş kesici öğütücü dişler bulunur. Bu dişler çelikten veya TC (Tungsten Carbit) 'den imal edilmiş olabilir. Çelik dişler koni gövdesi oyularak oluşturulur. TC (Tungsten Carbit) dişler ise koni gövdesi üzerine açılmış oyuklara basınç ile çakılarak, endüksiyon kaynağı ile veya ısı ile işleme yerleştirilirler.

Koni gövdesi oyularak oluşturulan dişlerin (Çelik Dişler) mukavemetini arttırmak için yüzey sertleştirme veya sert malzeme ile kaplama işlemi yapılır.

Konilerin üzerindeki diş sıraları, biri diğerinin boş bıraktığı yere etki edecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Bir konideki bir sıra diş diğer konideki iki sıra dişin arasına gelerek dönerken araya sıkışmış kırıntıları temizler (Göktekin,1983), (Şekil 3).

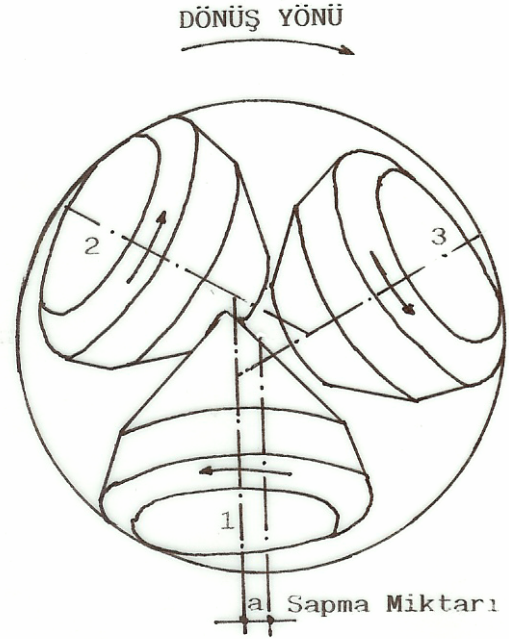


Şekil 3 - Dişlerin kuyu tabanındaki konumu (Gümüşay,1974)

Koni gövdesinin dış yüzeyi tek açılı olduğu gibi iki veya üç açılı da olabilir. Matkap sağa doğru dönerken koniler kendi eksenlerinde sola doğru dönerler (Şekil 4).

Matkap, delgi yapacağı zemine oturduğunda konilerin zeminle yaptığı açı önemlidir. Bu açı arttıkça döndürme momenti de artar ve yanak aşınmaları olur. Bu da matkap çapının azalmasına neden olur. Bu yüzden sert formasyon matkaplarında bu açı 1° 'den az, orta sert formasyon matkaplarında 2° - 5° arası, yumuşak formasyon matkaplarında ise 7° - 9°

arasındadır. Bu açı azaldıkça koni ekseninin düşeyle yaptığı açı artmaktadır



Şekil 4 - Dönüş yönü, sapma miktarı ve koni düzeni

Koni eksen açısı koni yüzeylerinin zeminle yapacağı açıyla ters orantılıdır. Koni eksen açısı; sert formasyon matkaplarında 39° , orta sert formasyon matkaplarında 36° , yumuşak formasyon matkaplarında ise 33° dir. Koni üzerindeki bir dişin yapacağı iş merkezden uzaklığına bağlıdır. Bu iş merkezde sıfır en dışta ise maksimumdur. Merkezde iş yapılabilmesi için konilerden birisinin ucu çıkıntılı yapılıdır. Bazı matkaplarda koni eksenleri matkap merkezinden geçmeyecek şekilde saptırılır. Bu sapma (matkap merkezi ile koni eksenleri arasındaki uzaklık "a"); yumuşak formasyon matkaplarında fazla sert formasyon matkaplarında azdır (Şekil 4). Çok sert ve aşındırıcı formasyon matkaplarında ise sapma yoktur (Göktekin,1983). Bu farklılık çalışma prensiplerinin ayrı olmasından kaynaklanır. Yumuşak ve sert formasyon matkapları formasyonu "kazıyarak yonga/parça çıkarma esasına göre çalışır. Sapma ne kadar fazla olursa kazıma tırmalama da o kadar fazla olur. Çok sert ve aşındırıcı formasyon matkapları ise "basınç uygulayıp basıncı kaldırarak patlatma" esasına göre çalışırlar. Bu yüzden matkap merkezi ile koni eksenleri arasında sapmaları yoktur.

Formasyona uygun diş şekilleri ve koni üzerindeki yerleşimleri şöyle açıklanabilir (Martin ve diğerleri,1982).

- Yumuşak Formasyon: Uzun kama şekilli çelik diş veya uzun keski şekilli TC diş, diş aralıkları çok geniştir.
- Orta yumuşak Formasyon: Kısa kama şekilli çelik diş veya uzun keski şekilli TC diş, diş aralıkları çok geniştir.
- Orta sert Formasyon: Konik ya da küresel TC diş, diş aralıkları oldukça dardır.
- Sert Formasyon: Küresel TC diş, diş aralıkları çok dardır.

Kayaçların tek eksenli basınç değerleri ile kullanılacak matkabın diş şekilleri arasında ilişki vardır, Şekil 5 ve Çizelge 3 (Kahraman,1995),

Çelik diş	Uzun konik TC diş	Kısa yuvarlak TC diş	Küresel TC diş
I	II	III	IV
0 - 1400	1400 - 2100	2100 - 2800	> 2800
Kayaç basınç dayanımı (kg/cm ²)			

Şekil 5 - Basınç dayanımına göre diş şekilleri (Kahraman,1995).

Kayaçların tek eksenli basınç değerlerine göre diş şekli, cinsi belirlenmeli ve matkap seçilmelidir.

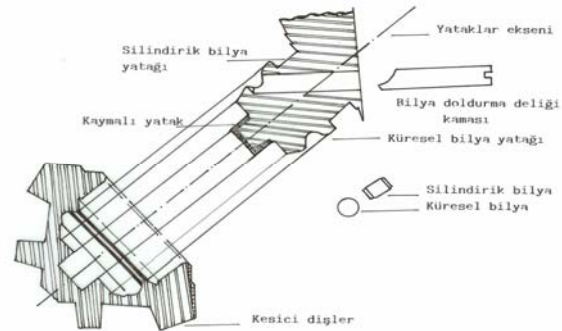
Kayaçların tek eksenli basınç dayanımlarına göre diş cinsleri ve şekilleri;

- Basınç dayanımı 0–1400 kg/cm² olan formasyonlar için kama şekilli çelik dişli,
- Basınç dayanımı 1400–2100 kg/cm² olan formasyonlar için uzun konik şekilli TC dişli,
- Basınç dayanımı 2100-2860 kg/cm² olan formasyonlar için kısa yuvarlak şekilli TC dişli,
- Basınç dayanımı 2860 kg/cm² den büyük olan formasyonlar için ise küresel şekilli TC dişli matkap kullanılmalıdır.

Matkap konileri, kullanılacağı formasyona göre iki veya üç kısımdan yataklanır. Bu yataklar; silindirik bilyeli, küresel bilyeli ve kaymalıdır (Şekil 6). Kaymalı yataklar sert formasyon matkaplarında bulunur. Kaymalı yatak koninin tepesi ile milin uç kısmı arasındaki yatak olup koninin merkezlenmesini sağlar. Küresel bilyeli yatak koniyi yataklar üzerinde tutar. Küresel yatak bilye yatağı bir kanalla matkabın yanağı ile irtibatlıdır. Bu kanal bir mülle kapatılır. Silindirik bilyeli yatak ise matkaba gelen yükü taşır. Yatak ve bilyeler da çelikten imal edilirler.

Çizelge 3 – Formasyonlar ve tek eksenli basınç değerleri (Erguvanlı, 1982)

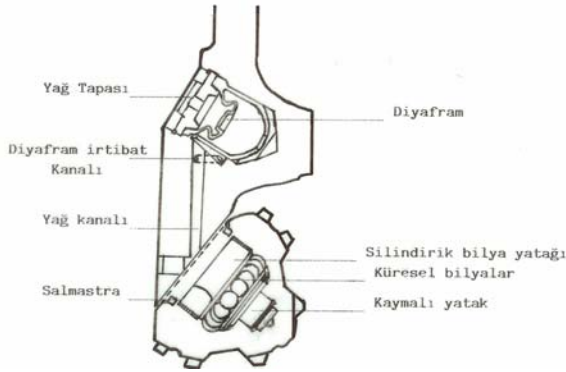
Formasyon	Tek eksenli basınç değerleri (kg/cm ²)
Bazalt	1500-2700
Granit	1000-2000
Mermer, kristalize kireçtaşı	600-2000
Trakit, andezit	1300
Kumtaşı, konglomera	450-750
Kaba ve tebeşirli kireçtaşı	50-350
Volkanik tuf, lav ve aglomera	200-700
Traverten	250-700
Diyorit	1800-3000
Gabro	1800-3000
Killi şist	100-1000
Dolomit	800-2500
Kuarsit	1500-3000
Gnays	500-2000



Şekil 6 - Bilyeli yataklanmış matkap kesiti (Gümüştay,1974'den sadeleştirilmiştir).

Bazı matkaplarda yatakların aşınmasını önlemek için yağlama düzeneği vardır. Koni milinin ortasındaki yağ kanalı, matkap bacağı ile irtibatlıdır. Matkap bacağına kadar uzanan bu kanal bir tapa ile kapatılmıştır. Bu tapaya yağ tapası denir. Matkabın bacağı dış yüzünde ki tapa açılarak kanal yağla doldurulur. Bu yağla yatak yüzeyi ve koni iç yüzeyinin yağlanması sağlanır. Ancak sondaj sırasında kuyu dibindeki yüksek basınç etkisi ile yataklara giren çamur yağın etkisini azaltır. Çamurun yataklara girmesini engellemek için salmastralar kullanılır. Bu şekilde salmastra ile sızdırmazlığı sağlanan yatak tipine de sızdırmaz yatak denir (Şekil 7).

Sondaj sıvısı basıncının yataktaki yağ basıncını yenip salmastrayı yırtmaması için yağ kanalının dış yüzeyindeki yağ tapası diyaframlı yapılıdır. Diyafram kuyu içi basıncı ile yağ basıncını dengeler. Böylece çamurun yataklara girmesini ve yağın dışarı çıkmasını önler. Bazı matkaplarda diyafram matkabın dış yüzeyi ile bazı matkaplarda ise iç yüzeyi ile irtibatlıdır.



Şekil 7 - Sızdırmaz yataklı matkap kesiti
(Göktekin, 1983'den sadeleştirilmiştir).

3 MATKAP ÖMRÜNÜ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Bir matkabın ömrü önce seçimine ve nasıl kullanıldığına bağlıdır. Ayrıca bu ömür maruz kaldığı baskı ve dönme hızı ile alakalıdır. Delme hızı baskı ve dönme hızının bir fonksiyonudur. Baskı koni yataklarının dayanımı ile dönme hızı ise makinenin gücü ile sınırlıdır. Matkap çapı arttıkça koni yataklarının çapı da artacağından matkap daha büyük baskılara dayanacaktır.

TC ve çelik dişli yumuşak formasyon matkapları için ortalama baskı 0,7 Ton/cm x çap'tır. Sert formasyon matkapları için bu değer 1,4 Ton/cm x çap'a kadar çıkarılmaktadır (Kahraman, 1995).

Dönme hızı matkabın ömrünü etkileyen diğer bir faktördür. Dönme hızı; çok sert formasyonlarda 30-40 devir/dakika, orta sert formasyonlarda 60-120 devir/dakika, yumuşak formasyonlarda 70-140 devir/dakika, çok yumuşak formasyonlarda ise 200-250 devir/dakika değerine kadar çıkarılabilir (Bilgin, 1991).

Genel kural olarak sert ve aşındırıcı formasyonlarda yüksek baskı düşük dönme hızı, yumuşak formasyonlarda ise düşük baskı ve yüksek dönme hızı uygulanır.

Matkap kuyudan çıkarılınca basınçlı su ile iyice yıkanmalı ve paslanmaya karşı koruyucu yağ ile yağlanmalıdır. Sap bağlantı kısmı bir kılıfla kapatılmalıdır.

4 MATKAP DEFORMASYONLARI VE NEDENLERİ

- 1 - Konilerin kırılması: Nedenleri;
 - 1-1 Koni yataklarından birinin aşınması sonucu konilerin birbirine çarpması,
 - 1-2 Kuyuya takım indirilirken takımın kuyu kenarına çarpması,
 - 1-3 Takımın kuyuya düşürülmesi, sonucu koniler kırılabilir.
- 2 - Dişlerin kırılması: Nedenleri;
 - 2-1 Matkabın kuyuda ortamdaki daha sert bir parçaya çarpması,
 - 2-2 Aşırı baskı uygulanması,
 - 2-3 Aşırı dönme hızı uygulanması,
 - 2-4 Matkap değiştirildiğinde yeni inilen matkabın önceki matkabın oluşturduğu kuyu taban düzenine uymaması,
 - 2-5 Matkaba göre formasyonun çok sert olması.
- 3 - Dişlerin aşınması: Nedenleri;
 - 3-1 Matkabın formasyona uygun olmaması,
 - 3-2 Kuyuya metal düşürülmesi,
 - 3-3 Aşırı dönme hızı.
- 4 - Koni aralarının kırıntı ile dolması: Nedenleri;
 - 4-1 Matkabın formasyona uygun olmaması,
 - 4-2 Pompanın yetersiz olması,
 - 4-3 Pompa çalışmadan ilerleme yapılması,
 - 4-4 Aşırı baskı uygulanması,
 - 4-5 Düşük dönme hızı
- 5 - Konilerin çatlaması: Nedenleri;
 - 5-1 Koninin ortamdaki daha sert bir parçaya çarpması,
 - 5-2 Koninin kuyu kenarına veya tabanına çarpması,
 - 5-3 Konilerin farklı yatak aşınmasından dolayı birbirine çarpması.
- 6 - Koni üzerinde sürüklenme izleri: Nedenleri;
 - 6-1 Yatakların aşınması,
 - 6-2 Konilerin arasına dönmeyi engelleyecek parçaların girmesi,
 - 6-3 Bir koninin diğeri ile temas etmesi,
 - 6-4 Aşırı baskı uygulanması.
- 7 - Matkabın sıkışması: Nedenleri;
 - 7-1 Aşırı baskı uygulanması,
 - 7-2 Yatakların aşınması,
 - 7-3 Konilerin birbiri ile temas etmesi,
 - 7-4 Tarama yaparken aşırı baskı uygulanması,
 - 7-5 Aşırı ilerleme, yetersiz kuyu dibi temizliği yapılması.
- 8 - Konilerin düşmesi: Nedenleri;
 - 8-1 Matkabın kuyu kenarına veya tabanına çarpması,
 - 8-2 Takımın düşürülmesi,
 - 8-3 Koni yataklarının aşırı aşınması.
- 9 - Diş düşmesi: Nedenleri;
 - 9-1 Koni gövdesinin aşınması,
 - 9-2 Koninin çatlaması.
- 10 - Yanak aşınmaları: Nedenleri;

- 10-1 Matkabın formasyona uygun olmaması,
 10-2 Kuyu genişletmede kullanılan matkabın bir önce kullanılan matkabın çapına yakın olması,
 10-3 Yetersiz kuyu dibi temizliği,
 10-4 Aşırı baskı,
 10-5 Sirkülasyon sıvısının viskozitesinin düşük olması.
- 11- Koni çevrelerinin aşınması: Nedenleri;
 11-1 Matkabın formasyona uygun olmaması,
 11-2 Kuyuda ortamdan daha sert parçalar bulunması,
 11-3 Kuyu genişletmede kullanılan matkabın bir önce kullanılan matkabın çapına yakın olması,
 11-4 Sirkülasyon sıvısının viskozitesinin düşük olması,
 11-5 Yetersiz kuyu dibi temizliğidir.

5 KONİLİ MATKAPLARIN SINIFLANDIRMASI (IADC 1992)

(International Association of Drilling Contractes)

Konili matkapları, önceleri her firma ürettiği matkaba değişik harf ve rakamlar vererek isimlendirmekte idiler. En son sınıflamayı Mc Gehe ve arkadaşları 1992 yılında yapmışlardır (Çizelge 4).

Bu sınıflamada rakam ve harflerden oluşan karakterler kullanılır. Sayısal karakterler matkabın sırayla; seri tip ve yatak-gövde korumasını, harf karakterler ise diğer özelliklerini belirtir. Diğer özelliği olmayan bir matkap yalnız üç rakamla isimlendirilir. Diğer özelliği olan bir matkap en az iki rakam ve birkaç harfle belirtilebilir.

Rakamsal karakterlerden birincisi 1'den 8'e kadar olup formasyon özelliklerini tanımlar. 1,2,3 çelik dişli 4,5,6,7,8 ise TC dişli matkaplardır. İkinci rakam 1'den 4'e kadar olup her seri kendi içinde dört sertlik derecesine bölünür."1" en yumuşak "4" en sert formasyonu gösterir. Üçüncü rakam ise 1'den 7'ye kadar olup konilerin yataklanma şeklini ve gövde korumalı olup olmadığını gösterir.

Çizelge 4 – Konili matkap sınıflaması (Mc Gehee ve diğerleri, 992a) 1992 IADC (International Association of Drilling Contractes)

MATKAP	Formasyon	SERİ	TİP	Matkap özellikleri	Diğer Özellikler			
MATKAP	Formasyon		1		A			
			2		Havalı Sondaj Matkabı			
	Yumuşak	1	3	1	Standart rulmanlı yatak	B Özel Sızdırmazlık Elemanlı Matkap		
			4			C		
			Orta Orta Sert	2	2	2	Hava soğutmalı rulmanlı yatak	Merkezi Jetli Matkap
					3			D
	Sert	3	4	1	1	Sapma Kontrollu Matkap		
			2			E		
			3	3	3	Rulmanlı yatak çevre korumalı	Uzatılmış Jetli Matkap	
			4			G		
Yumuşak	4	1	1	1	Yanak Ve Gövde Korumalı Matkap			
		2			H			
		3	4	4	Sızdırmaz rulmanlı yatak	Yatay Ve Yönlü Sondaj Matkabı		
		4			J			
Yumuşak Orta Sert	5	2	2	2	Saptırma Jetli Matkap			
		3			L			
		4	5	5	Sızdırmaz rulmanlı yatak çevre korumalı	Ek Gövde Korumalı Matkap		
		1			M			
Orta Sert	6	1	1	1	Kuyu Dibi Motoru İle Kullanılan Matkap			
		2			S			
		3	6	6	Sızdırmaz kaymalı yatak	Standart Çelik Dişli Matkap		
		4			T			
Sert	7	1	1	1	İki Konili Matkap			
		2			W			
		3	6	6	Sızdırmaz kaymalı yatak	Dişlerin Yüzeyi Sertleştirilmiş Matkap		
		4			X			
Çok Sert	8	1	1	1	Sık TC Dişli Matkap			
		2			Y			
		3	7	7	Sızdırmaz kaymalı yatak çevre korumalı	Konik TC Dişli Matkap		
		4			Z			
					Diğer Şekilli TC Dişli Matkap			

Matkabın diğer özelliklerini belirlemede ise onaltı değişik harf kullanılır. Bu harfler;

- A: Havalı sondajlarda kullanılan hava soğutmalı matkabı,
 B: Özel sızdırmazlık elemanlı bir matkabı,
 C: Merkezi jetli,
 D: Sapma kontrollü,
 E: Yumuşak formasyonlarda kullanılan uzatılmış jetli matkabı,
 G: İlave olarak yanak ve gövde korumalı bir matkabı
 H: Yatay ve yönlü sondajda kullanılmak üzere dizayn edilmiş matkap,
 J: Yumuşak formasyonlarda sondajı saptırmak için kullanılan saptırma jetli bir matkabı,
 L: Ek gövde korumalı bir matkabı,
 M: Kuyu dibi motoru ile kullanılabilir bir matkabı,
 S: Standart çelik dişli matkabı,
 T: İki konili matkabı,
 W: Dişleri sertleştirilmiş bir matkabı,
 X: Dişleri keski şekilli ve TC dişli bir matkabı,
 Y: Konik şekilli ve TC dişli bir matkabı,
 Z: Diğer şekilli TC dişli bir matkabı tanımlar.

Örnek olarak;

5 3 7 G

Yanak ve gövde korumalı, sızdırmaz kaymalı yataklı, TC dişli orta sert formasyon matkabıdır.

3 3 1 E

Uzatılmış jetli, standart rulmanlı yataklı, çelik dişli sert formasyon matkabıdır.

A B 6 3

Özel sızdırmazlık elemanlı, havalı sondajda kullanılabilir, TC dişli orta sert formasyon matkabıdır.

L X 7 4

Ek gövde korumalı, yoğun TC dişli sert formasyon matkabıdır.

8 1 3

Rulman yataklı, çevre korumalı, çok sert formasyon matkabını tanımlar.

Matkabın üst yüzeyinde; matkap çapı, sap çapı, seri numarası, matkap özelliğini belirten karakterler ve üretici firmanın özel simgeleri vardır.

6 SONUÇ

Matkaplar pahalı malzemelerdir. Formasyona uygun olmayan matkap kullanımı sondaj maliyetinin artmasına ve zaman kaybına neden olur. Sondaj maliyetini düşürmek ve zamandan kazanmak için delinecek formasyon iyi tanınmalı ve matkap ona göre seçilmelidir.

Matkap dişlerinin şekli delinecek formasyonun tek eksenli basınç dayanımı ile alakalıdır, matkap seçerken basınç dayanımları dikkate alınmalıdır.

Satın alınacak matkabın IADC sınıflamasına göre karakterleri belirlenmeli, teklife veya şartnameye bu karakterler yazılmalıdır.

Matkabın deformasyon şekline bakılarak deformasyonun nedenleri tespit edilmeli, kullanıcılar uyarılmalı ve eğitilmelidir.

Metalürji, Makine ve Yerbilimcilerin ortak ilgi alanında olan bu konu birlikte tartışılıp ülkemizde de imal edilme imkânları araştırılmalıdır.

7 KAYNAKLAR

- [1] Bilgin, N., 1991, Maden işletmelerinde Kullanılan Deliciler, Çalışma Şartları ve Ekonomisi, İTÜ Maden Fak. Maden Müh. Bölümü.
- [2] ----- DSİ Yayını, 1978, Birinci Bilimsel ve Teknik Sondaj Kongresi.
- [3] ----- DSİ Yayını, 1985, Su Sondaj Teknik Talimatları.
- [4] ----- DSİ Yayını, 1991, Su Sondajı Eğitim Programı I.
- [5] Ergüvanlı, K., 1982, Mühendislik Jeolojisi, İTÜ Maden Fak: Jeo. Müh. Böl.
- [6] Göktekin, A., 1983, Sondaj Tekniği, İTÜ Maden Fak. Maden Müh. Bölümü.
- [7] Gümüşay, E., 1974, Su Sondaj Matkapları, DSİ Yayını.
- [8] Kahraman, S., 1995, Konili Matkaplar; Seçim Kriterleri ve Sınıflandırması, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Sayı 47.
- [9] Martin, Y.W., Martin, T.J., Bennet, T.P., Martin, K.M., 1982, Surface Mining Equipment, Colorado, PP.367.414.USA.
- [10] McGehee, D., Y., Dahlem, J.S., Gieck, J.C., Kost, B., Lafuze, D., Reinsvod, C., H., Steinkes, S. C., 1992, "The IADC Roller Bit Dull Grading System " 1992 IADC/SPE Drilling Conf., New Orleans, Louisiana, Feb.18-21, pp.819-827, USA.

ERZURUM YÖRESİNDE İÇME SULARINDA NİTRAT, NİTRİT KİRLENME DÜZEYLERİ

Berrin Zeliha KARAKAYA CAN
Çevre Y. Müh. DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü 25100, Erzurum
berrinzcan@dsi.gov.tr

Nuri KALİ
Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müd., DSİ VIII. Bölge Müdürlüğü 25100, Erzurum
nurik@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 18.01.2008, Bildirinin kabul tarihi: 15.02.2008)

ÖZET

Azotlu bileşikler su kirliliği açısından önemli bileşenlerdir. Alıcı ortamlarda yüksek dozlarda bulunan nitrit, nitrat başta ötrofikasyon olmak üzere içme sularında toksik etki göstermektedirler. Bu çalışma, Erzurum yöresindeki içme suyu amaçlı kullanılan yeraltı sularının nitrit ve nitrat parametrelerini araştırmak ve kirlenme kaynaklarının etkisini belirleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Şehir içme suyunun sağlandığı 14 kuyudan 3 yıl süre (2004-2007 tarihleri arası) ile Şubat, Mayıs, Ağustos, Kasım aylarında alınan örneklerde nitrit azotu, nitrat azotu ve amonyum azotu analizleri gerçekleştirilmiştir. Araştırma bulgularına dayanarak Erzurum ilindeki yeraltı suları içme suyu olarak kullanılabilirlik yönünden değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Erzurum ilindeki yeraltı sularının, uygun olmayan çevre şartlarından etkilendiği ve az da olsa kirlendiği belirlenmiştir. Analizi yapılan parametrelerin mevsimlere, hava şartlarına göre değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Ölçülen konsantrasyon değerleri, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde yer alan Su Kalite Sınıfları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca kirlenmenin önlenmesi amacı ile alınması gereken bazı önlemler hakkında öneriler getirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Erzurum, kuyu suyu, nitrat, nitrit

ABSTRACT

Nitrogen compounds are important compounds in view of the water pollution. Nitrite, nitrate found in receiver environment at high dosage shows toxic effects and leads to eutrophication. This study was carried out in order to investigate the nitrite and nitrate parameters of the ground water used as drinking water in Erzurum Region and to identify the origin and the cause of pollution if there were any. The samples drawn from the 14 wells located in the city and provided as drinking water of Erzurum were studied for nitrogen in nitrite, nitrogen in nitrate and nitrogen in ammonium in February, March, August, November months in a 3 years (between 2001 and 2007) study duration. According to the data obtained from laboratory work, the ground water in Erzurum country was evaluated in respect to the human usage was estimated. As a result, the ground water in Erzurum has been affected by the unnatural environmental conditions and it has been polluted mildly. It is observed that the determined parameters were varied according to the season and climatic conditions. The measured concentration values were compared with the classes of water quality referred from statute about the Water Pollution and Control Regulation. Some suggestions and solution ways to prevent pollution were also given.

Key words: Erzurum, well water, nitrate, nitrite

1 GİRİŞ

Toplumun içme ve kullanma (yemek, temizlik vb.) ihtiyaçları için kullandığı hijyenik sulara içme suları denir. Doğadaki bütün suların ve su rezervlerinin kaynağı havanın su buharı, bulutlarıdır. Su bulut halinde iken saf su niteliğinde ve temizdir. Fakat yağmur halinde yere düşerken havanın çeşitli gazlarını, tozlarını v.b. maddeleri bünyesine alarak safiyetini kaybeder ve yeryüzü ile temasa geçtiğinde yeryüzünün çeşitli maddelerini eritip bünyesine alarak sürüklenir, yeraltına geçer ve insan ve hayvanlar için gerekli içme suyunun kalitesinde bozukluğa yol açar.

Türkiye’de içme ve kullanma sularının büyük bir kısmının yeraltı sularından temin edildiği ve bu sular sanayi, tarım ve hayvancılık atıkları ile barajların çevresinde oluşturulan yapılaşma ve katı atık depolama sahalarındaki sızıntılar sonucu kirlenmeye maruz kalmaktadır [Durmaz vd., 2007]. Çoğunlukla suyun varlığı yeterli görülmekte, kimyasal ve bakteriyolojik bileşimine dikkat edilmeden kullanılmaktadır. Ancak, büyük boyutlu sağlık problemleri ile karşılaşıldığında kullanılan suyun sağlığa zararlı olup olmadığı konusu ön plana çıkmaktadır. Su kirliliğine neden olan etkenlerden en çok rastlanana ise, evsel ve endüstriyel atıkların neden olduğu antropojen kökenli kirliliktir [Tuncay, 1994]. Nüfus artışı, hızlı kentleşme, evsel-endüstriyel ve tarımsal atıkların arıtma işlemi uygulanmadan sulara karışması mevcut su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır [Yalçın vd., 2004].

Yeraltı suyunun kirlenmesine sebep olan unsurlardan birisi de tarımsal faaliyetlerden ileri gelen pestisit, gübre kullanımı ve hayvan atıklarının sebep olduğu kirliliktir. Bu etkenlerden dolayı özellikle derin olmayan akifere kolaylıkla ulaşabilen kirleticiler önemli sorunlara yol açmaktadır. Kimyasal gübreler genelde suların kirlenmesinde önemli bir paya sahip olup suların nitrat ile kirlenmesinin sebebidir [Kaplan vd., 1999]. Toprakta oluşan nitratın bitkiler tarafından kısmen tüketilmesi durumunda, kalan nitrat yağmur suları ile topraktan suya geçmekte; hem yeraltı sularını hem de yüzey sularını kirletmektedir. Diğer taraftan gereğinden fazla gübre kullanımı da toprağa ve dolayısıyla suya nitrat geçmesine yol açmaktadır. İdeal koşullarda toprağa atılan azotun %50-70’inin bitkiler tarafından kullanıldığı; %2-20’sinin buharlaşma yoluyla kaybedildiği, %15-25’inin kil toprakta bulunan organikler ile birleştiği ve geri kalan %2-10’luk kısmının yüzey ve yeraltı sularına karıştığı söylenmektedir. Ancak toprakta biriken nitratın

suya geçişini etkileyen pek çok faktör bulunması nedeniyle, bu değerler değişebilmektedir. Etkileyen faktörler şu şekilde sıralanmaktadır [Akyurt vd., 2002].

- Toprağın yapısı
- Bitkilerin azot gereksinimi
- Sıcaklık
- Yağmur
- Gübre kullanım miktarı
- Toprağın su içeriği vb.

Genel olarak yoğun tarım yapılmayan alanlardaki sularda göreceli olarak daha düşük, tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu alanlarda ise, daha yüksek nitrat düzeyleri yaşanmaktadır. Tarım alanları dışında, yüzey ya da yeraltı sularında tipik olarak 0 ila 10 mg/L düzeyinde nitrat bulunmaktadır. Ülkemizde geçerli olan “Sular - İnsani Tüketim Amaçlı Sular” standardında (TS 266), nitrat için müsaade edilebilir maksimum değer 50 mg/L olarak tanımlanmaktadır. Avrupa birliği 50 mg/L’lik bir üst sınır getirirken, EPA (US Environmental Protection Agency) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından 10 mg/L Nitrat-N (45 mg/L Nitrat) üst sınır olarak tanımlanmaktadır [Othmer, 1984].

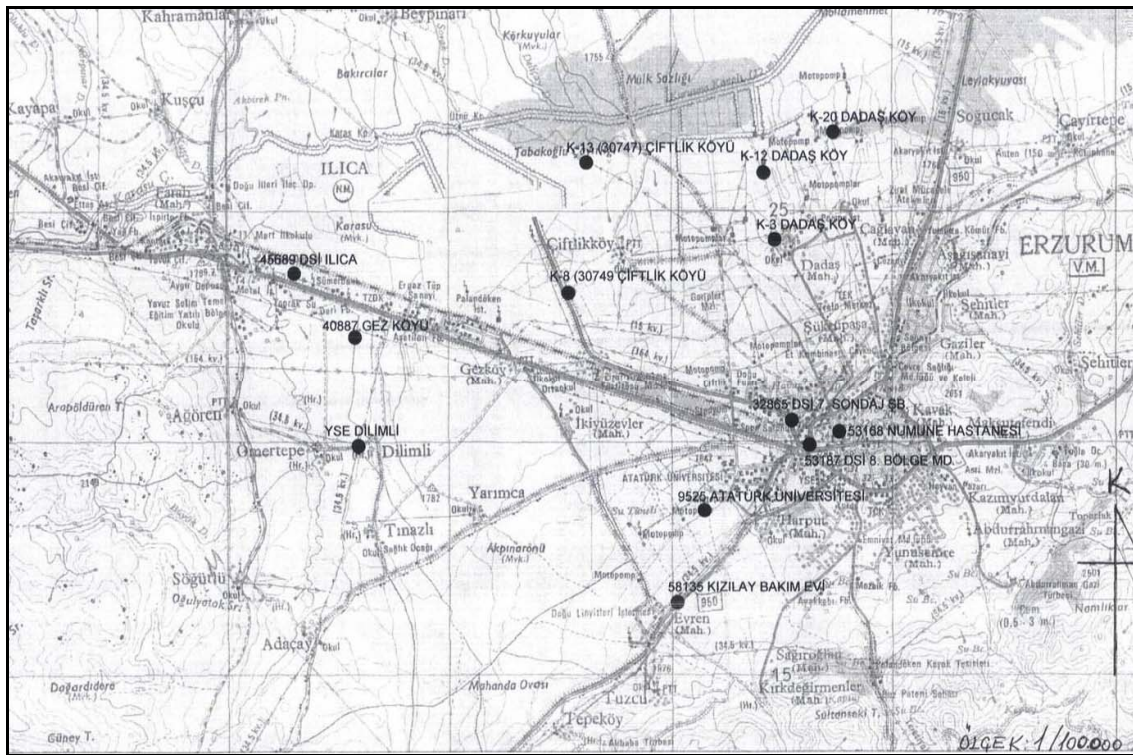
İçme suyunda nitritin yüksek konsantrasyonlarda bulunması zehirlilik etkisi yapmaktadır. Genel olarak yeraltı sularında azot olarak 0.1 mg/L’den fazla nitrit bulunmaz. Ayrıca, sularda serbest amonyakın bulunması sudaki yakın kirlenmenin göstergesidir. Serbest amonyak ve nitrit düşük miktarlarda bile yüksek toksik etki yapmaktadır. TS 266’ya göre içme sularında amonyak ve nitritin hiç bulunmaması istenmektedir [Erguvanlı ve Yüzer, 1987]. İçme suyu kaynaklarının nitrat ile kirlenmesi, altı aydan daha küçük çocuklarda mavi bebek (*methemoglobinemia*) hastalığına ve yetişkinlerde sindirim sisteminde kansere neden olmaktadır [Wasik vd., 2001].

Bu çalışmada Erzurum şehir merkezindeki içme suyu kuyularından alınan numunelerin nitrat ve nitrit seviyelerinin belirlenmesi amacı ile yapılmıştır. İnsan sağlığı için çok önemli olan su ve suda optimum seviyede bulunması gereken nitrat ve nitrit miktarı araştırılmıştır. İçme sularının fazla nitrat ve nitrit içermesinin insan sağlığı açısından önemli olduğu bilindiği için Erzurum şehir merkezindeki içme suyu kuyularının nitrat ve nitrit seviyelerine bakılarak her iki durum için de ne gibi önlemler alınabileceğinin belirtilmesi amaçlanmıştır.

1.1 Çalışma Alanı

Doğu Anadolu Bölgesinin en önemli yerleşim yeri olan Erzurum'un kurulduğu ovaya "Erzurum Ovası" denir ve alanı yaklaşık 520 km²'dir. Erzurum ovasında yer alan Dadaşkent, Ilıca, Dadaş Köyü, Dumlu, Çiftlik köyü, nüfus yoğunluğu bakımından önemli yerleşim alanlarıdır. Erzurum ilinin içme suyu ihtiyacı Erzurum ovasında bulunan kuyulardan karşılanmaktadır. Erzurum Ovasında içme-kullanma suyu amaçlı açılmış bulunan 14 adet sondaj kuyusunun dağılımı ve haritada gösterimi şu şekildedir (Şekil 1.):

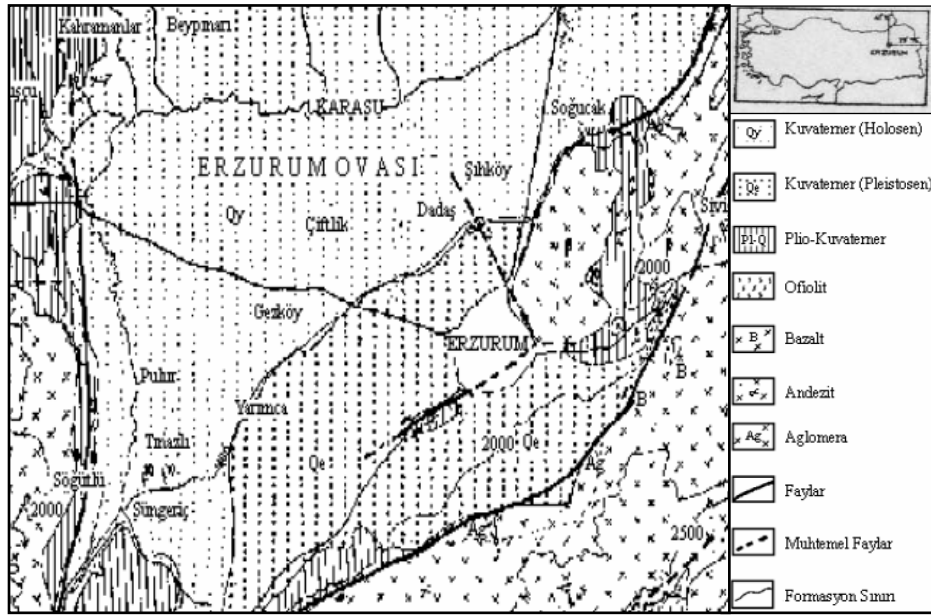
- DSİ Bölge Müd. Tesisleri Kuyu No:53187
- DSİ 7. Sondaj Şube Müd. Kuyu No:32865
- Ilıca DSİ Kuyu No:45689
- Afetevleri Kuyusu No:58183
- Çiftlik Köyü Kuyu No: K13-27183
- Çiftlik Köyü Kuyu No: K8-30749
- Dadaşköyü Kuyu No:12
- Dadaşköyü Kuyu No:20
- Dadaşköyü Kuyu No:3
- Dilimli YSE Kuyusu
- Gezköyü Kuyu No:40887
- Kızılay Kuyu No:58135
- Numune Hastanesi Kuyu No:53168
- Atatürk Üniversitesi Kuyu No:9525



Şekil 1 - Erzurum Ovasında içme-kullanma suyu amaçlı açılmış bulunan sondaj kuyularının dağılımları

Erzurum Ovasının jeolojisini kuvaterner oluşturur. Kuvaterner alüvyonlardan teşekkül etmiş olup alüvyon kil, kum, çakıldan müteşekkil geçirimli bir formasyondur. Ayrıca ova çevresinde büyük birikinti konileri gelişmiştir. Bu koniler daha ziyade çakıl gibi çok geçirimli bir

malzeme ile kaplıdır. Erzurum Ovasında yeraltı suyu beslenimi ovaya düşen yağışın bir kısmının geçirimli malzemelerden yeraltına süzülmesiyle, drenaj alanından gelen yüzeysel akışın süzülmesiyle ve yanal beslenim ile olmaktadır.



Şekil 2. Erzurum Ovasının jeolojik haritası [Atalay, 1978]

2 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Malzemenin Temini ve Deneyle

Çalışmanın materyalini oluşturan su örnekleri 2004-2007 tarihleri arasında Şubat, Mayıs, Eylül ve Kasım aylarında Erzurum ve yöresindeki 14 ayrı kaynaktan sağlanmıştır. Yeraltı suyunun örneklenmesinde, Erzurum Belediyesi ve diğer resmi ve özel kuruluşlar tarafından kullanılmakta olan kuyulardan yararlanılmıştır. Örnek alımında bu kuyulara monte edilmiş pompalar kullanılmıştır. Kuyular aracılığıyla örnek alımında dikkat edilmesi gereken önemli nokta, kuyuda durgun halde bekleyen suyun değil, akiferden kuyuya örnek alımı sırasında boşalan suyun alınmasıdır [Scalf *et al.* 1973]. Numune kapları alınacak su ile en az iki kere çalkalanmış ve 5 dakika kadar bir süre akıtılarak alınmıştır. Numune alındıktan sonra, şişenin ağzı kapakla kapatılmıştır. Kapak ile suyun üst yüzeyi arasında hava kalmamasına dikkat edilmiştir [Anonim, 1991]. Uygun koruma yöntemiyle (soğutma) DSİ laboratuvarına getirilen 1000 mL'lik örneklerin içeriğinin değişmemesi için analizler 24 saat içinde yapılmıştır. Amonyum tayini TS ISO 7159, nitrit tayini TS 7526 EN 26777, nitrat tayini TS 3308'e göre yapılmıştır.

2.2 Deneysel Bulgular

Ülkemizde geçerli olan içme suyu standartlarında (TS 266), nitrat için müsaade edilebilir maksimum değer 50 mg/L, nitrit için 0.5 mg/L ve amonyak 0.5 mg/L olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla içme sularında nitrat azotunun (NO_3^- -N) 11.29 mg/L, nitrit azotunun (NO_2^- -N) 0.15 mg/L ve amonyum

azotunun (NH_4^+ -N) 0.41 mg/L'nin üzerinde olması istenmez. Bu parametrelerinin Su Kirliliği ve Kontrolü yönetmeliğinin kıta içi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterlerindeki değerleri ise Çizelge 1'de gösterilmiştir [Anonim, 2004a]. Bir su kaynağının bu sınıflardan herhangi birine dahil edilebilmesi için bu parametre değerleri, o sınıf için verilen değerle uyum halinde bulunmalıdır.

Yeraltı Sularının Sınıflarının Belirlenmesi yalnızca üç sınıf (YAS I, YAS II, YAS III) göz önüne alınır. YAS I, yüksek kaliteli yeraltı suları; YAS II, orta kaliteli yeraltı suları; YAS III, düşük kaliteli yeraltı suları temsil eder. Sınıf YAS I sular içme suyunda ve gıda sanayinde kullanılabilen yeraltı sularıdır. Bu sınıfa giren yeraltı suları diğer her türlü kullanma amacına uygundur ve gerektiğinde uygun bir dezenfeksiyon işleminden sonra içme suyu olarak kullanılabilirler. Sınıf YAS II sular, bir arıtma işleminden sonra içme suyu olarak kullanılabilirler. Sınıf YAS III suların kullanım yeri ise ekonomik, teknolojik ve sağlık açısından sağlanabilecek arıtma derecesi ile belirlenir [Anonim, 2004a].

Erzurum Ovasında bulunan sondaj kuyularından alınan su örneklerinde saptanan nitrit azotu, nitrat azotu ve amonyum azotu düzeyleri Çizelge 2'de, temsil ettikleri su sınıfları Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 1 - Kıta içi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterleri

SU KALİTE PARAMETRELERİ	SU KALİTE SINIFLARI			
	I	II	III	IV
Fiziksel ve inorganik - Kimyasal parametreler				
Amonyum azotu (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	0.2 ^c	1 ^c	2 ^c	> 2
Nitrit azotu (mg NO ₂ ⁻ -N/L)	0.002	0.01	0.05	> 0.05
Nitrat azotu (mg NO ₃ ⁻ -N/L)	5	10	20	> 20

(c: pH değerine bağlı olarak serbest amonyak azotu konsantrasyonu 0,02 mg NH₃-N/L değerini geçmemelidir.)

Çizelge 2 - Erzurum ve yöresindeki kuyu sularında belirlenen amonyum azotu, nitrit azotu ve nitrat azotu miktarlarının dağılımı.

İstasyon Adı	Zaman	n	NH ₄ ⁺ -N (mg /L)			NO ₂ ⁻ -N (mg /L)			NO ₃ ⁻ -N (mg /L)		
			En az	En çok	Ortalama x±Sx	En az	En çok	Ortalama x±Sx	En az	En çok	Ortalama x±Sx
Afetevleri Kuyusu No:58183	2004-2007	6	0,0	0,06	0,048±0,021	0,0	0,001	0,000±0,000	1,80	2,30	2,100±0,200
Çiftlik Köyü Kuyu No: K13-27183	2004-2007	14	0,0	0,31	0,038±0,079	0,0	0,003	0,001±0,001	0,00	0,90	0,500±0,320
Çiftlik Köyü Kuyu No: K8-30749	2004-2007	15	0,0	0,29	0,040±0,072	0,0	0,002	0,000±0,001	0,05	1,00	0,500±0,300
Dadaşköyü Kuyu No:12	2004-2007	14	0,0	0,16	0,058±0,047	0,0	0,004	0,001±0,001	2,15	16,20	9,200±4,600
Dadaşköyü Kuyu No:20	2004-2007	15	0,0	0,27	0,072±0,068	0,0	0,118	0,001±0,030	2,70	13,75	7,200±3,680
Dadaşköyü Kuyu No:3	2004-2007	15	0,0	0,74	0,229±0,217	0,0	0,002	0,001±0,001	0,95	20,00	12,200±5,310
DSİ 7. Sondaj Şube Müd. Kuyu no:32865	2004-2007	15	0,0	0,11	0,028±0,036	0,0	0,001	0,001±0,001	2,10	12,19	7,500±3,040
Dilimli YSE Kuyusu	2004-2007	14	0,0	0,18	0,028±0,048	0,0	0,003	0,001±0,001	1,75	0,20	1,000±0,420
Gezköyü Kuyu no:40887	2005-2007	11	0,0	0,30	0,035±0,030	0,0	0,001	0,001±0,001	0,15	1,85	0,900±0,480
Ilıca DSİ Kuyu No:45689	2004-2007	15	0,0	0,26	0,049±0,070	0,0	0,010	0,001±0,002	0,30	1,65	1,000±0,460
Kızılay Kuyu No:58135	2004-2007	5	0,0	0,11	0,087±0,141	0,0	0,003	0,002±0,004	0,55	0,80	0,700±0,100
Numune Hastanesi Kuyu No:53168	2004-2007	15	0,0	0,22	0,029±0,056	0,0	0,002	0,001±0,000	0,50	13,80	3,000±3,290
Atatürk Üniversitesi Kuyu No:9525	2004-2007	14	0,0	0,08	0,027±0,0259	0,0	0,002	0,001±0,001	0,40	3,60	1,947±0,980
DSİ Bölge Müd. Tesisleri Kuyu No:53187	2004-2007	15	0,0	0,23	0,062±0,0631	0,0	0,004	0,001±0,0014	0,05	10,25	6,058±2,534

(n=Örnek sayısı, Sx= Standart hata).

Çizelge 3 - Numunelerin analiz sonuçlarının %90'ının bulunduğu sınır değerler ve SKKY 'ye göre kalite sınıfları

İstasyon Adı	Zaman	n	NH ₄ ⁺ -N (mg /L)		NO ₂ ⁻ -N (mg /L)		NO ₃ ⁻ -N (mg /L)	
			verilerin%90'ı	Kalite	verilerin%90'ı	Kalite	verilerin%90'ı	Kalite
Afetevleri Kuyusu No:58183	2004-2007	6	0,074	I. Sınıf	0,001	I. Sınıf	2,300	I. Sınıf
Çiftlik Köyü Kuyu No: K13-27183	2004-2007	14	0,140	I. Sınıf	0,002	II. Sınıf	0,900	I. Sınıf
Çiftlik Köyü Kuyu No: K8-30749	2004-2007	15	0,132	I. Sınıf	0,001	I. Sınıf	0,900	I. Sınıf
Dadaşköyü Kuyu No:12	2004-2007	14	0,118	I. Sınıf	0,003	II. Sınıf	15,100	III. Sınıf
Dadaşköyü Kuyu No:20	2004-2007	15	0,159	I. Sınıf	0,048	III. Sınıf	11,900	III. Sınıf
Dadaşköyü Kuyu No:3	2004-2007	15	0,506	II. Sınıf	0,002	I. Sınıf	19,000	III. Sınıf
DSİ 7. Sondaj Şube Müd. Kuyu no:32865	2004-2007	15	0,074	I. Sınıf	0,002	I. Sınıf	9,800	II. Sınıf
Dilimli YSE Kuyusu	2004-2007	14	0,089	I. Sınıf	0,002	II. Sınıf	1,500	I. Sınıf
Gezköyü Kuyu no:40887	2005-2007	11	0,074	I. Sınıf	0,002	I. Sınıf	1,500	I. Sınıf
Ilıca DSİ Kuyu No:45689	2004-2007	15	0,138	I. Sınıf	0,004	II. Sınıf	1,600	I. Sınıf
Kızılay Kuyu No:58135	2004-2007	5	0,267	II. Sınıf	0,007	II. Sınıf	0,800	I. Sınıf
Numune Hastanesi Kuyu No:53168	2004-2007	15	0,100	I. Sınıf	0,001	I. Sınıf	7,200	II. Sınıf
Atatürk Üniversitesi Kuyu No:9525	2004-2007	14	0,060	I. Sınıf	0,002	I. Sınıf	3,200	I. Sınıf
DSİ Bölge Müd. Tesisleri Kuyu No:53187	2004-2007	15	0,142	I. Sınıf	0,003	II. Sınıf	9,300	II. Sınıf

3 SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye’de içme ve kullanma sularının büyük bir kısmı yeraltı sularından temin edildiği ve bu suların çeşitli faktörlerin etkisiyle yaygın bir şekilde kirlenmeye maruz kaldığı bilinmektedir. Bu nedenle, Erzurum ve yöresindeki kuyu sularının nitrat ve nitrit düzeylerinin belirlenmesi, halk sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır [Durmaz vd., 2007]. Erzurum ovasında yeraltı suyu kirliliğine neden olan ana kirleticiler tarımda kullanılan gübre ve ilaçlar, evsel atıkların toplandığı fosseptik çukurlarından sızıntılar, Karasu çayı ve sulama kanallarından yeraltı suyu beslenimi, endüstriyel faaliyet alanları, katı atık sahası ve deşarj sularıdır.

Erzurum’un topoğrafik yapısı ve coğrafi konumu, il genelinde şiddetli bir karasal iklim yaratır. Türkiye’nin sıcaklık ortalaması en düşük illerden biri olan Erzurum’da kışlar oldukça soğuk ve sert, kısa süren yazlar ise sıcak ve kurak geçmektedir. Yıllık yağış ortalaması 460,5 mm’dir. İl’de, ortalama karla örtülü günler sayısı 29,3 dür. Kar yağışlı günler, Ekim ayında başlamakta ve Mayıs ayına kadar sürmektedir. İlkbahar mevsiminde eriyen kar sularının zemine inerek kuyu sularına karışmakta ve suların içeriğinde oldukça büyük değişimlere neden olmaktadır. Bu nedenle çalışmanın sonuçlarına mevsimsel değişimlerin etki edeceği düşünülerek numuneler Şubat, Mayıs, Ağustos, Kasım aylarında alınmıştır. Ayrıca numune alınırken gübrelemenin etkisini görebilmek için gübreleme yapılan ve yapılmayan aylarda da numune alınmasına özen gösterilmiştir.

Yapılan analiz sonuçlarından Erzurum ve yöresi kuyu sularının çoğunun nitrat ve nitrit miktarlarının, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’ne uygun olduğu fakat Dadaşköy civarında yer alan K3, K12, K20 nolu kuyuların nitrat azotu değerlerine bakıldığında bu suların III. sınıf su oldukları ve sağlık açısından büyük risk taşıdıkları görülmektedir. Bu sular TS 266 İçme suyu standartlarında belirtilen suda bulunması gereken maksimum nitrat konsantrasyonunun da üzerindedir. Bunun sebebi ise Dadaş Köy dolayında bulunan Erzurum mezbahanelerin sularının deşarj edildiği atık sular ve bu bölgedeki tarımsal faaliyetlerdir.

Erzurum ilinde tarım, bölge ekonomisinin başlıca unsurudur. Tarım sadece nüfusun büyük bir bölümünün geçim kaynağı olmakla kalmaz, aynı zamanda bölgenin ticaret ve sanayi hayatına da katkıda bulunmaktadır. Bir yıllık toplam üretim değerinin büyük bir kısmını

tarımsal ürünler oluşturmakta, az sayıda var olan sanayi kuruluşlarının çoğunun ham maddesini de tarımsal ürünler teşkil etmektedir. Tarım, Erzurum ovasında önemli bir ekonomik faaliyetlerden olup, bu alanlarda verimi arttırmak amacıyla yaygın bir şekilde gübre kullanılmaktadır. Erzurum halkı tarafından kimyevi gübreler çiftlik gübresinden daha fazla kullanılmaktadır. Çiftçiler çiftlik gübresinin tarımsal açıdan değerinin bilmekle birlikte ekonomik nedenlerle kışlık yakacak olarak kullanılmaktadırlar. Ticari gübreler içinde en çok tercih edilen granül gübreler ve bunların içinde ise en çok kullanılanı % 33 amonyum nitrat, % 26 potasyum nitrat, DAP ve % 46 üre gübresidir. Erzurum Tarım İl Müdürlüğü verilerine göre Erzurum Ovasına yakın zirai alanlarda kullanılan kimyasal gübre türleri ve miktarları ile bunların yıllara göre durumları Çizelge 4’te verilmiştir. Tercih edilen azotlu gübreler mevsim yağışlarıyla yıkanarak toprağın derinlerine inerek yeraltı sularına ve içme sularına karışmaktadır. Gübrenin çevre kirliliği yaratması bilinçsiz kullanımından kaynaklanır. Bilinçli kullanımda gübre dozları; topraktaki besin maddeleri açığını kapatacak şekilde toprak ve bitki analizleri veya biyolojik denemelerle belirlenir. Bu yollarla tespitten sonra gübrelerin; uygulanma zamanına, gübredeki bitki besin maddesinin kimyasal formuna (organik veya inorganik) ve uygulanma sekline özellikle dikkat edilmeli, bazı gübrelerin toplam yıllık dozu birkaç parça halinde uygulanmalıdır. Çiftçilerin doğal kaynakların korunması konusunda bilinçlendirilmesi ve bu konuyla ilgili eğitimlerin verilmesi gerekmektedir. Bu konu 18 Şubat 2004 tarihli ve 25377 sayılı Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğine Karşı Suların Korunması Yönetmeliği’nde ele alınmıştır [Anonim, 2004b]. Bu Yönetmeliğin amacı, tarımsal kaynaklı nitratın suda neden olduğu kirlenmenin tespit edilmesi, azaltılması ve önlenmesidir. Yönetmelikteki ilgili maddeler dikkate alınarak yapılacak tarımsal faaliyetlerle kimyevi gübrelerden kaynaklanan çevre kirliliklerini en aza düzeye indirebilmek mümkün olabilir.

Çizelge 5 - Erzurum yöresinde tüketilen kimyasal gübre türleri ve miktarları

2004 yılı					
	Saf N (ton)	Saf P205 (ton)	Saf K20 (ton)	Çiftlik gübresi (kuru)(ton)	Gübrelenen arazi (ha)
Merkez	1175	435	85		
Aşkale	200	67		2000	6000
İllica	89,3	10,3		44000	22000
2005 yılı					
	Saf N (ton)	Saf P205 (ton)	Saf K20 (ton)	Çiftlik Gübresi (kuru)(ton)	Gübrelenen Arazi (ha)
Merkez	310	160	88		
Aşkale	1				
İllica	9	3,3			
2006 yılı					
	Saf N (ton)	Saf P205 (ton)	Saf K20 (ton)	Çiftlik Gübresi (kuru)(ton)	Gübrelenen Arazi (ha)
Merkez	111,4	21,6	2,7		
Aşkale	417,8	3,1			

Bu yöredeki yeraltı sularının nitrat ile kirlenmesinin ikinci önemli nedeni ise evsel, endüstriyel atık suların arıtılmadan alıcı ortam olan Karasu Çayına verilmesidir. Karasu Çayının ise bu bölgedeki yeraltı sularını beslemesi sonucu sularda nitrat riski baş göstermektedir. İnceleme alanında yüzeylenen birimlerin kalınlık ve litolojisi incelendiğinde, alüvyonların akifer özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Kaynağın beslenme alanında yüzeylenen alüvyon, gözenekli ve geçirgen bir yapıya sahip olduğundan, yağış ve akış esnasında tüm kirlenici unsurlar yeraltı sularına karışmaktadır. Bunun sonucunda akiferler ve yeraltı suları da kirlenmektedir. Bunun önüne geçmek için bu bölgeden açıkta giden drenaj suları ve deşarj suları mutlaka kapalı sızdırmaz borularla taşınmalı ve arıtma işlemine tabi tutulduktan sonra Karasuya deşarjı sağlanmalıdır.

Ayrıca, yeraltı suları beslenme havzası üzerinde bulunan, Çat Yolu - Dutçu Deresi mevkiindeki vahşi depolamanın yapıldığı mevcut çöp alanının hala kullanıma açık olması, yeraltı su kaynaklarını olumsuz yönde etkilemektedir. Katı, sıvı ve gaz atıklar alıcı ortama verildikten sonra, iklim durumuna, toprağın yapısına, topografyasına, atığın cinsine ve zamana bağlı olarak yeraltı sularına taşınırlar. Evsel atıkların

doğrudan toprağa verilmesi sonucu, özellikle kanalizasyon sistemlerinin olmadığı yerlerde fosseptik çukurlardan sızan sular yeraltı suyuna taşınmaktadır. Bu sıkıntıyı giderilmesi yaklaşık üç yıldır yürütülen Erzurum'un 7 km güney batısında Süngeriş Köyü yakınlarındaki toplam 550 dönüm arsalık düzenli katı atık deponi alanının çalışmaları tamamlanmak üzeredir. Böylece yılda ortalama 70 bin ton çöpün toplayacak bu deponi alanı ile sızıntı sularının yaratacağı yeraltı suların kirlenme tehlikesinin önüne geçilecektir.

Ayrıca Dadaşköy civarındaki kuyuların içme suyu amaçlı kullanımına devam edilmesi durumunda; su çekilirken daha derinlerden su çekilmelidir. Çünkü sığ kuyularda nitrat kirlenmesinin daha yüksek olduğu tahmin edilmektedir. Derinlik arttıkça kirlenmelerin suya karışma riski azalır.

Erzurum ilinde kentin içme suyu ve tarımsal sulama ihtiyacı yeraltı sularından karşılandığı için deprem bölgesinde bulunan ilin zemini yeraltı sularını çekilmesiyle boşalmakta ve bu da en küçük ölçekli depremin bile çok daha büyük etki yapabileceği konusunu gündeme getirmektedir. Ayrıca Erzurum'un çevre ilçe ve köylerden aldığı göç nedeniyle nüfusunun artmakta buna paralelde olarak içme suyu ihtiyacı da artmaktadır. Erzurum halkının hem nicelik hem de nitelik yönünden içme suyu sıkıntısı Palandöken Barajı'nın devreye girmesiyle aşılabacaktır. Palandöken Barajı Erzurum ilinin 25 yıllık içme suyunu karşılayacak olup 18.12.2005 tarihinde hizmete alınmıştır. Erzurum İçme suyu Projesi kapsamında uzunluğu 19 700 m, çapı 1500 mm olan isale hattı ile 1 adet arıtma tesisi ve 5 adet depolama tesisinin yapım çalışmaları devam etmektedir. Ayrıca Erzurum içme ve sulama suyu projesi Fırat havzasında yer alan 12038 ha. alanı sulayacaktır.

Diğer taraftan, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik [Anonim, 2005] içme ve kullanma sularında bulunabilecek nitrat: 50 mg/L (nitrat azotunun 11,29 mg/L), nitrit: 0,50 mg/L (nitrit azotunun 0,15 mg/L), amonyum: 0.5mg/L (amonyum azotu 0,41 mg/L) için bildirilen değerler göz önüne alındığında, bu araştırmada Dadaşköy civarından sağlanan kuyu sularının dışında elde edilen sonuçlarının çoğunun yönetmeliğe uygun olduğu görülmektedir.

4 KAYNAKLAR

- [1] Akkurt, F., Alicılar, A., Şendil, O., 2002. "Sularda bulunan nitratın adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırılması", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 17, 4, 83-91.
- [2] Anonim, 1991. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Numune alma ve Analiz Metotları Tebliği, 07/01/1991, Sayı: 20748, Resmi Gazete
- [3] Anonim, 2004a. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, 31/11/2004, Sayı: 25687, Resmi Gazete.
- [4] Anonim 2004b, Tarımsal Kaynaklı Nitrat Kirliliğine Karşı Suların Korunması Yönetmeliği, 18/02/2004, Sayı: 25377, Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [5] Anonim, 2005. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 17/2/2005, Sayı: 25730, Resmi Gazete.
- [6] Atalay, İ., 1978. Erzurum Ovası ve Çevresinin Jeolojisi ve Jeomorfolojisi. Atatürk Üniv. Yayın No: 343, 96s, Erzurum.
- [7] Durmaz, H., Ardiç, M., Aygün, O., Genli, N., 2007. "Şanlıurfa ve yöresindeki kuyu sularında nitrat ve nitrit düzeyleri", YYÜ Vet. Fak. Dergisi, 18, 1, 51-54.
- [8] Erguvanlı, K., Yüzer, E., 1987. Yeraltı suları Jeolojisi. İTÜ yayın no: 23, 339s, İstanbul.
- [9] Kaplan, M., Sönmez, S., Tokmak, S., 1999. "Antalya-Kumluca yöresi kuyu sularının nitrat içerikleri", Tr. J. of Agriculture and Forestry, 23, 309-313.
- [10] Othmer, K., Encyclopedia of Chemical Technology, 1984. John Wiley & Sons, 10. Cilt, New York, ABD.
- [11] Scalf, M. R., J. W. Keeley, and C. J. Lafavers, 1973, Groundwater Pollution In The South Central States: U. S. Environ. Protect. Agency Rept. EPA-122-73-268, June.
- [12] Tuncay, H., 1994. Su Kalitesi. E.Ü. Ziraat Fak. Yayınları No: 512. Bornova, İzmir.
- [13] Wasik, E., Bahdziewics, J., Blasszczyk, M., 2001. "Removal of nitrates from ground water by a hybrid process of biological denitrification and microfiltration membran", Process Biochemistry, 37, 57-64.
- [14] Yalçın, A., Davraz, A., Özçelik, M., 2004. "Yeraltı sularının kirlenmesinde litoloji ve yerleşim alanlarının etkisi: Ulupınar kaynağı, Sorkuncak-Eğirdir-Isparta", Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 28 ,2.

KÜTLE BETONU TASARIMI VE UYGULAMA ESASLARI

Aydın SAĞLIK
DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yüce-tepe ANKARA
aydinsaglik@dsi.gov.tr

M. Fatih KOCABEYLER
DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yüce-tepe ANKARA
mehmetf@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 25.12.2007, Bildirinin kabul tarihi: 10.03.2008)

ÖZET

Kütle betonu, çimentonun su ile reaksiyonu sırasında açığa çıkan hidratasyon ısı ve bunu takip eden hacim değişiklikleri neticesinde termal çatlak oluşumlarının en alt seviyeye çekilmesi amacıyla tedbirler alınması gerekli olan büyük boyutlu betonlar için kullanılan bir ifadedir.

Kütle beton tasarımında termal etkiler, dayanıklılık ve ekonomi ile ilgili parametreler öncelikle düşünülmekte ve dayanım genellikle ikincil derecede ele alınmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonun egzotermik (ısı açığa çıkaran) olması ve betonun ısı iletim özelliğinin düşük olması nedeniyle açığa çıkan ısının transferi için büyük hacimli betonlarda çok uzun bir süreye ihtiyaç olması nedeni ile bazen oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılabilir. Beton henüz erken yaşlarda iken sıcaklığının yüksek değerlere ulaşması ve sıcaklık kayıp hızının da bu tip beton yapılarda oldukça düşük olması nedeniyle çevre sıcaklığına soğuma çok uzun bir süreyi gerektirmektedir. Soğumanın tamamlanarak çevre sıcaklığına ulaşılınca kadar ise beton dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Uzun vadede betonun soğuyarak çevre sıcaklığına ulaşması ile birlikte önemli çekme gerilmelerinin oluşumu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle, yapıda ciddi hasar oluşumlarının önlenmesi, yapısal bütünlüğün bozulmaması, aşırı sızma riskinin önlenmesi, servis ömrünün kısaltılmaması ve estetik olarak da kabul edilemez hasar oluşumlarının meydana gelmemesi için termal etkilerin oldukça dikkatlice ele alınması zorunludur.

Bu makalede, en küçük boyutu en az 90 cm olan herhangi bir kütle betonu yapısının inşasında dikkat edilmesi gerekli hususlar ve ince kemer beton barajlardan elde edilmiş olan bilgi birikimleri ışığında kütle betonunda kullanılan malzemeler ve karışım oranları tasarımı ile ilgili önemli görülen bazı bilgiler ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: kütle betonu, çimento, mineral katkı, hidratasyon ısı, termal çatlak, adyabatik.

MASS CONCRETE DESIGN AND FUNDAMENTAL BASICS

ABSTRACT

Mass concrete is defined as “any volume of concrete with dimensions large enough to require that measures be taken to cope with generation of heat from hydration of the cement and attendant volume change to minimize cracking.”

The design of mass concrete structures is generally based on durability, economy, and thermal action, with strength often being a secondary, rather than a primary, concern. The one characteristic that distinguishes mass concrete from other concrete work is thermal behavior. Because the cement-water reaction is exothermic by nature, the temperature rise within a large concrete mass, where the heat is not quickly dissipated, can be quite high. Significant tensile stresses and strains may result from the restrained volume change associated with a decline in temperature as heat of hydration is dissipated.

Measures should be taken where cracking due to thermal behavior may cause a loss of structural integrity and monolithic action, excessive seepage and shortening of the service life of the structure, or be aesthetically objectionable. Many of the principles in mass concrete practice can also be applied to general concrete work, whereby economic and other benefits may be realized.

In this paper, some knowledge about materials and mix proportioning of mass concrete design is given with the gained experience and know-how for the construction of any mass concrete structure having a minimum dimension of at least 90 cm and concrete arch dams.

Key Words: mass concrete, cement, mineral admixture, heat of hydration, thermal crack, adiabatic.

1 GİRİŞ

Ülkemizde özellikle de DSİ projelerinde son yıllarda kütle betonu ile ilgili olarak inşa edilen imalâtlar artmış ve farklı türde birçok yapı kütle betonu olarak dökülmektedir. Kütle betonuna örnek olarak başta ince kemer tipinde beton barajlar, silindirle sıkıştırılmış beton yapılar, dolusavak yapıları, önyüzü beton kaplama barajlar ve diğer konvansiyonel beton yapılar sayılabilir. Kütle betonu tasarımı diğer betonlardan daha farklıdır ve daha dikkatlice ele alınmalıdır. Çimentonun su ile olan hidratasyon reaksiyonunun egzotermik (ısı açığa çıkaran) olması ve betonun ısı iletkenliğinin düşük olması ile beton içerisinde oluşan sıcaklık artışı nedeniyle problemler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kütle betonu tasarımında bazı önlemlerin tasarım öncesi ele alınması gerekmektedir. Kütle betonu tasarımında malzeme seçimi ilk olarak düşünülmesi gerekli işlemdir. Kütle betonunda mineral ve kimyasal katkı kullanılması önemli bir yeri vardır. Özellikle hidratasyon ısısalınım oranının azaltılması ancak hidratasyon ısısal çok düşük çimento ve kimyasal katkı ile mümkün olabilmektedir. Düşük hidratasyon ısısal çimento bulunmadığı durumlarda ise puzolanik malzemelerden (mineral katkı) faydalanmak kaçınılmazdır. Diğer bir husus ise kimyasal katkıların gerekli durumlarda kullanılması konusudur. Kütle betonunda erken yaşlarda adyabatik sıcaklık artışını kontrol etmek amacıyla özellikle çimento hidratasyon hızını yavaşlatıcı kimyasalların kullanılması (priz geciktirici kimyasal katkı) oldukça önemlidir. Ayrıca gerekli yerlerde hava sürükleyici katkıların kullanılması da betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu makalemizde bu konularla ilgili özet bilgiler verilecektir.

2 KÜTLE BETONU VE TERMAL ANALİZİ

Kütle betonu yapılarında termal gerilimler nedeniyle çatlak oluşumlarının engellenebilmesi oldukça önemlidir. Dolayısı ile tasarım çalışmaları bu tip çatlakların meydana gelme riskini en düşük seviyeye çekecek şekilde gerçekleştirilmeli ve tasarım aşamasında da

inşaat aşamasında da belirlenen kriterlere titizlikle uyulmalıdır. Isıl çatlak oluşumları riskini etkileyen temel parametreler şöyle sıralanabilir:

- Kullanılan bağlayıcı malzemenin (çimento + uçucu kül) hidratasyon ısısal,
- Toplam bağlayıcı miktarı,
- Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığı,
- Beton elemanın şekli ve büyüklüğü,
- Ard soğutma işlemi ile alınan ısı,
- Döküm anında ve sonrasındaki çevre sıcaklığı,
- Betonun ısısal özellikleri (özümlü ısı, ısısal iletkenlik, ısısal genleşme katsayısı, vb.)
- Betonun çekme dayanımı,
- Betonun elastisite modülü,

Isıl çatlak oluşumları beton yapıdaki en düşük ve en yüksek sıcaklık değerlerinin arasındaki fark (yukarıda verilen parametrelere bağlıdır), betonun ısısal genleşme katsayısı, betonun çekme dayanımı ve elastisite modülü parametrelerine bağlı olarak meydana gelmektedir. Beton yapıdaki sıcaklık farkının düşük olması parametrelerinden biri/birkaçı veya tamamının bir arada etkin bir şekilde kullanılması suretiyle çatlak oluşum riskinin azaltılabilmesi/ortadan kaldırılması temin edilebilmektedir.

Herhangi bir kütle betonu dökümüne başlamadan önce termal analizinin mutlak surette yapılması önemlidir. Betonda termal analiz yapılmasının amacı ve sağladığı faydalar nelerdir? Aşağıda maddeler halinde verilmektedir:

1) Fizibilite değerlendirmesinde, tasarımda, fiyat analizlerinde, kriterlerin belirlenmesinde ve yeni kütle betonu yapılarının tasarlanmasında kullanmak amacıyla malzeme, yapı ve inşaat prosedürlerine ait şartların belirlenmesi ve geliştirilmesi amacıyla yapılır. Termal çalışmalar inşaat şartlarının belirlenmesinde önemli bir temel sağlar. Termal bir çalışma, avantajlı tasarım parametrelerinin formüle edilmesi, beton karışım oranlarının optimize edilmesi ve gerekli inşaat şartlarının adapte edilmesi ile ilgili

kriterlerin formulasyonu için bir rehber görevi üstlenir.

2) Yapısal konfigürasyonun, malzeme şartlarının veya inşaat yapım sırasının revize edilmesi ile parasal tasarrufun sağlanması. Beton yerleştirme sıcaklığı, karışım oranları, döküm hızı, izolasyon şartları pahalı işlemlerin oluşmasına yol açabilir. Gereksiz bazı derzlerin elimine edilmesi, yerleştirme sıcaklığının azaltılması veya artırılması, ano yüksekliklerinin artırılması ve izolasyon şartlarının belirlenmesi gibi konuların açıklığa kavuşturulması ile tasarruf sağlanabilir.

3) İnşaat sırasında mevcut benzer yapıların yetersiz davranış (örneğin büyük çatlakların oluşması) göstermesi ve daha performanslı yapıların geliştirilmesi.

4) Farklı yapısal konfigürasyona sahip yapılar, aşırı yüklemeye maruz yapılar, farklı inşaat kısıtlamaları veya ciddi işlemsel şartlar gibi yetersiz tecrübenin olduğu durumlarda yeni yapıların davranışlarının daha doğru olarak tahmin edilmesi

Betonda termal çatlak oluşumu sonucunda hangi parametreler düşünülmelidir;

- İnşaat prosedürlerinin değişmesi (beton yerleştirme zamanı ve sıcaklığı da dahil),
- Beton bileşenlerinin ve termal özelliklerin değişmesi,
- Beton bileşenlerinin ön soğutulması ve beton yerleştirme sıcaklığının kontrolü,
- Betonun art-soğutulması işlemleri,
- Çatlak lokasyonunun kontrolü için inşaat derzlerinin yapılması (gerekli yerlerde su tutucu contaların kullanılması),
- Çatlaklardan suyun sızmasının önlemek amacıyla gerekli yerlere membranların yerleştirilmesi,
- Çatlak oluşumunu önlemek ve kontrol etmek amacıyla yapı geometrisinin alternatifleri,
- Gerekli durumlarda izolasyon kullanılması ve zamanında kaldırılması.

3 TERMAL ANALİZ KONSEPTİ

Kütle betonunda termal analiz daha önce tarif edildiği gibi kütle betonlarında yapılması zorunlu olan bir testtir. Çimento ile su reaksiyona girdiğinde hidrasyon sonucunda ortama ısı enerjisi verilmektedir. Bu reaksiyonlar ekzotermik olarak adlandırılan reaksiyonlardır ve ortama salınan enerjinin büyüklüğü maddelerin kimyasal bileşimine, reaksiyona giren kısma, reaksiyon hızlarına ve aktivasyon enerjilerine bağlıdır. Ortamda reaksiyona girmeyen malzemeler olduğunda

reaksiyon hızı düşer ve birim zamanda ortama yayılan enerji de azalır. Ancak, sabit malzemelerle toplam enerji değişmez. Kütle betonlarında kullanılması oldukça yaygın olan katkı çimentolar veya puzolanlı çimentolar ortama çıkan toplam enerjinin de azalmasını sağlarlar. Örneğin, bu tür malzemeler arasında uçucu kül en iyi örnektir.

Bir kütle betonunda adyabatik sıcaklık artışı betonun bazı özellikleri ile yakından ilgilidir. Bunlar aşağıda özetlenmiştir;

- 1.Çimentonun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri (örneğin C_3S ve C_3A ve incelik değeri),
- 2.Betonda kullanılan bileşenlerin ve özellikle agreganın termal özellikleri,
- 3.Betonun döküldüğü zamanlarda çevre şartları,
- 4.Beton yapının geometrisi,
- 5.İnşaat şartları.

Betonda en yüksek adyabatik sıcaklık artışı yerleştirmeden sonra genellikle bir kaç gün ile birkaç hafta içinde meydana gelir. Bu aşamadan itibaren çevre şartlarına ve betonun termal özelliklerine bağlı olarak soğumaya başlar. Birkaç ay sonra veya bazen yıllar sonra beton tamamen sabit bir sıcaklığa soğumuş olacaktır. Sıcaklık farklarından dolayı beton içerisinde termal genleşmeler ve sonuçta da hacimsel değişimler meydana gelmektedir. Kütle betonu çevreye soğuma esnasında büzülmesini serbest bir halde yapamıyorsa yani herhangi bir taraftan kısıtlanma (K_f veya K_r) söz konusu ise betonun termal gerilimden ve kısıtlanmadan dolayı çatlama mümkündür. Çatlama tüm beton anoda olabileceği gibi yüzeysel de olabilir (bu kısıtlanma temeldeki kaya zeminden veya bir önceki beton anodan kaynaklanabilir veya yeterli miktarda çekme gerilmesi yaratacak diğer dış yüzeylerden olabilir). Tüm ano içinde olana kısıtlanmadan dolayı oluşan kütle betonu çatlama ve yüzeysel olana ise termal farklılıklardan dolayı oluşan çatlak oluşması denilmektedir. Uygulamada bu etkilerin her ikisi birden oluşmaktadır. Termal bir çalışma aşağıdaki adımlardan oluşur;

Literatürde ve kütle betonu ile ilgili otoritelerce kabul edildiği üzere sıcaklık farkı için aşılması gerekli olan sınır değer birçok kaynaktan genellikle $20^\circ C$ olarak verilmektedir. $20^\circ C$ 'luk fark emniyetli tarafta kalınması açısından önerilen sıcaklık farkıdır. Beton yapıdaki sıcaklık farkının belirlenen bu sınır değerinin altında tutulması önemlidir. Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığı bunu temin

edebilmek için kullanılan faktörlerden bir tanesidir. Bu sıcaklığın belirlenmesine yönelik olarak kütle betonlarında bazı termal, fiziksel ve mekaniksel özelliklerin tespit edilmesi gerekmektedir. Belirlenmesi gerekli özellikler genellikle zaman ve sıcaklığa bağlı faktörlerdir. Bu faktörler aşağıda özetlenmiştir;

- **Adyabatik Sıcaklık Artışı (ΔT):** Örneğin şantiyede farklı bağlayıcı dozajlarında büyük ölçekli testlerin gerçekleştirilmesi ve adyabatik sıcaklıkların zamana bağlı tespit edilmesi. Adyabatik sıcaklık artışı şu şekilde hesaplanır; $\Delta T = T_p + \Delta T_a - T_{Amb} - T_{HL}$; Burada, T_p yerleştirme sıcaklığı, ΔT_a adyabatik sıcaklık artışı, T_{Amb} ortalama çevre sıcaklığı ve T_{HL} ısı kayıpları nedeniyle sıcaklık azalmasıdır. Adyabatik sistemlerde T_{HL} sıfır kabul edilebilir.
- **Kısıtlanma faktörü, K_f veya K_r :** Kısıtlanma faktörü 0 ilâ 1 arasında değişen bir katsayıdır. K_f betonun kendi içindeki kısıtlanma faktörü iken K_r temele bağlanmadan dolayı oluşan kısıtlanma faktörüdür. Temel olarak kaya esas alınırsa $K_r = 1,0$ alınabilir. Betonun büzölmeye karşı herhangi bir kısıtlanması yok ise (serbest) $K_r = 0,0$ dir.
- **Betonun ve bileşenlerinin özgül ısıları (C):** Yaklaşık bir değer olarak 0,85 ile 1,17 kJ/kg °C değerleri arasında kullanılabilir, Bu değer büyük ölçüde agreganın özgül ısısına yakın bir değerdir.
- **Termal diffüzyivite (h^2):** özgül ısı, ısıl iletim katsayısı ve yoğunluğa bağlı olarak hesaplanabilir, $h^2 = k / \rho C$, kütle betonunda yaklaşık 0,002 ilâ 0,007 m²/saat değeri kullanılabilir.
- **Isıl iletim katsayısı (k):** betonun ısı transfer etme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Bir çok beton için yaklaşık 1,5 ilâ 4,5 W/m °K arasında değişir.
- **Termal genleşme katsayısı (α_c):** Sıcaklık değişimlerine karşı betonun genleşme oranıdır. Betonda ortalama $7,4 \times 10^{-6}$ ile $13 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ arasında değişir.

4 ÇATLAK ANALİZİNİN YAPILMASI

Bir beton yapının termal çatlamaya karşı dirençli olabilmesi termal rötre (hacim değişimi), beton üzerindeki kısıtlama faktörüne ve çekmede birim deformasyon kapasitesine (tensile strain capacity) bağlıdır. Bu durum bilinen fiziksel kurallar ile formüle edilebilmektedir. Tipik olarak kütle betonunda enine çatlak oluşumu baraj gövdesinin stabilitesini doğrudan etkilemez. Ancak su kaçaklarının olmasına neden olabilir. Buna karşın boyuna ve çapraz çatlak oluşumları baraj gövdesinin bölünmesine ve kararsız yapıların

oluşmasına neden olabilir. Termal şok, beton henüz biraz ılık iken aniden soğuk su ile temas ettiğinde çok ciddi yüzeysel çatlamalara yol açabilir ve bu durum daha sonra çatlağın büyümesine neden olabilir. Bu gibi durumlar kalıp almadan sonra meydana gelebilir. Bu nedenle ılık betonu soğuk su ile temas halinde bırakmak doğru olmayabilir.

Termal hacim değişikliği veya termal rötre hidrasyon sonucu ortaya çıkan ısı ve ardından betonun soğuması sonucunda oluşmaktadır. Betonun termal genleşme katsayısı ve sıcaklık farkından hesaplanmaktadır. Betonun kendi içinden ve temelinden dolayı kısıtlanması çatlak oluşumuna neden olur. Beton, hiçbir şekilde kısıtlanmaya maruz değilse yani büzölme için herhangi bir engel yok ise zaten çatlak oluşmaz.

4.1 Kütle Betonunda Kısıtlanma (restraint)

Kütle betonunda çatlamaya neden olan en önemli faktör hacim değişikliğinin kısıtlanmasıdır. Betonun adyabatik sıcaklık artışı esnasında maksimum sıcaklığa ulaşması ve ardından da soğuması esnasında oluşacak olan hacim değişikliği kısıtlanmaktadır. Kısıtlanma betonun dışında veya içinde olabilir. Dışında olana **kütle gradienti sonucu oluşan deformasyon-gerilimi** ve içinde olana **yüzeysel gradient sonucu oluşan deformasyon-gerilimi** adı verilmektedir.

1.) **Kütle Gradienti Kısıtlanması:** kütle betonu elemanı ve temel yapısı arasında meydana gelen sürtünme kuvvetleri veya bağlar nedeniyle oluşur. Harici kısıtlanma derecesi henüz yerleştirilen taze betonun rijitliğine, kısıtlayan malzemenin özelliklerine ve elemanın geometrisine bağlıdır. Temel yapısı veya önceki ano (lift) kısıtlayan yüzey olarak belirlenmektedir ve birleşme yüzeyinde yüksek deformasyon ve buna bağlı olarak gerilmeler meydana gelir.

2.) **Yüzeysel gradient kısıtlanması:** Beton içinde sıcaklık farklılıklarından dolayı oluşur. Beton yüzeyi kısa süre sonra çevre sıcaklığı ile kararlı hale veya sabit duruma gelir, ancak betonun iç kısmı hidrasyon devam ettiğinden dolayı ısı salınımı devam eder ve sıcaklık da yükselmektedir. Bu sıcaklık gradienti daha sonra da devam eder. Bu sıcaklık farkı betonun özellikle yüzey kısımlarında termal genleşmelere neden olur ve çekme gerilimini aştığında çatlak oluşumu kaçınılmazdır. Yüzeyden merkeze doğru gerilim-deformasyon oranı gittikçe azalır ve merkezde sıfır olur. Bu nedenle betonun iç kısmı ile yüzeyi arasındaki

sıcaklık farklarını düşürmek asıl amaç olmalıdır. Yüzeyde gerilimin fazla olmasının nedeni betonun iç kısmının yüzeye oranla daha düşük hızla hacim değişikliğine uğraması olarak tarif edilebilir. Diğer bir tanımlama ile betonun iç kısmı betonun dış kısmını kısıtlamaktadır.

4.2. Termal Çatlak Tipleri

Yukarıda anlatılan durumlara göre çatlak tipini de 2 kategori altında toplayabiliriz; Kütle gradienti neticesinde oluşan çatlaklar ve yüzeysel gradient neticesinde oluşan çatlaklar.

1) Kütle gradienti sonucu oluşan çatlak:

Kütlenin çekme gerilmeleri betonun çekme gerilim kapasitesini aştığında oluşmaktadır. Çatlağın yönü genellikle beton kütlenin enine ve bazen de boyuna oluşabilmektedir ve beton kütleyi tamamen ikiye ayırabilir.

2) Yüzeysel gradient sonucu oluşan çatlak:

Kütle betonlarının yüzey kısmı iç kısmına oranla daha hızlı soğumaktadır ve bu da yüzeyle iç kısım arasında büyük sıcaklık gradientinin oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum ise beton yüzeyinde gerilim ve deformasyonların olmasına neden olduğundan yüzeyde çatlak oluşumu görülmektedir. Çatlak oluşumları sadece lokal yüzeysel çatlaklar olabilir, ancak bu şekilde uzun süre kalmaları anlamına gelmez. Bir kez çatlak oluştuğunda bu çatlağın ilerlemesi daha kolaydır. Yüzeyde gözle ayırt edilebilen yapısal çatlaklar görülebilir ve bazen derinlikleri birkaç cm'den 1 m'ye kadar olabilir. Beton yüzeyi ani hava soğumalarına maruz bırakıldığında sıcaklık gradienti daha hızlı gelişmekte ve çatlak oluşumunu da hızlandırmaktadır. Özellikle izole edilmiş beton yüzeylerin aniden soğuk havaya maruz bırakılmasında daha çok gözlenir.

3) İki etkinin aynı zamanda etkili olduğu kütle/yüzey gradienti çatlak oluşumu:

Aslında çatlak tek bir etki ile her zaman oluşmaz. Her ikisinin etkisi ile bu durum iyice ciddi boyutlara ulaşır. Çatlak oluşumu çok daha hızlı ve derindir. Bu iki etkiye ilâve olarak da hidrostatik su basıncı veya soğuk su ile temas eden beton yüzeyleri gibi diğer başka yüklerde eklendiğinde bu durum daha da ciddi boyutlara ulaşır.

4.3 Termal Çatlak Riskini Önleme ile İlgili Öneriler

Kütle betonunda termal çatlakların oluşmasını önlemek amacıyla iklim şartları özellikle dikkate alınmalıdır;

1) Soğuk havada betonlama; soğuk havada betonlama işlerinin yürütülmesi esnasında

gerektiğinde betonu dondan korumak ve hidratasyonunu devam ettirebilmesi amacıyla İzolasyon (soğuktan koruma) yapılması gerekli olabilir. Beton döküldükten sonra özellikle yüzey kısmı soğuk hava ile açıkta bir şekilde uzun süre temas ettirildiğinde beton termal şoka maruz kalmış olabilir. Aynı şekilde betonu kür ederken çok soğuk su ile temas etmemesi de sağlanmalıdır. Kür için kullanılan suyun sıcaklığı yaz ve kış ortalama 15 - 20 °C arasında olmalıdır. İzolasyon malzemesi ince bir şilte de olabilir. Beton yüzeyi ile iç kısmı veya genel olarak beton blok içinde herhangi iki nokta arasındaki sıcaklık farkının 20 °C'ü aşmaması sağlanmalıdır.

2) Sıcak havada betonlama; Hava sıcaklığının arttığı bahar ve yaz şartlarında betonu yalıtım ile korumanın herhangi bir gereği yoktur. Betonun yüzey sıcaklığı çevre sıcaklığına kadar soğurken veya ısınırken sıcaklık farkının yine 20 °C'ü aşmaması sağlanmalıdır. Beton kür edilirken kür suyunun sıcaklığı beton yüzey sıcaklığına yakın veya bir miktar (zorunlu durumlarda en fazla 10° C olabilir) daha fazla olmalıdır.

Her iki durumda da art-soğutma işlemleri dikkatle yapılmalıdır. Betonda iç sıcaklığın çok fazla artmaması için gerekli durumlarda boru uzunluğunun artırılması ve/veya sisteme gönderilen suyun debisi ve suyun içerde kalma süresi çıkış sıcaklığına göre yeniden ayarlanmalıdır.

Kütle beton konusundaki bilgi birikimi büyük çapta, ısı etkisi nedeniyle açığa çıkan oluşumlarının ilk olarak belirlendiği beton barajlardan elde edilmiştir. Ancak, radye jeneral temel yapıları, köprü ayakları, kalın duvarlar, tünel kaplamaları gibi diğer bazı büyük boyutlu beton yapılarda da ısı etkisi kaynaklı çatlak oluşumları gözlenmektedir.

İnce kemer yapılar istisna olmak kaydıyla, kütle beton yapılarda yüksek basınç dayanım değerlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ağırlık barajları gibi büyük yapılar yükleri öncelikli olarak şekli ve ağırlığı, ikincil mertebede beton dayanımı yardımı ile taşıyabilmektedir. Bu nedenle, büyük boyutlu beton yapılarda dayanıklılık ve termal davranış ve çatlak oluşum eğilimi ile ilgili özellikler daha büyük önem arz etmektedir.

4.4 Çatlak Analizinin Yapılması

Betonda oluşan termal deformasyonlar ve gerilmeler aşağıda verilen genel bağıntı ile hesaplanır;

Termal deformasyon hesabı,

$$\varepsilon = \alpha K_f K_R \Delta T$$

$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_c}$ ifadesi kullanılarak termal gerilim hesabı yapılabilir;

$$\sigma = \alpha E_c K_f K_R \Delta T$$

Burada, K_f temelden dolayı kısıtlama faktörü, K_R ise beton elemanın kendisine ait kısıtlama faktörüdür (içsel kısıtlama faktörü) ve boyutlarına bağlıdır.

K_R beton kütle uzunluğuna (L) ve yüksekliğine (H) ve kısıtlama ara yüzey derinliğine (yapının temelinden itibaren deformasyonun belirleneceği noktaya olan mesafe), h, bağlı olarak hesap edilmektedir; $h=H/2$ olarak maksimum değerde seçilebilir.

$L/H \geq 2,5$ olduğunda

$$K_R = \left(\frac{\frac{L}{H} - 2}{\frac{L}{H} + 1} \right)^{h/H}$$

$L/H < 2,5$ olduğunda

$$K_R = \left(\frac{\frac{L}{H} - 1}{\frac{L}{H} + 10} \right)^{h/H}$$

Beton dış yüzeyinde K_R genellikle maksimum değer olan 1,0'a eşittir.

Temel kısıtlama faktörü K_f : Betonun elastisite modülü ile temel malzemesinin elastisite modülü arasındaki ilişki ile belirlenir;

$$K_f = \frac{1}{1 + \frac{A_g E_c}{A_f E_f}}$$

Burada, A_g temel eksenini üzerinde beton en kesitinin toplam alanı, A_f temel alanı veya betonu kısıtlayan kısmın toplam alanı, E_f temel malzemenin elastisite modülü ve E_c kütle betonunun elastisite modülü.

Çatlak analizinin tam ve kesin hesaplamaları beton ve bileşenlerinin termal özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ile yapılabilecektir.

5 MALZEMELER VE KÜTLE BETONU KARIŞIM ORANLARI TASARIMI

Diğer betonlarda olduğu gibi kütle betonu da çimento, agrega, su ve sıklıkla puzolanlar ve beton katkı maddeleri kullanılarak tasarlanmaktadır. Kütle betonu karışım elemanları miktarının tayininde amaç; uygun işlenebilirlik, düşük sıcaklık artışı, boyutsal kararlılık, ekonomi, çatlak oluşumlarının engellenmesi, dayanıklılık, yeterli dayanım ve özellikle su yapılarında düşük su geçirgenlik kriterlerinin aynı anda sağlanmasıdır. Bu makalede geçmiş tecrübeler çerçevesinde kütle beton inşasında başarı ile kullanılmış olan malzemeler, malzeme seçimi ve karışım oranları tasarımı ile ilgili bilgiler aktarılmaktadır.

5.1 Çimento

Kütle betonunda aşağıda belirtilen çimento türlerinin kullanılması uygun görülmektedir:

- Portland çimentosu+mineral katkı veya katkı çimento.
- Çok düşük ve düşük hidrasyon ısılı Portland çimentosu (EN 14216 veya ASTM C150 Tip IV),

Portland çimentosu, mineral katkı (puzolan) veya başka çimentolar ile birlikte kullanıldığında, malzemelerin karışımı beton santralinde genelde ayrı-ayrı yapılmaktadır. Ekonomi ve düşük hidrasyon ısısı toplam çimento miktarının sınırlandırılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Normal Portland çimentoları beton yapıların çoğunda kullanılabilir. Ancak, kütle betonunda yüksek hidrasyon ısısı ve dolayısı ile yüksek sıcaklık riski nedeni ile tek başına kullanılması önerilmez. Portland çimentosu ile birlikte mutlaka uygun bir puzolanik malzeme (mineral katkı) kullanılmalıdır.

Hidrasyon ısısı orta dereceli olan portland çimentolarında erken ısı gelişimi yüksek olan trikalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni en fazla %8 ile sınırlandırılmaktadır. Buna ilave olarak bazı şartnamelerde trikalsiyum alüminat ve trikalsiyum silikat (C_3S) toplamının en fazla %58 olması yanı sıra hidrasyon ısısının 7 günde en fazla 60 cal/g (ASTM C150 Tip II için 70 cal/g, Tip IV için 60 cal/g ve EN 197-1'de düşük hidrasyon ısılı çimento için 65 cal/g, EN 14216'da çok düşük hidrasyon ısılı çimentoda 52,5 cal/g) olması kriteri bulunmaktadır. Söz konusu şartnamelerde belirtilen ek kriterlerin ($C_3A + C_3S$) \leq % 58 ve/veya 7 günlük

hidratasyon ısı ≤ 60 cal/g) dikkate alınması durumunda 28 günlük basınç dayanımı kriteri de daha düşük bir değere çekilebilmektedir.

Hidratasyon ısısının oldukça düşük olmasının gerekli olduğu çok büyük boyutlu yapı elemanlarında **çok düşük hidratasyon ısıli portland çimentoları** öncelikle tercih edilmelidir. Ancak, bu tip düşük hidratasyon ısıli çimentoların temininin zor olması ve hidratasyon ısıli gelişiminin başka bazı yöntemler kullanılarak kontrol altına alınmasının mümkün olmasından dolayı son yıllarda çok tercih edilmemektedir. Bu tür çimentolarda trikalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni en fazla %7, trikalsiyum silikat (C_3S) bileşeni en fazla %35 ve dikalsiyum silikat (C_2S) bileşeni ise en az %40 ile sınırlandırılmaktadır. EN 14216 standardı çok düşük hidratasyon ısıli çimentolar hakkında bilgiler ve bazı gerekleri belirtmektedir. Bu standardda çimentonun 7 gün sonundaki hidratasyon ısıli 52,5 cal/g ile sınırlandırılmaktadır.

Sülfata dayanıklı portland çimentosu hem düşük alkali ve hem de düşük hidratasyon ısıli olduğundan dolayı tercih edilebilmektedir. Ayrıca EN 197-4 standardına uygun düşük erken dayanımlı ve düşük hidratasyon ısıli yüksek fırın cürufu çimentoların da kütle betonu yapılarında kullanılması tavsiye edilmektedir.

Katkılı çimentoların da kütle betonlarında kullanılması oldukça yaygın bir uygulamadır. Portland çimentosunun ince puzolan ile karıştırılması veya portland çimentosunun puzolan ile birlikte öğütülmesi sureti ile erken dayanımı düşük çimento elde edilebilmektedir. Bu tip çimentolarla bazı şartnamelerde belirtildiği üzere hidratasyon ısısının 7 günde en fazla 60 cal/g ve 28 günde de en fazla 70 cal/g olması kriteri sağlanabilmektedir.

Kütle betonlarında diğer tip çimentoların kullanımları da araştırılmaktadır. Hidratasyon ısısının düşük ve aynı zamanda erken dayanımı yüksek olan çimentolar üzerinde araştırmalar yoğunlaştırılmaktadır. Bunlardan bir tanesi **Borlu Aktif Belit Çimentosu**'nun (TS 13353) kullanımıdır. Ülkemizde Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından her yıl birçok proje kapsamında yüz binlerce metreküp beton dökümü gerçekleştirilmektedir. DSİ projelerinin büyük kısmını oluşturan baraj inşaatları işlerinde farklı beton yapılar ve özellikle kütle betonu yapıların imalatı söz konusu olmaktadır.

Kütle betonlarında en önemli problem daha önce bahsedildiği üzere hiç kuşkusuz çimentonun hidratasyon ısısidir. Kütle

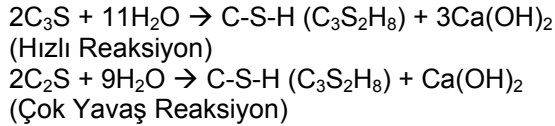
betonlarının bileşenlerinin ön soğutulması ve ardından da art-soğutma işlemleri yapılmasına rağmen beton içerisinde sıcaklığın artması engellenememekte ve bunun sonucunda da ısı kaynaklı gerilimlerden dolayı betonda ciddi çatlakların oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için en çok katkılı çimentolardan ve özellikle de çimentonun bir kısmının yerine uçucu kül ikame ederek oluşturulan karışımlardan beton imalatları yapılmak suretiyle hidratasyon ısıli azaltılmakta ve kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Ancak, buna rağmen betonda çatlak oluşumları riski tamamen bertaraf edilemeyebilmektedir.

Bilindiği üzere kireçtaşı ($CaCO_3$), kil ve/veya silt, demir esaslı alüminasilikatlar ve diğer bazı yardımcı hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda döner fırınlarda pişirilmesi sonucunda normal Portland çimentosu klinkeri dört ana fazdan ibaret olarak oluşur. Bunlar çimento kimyasında kısaca Alite: C_3S ($3CaO.SiO_2$), Belite: C_2S ($2CaO.SiO_2$), Alüminat: C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) ve Ferrit: C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.SiO_2$) olarak gösterilir. Klinker daha sonra alçıtaşı ($CaSO_4.2H_2O$) ile birlikte öğütülerek toz halindeki Portland çimentosu elde edilir. Normal Portland çimentosu içerisinde yaklaşık olarak %55-65 C_3S , %15-25 C_2S , %7-12 C_3A ve %5-10 C_4AF ve yaklaşık %5 $CaSO_4.2H_2O$ bulunur. Bu fazlar arasında en reaktif (su ile reaksiyon verme açısından) olanları sırasıyla C_3A , C_3S , C_4AF ve C_2S dir. Çimento dayanımının zamanla gelişimi açısından C_3S başlangıçtan (erken dayanım kazandıran bileşen) itibaren en fazla katkıda bulunan bileşen iken C_2S başlangıçta çok zayıf ancak daha sonraları C_3S kadar dayanım gelişimine sahip olmaktadır. Diğer alüminat ve ferrit fazlarının dayanıma büyük katkıları yoktur.

Bor mineralleri arasında en fazla tercih edilen kolemanit'in ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) çimento hammaddelerinden kireçtaşının bir kısmının yerine Portland çimentosu üretiminde kullanılması sonucunda Bor (B_2O_3) katkılı çimento üretimi yapılabilmektedir. Çimento özelliklerini olumsuz yönde etkilemeyen ve uygunluğu tespit edilen diğer bor mineralleri de bu amaçla kullanılabilir. Bor veya boroksit katkılı çimento üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre normal Portland çimentosunda (CEM I 42,5) oldukça yüksek oranlarda meydana gelen C_3S fazının hiç oluşmadığı veya çok az (ihmal edilebilir düzey) oluştuğu ve bunun yerine kararlı ve aktif belit (di-kalsiyum silikat, α veya α' - C_2S) fazının yüksek oranda oluştuğu görülmüştür. Buna ilâve olarak çimentonun C_3A miktarı da %5'in altında istenildiğinde üretilebilmektedir. Çimentonun dört ana fazından (C_3S , C_2S , C_3A

ve C₄AF) hidratasyon ısısı yüksek olan C₃S ve C₃A oranlarının sırasıyla yaklaşık % 0 ve <%5 olması kütle betonu yapılarında bu tip bir çimentonun kullanılabilmesi için umut vericidir. Keza bu fazların oranı düştükçe çimentonun hidratasyon ısısı erken yaşlarda oldukça düşük seviyelerde seyretmektedir. Borlu aktif belit çimentosunun hidratasyon reaksiyonu izotermal bir kalorimetre vasıtasıyla ölçülmüş ve hidratasyon ısısının çok düşük hidratasyon ısı çimentodan dahi düşük olduğu tespit edilmiştir.

Borlu aktif belit çimentosunun en önemli özelliği reaktif veya aktif C₂S (Belite) oranının yüksek olması ve C₃S fazı oranının ise çok düşük veya %0 olmasıdır. Normal şartlarda C₂S fazının reaktivitesi C₃S fazına göre oldukça yavaştır ve geç dayanım kazanmaktadır. Ancak, nihai dayanımı C₃S'den daha fazla olabilmektedir. Bunun nedeni ise aşağıdaki reaksiyonlarla özetlenebilir;



C₃S fazının su ile hidratasyon reaksiyonu sonucu C₂S fazından oluşana göre 2 kat daha fazla Ca(OH)₂ oluşmaktadır. Kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂)normal bir Portland çimentosu pastasının hacimce %20 ile %25'ini oluşturur. Bu bileşen betonda en zayıf bileşendir ve daha çok betonda agrega ile çimento pastası arasındaki ara yüzeyde toplanmaya meyillidir. Betonda kırılma genellikle agrega ile çimento pastası arasındaki ara yüzeyden başlar ve devam eder. Normal C₃S'li bir çimento ile diğer bir olumsuzluk ise çok fazla oluşan kalsiyum hidroksitin betonun boşluk oranının artmasına neden olmasıdır. Buna karşın C₂S oranı yüksek olan çimento ile yapılan betonlarda kalsiyum hidroksit oranı oldukça düşük ve oluşan C-S-H ürünü daha fazla olacağından betonun boşluk oranı da düşük olacak ve daha sıkı bir yapıya sahip olan betonun dayanımı da bu oranda yüksek olacaktır.

Borlu aktif belit çimentosunun bileşiminde çimentonun hidratasyon ısısını en fazla artıran bileşenlerden en önemli olanı C₃S (Alite) bu çimentonun üretimi esnasında düşük pişirme sıcaklığı ve boroksit nedeniyle oluşmamaktadır. Hal böyle olunca hidratasyon ısısında önemli mertebelerde azalma sağlanmaktadır. Ayrıca yapılan ön denemeler sonunda ileri yaşlarda normal CEM I 42,5 çimentosundan daha yüksek mukavemetler verdiği de laboratuvarında yapılan deneylerle tespit edilmiştir. Literatür bilgisi dâhilinde C₃S fazı olmadan da

çimentonun dayanım değerlerinde belirli bir miktar artış olduğu da literatürde kaydedilmektedir. Teknolojisinin henüz tam olarak fabrikalarca bilinmemesi nedeniyle borlu aktif belit çimentosunun üretimi sürekli olarak yapılmamaktadır. Çimentonun çok yönlü olarak incelenmesi gereklidir.

5.2 Puzolanlar ve Öğütülmüş Cüruf

Puzolan silisli veya silisli-ve-alüminli malzeme olup tek başına ya hiç ya da hiç denecek kadar az bağlayıcı özelliğe sahiptir. Ancak, inceliğinin yüksek olduğu ve rutubetin de mevcut olduğu ortamlarda kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girer ve çimentonun su ile reaksiyonu sonucu oluşan C-S-H bileşenini ortaya çıkararak bağlayıcı bir özellik kazanır. Puzolanlar ASTM C 618'de N tipi veya F tipi olarak sınıflandırılmaktadır. TS EN 450-1 betonda kullanılan uçucu kül ile ilgili özellikleri ve gerekleri belirlemektedir. Uçucu küller F ve C olarak iki sınıf altında toplanırlar. Bazı C tipi puzolanlar çimentodakine benzer bileşenler ihtiva etmektedir. Bundan dolayı C tipi puzolanlar çimento gibi bağlayıcı özelliği olup önemli derecede beton dayanımına katkı sağlamaktadır.

Puzolanlar portland çimentosunun hidratasyonu sırasında açığa çıkan hidrate kireç veya kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği olan bileşenler oluşturmaktadır. Puzolanik aktivitesinin yüksek olması için puzolanlar cam veya opal gibi amorf bir yapıya haiz olmalıdır. Kuvars gibi kristal yapıya haiz silisli malzemeler yüksek inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmedikçe kireç ile normal sıcaklık koşullarında reaksiyon vermemektedir.

Doğal puzolanik malzemeler, obsidiyen, pumis (süngertaşı), volkanik kül, tuf, kil, şeyl ve diatomit olarak bulunmaktadır. Doğal puzolanlar genellikle öğütülerek kullanılabilir durumda bulunmaktadır. Ancak bazı volkanik malzemeler doğal durumu itibarı ile öğütülmeden kullanılabilir inceliğe haizdir. Kil ve şeyl ise öğütülmenin ötesinde 650-980 °C'ta kalsinasyon işlemine tabi tutulmak sureti ile aktif hale getirilmek zorundadır.

Uçucu kül, öğütülmüş veya toz kömürün yanması sırasında açığa çıkan baca tozudur. Karbon içeriği düşük olup portland çimentosu ile yaklaşık olarak aynı inceliğe sahipse ve çok ince cam kürecikleri gibi bir yapıya haiz ise mükemmel bir puzolan olabilmektedir. Şekli ve yapısı nedeni ile betonda kullanıldığında genellikle karma suyu ihtiyacı azalmaktadır. Birçok durumda uçucu külün daha büyük

inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmesi, puzolanik aktivitesinin artmasını sağlamaktadır. Ancak, bu işlem küresel tane yapısına sahip olan uçucu külün öğütülme sonrası yapısının bozulması sonucu beton içerisindeki yağlama kabiliyetini azaltabilmekte ve dolayısı ile karma suyu ihtiyacının artmasına neden olabilmektedir. Yüksek silisli F tipi uçucu küllerin puzolanik aktivitesi genellikle mükemmeldir. Bununla birlikte, C tipi uçucu küller yüksek oranda CaO içerebilmekte ve iyi bağlayıcı özelliklere sahip olsa da betonun sülfata karşı dayanıklılığının artırılması veya alkali-silika reaksiyonunun (ASR) önlenmesi maksadıyla kullanılamamaktadır. Buna ilave olarak C tipi uçucu küllerin kütle betonda hidrasyon ısısının düşürülmesi maksadıyla kullanılması daha az uygun düşmektedir.

Puzolanlar kütle betonda portland çimentosu faktörünün düşürülerek ekonomi sağlanması, hidrasyon ısısının düşürülmesi, yüksek işlenebilirlik sağlanması, sülfat ve alkali-silika reaksiyonu sonucu ortaya çıkan hasar oluşumunun azaltılması maksadıyla kullanılabilir. Bununla birlikte, farklı puzolanların değişik özelliklere haiz olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bazı puzolanlar düşük erken dayanım, yüksek kuruma rötresi ve dolayısı ile düşük dayanıklılık gibi problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Bir puzolan kullanılmadan önce projede kullanılacak olan çimento ve agregası ile birlikte deneye tabi tutularak beton ekonomisi ve kalitesine katkı sağlayıp sağlamayacağı belirlenmelidir. Portland çimentosuna kıyasla, katkılı çimentolarda puzolanın etkiden kaynaklanan dayanım gelişimi erken yaşlarda yavaş olmakta ancak ileriki yaşlarda daha hızlı seyretmektedir. İleriki yaşlarda aynı dayanıma sahip olması tasarlanan betonlarda, puzolanlı portland çimentosu kullanılan betonun erken yaşlardaki dayanımının portland çimentosu kullanılan beton dayanımına kıyasla daha düşük olması beklenmelidir. Kütle betonunun erken dayanımının yüksek olması gerekli olan bazı kısımlarında kütle beton karışımından farklı bir beton tasarımı kullanılabilir. Kütle betonunda puzolan kullanıldığı durumlarda puzolanın düşük dozda kullanılması veya hiç kullanılmaması sureti ile erken dayanım hedefine ulaşılabilir. Ancak, alkali-agrega reaksiyon riski mevcutsa puzolan mutlak surette kullanılmalı, erken yaşlarda yüksek dayanım portland çimentosu kullanım dozajının artırılması sureti ile sağlanmalıdır.

Özellikle doğal puzolanların, reaktif agregası kullanılan betonda alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan genleşmenin azaltılması

açısından oldukça etkili olduğu saptanmıştır [2]. Genleşmedeki azalma miktarı kullanılan puzolanın kimyasal yapısı, inceliği ve kullanım dozajı ile değişmektedir. Bazı puzolanlarda, genleşmedeki azalma %90'ı aşabilmektedir. Puzolanlar genleşmeyi çimentodaki alkali-ileri agregası ile reaksiyona girmeden önce tüketmesi yolu ile azaltmaktadır [3]. Alkali-reaktif agregası kullanılması zorunlu olduğu durumlarda, düşük alkali çimento ve genleşmeyi azaltıcı etkisi kanıtlanmış puzolan kullanımı en iyi yaklaşım olmaktadır.

Corps of Engineers tarafından yapılan deneysel çalışmalara göre kütle betonunun gerilmelerin daha düşük olduğu iç kısımlarında daha yüksek oranda puzolan kullanılması ekonomi sağlamakta ve gerekli dayanım daha ileri yaşlarda sağlanabilmektedir. Laboratuvar sonuçlarına göre, 53 kg/m³ çimento dozajlı ve uçucu kül kullanılan ve eşdeğer çimento dozajı 112 kg/m³ olan hava sürüklenmiş kütle betonunda karma suyu 60 kg/m³ olmasına karşın oldukça işlenebilir bir karışım elde edilebilmiştir. Islak elenmiş betondan $\phi=150\text{mm}$, $h=300\text{mm}$ ebatlarında silindirik şekilde alınan beton numunelerin bir yıllık basınç dayanım değerlerinin ise 21 MPa mertebesinde olduğu tespit edilmiştir [2].

Agregası tane şekli ve bunun betonun işlenebilirliği üzerindeki olumsuz etkisi, puzolan kullanımının işlenebilirliği artırma etkisi ve hava sürükleyici ve/veya diğer katkı maddeleri ile rahatlıkla çözümlenebilecek bir noktaya gelmiştir [2].

İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu da portland çimentosuna ilave edilmek sureti ile kütle betonunda bağlayıcı olarak kullanılabilir. Portland çimentosu ile birlikte kullanıldığında hidrasyon ısısının 7 günde 60cal/g değerinin altına düşmesi için toplam bağlayıcının en az %70'i oranında kullanılması gerekebilmektedir. Yüksek fırın cürufu hidrasyon hızının düşük olması nedeni ile hidrasyon ısısını genellikle düşürmektedir. İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılması betona birçok avantajlar da sağlamaktadır. Bunlar düşük geçirgenlik, reaktif agregası kaynaklı genleşmenin kontrolü, işlenebilirliğin artırılması ve sülfata karşı dayanıklılık olarak sıralanabilir. Ancak, bu avantajlardan yararlanabilmek için tras, uçucu kül vb. puzolanlardan çok daha yüksek oranlarda cüruf kullanılması gerekmektedir.

5.3 Kimyasal Katkı Maddeleri

Kütle betonu açısından önemli etkileri olan katkı maddeleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Hava sürükleyici,
- Su azaltıcı,
- Priz geciktirici,
- Su azaltıcı ve priz geciktirici.

Priz hızlandırıcı katkı maddeleri, erken yaşlarda yüksek dayanımın gerekli olmaması ve hidrasyon hızını artırmasından dolayı kütle betonunda kullanılmamaktadır. Kimyasal katkı maddeleri henüz plastik durumda olan kütle betonuna önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar; işlenebilirliği artırması ve/veya karma suyu ihtiyacını azaltması, priz başlangıcını geciktirmesi, terleme hızı ve kapasitesini geliştirmesi, ayrışmayı engellemesi, slump kayıp hızını azaltması olarak sıralanabilir. Kimyasal katkı maddeleri sertleşmiş kütle betonuna da önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar; sertleşme sürecinde hidrasyon ısısını kontrol etmesi, dayanımı artırması, çimento dozajını düşürmesi, dayanıklılığı artırması, geçirgenliği azaltması ve aşınma/kavitasyon direncini artırması olarak sıralanabilir.

Hava sürükleyici katkı maddeleri betona karışım esnasında küçük hava kabarcıkları sürüklemektedir. Bunun sonucunda işlenebilirlik artmakta, ayrışma azalmakta, terleme azalmakta, geçirgenlik düşmekte ve donma-çözümeye karşı dayanıklılık artmaktadır. Hava sürüklenmesi çimento dozajı düşük olan beton karışımlarında işlenebilirliği büyük çapta arttırmakta ve tane şekli ve granülometrisi iyi olmayan agreganın kullanılmasını tolere edebilmektedir. Buna ilave olarak betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerini de kolaylaştırmaktadır. Sürüklenmiş her %1 hava işlenebilirliği artırırken slump kaybı olmaksızın karma suyunu %2-4 mertebesinde azaltabilmektedir. Betonun donma-çözümeye etkilerine karşı dayanıklılığı hava sürüklenmiş betonda oldukça üst düzeydedir. Ancak çimento matrisindeki hiç bir noktanın en yakın hava kabarcığına olan uzaklığı 0,2 mm'den fazla olmayacak şekilde hava kabarcıkları homojen bir dağılım arz etmelidir.

Sürüklenmiş hava doğal olarak çoğu betonun dayanımını düşürmektedir. Çimento dozajı sabit tutulduğu ve aynı slump değerinde hava sürüklenmesinin karma suyundaki azaltma etkisinden istifade edildiği takdirde düşük dozajlı kütle betonlarında dayanım üzerinde önemsenmeyecek düşüş veya hafif bir artış meydana gelmektedir. Hava sürükleyici katkı

maddesi kullanım dozajı sabit tutularak gerçekleştirilen deneyler sürüklenmiş hava oranının agrega granülometrisi, agrega tane şekli, çimento dozajı, başka katkı maddelerinin kullanılması, karıştırma süresi, slump, ve beton sıcaklığına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir [2]. Sabit hava sürükleyici katkı dozajında, hava oranı 150 mm'ye kadar artan slump ile artmakta; ince madde miktarındaki artış, beton sıcaklığındaki artış ve karıştırma süresinin uzaması ile düşmektedir. Uçucu külün aktif karbon içermesi durumunda, daha yüksek dozajda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılması gerekmektedir. Çoğu şartname elek göz açıklığı 38,1 mm olan elekten kütle betonu ıslak elendikten sonra elde edilen taze beton numunesinde yaklaşık olarak %4 ilâ 5 hava olması gereğini belirtmektedir.

Su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri aşağıda belirtilen bileşenlerin bir ya da daha fazlasını içermektedir.

- Lignosülfonik asit
- Hidroksilli karboksilik asit
- Polimerik karbohidratlar,
- Naftalin ve melamin esaslı yüksek oranda su azaltıcılar.

Priz geciktirici katkı maddeleri kütle betonunun daha uzun süre plastik kıvamda kalmasını temin ederek üst tabaka yerleştirilinceye kadar geçen süre zarfında alt tabakanın prize başlamasını geciktirmekte ve böylece üst tabakanın vibrasyonla sıkıştırılma işlemi esnasında alt tabaka ile daha iyi kaynaşmasını mümkün kılmaktadır. Su azaltıcı katkı maddeleri karma suyu ihtiyacını azaltmak, beton dayanımı arttırmak veya daha düşük çimento dozajında aynı dayanım değerini yakalamak amacıyla kullanılmaktadır. Yukarıdaki su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri türlerinden ilk üçü kullanıldığında %10 mertebesinde su azaltma oranı gerçekleşmekte olup priz başlangıcı en az bir saat gecikmekte (slump kaybı olmaksızın) ve beton dayanımı kayda değer düzeyde artmaktadır. Geciktirici etkili bir katkı kullanıldığında 12 saat sonraki dayanım değeri katkı kullanılmayan şahit beton ile aşağı yukarı aynı seviyede olmaktadır. Çimento dozajı, çimentonun kompozisyonu, sıcaklık ve diğer etkenlere bağlı olarak su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri kullanılması 1, 3 ve 28 gün ve daha sonraki yaşlarda beton dayanım değerlerini önemli seviyede arttırmaktadır. Dayanımdaki artış sadece su/çimento oranındaki azalma ile açıklanamamaktadır. Katkı maddeleri hidrasyon üzerinde çok olumlu etkileri de

beraberinde getirmektedir. Karboksilik asit ailesinin terlemeyi arttırdığı dikkate alınmalıdır. Venezüella'da inşa edilen Guri barajının bazı kısımlarında kullanılmış olmakla birlikte, yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri kütle beton yapımında doğruluğu kanıtlanmış bir kayda sahip bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yüksek plastikleştirici etkisi ile gerekli olduğu durumlarda işlenebilirliğin artırılması maksadı ile bazı özel kütle beton inşaatlarında kullanılması açısından umut verici yönünü korumaktadır.

Kütle betonu uygulamalarında agregası en büyük tane büyüklüğünün 100 mm'den daha fazla olmasından dolayı ve hidrasyon ısısının düşürülmesi amacıyla mümkün mertebe genellikle düşük çimento dozajı kullanılmaktadır. Bu nedenle kütle betonlarında süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları pek tercih edilmez, çünkü su azaltma oranı normal akışkanlaştırıcı kadar elde edilir. Süper akışkanlaştırıcı türü katkıları çimento dozajının yüksek olduğu ve slump değerinin de en az 13-15 cm olan betonlarda daha etkili olduğu söylenebilir. Baraj kütle betonlarında betonun dozajı ve slampı oldukça düşük olduğundan çok

süper akışkanlaştırıcı katkıları genellikle tercih edilmez. Çünkü teknik ve ekonomik avantaj sağlamaz.

5.4 Agregası

İnce agregası elek göz açıklığı #4 (4,75mm) olan elekten tamamı geçen tane sınıfıdır. Doğal şekillenmiş tanecikler veya daha büyük boyutlu agregası/ kayaların kırılması yoluyla elde edilen tanecikler veya her ikisinin karışımından oluşabilmektedir. İnce agregası, sert, özgül kütlesi yüksek, dayanıklı olmalı ve üzeri zararlı maddelerle kaplı olmamalıdır. İnce agregası zararlı miktarda kil, silt, toz, mika, organik madde içermemeli ve sınır değerlerinin üzerinde diğer zararlı maddeleri ihtiva etmemelidir. Bu zararlı maddeler karışım oranları tasarımında hedeflenen beton özelliklerinin sağlanamamasına neden olabilmektedirler. Zararlı maddelerin kütlece oranının Çizelge-1'de verilen sınır değerlerin altında olması gereklidir. Hidrolik yapılarda su dalgalanmasına maruz kalan beton yüzeylerinde bu değerler %50 mertebesinde düşürülebilir. Kütle betonunun iç kısımlarında ve sürekli olarak suya gömülü olan kısımlarda ise bu sınır değerler %50 daha artırılabilir.

Çizelge1 - İnce agregada izin verilen zararlı madde yüzdeleri, en fazla (kütlece)

Kil toprakları ve eriyebilir parçacıklar	3,0
#200 (75 µm) Elekten Geçen İnce Madde Miktarı	
Aşınmaya Maruz Betonlar İçin	3,0*
Diğer Betonlar İçin	5,0*
Kömür ve Linyit	
Betonun Yüzey Görünümünün Önemli Olduğu Yerlerde	0,5
Diğer Betonlar İçin	1,0

*Kırma taş ince agregası için elek göz açıklığı #200 olan elekten geçen miktar kil, silt vb. zararlı madde değil de kırma agregası parçacıklarından oluşuyorsa bu sınır değeri aşınmaya maruz yapılarda %5'e diğer yapılarda ise %7'ye kadar artırılabilir.

İnce agregasının granülometrisi betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Kütle betonunda kullanılacak olan ince agregası için iyi bir granülometri Çizelge-2'de belirtilen alt ve üst limitler arasındaki bant içerisinde olmalıdır. Laboratuvarlarda yapılan çalışmalar daha farklı bant kullanımı ile de başarılı sonuçlar alınabileceğini göstermektedir. Bu da ince agregası için oldukça geniş bir bant kullanılabilmesinin bir göstergesidir. Granülometri kriterleri oldukça esnek olmakla birlikte, ince agregası granülometrisi bir kez ayarlandıktan sonra, beton işlenebilirliği üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak

maksadıyla granülometrinin aşağı yukarı sabit tutulması oldukça önemlidir.

Büyük yapılar için iri agregası çakıl, kırma taş çakıl veya kırma taş kaya ya da bunların bir veya bir kaçının karışımından oluşmakta olup, elek göz açıklığı #4 (4,75mm) olan elekte kalan ve elek göz açıklığı 6" (150mm) olan elekten geçen agregası için kullanılan bir ifadedir. Santral binası veya diğer yoğun demir donatı kullanılan ve kütle betonu kategorisinde yer alan yapılarda 3" (75mm) ve hatta 1 1/2" (37,5mm) gibi daha küçük en büyük tane boyutlu iri agregası başarı ile kullanılabilir.

Çizelge 2 - Kütle betonunda kullanılacak ince agregada granülometri alt ve üst sınırları

Elek göz açıklığı	Elekte kalan, % (kütlece)
3/8" (9,5mm)	0
#4 (4,75mm)	0-5
#8 (2,36mm)	5-15
#16 (1,18mm)	10-25
#30 (600µm)	10-30
#50 (300µm)	15-35
#100 (150µm)	12-20
Pan	3-7

*U.S. Bureau of Reclamation

Agrega en büyük tane boyutu genellikle demir donatı aralığına bağlı olarak belirlenmekle birlikte yakın civarda bulunan en büyük tane boyutlu agregaya bağlı olarak da belirlenebilmektedir. Agregada en büyük tane boyutu küçüldükçe karışımda kullanılan çimento miktarı ve buna bağlı olarak hidrasyon ısısı ve termal çatlak oluşum riski artmaktadır. Bunu ortadan kaldırmak için ise çimento dozajı ve beton yerleştirme sıcaklığının düşürülmesi gibi ciddi tedbirlerin alınması zorunlu olmaktadır. Bundan dolayı, betonarme yapım kurallarına bağlı kalmak kaydı ile en büyük agregada tane boyunun kullanılması en uygun yaklaşımdır.

İri agregada sert, özgül kütlesi yüksek, dayanıklı olmalı ve üzeri zararlı maddelerle kaplı olmamalıdır. Eriyebilen; işlem, taşıma veya depolama sırasında aşınmaya maruz kalan kayanın kullanılmasından kaçınılmalıdır.

Donma-çözülmeye maruz kalan kütle beton yapılarında özgül kütlesi 2,5'tan küçük ve su emme oranı %3'ten büyük olan kayanın kullanılması genellikle uygun görülmemektedir. Kimyasal analiz sonucuna göre iri agregada SO₃ olarak hesaplanan sülfat miktarı %0,5'i aşmamalıdır. İri agregada zararlı miktarda kil, silt, toz, mika, organik madde içermemeli ve sınır değerlerinin üzerinde diğer zararlı maddeleri de ihtiva etmemelidir. Bu zararlı maddeler karışım oranları tasarımında hedeflenen beton özelliklerinin sağlanamamasına neden olabilmektedirler. Zararlı maddelerin kütlece oranının Çizelge-3'de verilen sınır değerlerin altında olması gereklidir. Zararlı maddelerden arındırmak amacıyla iri agregada yeniden yıkamaya tabi tutulmak sureti ile temizlenebilmektedir.

Çizelge 3 - İri agregada izin verilen zararlı madde yüzdeleri, en fazla (kütlece)

Kil Topakları ve Eriyebilir Parçacıklar	0,5
#200 (75µm) Elekten Geçen İnce Madde Miktarı	0,5
Hafif Madde	2,0
Diğer Zararlı Maddeler	1,0

Teorik olarak, agregada en büyük tane boyutu arttıkça hedeflenen kalitede beton tasarımı için karışımdaki çimento miktarı azalmaktadır. Bu teori granülometrisi iyi ayarlanmış agregalar için agregada en büyük tane boyutu arttıkça agregada tanecikleri arasındaki boşluk miktarının azalmasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, çimento ve agregada tipi aynı olmak kaydı ile en büyük çimento verimliliğine ulaşmak için her basınç dayanımı için optimum en büyük tane boyutu olduğu Higginson, Wallace ve Ore tarafından 1963 yılında ortaya konulmuştur. Agregada en büyük tane boyutu kalıp ve betonarme çelik donatı yerleşim planı ile sınırlı

olarak belirlendiğinden dolayı, çelik donatı kullanılmayan bir çok beton yapıda en büyük tane boyutu neredeyse sınırsız bir şekilde belirlenebilmektedir. Elde edilebilirliğine ilave olarak, ekonomik agregada en büyük tane boyutu bu yüzden tasarım dayanımı, işleme, karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma sırasında karşılaşılan sorunlara bağlı olarak belirlenmektedir. Düzensiz şekle sahip iri agregada taneleri farklı hacim değişikliklerine bağlı olarak daha iri tanecikler etrafından çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Buna ilave olarak düzensiz şekilli agregada taneleri alt kısımlarında terleme sonucu su ve sıkıştırma esnasında

hava birikimi olması nedeni ile boşluk oluşumlarına da sebep olmaktadır. Daha büyük boyutlar kullanılabilirlikle birlikte, 6" (150 mm) kullanılabilir en büyük tane boyutu olarak benimsenmektedir.

Agrega tane şeklinin işlenebilirlik ve sonuç olarak karma suyu ihtiyacı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Akarsu yatağından elde edilen doğal şekillenmiş (yuvarlak şekilli) tanecikler bu açıdan en iyi işlenebilirlik sağlanmasını temin etmektedir. Bununla birlikte, kırmataş ocaklarında kullanılan çağdaş kırıcı ve öğütücüler hem ince hem de iri agrega tane sınıfında uygun tane şekilli agrega üretimini sağlayabilmektedir. Böylece, doğal şekillenmiş agreganın karma suyu ihtiyacı biraz daha az olsa da, uzak bir kaynaktan getirilmesi yakın civardan uygun şekilde kırmataş agrega elde edilmesine kıyasla nadiren daha ekonomik olmaktadır. Ancak, kırıcı ve öğütücü ekipmanın tane şekli açısından uygun özelliklerde agrega üretimine imkan verip vermeyeceğinin saptanması gereklidir. Tane şeklinin uygun olup olmadığının kontrolünde kullanılan yöntemlerden birisi yassı ve uzun taneciklerin her tane sınıfında %20'den fazla olmamasıdır. Yassı tane, genişliğinin kalınlığına oranı 3'ten büyük olan taneler için kullanılırken; uzun tane uzunluğunun genişliğine oranı 3'ten büyük olan taneleri ifade etmektedir.

Beton karışımındaki agrega oranlarının belirlenmesi betonun işlenebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Uygun agrega granülometrisinin sağlanmasını kolaylaştırmak maksadıyla agreganın farklı tane sınıflarına ayrılması gereklidir. A.B.D.'de geleneksel olarak Çizelge-4'te verilen iri agrega tane sınıfları kullanılmaktadır. Çizelge 5'te ise bu tane sınıflarının kullanım oranları verilmektedir.

Tecrübeler her tane sınıfında oldukça geniş bir granülometri bandının kullanılabilirliğini göstermektedir. Doğal şekillenmiş çakıl kullanıldığında, teorik granülometrinin dışında ocaktaki mevcut agrega granülometrisinin kullanılması ekonomik bir yaklaşım olmaktadır. Bir tane sınıfında gereğinden çok fazla veya az miktarda malzeme olması durumunda, bir kısım malzemenin kullanılmaması, işlenebilirliği oldukça düşük beton üretimi yerine tercih edilmelidir. Kırmataş agrega üretimi sırasında yapılan ayarlamalar yardımı ile kullanılmayan malzeme oranı en düşük seviyeye çekilebilmektedir. İki veya üç aşamalı çağdaş kırıcı kullanılması sureti ile işlenebilir bir agrega karışım oranı elde edilebilmesi mümkün olmaktadır.

Dünyada bazı projelerde kütle betonunda kesikli granülometri kullanılabilirliktedir. Bu granülometride bir ya da daha fazla elekte kalan malzeme miktarının %0 olması anlamına gelmektedir. A.B.D.'de yaygın olarak kullanılmakta olan sürekli granülometri yaklaşımıdır. Kesikli granülometri malzemenin doğal hali ile kesikli granülometriye sahip olması durumunda ekonomik olmaktadır. Bununla birlikte, deneysel çalışmalar sürekli granülometri yerine kesikli granülometrinin özellikle tercih edilmesinin bir avantaj yaratmadığını ortaya koymaktadır. Sürekli granülometri daha düşük slamp değerinde, daha düşük çimento dozajında ve daha az karma suyu ile daha işlenebilir bir beton üretimini mümkün kılmaktadır. Kırmataş agrega tesisi kullanılması durumunda, sürekli granülometriye haiz agrega elde edilmesinde bir zorlukla karşılaşılması, doğal şekillenmiş agrega ocaklarının da mevcut durumu ile genellikle sürekli granülometri kullanılmasına olanak sağlaması da bu yüzden oldukça avantajlıdır.

5.5 Karma Suyu

Beton karışımında kullanılan su, çimentonun hidrasyon reaksiyonu olumsuz etkileyebilecek maddeleri içermemelidir. İçilebilir özelliklere haiz olan su genellikle beton karma suyu olarak da kullanılabilir. İçme suyu analizleri klorür miktarı açısından beton için kabul edilemez değerleri dikkate almadığından dolayı, şayet beton içerisinde metal aksam ve çelik donatı kullanılması söz konusu ise klorür analizleri yapılmalı ve suyun karma suyu olarak kullanılıp kullanılmayacağı yapı tipine bağlı olarak belirlenmelidir.

Su içerisindeki maddelerin çimentonun dayanım gelişimi üzerinde önemli ölçüde etki yapılıp yapılmadığının saptanması istendiğinde, mukayeseli dayanım deneylerinin yapılabilmesi için ditle su (şahit) ve kuşkulu su ile harç numuneleri hazırlanmalıdır. Kuşkulu su ile hazırlanan numunelerin ortalama dayanımı ditle su ile hazırlanan numunelerin ortalamasının %90'ı veya daha altında olması durumunda su karma suyu olarak kullanılmamalıdır. 5000 ppm veya daha fazla miktarda yabancı madde içeren suyun dayanıklılık yönünden zararlı olup olmadığı, dayanım ve boyutsal kararlılık deneyleri yapılmak sureti ile belirlenmelidir. Birkaç ppm hidroklorik asit ve sülfürik asit vb. mineral asitler içeren su dayanım gelişimi yönünden hoş görülebilir. Az miktarda şeker veya şeker türevi maddeler içeren su ise priz süresi üzerindeki etkisi tahmin edilemeyeceği için kullanılmamalıdır.

Çizelge 4 - Kütle betonunda kullanılacak iri agregada granülometri alt ve üst sınırları

Elek göz açıklığı	Elekten geçen, % (kütlece)			
	6"-3" (150-75) mm	3"-1 1/2" (75-37,5) mm	1 1/2"-3/4" (37,5-19) mm	3/4"-#4 (19-4,75) mm
7" (175mm)	100			
6" (150mm)	90-100			
4" (100mm)	20-45	100		
3" (75mm)	0-15	90-100		
2" (50mm)	0-5	20-55	100	
1 1/2" (37,5mm)		0-10	90-100	
1" (25mm)		0-5	20-45	100
3/4" (19mm)			1-10	90-100
3/8" (9,5mm)			0-5	30-55
#4 (4,75mm)				0-5

Çizelge 5 - İşlenebilir kütle betonu için iri agregata tane sınıfları alt ve üst kullanım sınırları

Agrega en büyük tane boyutu	İri agregata tane sınıfları kullanım miktarı, %				
	6"-3" (150-75) mm	3"-1 1/2" (75-37,5) mm	1 1/2"-3/4" (37,5-19) mm	3/4"-#4 (19-4,75) mm	3/8"-#4
6" (150mm)	20-30	20-32	20-30	12-20	8-15
3" (75mm)		20-40	20-40	15-25	10-15
1 1/2" 37,5mm)			40-55	30-35	15-25
3/4" (19mm)				30-70	20-45

5.6 Karışım Oranların Belirlenmesi

Kütle beton tasarımında temel hedef uygun dayanım, dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerine haiz olan sertleşmiş beton yapımı için bağlayıcı (çimento, puzolan, öğütülmüş cüruf), agregata, su ve katkı maddesi/katkı maddelerinin karışım oranlarının yeterli işlenebilirlikte ve yerleştirme sonrası en düşük sıcaklık artışı sağlanmasına yönelik olarak en uygun şekilde belirlenmesidir. Bu maksatla deneme karışımları yapılarak optimum karışım oranları belirlenmelidir.

Su/çimento veya su/bağlayıcı oranı dayanım, dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerini belirleyen en önemli parametredir. Bunun yanı sıra yerleştirmeyi kolaylaştırmak için yeterli miktarda ince madde de bulunmalıdır. Tecrübeler en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan doğal şekillenmiş agregata kullanılması durumunda en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan kırmataş

agregata kullanılmış karışıma kıyasla aynı işlenebilirliğin elde edilebilmesi için %10 daha az çimento inceliğinde malzeme kullanılmasının yeterli olduğunu göstermektedir. Hedeflenen su/bağlayıcı oranında hazırlanan deneme karışımları ve kullanılacak malzemelerin istenilen işlenebilirlikteki karma suyu ihtiyacı, bağlayıcı miktarının rahatlıkla belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Beton karışım elemanları miktarı tayininde ilk adım kütle betonunun değişik kısımlarında hangi agregata en büyük tane boyutunun kullanılacağını belirlenmesidir. Bir sonraki aşama, istenilen slump değerinde toplam su ihtiyacının belirlenmesidir. Slump deneyi için taze beton elek göz açıklığı 1 1/2" (37,5 mm) olan elekten ıslak elenmeli ve elekten geçen numune üzerinde deney gerçekleştirilmelidir. Agregata en büyük tane boyutu 6" (150 mm) olan düşük slamlı ve hava sürüklenmiş betonlarda su ihtiyacı doğal şekillenmiş agregata için 70kg/m³ ila 90 kg/m³

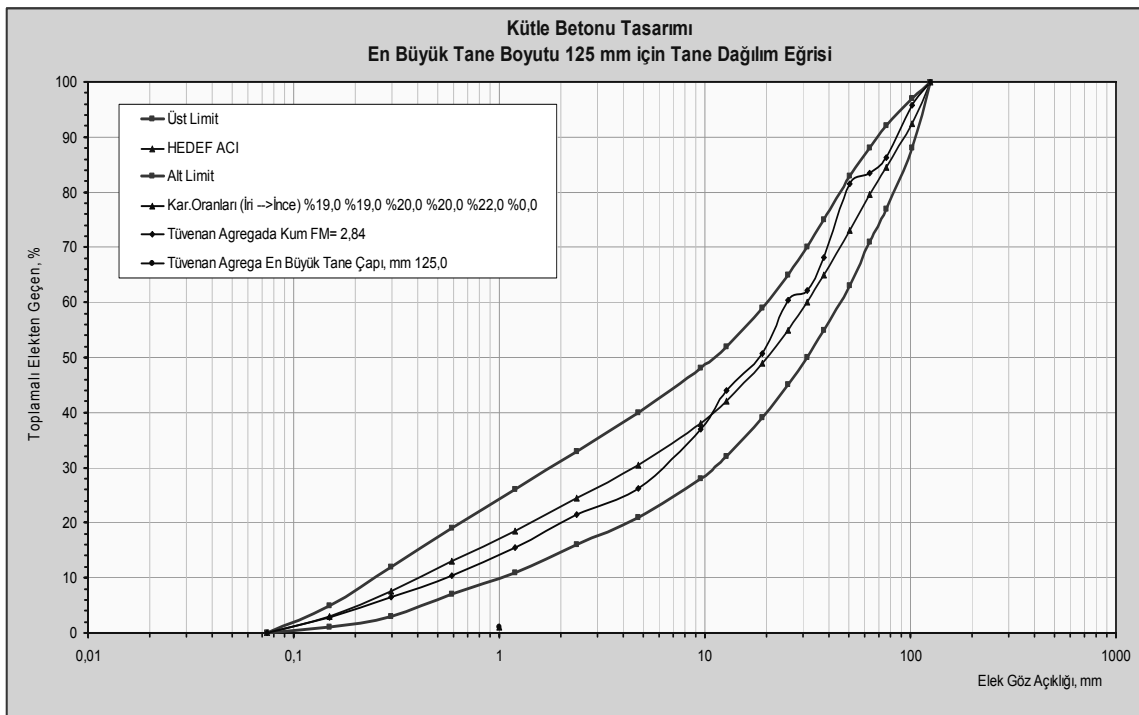
arasında, kırmataş agregası için ise 85kg/m^3 ile 115kg/m^3 arasında değişmektedir. Agregası en büyük tane boyutu 3" (75mm) olan betonlarda su ihtiyacı yaklaşık %20 daha fazladır. Bununla birlikte, 1 yıllık basınç dayanımının 28 MPa veya üzeri olmasının gerekli olduğu durumlarda 3" (75mm) agregası en büyük tane boyutu daha verimli olabilmektedir.

Karışımında kullanılacak olan bağlayıcı miktarı toplam su ihtiyacının su/çimento oranına bölünmesi ile elde edilebilmektedir. İşlenebilirliğin belirleyici olduğu durumlarda ise istenilen işlenebilirliği temin edebilecek en düşük çimento dozajı belirlenmektedir. Karışıma giren çimento ve karma suyunun hesaplanması ve hava miktarının %3-5 arasında tahmini bir değer olarak kullanılması ile geriye sadece agregası kalmaktadır. Bu aşamada ince ve iri agregası tane sınıflarının oranlarının bilinmesi gereklidir. Optimum oran, agregası granülometrisi ve agregası tane şekline bağlıdır. Bu oranlar arazide belirlenebilmektedir. Agregası en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan doğal şekillenmiş iri ve ince agregası içeren betonlarda toplam agregadaki ince agregası oranı %21 kadar düşük olabilmektedir. Kırmataş agregaları için ise bu oran %25-27 arasında olabilmektedir.

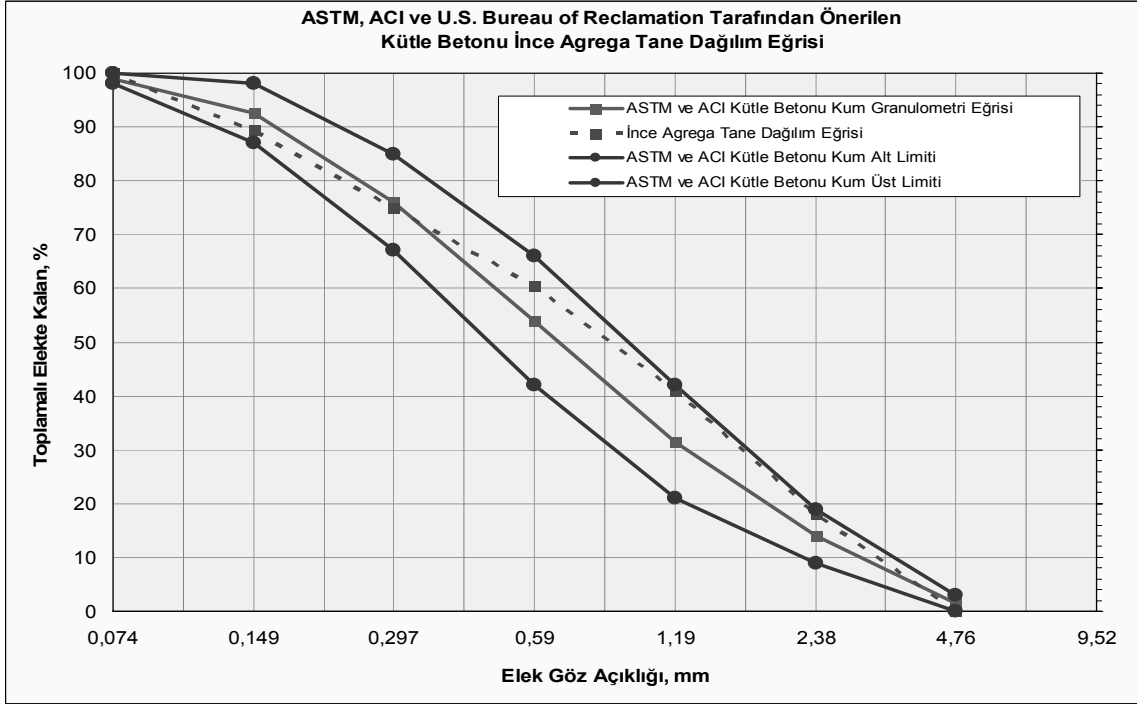
Karışımında bağlayıcı olarak puzolanın da kullanılması durumunda, karışım oranları tayini işlemi değişmemektedir. Ancak, aşağıda belirtilen maddeler dikkate alınmalıdır:

- Karma suyu ihtiyacının değişebileceği dikkate alınmalıdır,
- Erken yaşlardaki dayanımın kritik olabileceği göz ardı edilmemelidir,
- Karışım oranlarının en ekonomik bir şekilde tayini için daha büyük tasarım yaşı (90 veya 180 gün) kullanılması önerisi dikkate alınmalıdır.

Puzolan içeren betonlarda dayanım gelişimi, sadece portland çimentosu kullanılan betonlara kıyasla daha yavaş seyretmektedir. Bununla birlikte, kütle betonu üzerinde yüklemeye genellikle beton oldukça ileri yaşlarda iken yapılmaktadır. Bundan dolayı, puzolan içeren kütle betonu genellikle 90 gün ile 365 günlük dayanım değerleri dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Kütle betonunun tasarlanan fonksiyonlarını yerine getirebilmek için erken yaşlarda dayanım gereksiniminin olmamasına karşın, çoğu yapıda üst tabaka kalıpları bir alt tabakaya ankrajla sabitlenmektedir. Bundan dolayı erken yaşlardaki dayanım, ankraj tespit sistemini taşıyabilecek kadar yeterince büyük olmak zorundadır. Bununla birlikte özel tasarım kalıp ve ankraj sistemleri yüksek puzolan veya düşük çimento dozajlı betonlar için çözüm olabilmektedir. Aşağıda Şekil 1 ve Şekil 2'de bir beton ince kemer baraj gövdesinde kullanılan tüvenan ve ince agregası (en büyük tane boyutu = 125 mm) tane dağılım eğrileri verilmektedir. Kütle betonunda kullanılacak olan agregası tane dağılım eğrilerinin bu sınırlar içerisinde olması tavsiye edilmektedir.



Şekil 1 - Tüvenan agregasına ait tane dağılım eğrisi.



Şekil 2 - Kütle betonu içinde bulunan ince agregaya ait tane dağılım eğrisi.

6 SICAKLIK KONTROLÜ

Tamamı veya birkaçı tedbir olarak kütle betonunda kullanılabilecek dört etkili sıcaklık kontrol programı şu şekilde sıralanabilir:

- Bağlayıcı malzeme miktarı kontrolü - bağlayıcı tipi ve miktarı hidrasyon ısısı potansiyelini azaltabilmektedir.
- Önsoğutma - Karışımda kullanılacak olan malzemelerin soğutulması taze beton sıcaklığının daha düşük seviyelere çekilmesini sağlamaktadır.
- Art-soğutma - Hidrasyon sonucu artan sıcaklığın dengelenmesi amacıyla içerisine yerleştirilen soğutma tesisatı ile sıcaklık artışı sınırlandırılabilir.
- Yapı yönetimi - mükemmel planlama, yapım yöntemleri, betonun üretiminden yerleştirilmesine kadar geçen aşamalar ile ilgili bilgi birikiminin iyi kullanılması yardımıyla aşırı sıcaklık farklılıklarının oluşması engellenebilmektedir.

Küçük yapılarda, sıcaklık kontrolü için beton işlerinin soğuk süreçlerde (geceleri, soğuk aylarda vb.) yapılması gibi tek bir tedbir alınması yeterli olabilmektedir. Bununla birlikte daha büyük yapılarda, bağlayıcı miktarının azaltılması, puzolan kullanımı, agreganın ve karma suyunun önsoğutma işlemine tabi tutulması (karma suyunun bir kısmının yerine buz kullanımı) gibi tedbirlerin alınması sureti ile

beton yerleştirme sıcaklığı düşürülebilmektedir. Hava sürükleyici veya diğer katkı maddelerinin kullanımı hem taze ve hem de sertleşmiş beton özelliklerini geliştirerek betonun uygun boyutta bloklar halinde yerleştirilmesini, yerleştirme sıklığının artırılmasını, tabaka kalınlığına müdahale edilmesi sureti ile inşaat programının koordine edilmesini sağlamaktadır. Özel karıştırma ve yerleştirme ekipmanları betonun karıştırılmasından yerleştirilmesine kadar geçen süreci çevre sıcaklığından fazla etkilenmeden hızlı bir şekilde tamamlamasını temin etmektedir. Su kürü sonrası buharlaşma yolu ile soğumanın sağlanması, beton içerisine yerleştirilen tesisat ile sertleşmiş betonun soğutulması ve yüzeylerin yalıtılması yolu ile iç ve dış kısımlar arasında sıcaklık farklılıklarının en alt seviyeye çekilmesi de etkili tedbirlerdir.

İnce agreganın soğutulması pratik olmamakla birlikte iri agregaya rahatlıkla soğutulabilmektedir. Karma suyunun bir kısmı ya da tamamının buz olarak karışıma konulması da etkin bir yöntemdir. Sonuç olarak taze beton sıcaklığı 10°C veya altına rahatlıkla çekilebilmektedir. Daha düşük sıcaklıkların elde edilmesi genellikle çok zordur. Taze beton sıcaklığının düşürülmesi amacıyla karma suya sıvı nitrojen enjekte edilmesi işlemi de kullanılabilmektedir. Çoğu durumda sıvı nitrojen yardımı ile taze beton sıcaklığı 18 °C'un altına başarı ile çekilebilmektedir. Sıcaklık düşüktüçe

su ihtiyacı da azaldığından dolayı, soğutulmuş beton oldukça avantajlıdır.

Sıcaklık artışını sınırlamanın başlıca yolu, bağlayıcı malzemenin tipi ve miktarının kontrol altına alınmasıdır. Bu yüzden tasarım çalışmalarında istenilen dayanım değerinin en düşük bağlayıcı kullanılarak sağlanması hedeflenmelidir. Bağlayıcı miktarının azaltılmasındaki tek engel işlenebilir bir karışım elde edebilmek için karışımda olması gerekli olan çimento inceliğindeki en az malzeme miktarıdır. Puzolan, hava sürükleyici katkı maddesi ve diğer katkı maddelerinin yardımcı olarak kullanılmaması durumunda kütle beton tasarımı, termal çatlak oluşumlarına engel olabilmek amacıyla çimento dozajı düşük seviyede tutulurken, işlenebilirliğin de sağlanması mücadelesine sahne olmaktadır.

Bağlayıcı malzeme üzerinde 7 günde 70cal/g veya 60cal/g gibi hidrasyon ısı kriterlerinin uygulanması, sıcaklık artışını kontrol altına almaktadır. Düşük hidrasyon ısı bir bağlayıcı dozajı 140 kg/m³'ü aşmadığı durumlarda sıcaklık farkı 19 °C'ü geçmemektedir.

6.1 Kütle Betonunda Adyabatik Sıcaklık Artışı ve Sıcaklık Gradyanı

Çimento ile su arasında meydana gelen ekzotermik reaksiyon nedeniyle kütle betonunda oluşan sıcaklık artışı ve beraberinde getirdiği problemlerin anlaşılabilmesi amacıyla ısı transferi kanunlarından faydalanmak gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan eşitliklerin çözülebilmesi için farklı yöntemlerden faydalanılmaktadır. Kütle betonunda aşılması gereken problemlerden bir tanesi termal gerilimlerden dolayı beton çatlamadan ano kalınlığının artırılması ve üzerine yapılacak olan diğer anonun da hızlı bir şekilde üzerine dökülmesidir. Bu sağlandığı takdirde beton döküm hızı artacak ve proje daha hızlı bitirilecektir ve sonuçta oldukça büyük miktarda tasarruf sağlanmış olacaktır. Kütle betonlarında sıcaklık artışı sistemin adyabatik olduğu kabulü ile aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$\Delta T_a = \frac{M_c \times Q_h \times \alpha(t)}{\rho \times C}$$

Burada;

M_c toplam bağlayıcı (çimento+puzolan), kg, Q_h çimentonun toplam hidrasyon ısı, kJ/kg, α(t) çimentonun t zamanındaki hidrasyon derecesi ve ρ betonun yoğunluğu, kg/m³ ve C ise betonun özgül ısıdır, kJ/kg°C. Bu eşitlik ile

hesaplanan adyabatik sıcaklık artışı ve kütle betonundaki gerçek sıcaklık artışı deneysel olarak da doğrulanmalıdır.

Yukarıdaki eşitlik yardımı ile bulunan ve betonun merkezinde ulaşılan adyabatik sıcaklık artışına ilâve olarak, kütle betonunda ısı transfer analizi de yapılmalıdır. Kartezyen koordinat sisteminde kondüksiyonla ısı iletim kanunu Fourier tarafından geliştirilmiştir ve aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + w = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

Burada, k, betonun ısı iletim katsayısı, w, hidrasyon ısısını, T sıcaklığı, t zamanı ve x, y ve z koordinat sistemini gösterir. Zamana bağlı hidrasyon ısı w aşağıda gösterildiği gibi sıcaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak da verilebilir;

$$w = M_c \frac{dQ_h}{dt} \text{ veya } w = \rho C \frac{dT_a}{dt}$$

Buradaki T adyabatik sıcaklık artışının zamanla olan değişimini ortaya koyar. Bu durumda son eşitlik aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Veya kısaca aşağıdaki formda yazılabilir.

$$k \nabla^2 T + w = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

Bu eşitliği çözenin yollarından bir tanesi sonlu-eleman yöntemidir. Öncelikle bu amaca yönelik olarak sınır şartlarının belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmeli ve daha sonra çözümüne başlanmalıdır.

Çimentonun toplam hidrasyon ısısının yaklaşık olarak hesaplanması aşağıdaki gibi yapılmalıdır;

Portland çimentosunun toplam hidrasyon ısısının hesaplanması (H_c) ;

$$H_{cem} = 500p_{C_3S} + 260p_{C_2S} + 866p_{C_3A} + 420p_{C_4AF} + 624p_{SO_3} + 1186p_{FreeCaO} + 850p_{MgO} \text{ kJ/kg}$$

Burada, p_i her bir bileşenin % olarak çimento içindeki oranıdır.

Portland çimentosuna ilâve olarak uçucu kül ve/veya cüruf gibi bir puzolan katıldığında ise katkılı çimentonun toplam (Hidratasyon %100 olduğundaki nihai ısı) hidratasyon ısı (H_u) ;

$$H_u = H_{cem} \times p_{cem} + h_{FA} \times p_{FA} + 461 \times p_{Slag} \text{ kJ/kg}$$

Burada, p_i her bileşenin karışımdaki % olarak kullanım oranıdır. h_{FA} uçucu külün içeriğindeki CaO yüzdesi ile hesaplanan hidratasyon ısıdır.

7 FARKLI EBAT VE ŞEKİLDEKİ NUMUNELERİN DAYANIMLARI ARASINDAKİ GEÇİŞ FAKTÖRLERİ

Kütle betonu tasarımı yapılırken farklı şekilde ve farklı boyutlardaki numune kalıplarından yararlanılması gerekmektedir. Kütle betonunda kullanılan en büyük agrega tane boyutunun 150 mm'ye kadar ebatlarda seçilmesi nedeniyle 450 mm çapında ve 900 mm yüksekliğindeki silindir kalıp numunelerden faydalanılmaktadır. Karışım tasarımı esnasında daha küçük ebatlı numune kalıpları da kullanılmakta ve beton 38,1 mm'lik elekten ıslak eleme yapıldıktan sonra numuneler alınmaktadır. 63,5 mm'lik elekten elendiğinde (250x500) mm'lik silindir numuneler ve 38,1 mm'lik elekten elendiğinde ise (150x300) mm'lik silindir numuneler alınmaktadır. Ayrıca 25,4 mm'lik elekten ıslak eleme yapıldığında ise (150x150x150) mm'lik küp şekilli numuneler alınabilmektedir. Numunelerin alınmasından sonra elde edilen

basınç dayanım sonuçları birbirleri ile karşılaştırılmakta ve aralarında korelasyon kurulmaktadır. Beton imalatı sırasında ise kalite kontrol işlerinde istenildiğinde silindir şekilli ve küp şekilli numuneler alınarak geçiş katsayıları yardımıyla yapıdaki betonun gerçek dayanımına dönüşüm yapılmaktadır.

Aşağıda Çizelge 6'da l/d oranı 2 olan silindir şekilli farklı çaptaki numuneler arasındaki geçiş katsayıları gösterilmiştir. Burada çapı 15 cm olan silindir numune referans olarak alınmıştır. Diğer bir çapa geçişte Çizelgede bu çapa karşılık gelen katsayı ile (15x30) cm'lik numunenin dayanımı çarpılmalıdır. Eğer (25x50) cm'lik numuneden (45x90) cm'lik numuneye geçiş yapılacaksa bu durumda (25x50) cm'lik numune dayanımı, (45x90) cm'lik numune geçiş katsayısının (25x50) cm'lik numune geçiş katsayısına bölünmesi ile elde edilen yeni geçiş katsayısı ile çarpılmalıdır.

L/D=2 olan ve (150x300) mm silindir şekilli numunelerin basınç dayanımının diğer farklı çaplardaki silindir şekilli numunelerin basınç dayanımlarına geçişte kullanılması gerekli korelasyon (geçiş) katsayıları aşağıdaki Çizelge'de verilmektedir. Bu çalışmamızda da (150x300) mm silindir numuneden (250x500) mm silindir numuneye geçişte aşağıdaki değere yakın bir dönüşüm katsayısı elde edilmiştir.

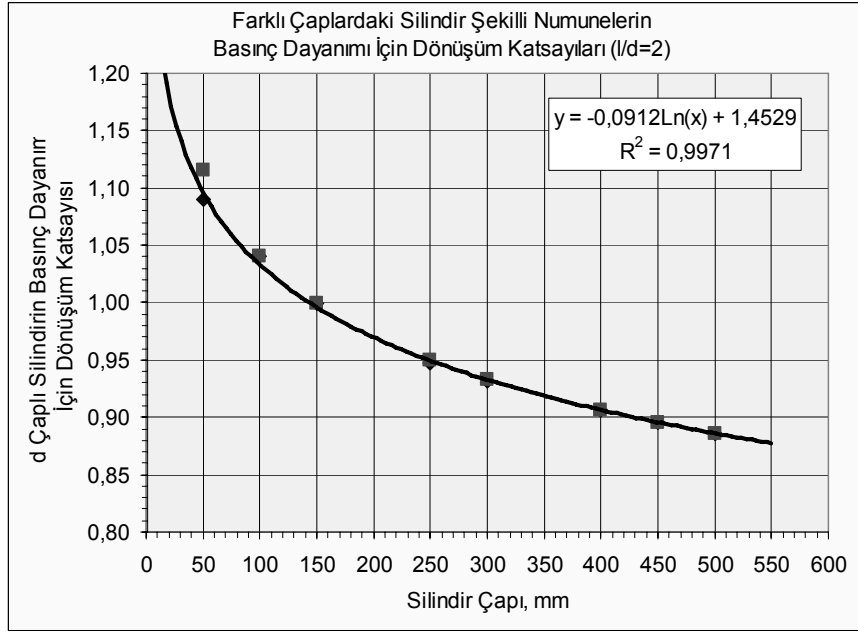
Çizelge 6 - L/D oranı 2 olan silindir şekilli beton numuneler arası dönüşüm katsayıları.

Numune Çapı, mm	Kim ve Eo, 1990 Göre Dönüşüm Katsayısı	Popovics, 1998 Göre Dönüşüm Katsayısı
50	1,09	1,12
100	1,04	1,04
150	1,00	1,00
250	0,95	0,95
300	0,93	0,93
400	0,91	0,91
450	0,90	0,90
500	0,89	0,89

Not - Her iki durumda da agrega en büyük tane boyutunun etkisi dönüşüm katsayısının içerisinde düşünülmüştür.

Bu Çizelgede gösterilen veri grafik üzerine taşındığında ise aşağıdaki gibi bir ilişki gözlenmektedir. Literatürde de bu tür bilgiler fazlasıyla mevcuttur. Tam ölçekli kütle betonu deneyleri esnasında (15x15x15) cm'lik küp şekilli beton numuneler de ıslak eleme yöntemi ile alınarak mukavemetleri değerlendirmeye alınmıştır. Küp numune ile silindir şekilli numune arasında ise aşağı yukarı sabit bir

katsayı elde edilmiştir. Bu çalışmada (15x30) cm'lik silindir şekilli numune dayanımının (15x15x15) cm'lik küp şekilli numune basınç dayanımına dönüşümünde (15x30) cm'lik silindir numune dayanımının **1,15** değeri ile çarpılması yeterli olmaktadır. Aşağıda Şekil 3'den yararlanarak farklı çaplara sahip L/D oranı 2 olan silindir numuneler arasındaki geçiş katsayıları grafik ortamından da elde edilebilir.



Şekil 3 - Yukarıda Çizelge 6'da verilen numuneler arası geçiş katsayılarının grafik ortamına aktarılması ile aşağıdaki gibi bir ilişki elde edilmektedir.

Grafik üzerinden görüleceği üzere 150 mm çaplı numune için dönüşüm katsayısı tam 1,0 olarak okunmalıdır. Diğer bir çapa geçileceği zaman ise o çapa ait dönüşüm katsayısı grafik üzerinden okunur ve 150 mm çaplı numunenin basınç dayanım değeri ile çarpılır. Diğer bir durumda ise, örneğin 250 mm çaplı numuneye ait basınç dayanımı değeri varsa ve 150 mm çaplı numuneye geçilmek istendiğinde 250 mm çaplı numunenin dönüşüm katsayısı grafikten okunarak, basınç dayanım değeri, dönüşüm katsayısına bölünerek 150 mm çaplı numunenin basınç dayanımı bulunmalıdır.

8 SONUÇ

Geçmişte kütle beton tabiri sadece beton ağırlık barajları gibi büyük boyutlu beton yapılar için kullanılmakta idi. Ancak, günümüzde kütle beton teknolojik açıdan termal etki kaynaklı çatlak oluşumlarının olabileceği tüm yapılar için kullanılmaktadır.

Bu tip yapılarda malzeme seçimi ve karışım oranları tasarımı yapılırken dayanıklılık, ekonomi ve termal etkiler ön planda olup, dayanım sıklıkla ikincil derecede ele alınmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonun ekzotermik olması ve açığa çıkan ısının transferi için büyük hacimli betonlarda çok uzun bir süreye ihtiyaç olması nedeni ile oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmektedir. Beton henüz erken yaşlarda iken sıcaklığının yüksek değerlere ulaşması ve

sıcaklık kayıp hızının da bu tip beton yapılarda oldukça düşük olması nedeniyle soğuma çok uzun bir süreyi gerektirmektedir. Soğumanın tamamlanarak çevre sıcaklığına ulaşıncaya kadar ise beton dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Uzun vadede betonun soğuyarak çevre sıcaklığına ulaşılması ile birlikte önemli birim boy değişimleri (kısalmalar) ve dolayısı ile çekme gerilmelerinin oluşumunu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle, yapıda ciddi hasar oluşumlarının önlenmesi, yapısal bütünlüğün bozulmaması, aşırı sızma riskinin önlenmesi, servis ömrünün kısaltılmaması ve estetik olarak da kabul edilemez hasar oluşumlarının meydana gelmemesi için termal etkilerin oldukça dikkatle ele alınması zorunludur. Kütle betonu tasarımında dikkat edilmesi zorunlu şartlar aşağıdadır;

- Düşük hidrasyon ısısına sahip bağlayıcı kullanmak,
- Toplam bağlayıcı miktarını olabilecek en az değerde kullanmak,
- Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığını ön-soğutma sistemleri ile 10-15 °C'ta tutmak,
- Çimento hidrasyon hızını yavaşlatıcı (priz geciktirici) kimyasal ve mineral katkılardan mutlaka faydalanmak,
- Beton elemanın şekli ve büyüklüğünü doğru seçmek,
- Gerektiğinde art-soğutma sisteminin kurulmasını temin etmek,

- Beton merkezinde sıcaklık ile dış yüzey sıcaklığı arasındaki farkın ortalama 20 °C'ü aşmamasını sağlamak,

Hem malzeme yelpazesinin geniş olması ve hem de seçilen malzemelerin karışım oranları belirlenirken çok değişik oranlar ile çalışılabilmesi termal etki, dayanıklılık, dayanım, geçirgenlik, ekonomi vb. özelliklerin tamamının kriterleri sağlanması maksadıyla çok boyutlu karışım oranları tayini yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmalar sonucu hem standard(lar) ve/veya şartname(ler) de belirtilen kriterlerin sağlanması ve hem de optimum karışım oranlarına ulaşılması sağlanabilecektir.

9 KAYNAKLAR

- [1] "Cement and Concrete Terminology" reported by ACI Committee 116R-90, ACI Materials Journal; 1990.
- [2] "Mass Concrete" reported by ACI Committee 207.1R-05, ACI Materials Journal; November 1996.
- [3] "Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete" reported by ACI Committee 221R-96, ACI Materials Journal; May 1996.

YERALTISUYU YAPAY BESLENİMİ

Müfit Şefik DOĞDU

Dr., Hidrojeoloji Yük.Müh., DSİ Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi,
Etüt ve Değerlendirme Şubesi, 06100 Yücepete ANKARA
mufitd@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 13.02.2008, Bildirinin kabul tarihi: 19.03.2008)

ÖZET

Yurdumuza düşen yağışın (~501 km³) 158 km³'lük kısmı akışa geçerek çeşitli büyüklükteki akarsulara, denizlere ve kapalı havzalardaki göllere boşalmaktadır. Ülkemizin yüzey suyu potansiyeli 193 km³'tür ancak bu miktarın ~%51'ini (~98 km³) kullanabilmekteyiz. Geriye kalan ~95 km³'lük suyun da bir şekilde ülke yararına kullanılması gerekmektedir. Özellikle son yıllarda tüm dünyada hissedilen küresel ısınma ve mevsim değişiklikleri ülkemizi de etkilemektedir. Birçok bölgemizde yağış azlığının yanı sıra, aşırı (plansız ve izinsiz) su tüketimi yüzey ve yeraltısularını olumsuz etkilemektedir. Bazı bölgelerde yeraltısuyu ~0,2-0,9 m/yıllık düşümler gözlenmektedir. Yeraltısuyu düşümlerini azaltabilmek sulama sistemlerinin modernleştirilmesi, kaçak (izinsiz) kuyuların önlenmesi ve su tasarrufu ile mümkün olabileceği gibi dünyanın birçok yerinde uygulanmakta olan yeraltısuyu yapay beslenimi ile de mümkündür. Bu çalışmada amaç: doğrudan tatlı su kaynağı/rezervuarı olarak kullanabileceğimiz yeraltısuyunun yapay beslenimiyle ilgili bilgi vermek ve dünyada yaygın olarak kullanılan yeraltısuyu yapay besleniminin ülkemizde de uygulanabilirliği konusunu tartışmaya açmaktır.

Anahtar Kelimeler: Düşüm, yeraltısuyu, yapay beslenme

ARTIFICIAL RECHARGE OF THE GROUNDWATER

ABSTRACT

158 km³ of the total precipitation (~501 km³) of Turkey discharge to the river, sea and lakes in the closed basin. Surface water potential of Turkey is 193 km³ but we can use only ~51% (~98 km³) of it. Remaining amount, which is ~95 km³ of water, must be employed to advantage of country. Global warming and climate changes perceived by all over the world especially in the recent years also affect our country. Beside very low precipitation, excessive (unplanned and unregistered) water use negatively impacts on either of surface and groundwater in many regions. In some regions, ~0.2-0.9 m/year drawdowns are observed at the groundwater levels. It will be possible to lessen of these drawdowns by using of the artificial groundwater recharge which is widely applied in the world beside modernization of irrigation systems, preventing of unregistered wells and savings of water. Aim of that study is giving information about artificial recharge of the groundwater which will able to be used directly as fresh water source and, bringing into sharp relief of the artificial recharge applicability in our country.

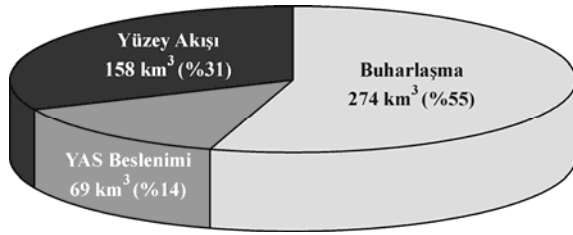
Key Words: Drawdown, groundwater, artificial recharge

1 GİRİŞ

Ülkemizde yıllık ortalama yağış ~643 mm olup, Türkiye'nin yüzölçümü (~780000 km²) göz önüne alındığında ülkemiz üzerine yağışla düşen su miktarı yıllık ortalama ~501 km³'tür (Şekil 1). Bu suyun 274 km³'ü toprak ve su yüzeyleri ile bitkilerden olan buharlaşmalar yoluyla atmosfere geri dönmekte, 69 km³'lük kısmı yeraltısularını (YAS) beslemekte, 158 km³'lük kısmı ise akışa geçerek çeşitli

büyüklükteki akarsular ile denizlere ve kapalı havzalardaki göllere boşalmaktadır [6]. YAS'ı besleyen 69 km³'lük suyun 28 km³'ü kaynaklar aracılığıyla yüzey suyuna tekrar katılmaktadır. Ayrıca, komşu ülkelerden ülkemize gelen yılda ortalama 7 km³ su bulunmaktadır. Böylece ülkemizin brüt yüzey suyu potansiyeli 193 (158+28+7) km³'tür. YAS'ı besleyen 41 (69-28) km³ de dikkate alındığında, ülkemizin toplam yenilenebilir su potansiyeli brüt 234 (193+41)

km³tür. Ancak, günümüz teknik ve ekonomik şartları çerçevesinde, çeşitli amaçlara yönelik olarak tüketilebilecek yüzey suyu potansiyeli yurt içindeki akarsulardan 95 km³, komşu ülkelerden yurdumuza gelen akarsulardan 3 km³ olmak üzere yılda ortalama toplam 98 km³tür. Bu değere ek olarak 14 km³ olarak belirlenen YAS potansiyeli ile birlikte ülkemizin tüketilebilir yüzey suyu ve YAS potansiyeli yılda ortalama toplam 112 (98+14) km³ olmaktadır [6].



Şekil 1 - Ülkemiz üzerine yağışla düşen suyun (501 km³/yıl) dağılımı

2003 yılı itibarıyla sulama sektöründe 29,6 km³, içme suyu sektöründe 6,2 km³, sanayide 4,3 km³ olmak üzere toplam 40,1 milyar m³ su tüketildiği hesaplanmaktadır [6]. Bu durum mevcut yeraltı ve yüzey suyu su potansiyelimizin (112 km³) ancak % 36'sını geliştirebildiğimizi/kullanabildiğimizi göstermektedir.

Yukarıda verilen sayısal değerlerden de anlaşılacağı üzere, ülkemizin yüzey suyu potansiyelinin (193 km³) ancak ~%51'ini (98 km³) kullanabilmekteyiz. Geriye kalan ~95 km³lük suyun da bir şekilde ülke yararına kullanılması gerekmektedir.

Özellikle son yıllarda tüm dünyada hissedilen küresel ısınma ve mevsim değişiklikleri ülkemizi de etkilemektedir. Birçok bölgemizde, özellikle İç Anadolu ve Ege Bölge'sinde yağış azlığı (kuraklık) ve aşırı (plansız ve izinsiz) su tüketimi hem yüzey suları hem de YAS açısından sorunlara yol açmaktadır [5]. Yağış azlığının görüldüğü bu bölgelerde 1980'li yılların başından itibaren kurak dönem hüküm sürmektedir (Şekil 2). Kurak dönemin başlangıcıyla beraber YAS seviyelerinde ~0,2-0,9 m/yıl'lık düşümler gözlenmektedir (Şekil 3).

Bu olumsuz koşullar, kurak dönem periyotlarının uzaması ve/veya YAS'ın bilinçsiz ve izinsiz kullanımından kaynaklanmaktadır. Kurak dönem içerisinde YAS düşümleri azaltabilmek sulama sistemlerinin modernleştirilmesi, kaçak (izinsiz) kuyuların önlenmesi ve halkın su tasarrufuna

yöneldiği ile mümkün olabileceği gibi dünyanın birçok yerinde uygulanmakta olan YAS yapay beslenimi (YYB) ile de mümkündür.

Dünyamızdaki tüm suların %97'si okyanuslarda tuzlu su, %3'ü ise tatlı su karakterindedir [1]. Bu %3'lük az miktarın %87'si buzullarda (doğrudan kullanmadığımız tatlı su), %2'den az miktarı nehir ve göllerde ve %12'si ise yeraltında bulunmaktadır (Şekil 4). Dolayısıyla doğrudan tatlı su kaynağı olarak kullanabildiğimiz suların büyük bir kısmı yeraltında YAS olarak bulunmaktadır.

Bu çalışmada amaç: doğrudan tatlı su kaynağı/rezervuarı olarak kullanabileceğimiz YAS'ın yapay beslenimi ile ilgili bilgi vermek ve dünyada yaygın olarak kullanılan YYB'nin ülkemizde de uygulanabilirliği konusunu tartışmaya açmaktır.

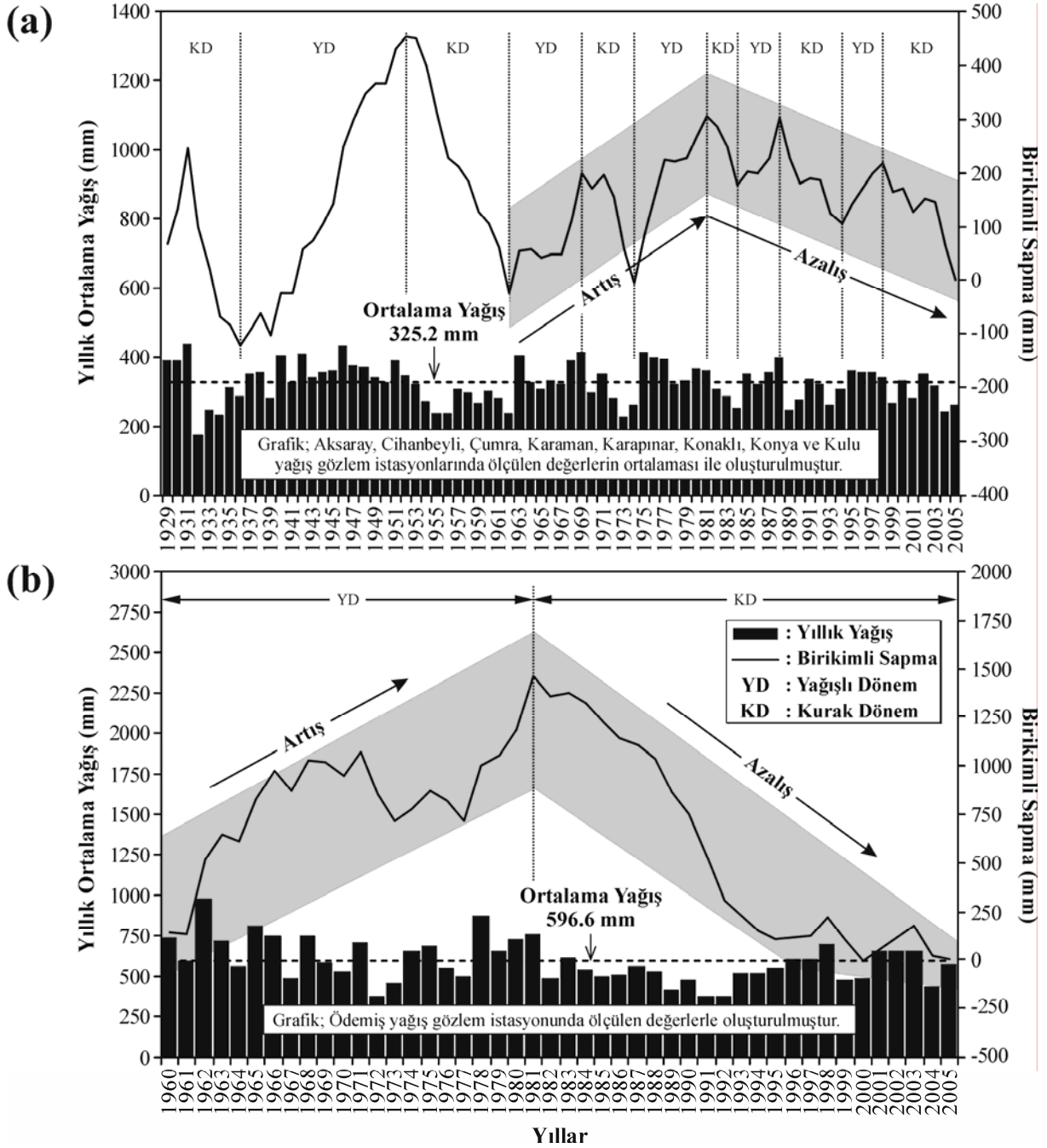
2 YERALTISUYU YAPAY BESLENİMİ

YAS yapay beslenimi (YYB); yüzey sularını havza, baraj, hendek, kanal, oluk, kuyu vb. mühendislik yapı sistemleriyle toplayarak ve bu suyun topraktan yerin derinliklerine süzülmesini sağlayarak gerçekleştirilmektedir [4, 10 ve 11].

YAS'a olan tuzlu su girişimini azaltmak, zemin oturmalarını önlemek, yeraltında su depolamak, suyun toprak ve akiferde süzülmesiyle YAS kalitesini düzeltmek, akiferi taşıyıcı sistem olarak kullanmak ve YAS'ın içme suyu amaçlı kullanılması için yüzey suyundan yararlanmak amacıyla YYB uygulanmaktadır [4]. YAS genel besleme yöntemleri: doğal (natural), artırılan (enhanced), sevklı (induced), rastlantısal (incidental) ve yapay (artificial) beslemedir (Şekil 5).

Doğal (natural) besleme: YAS'ın meteorik kökenli (yağış) doğal beslemesi, toprağa giren su (yağış, dere ve göllerden süzülmeyle giren) ile yüze yakışı ve buharlaşma-terlemeyle çıkan su arasındaki farkla oluşmaktadır. Nemli iklimlerde yağışın %30-50'si, Akdeniz tipi iklimlerde yağışın %10-20'si ve kurak iklimlerde ise yağışın %0-2'si doğal beslenim ile YAS'a katılmaktadır [2, 3 ve 13].

Artırılan (enhanced) besleme: Genelde derin köklü bitkilerle sığ köklü bitkileri değiştirmek veya araziye çıplaklaştırmak, yapraklarıyla yağışı tutan bitkileri değiştirmek vb. gibi bitki yönetimi ile gerçekleştirilmektedir. Örneğin: ormanlık alanlardaki kışın yapraklarını dökmeyen ağaçlarla yapraklarını döken ağaçların değiştirilmesi de artırılan beslemeye katkı sağlamaktadır [9].



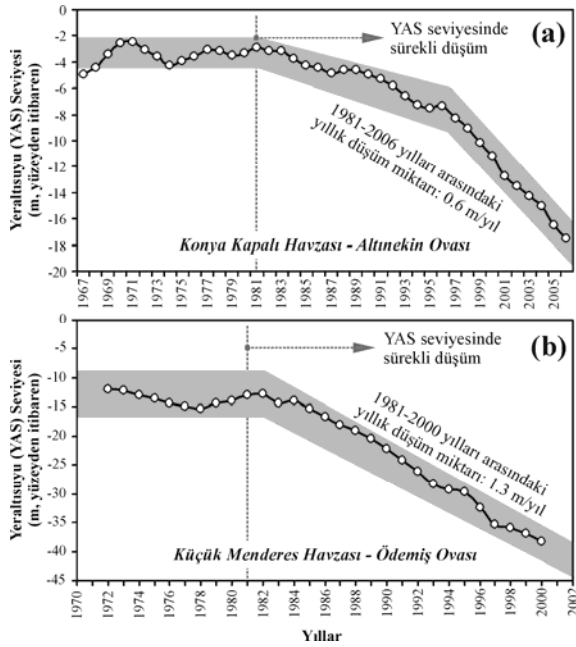
Şekil 2 - a) Konya Kapalı Havzası ve b) Küçük Menderes Havzası'ndaki yağış istasyonlarında ölçülen verilerinden oluşturulan yağış ve birikimli sapma grafikleri

Sevklı (induced) besleme: Kuyuları mümkün olduğu kadar dere yataklarına yakın yerleştirme ile gerçekleşmektedir. Dere yatağına yakın yerdeki su tablasında kuyular ile düşüm sağlanarak dereden akifere daha çok su girmesi sağlanmaktadır. Dere kenarı süzülmesi (riverbank filtration) olarak da adlandırılan bu uygulamanın başlıca amacı: kuyudan sağlanan içme suyu arıtmasından önce, dere suyunun dere yatak sedimanı ve akiferden geçerken ön arıtmaya uğramasını sağlamaktır [7]. Dere kenarı süzülme sistemi Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Almanya'da içme suyunun

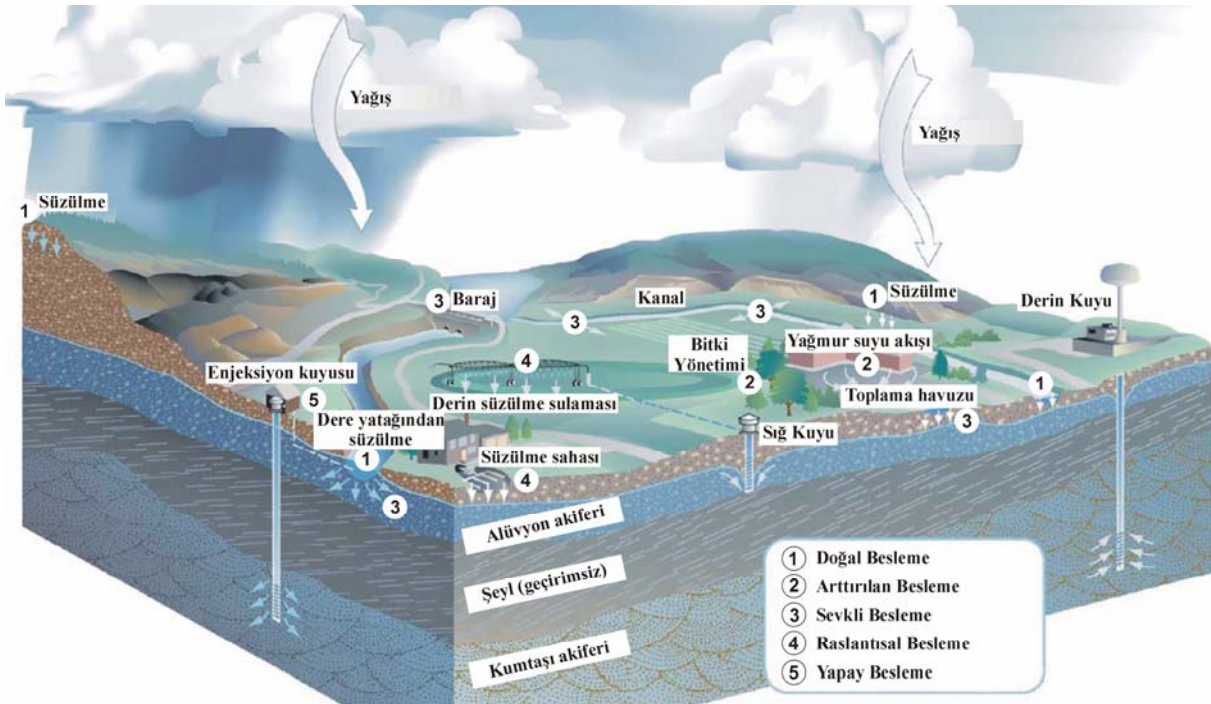
yaklaşık %16'sı, Macaristan'da %40'ı, Finlandiya'da %48'i, Fransa'da %50'si ve İsviçre'de %80'ni dere kenarı süzülme sistemi ile üretilmektedir [12].

Rastlantısal (incidental) besleme: İnsanlar tarafından niyet edilmemesine rağmen gerçekleşen YAS beslemesidir. Bu aktivitelere septik tanklardan kanalizasyon suyu sızması veya sulama alanlarında derine süzülme ile gerçekleşmektedir. Rastlantısal besleme şehirleşmeyle de sağlanmaktadır. Şehirleşmeyle beraber açıklık yüzeyler cadde,

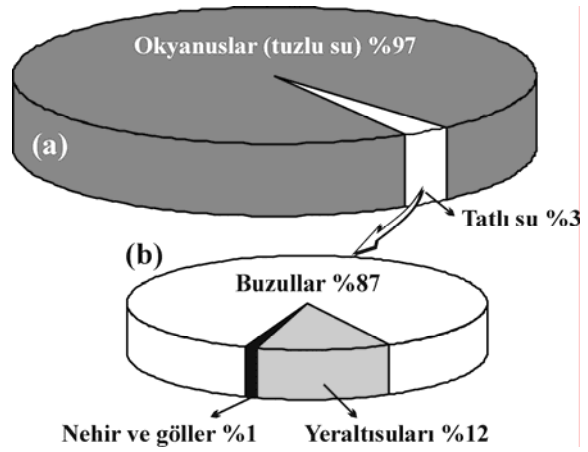
yol, çatı vb. gibi geçirimsiz birimler ile örtülmekte ve bu durum da daha çok yüzey akışına ve daha az buharlaşmaya neden olmaktadır. Bu besleme özellikle yarı kurak bölgelerde oldukça önemlidir. Çok yüzey akışının oluşması ile bu su bir bölgede toplanabilmekte ve buradan sızması sağlanabilmektedir [8].



Şekil 3 - a) Konya Kapalı Havzası ve b) Küçük Menderes Havzası'ndaki bazı ovalarda gözlemlenen YAS seviye düşümleri



Şekil 5 - YAS besleme yöntemleri ([11]'den alınmıştır)



Şekil 4 - Dünyamızdaki a) tüm (tatlı+tuzlu) suların ve b) tatlı suların dağılımı

2.1 Yeraltısu Yapay Beslenme Sistemleri

YAS yapay beslenimi; doymun olmayan bölgedeki toprağın yapısı, akiferin derinliği, projenin amacı vb. gibi nedenlere bağlı olarak birçok yöntemle gerçekleştirilmektedir.

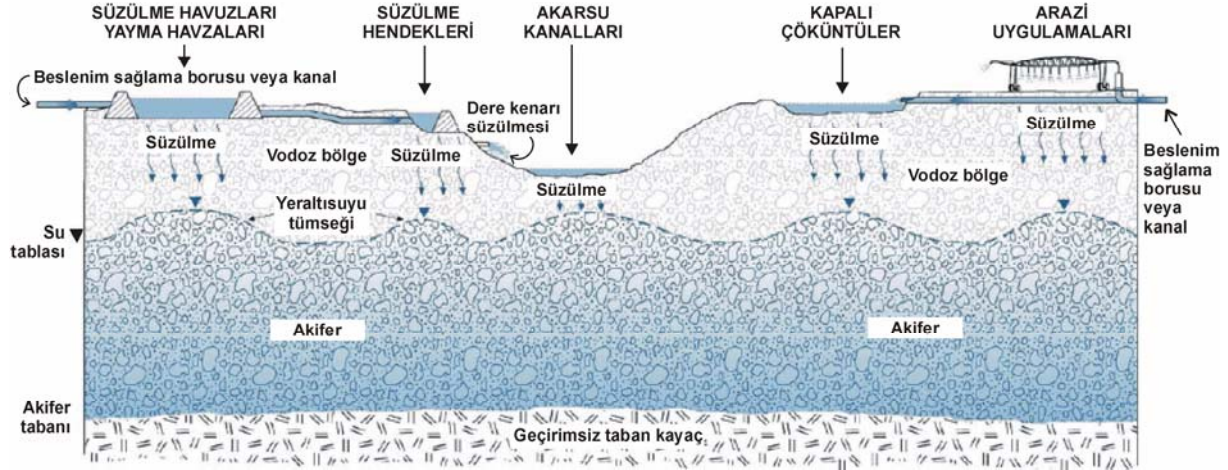
Genellikle YYB yüzey ve yüzey altı yöntemleriyle yapılmaktadır. Yüzey ve yüzey altı yöntemleriyle ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.1.1 Yüzeyden süzülme yöntemleri

Düşük maliyet, basitlik ve düşük işletme ve bakım giderleri nedeniyle YYB'nde genelde yüzey yöntemleri tercih edilmektedir.

Yüzey yöntemlerinin uygulanabilir olması için alanda: geçirimli toprağın olması, su tablasında yeterli derinlikte olması, uygun topografyaya, akiferin üstünde tünek geçirimsi birimlerin olmaması, süzülme engelleyebilecek yüksek miktarda YAS tümseğine neden olmaması için akiferin yeterli hidrolik iletkenliğe ve yatay

uzanıma sahip olması vb. gibi şartların var olması gerekmektedir. Yaygın yüzeyden süzülme yöntemleri: süzülme havuzları, yayma havzaları, süzülme hendekleri, akarsu kanalları (yatakları), kapalı çöküntüler ve bazı arazi uygulamalarını içermektedir (Şekil 6).



Şekil 6 - Yüzeyden süzülme yöntemleri ([11]'den alınmıştır)

Süzülme havuzları/yayma havzaları: Suyu bünyesine almak ve tabanından süzülmeyle akiferi beslemek amacıyla yapılan yapay yapılardır. Çakıl ocakları vb. gibi önceden yapılmış olan kazımlar genellikle besleme havzası olarak kullanılır. Küçük yapılar süzülme havuzları (Şekil 7), büyük yapılar ise yayma havzaları olarak adlandırılır.

Süzülme hendekleri: Kanal veya hendek gibi çizgisel yapılardır ve tabanlarında gerçekleşen süzülme ile akiferi beslemektedirler. Süzülme hendekleri, topografyanın veya yüzeyin süzülme havuzlarının kullanımını imkânsızlaştırdığı bölgelerde de kullanılabilirlerdir.



Şekil 7 - Grabo (İsveç) bölgesinde YYB için önerilen besleme havuzları

2.1.2 Yüzeyaltı süzülme yöntemleri

Yüzeyde ve sıg derinlerde alan toprağın yüzey süzülmesinin uygun olmaması veya yüzeyde

Dere kenarı süzülmesi: Yüzeysuyu kütlesi yakınında yer alan kuyunun kullanımıyla, yüzeysuyu kütlesinden akifere su sağlanmaktadır.

Yukarıdaki yöntemlerin dışında dere yatakları da YAS seviyesinin yükseltilmesi amacıyla süzülme kanalıymış gibi kullanılabilirlerdir. Kapalı çöküntülerde YAS beslenmesinde akiferin beslenme alanlarıymış gibi görülebilmektedir. Bahsedilen bu uygulamalar yüksek düşey hidrolik iletkenliğe sahip topraklar gerektirmektedir. Arazi uygulamaları birçok çeşitte yüzeyden uygulanmaktadır. Uygulama oranı buharlaşma oranından fazla olduğu durumlarda akifer beslenimi gerçekleşmektedir.

yeterli kadar alan olmaması durumunda YYB için yüzeyaltı süzülme yöntemleri kullanılmaktadır. Yüzeğe yakın geçirimsiz toprakları, doymun olmayan bölgedeki asılı geçirimsiz birimleri veya akifer üzerindeki basınçlı ve geçirimsiz tabakayı ortadan kaldırmak ve suya ulaşmak için yüzeyaltı süzülme yöntemlerinde hendek, çukur veya diğer tip kazı yöntemleri kullanılmaktadır. Yüzeyaltı yöntemleri birçok süzülme yöntemlerini içermektedir ki bu süzülme yöntemlerini doymun olmayan bölgede, YAS tablasının hemen üzerinde gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra yüzeyaltı yöntemleri doğrudan akifere yapılan su enjeksiyon yöntemlerini de içermektedir (Şekil 8).

Süzülme hendek ve galerilerinde: Delikli borularla ve geçirimli malzemelerle donatılmış kazılmış kanallar kullanılmaktadır. Hendekler, süzülmenin tam olabilmesi için genellikle sığ geçirimsiz toprak veya asılı geçirimsiz birimleri de kaplayacak şekilde kazıma ile inşa edilir.

Hendek sistemlerinin üzeri park yeri oluşturma, spor sahası açma vb. gibi aktiviteler için kapatılır. Süzülme galerileri birden çok hendekten oluşmaktadır.

Kuru kuyular: Doymun olmayan bölgede, su tablası yakınına kadar açılmış olan kuyulardır. Hendek sistemlerini kullanmanın mümkün olmadığı derinliklerde tercih edilen bir yöntemdir.

Süzülme şaftları: Kuyulara göre daha geniş kazılırlar ve kuyularda olduğu gibi su tablasına kadar uzanırlar.

Süzülme çukurları: Süzülme şaftlarına benzerler fakat süzülme çukurlarının çapları şaftlara göre daha büyüktür ve dairesel şekilde de olmayabilir.

2.1.3 Doğrudan enjeksiyon yöntemi

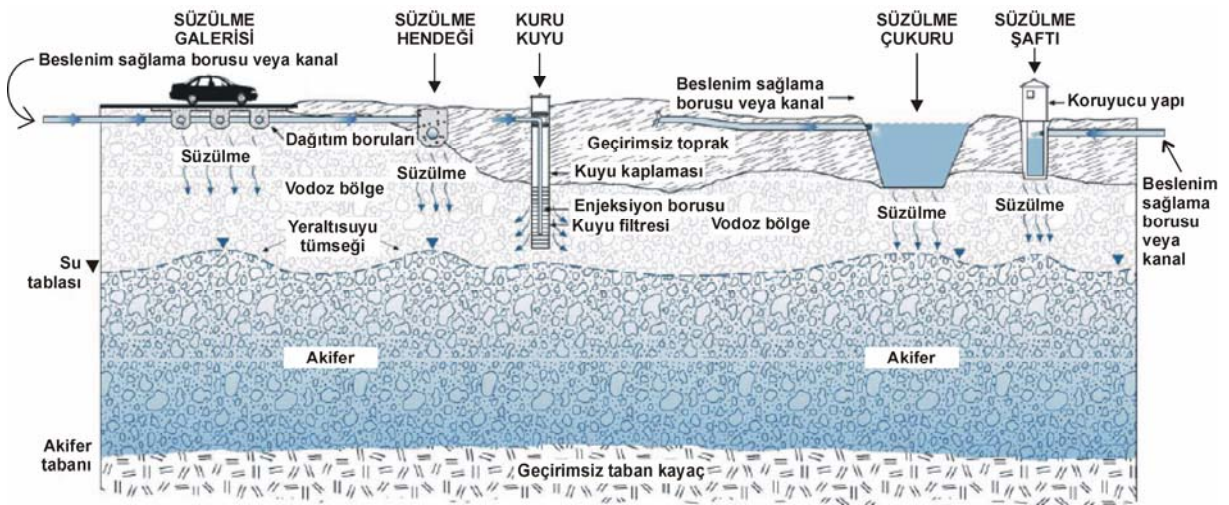
Doğrudan enjeksiyon yöntemi; dikey, radyal ve yatay enjeksiyon kuyularıyla beraber akiferde depolama ve geri alım (ADGA) kuyularını kapsamaktadır (Şekil 9).

- **Doğrudan enjeksiyon yöntemi:** Dikey, radyal ve yatay enjeksiyon kuyularıyla beraber akiferde depolama ve geri alım (ADGA) kuyularını kapsamaktadır (Şekil 9).

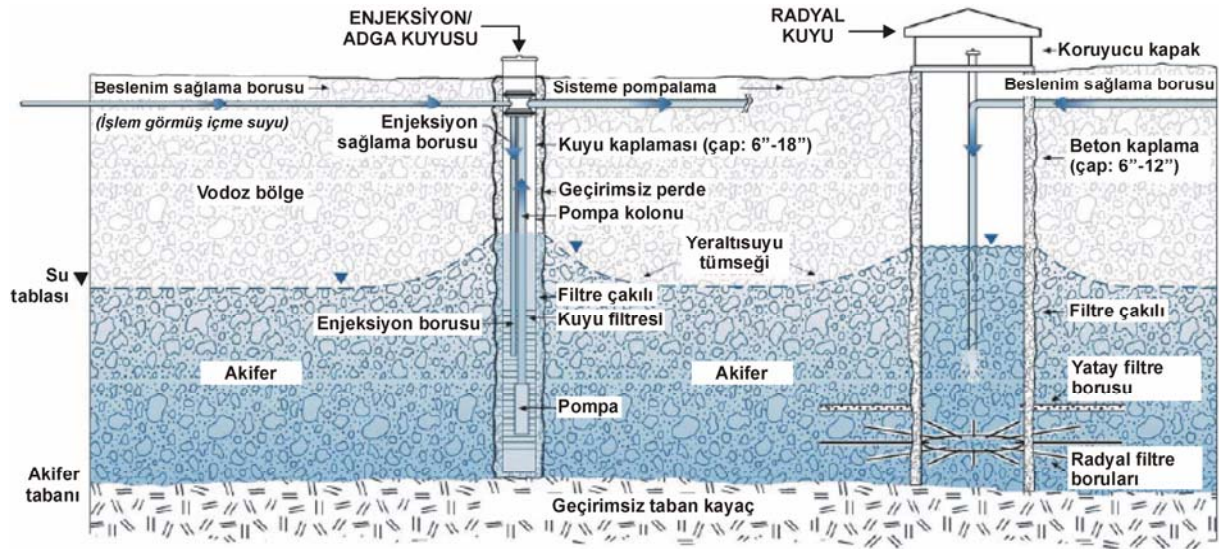
Enjeksiyon kuyusu akiferin doymun kısmına kadar uzanmaktadır ve böylece akiferin doğrudan beslenmesi mümkün olabilmektedir. Enjeksiyon kuyuları; beslenim suyunun akifere ulaşım zamanını en aza indirmesinin yanı sıra, yüzeyden beslenim yöntemlerinin tersine, su ve doymun olmayan bölgede gerçekleştirilecek istenmeyen kimyasal reaksiyonları da en aza indirmektedir. Enjeksiyon kuyuları dikey, radyal (yatay toplayıcı kollar kullanarak) veya değişik sondaj teknikleri ile yatay olarak açılmaktadır. Yatay kuyular YYB'de doğrudan enjeksiyon için kullanılmaktadır. Yatay kuyular uzun zamanlardan beri kullanılmaktadır. Son yıllara kadar birçok filtreli, geniş çaplı ve radyal şekilli yatay kuyu bulunmaktaydı. Bu kuyular genellikle yatay toplayıcı kuyular olarak adlandırılmaktadır. Toplayıcı kuyular, filtre alanını arttırdıkları için ince akiferlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, toplayıcı kuyular, kazılması ve bakımı pahalı olduğu için yaygın olarak kullanılmamaktadır.

- Akiferde Depolama ve Geri Alım (ADGA)

Yöntemi: Enjeksiyon kuyuları kullanılarak akiferde su depolamak için kullanılmaktadır. Kullanılan su genelde işlem görmüş içme suyudur. Su, aynı kuyu kullanılarak, hem akiferde depo edilir hem de akiferden çekilir. ADGA yöntemi genellikle basınçlı akiferlerde kullanılır.



Şekil 8 - Yüzealtı süzülme yöntemleri ([11]'den alınmıştır)



Şekil 9 - Doğrudan enjeksiyon yöntemleri ([11]'den alınmıştır)

2.2 Yeraltısuyu Yapay Beslenimi İçin Gerekli Çalışmalar

Bir alanda YYB'nin yapılması düşünülüyorsa, o alanda aşağıda ana başlıkları ile verilmiş olan çalışmaların ve incelemelerin yapılması gerekmektedir.

1- Beslenim alanının belirlenmesi: Beslenim planının ilk basamağı beslenim alanının sınırının belirlenmesidir. Beslenim alanı mikro havzalar için 20-40 km², küçük havzalar için 0,4-0,5 km² büyüklüğünde olabileceği gibi bir köyün ihtiyacını karşılayabilecek boyutta da olabilmektedir. Her durumda, beslenim alanının sınırını belirlemek için aşağıdaki kriterler göz önüne alınmalıdır.

- Aşırı çekim nedeniyle YAS seviyesinin düştüğü yerler,
- Akifer(ler)in önemli miktarda su kullanılan bölgelerindeki su seviyesinin yükseltilmesi,
- Kurak aylarda yeterli su alamayan kuyu veya tulumba ile çalışan keson kuyuların bulunduğu yerler,
- YAS kalitesinin kötü olduğu yerler.

2- YYB için su kaynaklarının belirlenmesi: Beslenim projesine girişmeden önce, beslenim için kullanılabilir su miktarının değerlendirilmesi/belirlenmesi gerekir. Aşağıda verilenler beslenim için kullanılacak suyun başlıca kaynaklarıdır.

- Sınır belirlenen beslenim alanına düşen yağış,
- Geniş çatılı alanlara düşen yağış (bu yapıların üzerine düşen yağış toplanıp beslenim alanına yönlendirilebilmektedir),
- Büyük rezervuarlardan beslenim alanına kanallarla su taşınımı,

- Dere ve akarsulardan akımın fazla olduğu zamanlarda beslenim alanına su aktarımı,
- Uygun yöntemlerle artılmış evsel ve sanayi atık sularıdır (bu sular, YAS kalitesini bozmayacağından emin olunduktan sonra kullanılmalıdır).

Arazinin her noktasının belli aylarda yağış alması mümkündür fakat bu besleme işlemi için yeterli olmayabilir. Bu durumda YYB için gerekli su beslenim alanına aktarılmalıdır. Bu suyun sağlanması bazı faktörlere bağlıdır. Bunlar: a) sağlanacak suyun miktarı, b) suyun ne kadar süre sağlanacağı, c) sağlanacak suyun kalitesi ve önceden bir işleme tabi tutulup tutulmayacağı ve d) suyu besleme alanına getirecek iletim sistemi.

3- Toprağın sızma kapasitesinin belirlenmesi: Toprağın sızma kapasitesi vadoz (doğun olmayan) bölgenin doğun hale getirilmesi ve akiferin beslenimi için önemli bir faktördür. Bu nedenle, alanda toprağın sızma kapasitesini belirlemek için değişik noktalarda sızma deneyleri yapılmalıdır. Böylece beslenim alanındaki toprağın sızma kapasitesi belirlenebilir ve ne kadar zamanda ne kadar suyun akifere süzüleceği hesaplanabilir.

Bölgedeki akiferin beslenime uygun olup-olmadığı ise akiferin depolama katsayısının büyüklüğüne bağlıdır. Depolama katsayısının büyüklüğü ise porozite ve permeabilitenin büyüklüğüne bağlıdır. Yüksek permeabilite, düşük permeabiliteye sahip bölgelerdeki yüzey altı akışı nedeniyle beslenim suyu kaybına neden olmaktadır. İyi bir beslenim oranı ve beslenim suyunun akifere kayıpsız ulaşması için ortalama bir permeabilite değerine ihtiyaç vardır. Eski alüvyonlar, gömülü kanallar,

alüviyal fanlar, kumluk yerler, buzul çökelleri besleme alanları için uygun bölgelerdir. Kayalık alanlarda ise kırıklı-çatlaklı ve boşluklu-mağaralı kayalar yüksek su alışı-emiş kapasiteleri ile önemlidir.

4- Hidro-Meteorolojik çalışmalar: Hidro-meteorolojik çalışmalar; besleme bölgesindeki yağış paterninin, buharlaşma-terleme kayıplarının ve yüzeysel akış miktarının belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Elde edilen hidro-meteorolojik verilerin kullanılmasıyla, YAS beslemesine ne kadar su verileceği ve besleme yapısının (besleme havuzu vb.) ne boyuta olacağı gibi konulara karar verilmektedir. Hidro-meteorolojik çalışmalarda dikkat edilecek başlıca faktörler:

- Son on yıl süresince minimum yıllık yağış değeri,
- Yağışlı dönemdeki yağışlı gün sayısı ve her bir yağışın süresi,
- Her bir yağışın miktarı,
- 3 saatlik, 6 saatlik vb. gibi sürelerde yağış şiddeti ve sellenmeye neden olan yağış şiddeti ve miktarı.

5- Hidrojeolojik çalışmalar: Besleme yapılacak ve projenin uygulanacağı alanının tam yerinin, hangi tip yapının (besleme havuzu vb.) inşa edileceğinin ve alanın hidrojeolojik özelliklerinin tam belirlenebilmesi için yapılmaktadır. Besleme projesi için aşağıdaki kriterler göz önünde bulundurulmalıdır:

- Ayrıntılı bilgiler ve haritalar:
 - Proje alanındaki su taşıyan sığ ve derindeki hidrojeolojik birimler,
 - YAS seviyesinin ve YAS'ın yüzey suları (göl, dere, kanal vb.) ile ilişkisinin belirlenmesi amacıyla YAS kontur haritaları,
 - Yüzeysel su tablasına olan en çok, en az ve ortalama derinlikler,
 - YAS salınımlarının (fluctuations) büyüklüğü,
 - Derin akiferlerdeki piyezometrik yükler ve bunların zamanla değişimi,
 - Değişik hidrojeolojik birimlerin YAS potansiyelleri, seviyeleri ve
 - Değişik akiferlerdeki suların kimyasal kalite bilgilerini içermelidir.
- YYB projelerinde her alanın kendine özgü karakteristikleri projeyi etkilemektedir. Bu nedenle aşağıda verilmiş olan bilgiler daha önce açılmış olan kuyu bilgilerinden elde edilmelidir.
 - Yüzeyin 3 m aşağısına kadar olan yerde doygun olmayan bölgenin kalınlığı belirlenmelidir. YYB'nin gerçekleşmesi için ilk olarak bu bölgenin doygun hale

getirilmesi gerekmektedir (bu bölge vadoz zon olarak da bilinmektedir).

- Doymun olmayan bölgenin en üstteki 3 m'lik bölümü besleme için düşünülmemelidir. Çünkü burası su tıkanıklığı, toprağın tuzlanması vb. gibi olaylar nedeniyle çevresel etkiler açısından ters etki gösterebilmektedir.
- Yağışlardan sonraki YAS'a kadar olan derinlik besleme için en az vadoz zon kalınlığını temsil etmektedir.

6- Jeofizik çalışmalar: Bu çalışmalar pahalı, zaman alan, yüksek beceri/tecrübe ve özel aletler isteyen çalışmalardır. Dolayısıyla bu gibi çalışmalar yerel/köy seviyesinde değil büyük projelerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmaların başlıca amacı, yüzeyaltı hidrojeolojik koşulların ekonomik, yeterli ve şüpheye yer vermeyecek şekilde belirlenmesi ve uygun suni besleme alanının seçilmesidir. Bunun yanı sıra jeofizik çalışmalar tuzlu su-YAS girişimini ve kirletilmiş (tuzlu) bölgeyi belirlemede de oldukça faydalı bilgiler vermektedir. Belirli jeofizik yöntemler kullanılarak elde edilen bilgilerle aşağıdaki süreçleri modellemek mümkündür.

- Akifer sisteminin stratifikasyonu ve karakteristik zonların hidrolik iletkenliğinin konumsal değişimi,
- Doymun ve doymun olmayan zonda olumsuz veya düşük hidrolik iletkenlik değeri nedeniyle verimsiz bölgeleri,
- Dayk ve fay zonu gibi yerlerde olabilecek düşey yündeki hidrolik iletkenlik değişimleri,
- Doymun olmayan zondaki nem hareketi ve bu bölgenin sızma kapasitesi,
- Doğal veya yapay besleme koşulları altındaki YAS akım yönü.

Değişik çekim (pompaj) ve besleme koşullarında akifer içinde tuzluluk değişimi, eğilimi, süresi ve tuzluluğun derinlik değişimi gibi süreçler de modellenmektedir.

7- Besleme suyu kalitesini belirleme çalışmaları: Bu çalışmalar ile belirlenmek istenen besleme suyunun kimyasal karakteristiği ve sediman yüküdür. YYB'nde başlıca problemlerden biri besleme suyu olarak kullanılacak suyun kimyasal kalitesidir ve genellikle besleme suyuna bir kimyasal iyileştirme uygulamak gerekmektedir. Bu nedenle besleme suyunun ve besleme yapılacak olan YAS'ın kimyasal ve bakteriyolojik analizinin yapılması zorunludur. Kimyasal özelliğin yanı sıra projede kullanılacak olan besleme suyunun siltsiz olması gerekmektedir. Silt, suda çözünmeyen katı

madde olarak adlandırılabilir ve genellikle mg/l cinsinden ölçülür. Silt, durgun suda ve/veya akışı çok yavaş (<0,1 m/saat) olan suda çökelir ve bu da besleme alanındaki üst sedimanlarda tıkanmaya sebep olabilir.

3 SONUÇ

Ülkemizin bazı bölgelerinde 1980'li yıllardan günümüze dek süren bir kurak dönem yaşanmaktadır. Bu kurak dönem yüzey sularının yanı sıra yeraltısularını da olumsuz yönde etkilemektedir. Oldukça uzun bir periyot sayılabilecek bu kurak dönem ve bununla birlikte izinsiz (kaçak) kuyulardan yapılan çekimler de yeraltısuyu seviyelerini olumsuz etkilemiştir. Kurak dönem etkisi ve izinsiz kuyulardan yapılan su çekimleri ile bazı bölgelerimizde yeraltısuyu seviye düşüm hızı 0,2-0,9 m/yıl gibi değerler göstermektedir ki bu durum yeraltısuları açısından büyük bir risk oluşturmaktadır.

Ülkemizin yüzey suyu potansiyelinin (193 km³) ancak ~%51'ini (98 km³) kullanabilmekteyiz. Geriye kalan ~95 km³lük suyun da bir şekilde ülke yararına kullanılması gerekmektedir. Kış aylarında sulama yapılmaması ve kış aylarında yüzey sularında (akarsu ve derelerde) daha fazla akış olması nedeniyle yeraltısuyu seviye düşümlerinin azaltılması için doğrudan tatlı su kaynağı/rezervuarı olarak kullanabileceğimiz yeraltısuyunun yapay beslenimi ile ilgili çalışma ve araştırmalar başlatılmalıdır.

Sulama sistemlerinin modernleştirilmesi (damla sulama vb.) ve ruhsatsız su kuyularının önüne geçilmesinin yanı sıra, dünyada yaygın olarak kullanılan yeraltısuyu yapay besleniminin ülkemizde de uygulanmasıyla yeraltısuyu seviyelerinde gözlenen aşırı düşümün azaltılabileceği düşünülmektedir.

4 KAYNAKLAR

- [1] Bouwer, H., 1978, *Groundwater Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 480 pp.
- [2] Bouwer, H., 1989, *Estimating and Enhancing Groundwater Recharge*, In: Sharma M.L. (ed.) *Groundwater Recharge*, Balkema, Rotterdam, pp. 1-10.
- [3] Bouwer, H., 2000, "The Recharge of Groundwater", Proc. Natural Recharge of Groundwater Symposium, 2 June 2000, Tepme, Arizona, USA, Arizona Hydrol. Soc., pp. 89-95.
- [4] Bouwer, H., 2002, "Artificial Recharge of Groundwater: Hydrogeology and Engineering", *Hydrogeology Journal*, 10: 121-142.

- [5] Doğdu, M.Ş., Toklu, M.M. ve Sağnak, C., 2007, "Konya Kapalı Havzası'nda Yağış ve Yeraltısuyu Seviye Değerlerinin İrdelenmesi", I. Türkiye İklim Değişikliği Kongresi-TİKDEK 2007, Bildiriler Kitabı CD'si (Editörler: A. Öztopal ve Z. Şen), 11-13 Nisan 2007, İTÜ Maslak Kampüsü Kültür ve Sanat Birliği Salonu, s. 394-401, İstanbul.
- [6] DSİ, 2007, Toprak ve Su Kaynakları, <http://www.dsi.gov.tr/topraksu.htm> (erişim tarihi: 15.08.2007).
- [7] Kühn, W., 1999, Overview of Riverbank Filtration Conference, Louisville, Kentucky, USA, sponsored by Natural Water Resources Institute, Fountain Valley, California, pp. 1-4.
- [8] Lerner, D.N., 2002, "Identifying and Quantifying Urban Recharge": A Review, *Hydrogeology Journal* (in pres), DOI 10.1007/s10040-001-0177-1.
- [9] Querner, E.P., 2000, "The Effects of Human Intervention in The Water Regime", *Groundwater*, 38: 167-171.
- [10] SEWRPC (Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission's Report), 2007, Chapter VI - Artificial Groundwater Recharge and Management (Report No: 43, 43 pp.), http://www.sewrpc.org/watersupplystudy/pdfs/tr-43_chapter-06_preliminary_draft.pdf (erişim tarihi: 15.08.2007).
- [11] Topper, R., Barkmann, P. E., Bird, D. A. and Sares, M. A., 2004, Artificial Recharge of Ground Water in Colorado - A Statewide Assessment, Environmental Geology 13, Colorado Geological Survey Department of Natural Resources, Denver-Colorado, USA.
- [12] Tufenkji, N., Ryan, J.N. ve Elimelech, M., 2002, "Bank Filtration", *Environmental Science and Technology*, 36(21): 422A-428A.
- [13] Tyler, S.W., Chapman, J.B., Conrad, S.H., Hammermeister, D.P., Blout, D.O., Miller, J.J., Sully, M.J. and Ginanni, J.M., 1996, "Soil-water Flux in The Southern Great Basin, United States: Temporal and Spatial Variations Over The Last 120000 years", *Water Resources Research*, 32(6): 1481-1499.

GEÇİRİMLİ ZEMİNE OTURAN SU ÇEVİRME (REGÜLATÖR) YAPILARI

Şefik COFCOF
İnşaat Yüksek Mühendisi, DOLSAR Müh. Ltd. Şti. ANKARA
dolsar@dolsar.com.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 04.03.2008, Bildirinin kabul tarihi: 18.03.2008)

ÖZET

Su çevirme yapıları, akarsulardan istenilen debinin sulama ve/veya enerji amaçlı su iletim kanallarına derivasyonunu sağlarlar. Bu yapılar çoğu defa alüvyon (geçirimli) zemin üzerine oturmaktadır. Bunların devrilme, kayma ve alttan kaldırma stabilite tahkikleri ve zeminin taşıma kapasitesine ilaveten temelin dengesinin korunması için zemin içinde suyun sızma (sürükleme) hızı ve dolayısıyla borulanma durumunun da titizlikle incelenmesi gerekmektedir. Bu durum (He) efektif yükün (mamba ve mansap su seviyeleri arasındaki fark) büyüklüğüne göre önem arz etmektedir. Geçirimli zemine oturan su çevirme yapılarında suyun zemin içindeki sürükleme hızı ve borulanma durumu, yeterli uzunlukta yapılacak mamba ve mansap platformları ve teşkil edilecek geçirimsizlik perdeleri ile kontrol altına alınmaktadır. Bu makalede geçirimli zemine oturan iki su çevirme yapısı ele alınmıştır. Bunlardan birinde dolu gövdeli diğerinde ise kalın alüvyon tabakası üzerine oturan kapaklı su çevirme yapıları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geçirimli zemin, su çevirme yapıları, regülatör

DIVERSION DAMS ON PERMEABLE FOUNDATION

ABSTRACT

Diversion dams (weirs) divert the required discharge of water into an irrigation and/or power canal. These structures usually constructed on permeable foundations. In addition to stability analysis against overturning, sliding, uplift, bearing capacity and settlement of soil, also seepage through foundation should be analyzed carefully in order to prevent piping. The importance of seepage depends on the difference of water level between upstream and downstream. (He: effective head). The seepage and piping phenomenon can be controlled by cut off walls having enough depth, and concrete slab platforms have enough length at upstream and downstream of the structure. To illustrate the problem mentioned above, two examples are given for the diversion dam on permeable foundation in the paper. One of them is gravity spillway, the other one is radial gated spillway.

Key words: Permeable foundation, diversion dams, weirs

1 GİRİŞ

Su çevirme yapıları, akarsularda suyun kabartılarak enerji veya sulama kanalına istenilen debinin derivasyonunu sağlarlar. Son yıllarda ülkemizde nehir ve kanal santralleri inşaatlarının hızla arttığı görülmektedir. Depolamasız olan bu tesislerden, su iletim hattına (kanal, tünel) çevrilen su yükleme havuzundan cebri boruyu beslemekte ve türbinlendikten sonra, çevrilen debiye ve kazanılan düşüye bağlı olarak hidroelektrik enerji üretilmektedir. Kanal santrallerinde üretilen enerjinin paterni (firm ve sekonder)

tamamen çevirme kapasitesi ve akarsuyun rejimine bağlıdır. Bunun için su çevrim eksenine için hazırlanan debi-süreklilik eğrisinden yararlanılmaktadır. Özetle, akarsulardan yapılacak derivasyonla tesis edilecek kanal santralleri ve sulama projeleri için su çevrim yapıları kilit tesis ve daimi yapı özelliği taşımaktadır. Su çevrim yapılarının oturduğu bazı zeminler aşağıda verilmiştir:

- Kaya,
- Geçirimli (kum-çakıl) alüvyon,
- Killi, siltli ve çamur gibi zayıf zeminler.

Kaya temeller en iyi temel yapısını oluşturmakla birlikte muhtemel fay zonlarından kaçınılması ve yamaçlar dahil kaya çatlaklarının enjeksiyonla ıslah edilmesi gerekmektedir.

Bu yazının konusunu teşkil eden geçirimli (alüvyon) zemin üzerine oturan su çevirme yapıları için bu tip zeminler genelde stabilite sorunu getirmezler. Ancak kabartılan suyun yüksekliğine (efektif yüke) bağlı olarak temel zemini içinde meydana gelecek borulanmaya ve alttan kaldırmaya karşı güvenliğin sağlanması için gerekli önemlerin alınması önem arz etmektedir. Bu amaçla, memba ve mansap platformlarının uzunluğunun artırılması ve efektif yüke bağlı olarak geçirimsizlik perdesi teşkili ile gerekli sızma boyunun temin edilmesi gerekmektedir.

Kil ve çamur zemine oturan temeller derin ve keson temel gibi özel önlemler gerektiren en pahalı yapılardır.

Çevirme yapıları dolu gövde veya kapaklı tipte yapılırlar. Dolu gövdeli tipte taşkın halinde su seviyesinin kontrolü mümkün olmadığından membada taşkın zararları ve kamulaştırma sorunları ile karşılaşılır. Kapaklı tipte ise su seviyesi kontrol altındadır. Bırakılacak sediment mansaba atılır. En önemli husus kapak işletmesinin dikkatli ve kontrollü olarak yapılarak taşkınların zarar vermeden mansaba savılmasıdır.

2 GEÇİRİMLİ ZEMİNE OTURAN SU ÇEVİRME YAPILARININ STABİLİTE ANALİZİ

Çevirme yapıları çoğu defa alüvyon (geçirimli zemin) üzerine oturmaktadır. Geçirimli temel üzerine oturan bu yapılarda temel zeminin erozyonu, oturma durumu ve taşıma kapasitesi ile yapının altında meydana gelen sızma problemlerinin çok iyi etüt edilmesi gerekmektedir. Bu problemler yeterli uzunlukta teşkil edilecek memba ve mansap platformları ve geçirimli zemine saplanan perde duvarları ile çözüme kavuşturulmaktadır. Memba platformu bir taraftan sızma uzunluğunu artırırken diğer taraftan alttan kaldırma kuvvetini azaltmaktadır. Mansap platformu ise aynı şekilde sızma uzunluğunu artırır ve ayrıca akımın enerjisini kırılmasını sağlar.

Zemin içindeki akış hızının ince donelerin (silt ve ince kum gibi) sürüklenme hızından küçük olması gerekmektedir. Bu akış hızı çok yavaş ise mansapta çıkan su berraktır. Çıkışta su bulanık ise, kaynama varsa, sürüklenme vardır.

Şekil 1. de bir çevirme yapısının şematik planı verilmiştir.

Darcy kanununa göre zemin içindeki suyun akış hızı aşağıdaki eşitlik ile verilmiştir:

$$v = ki$$

Burada;

v Suyun süzülme (sızma) hızı

k Zeminin permeabilitesi

i He/L hidrolik eğimdir (He: hidrolik yük, L: süzülme uzunluğu).

Suyun hızı hidrolik yükle doğru süzülme yolu ile ters orantılıdır. Bu su hızının, kritik değer (sürüklenme hızının) altında olması gerekmektedir. Bunu temin edebilmek için çevirme yapısının memba ve mansap taraflarında yeterli uzunlukta beton platformlar ve efektif yüke bağlı olarak yapı eksenine boyunca temelde geçirimli zemine ve devam ederek yamaçlara saplanan sızdırmazlık perdeleri teşkil edilmelidir. Şüphesiz su çevirme yapılarının bağlandığı yamaçların da sızdırmazlığının sağlanması önemli olup yapının bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir.

Darcy kanununa göre sızma miktarı ise:

$$Q = k \frac{He}{L} A$$

Q Sızma miktarı (m³/gün),

k Zeminin permeabilitesi (m/gün),

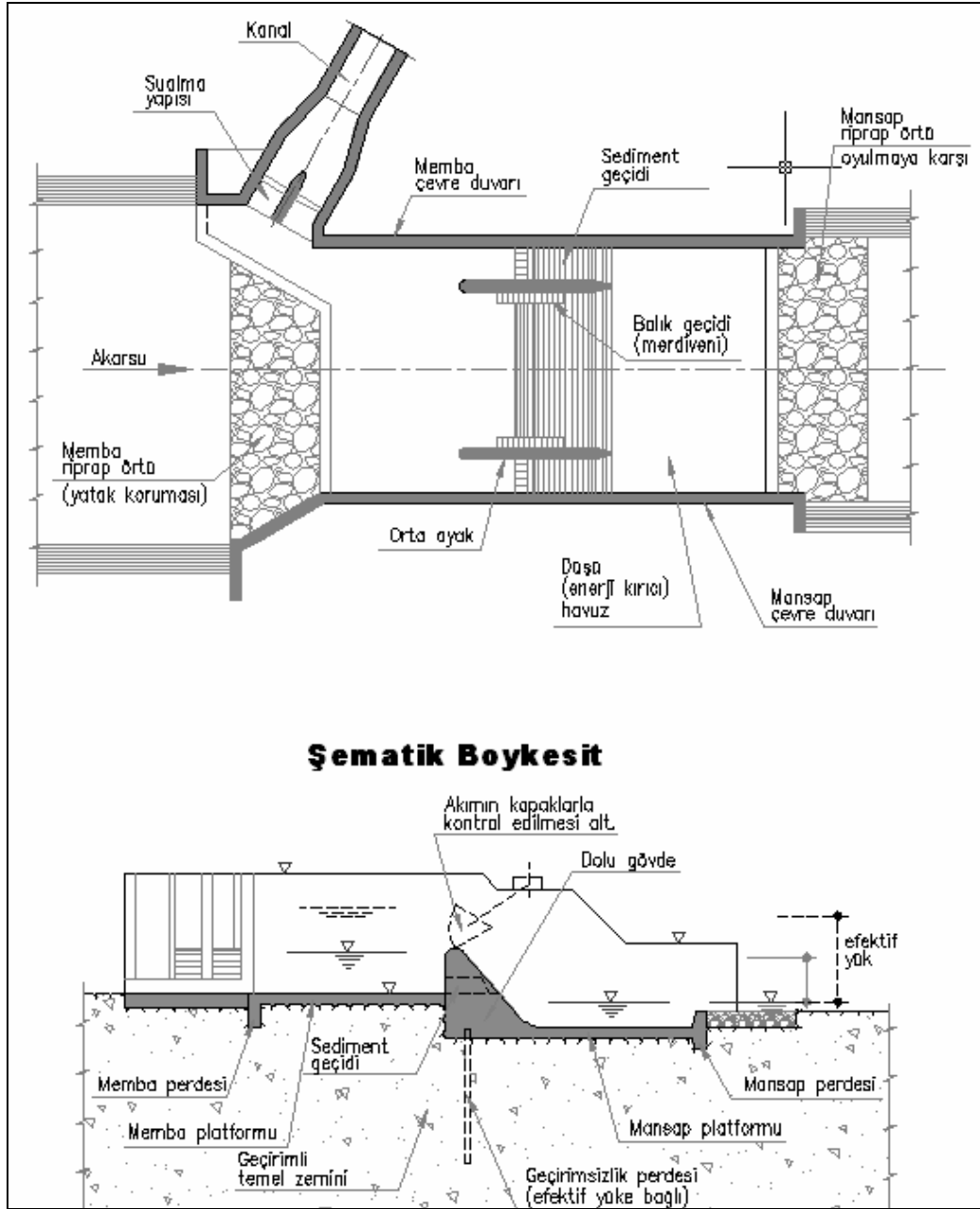
He Efektif yük (mimba ve mansap su seviyeleri arasındaki fark),

L Süzülme yolu uzunluğu (m),

A Süzülme alanıdır (m²).

Yıkılmaya sebep olan aşağıdaki hususlar üzerinde önemle durulması gerekmektedir.

- Alttan kaldırma kuvveti; devirici momenti artırır ve yapının ağırlığını azaltarak kaymaya sebep olur. Bilhassa mansap radyesinin alttan kaldırma kuvvetine göre tahkiki önem arz etmektedir.
- Süzülme hızının kritik hızdan büyük olması ve borulanma olayı; bu durumda temel zeminde sürüklenme ve oyulmalar başlayarak yapının stabilitesi tehlikeye girer.



Şekil 1 – Çevirme yapısı şematik planı

Buradan görüleceği üzere geçirimli zemine oturan çevirme yapılarında sızma tahkiki önem arz etmektedir. Sızma güvenliğinin sağlanmasında geçirimli zemine saplanan sızdırmazlık perdesi en etkili fonksiyon göstermektedir. Akımın alttan zemin danelerini sürükleyip sürükleyemeyeceğinin tahkikinde Lane tarafından verilen Ağırlıklı Süzülme Yolu (ASY) eşitliğinden yararlanılmaktadır.

$$(ASY) = \sum [\text{dikey süzülme yolu uzunluğu} + (\text{yatay süzülme yolu uzunluğu}) / 3]$$

$$\text{Lane sayısı } C = (ASY/He)$$

Buna göre, proje ile belirlenen $(ASY) > C \cdot He$ olması gerekmektedir.

Bu şart, He efektif su yükü altında zemin içinde meydana gelen akımın, zemin danelerini sürükleyip sürüklemeyeceği kontrol edilmiş olmaktadır.

Değişik zeminler için danelerin sürüklenmesine karşı Lane tarafından verilen C sayıları aşağıda verilmiştir:

Zemin cinsi	C Sayısı
Çok ince kum, silt	8,5
İnce kum (0,074 – 0,42 mm)	7
Orta kum (0,42 – 2 mm)	6
İri kum (2 – 4,76 mm)	5
İnce çakıl (4,76 – 19,1 mm)	4
Orta çakıl (19,1 – 76,2 mm)	3,5
İri çakıl (76,2 – 204 mm)	3
Çakıl kaya parçaları ile	2,5
Yumuşak kil	3
Yer yer çatlaklı kaya	2,50
Sağlam kaya ve sert sil	2
Sağlam kaya kontakt enjeksiyonlu	1,00

Pınarlaşma ve kaynamaların meydana geldiği mansap radyesi topuğunda borulanmanın önlenmesine yardımcı olan ters filtre teşkil edilmesi halinde Lane sayısının % 10 azaltılabileceği belirtilmektedir.

Geçirimli zemine oturan çevirme yapılarında efektif su yükünün fazla olduğu durumlarda, sızdırmazlığı temin üzere tesis edilecek geçirimsizlik perdelerinin bazıları aşağıda verilmiştir.

- Slury trench (bulamaç hendeği)
- Rijit veya plastik beton perde
- Kesişen kazıklar (çap \approx 0.65 m)
- Beton asfalt çekirdek
- Jet gouting
- Blanket örtü

Plastik betonla yapılacak geçirimsizlik perdesinde aşağıdaki şartların sağlanması arzu edilmektedir:

- Geçirgenlik $k \leq 10^{-7}$ cm/s
- Elastisite modülü 2000 ~ 5000 kg/cm²
- Basınç mukavemeti 10 ~ 20 kg/cm²

Malzemenin karışım oranı:

Su	300 ~ 400 litre
Çimento	70 ~ 130 kg
Bentonit	40 ~ 100 kg
Kum	1000 kg
Çakıl	500 kg
Katkı maddesi	Kullanılan malzemeye bağlı

Buraya kadar yapılan açıklamalarda, geçirimli zemine oturan çevirme yapılarında önemi dolayısıyla sızma problemleri, borulanma ve bunların sebep olacağı tehlikeler üzerinde durulmuştur. Şüphesiz bunlara ilaveten yapının bir bütün olarak aşağıda belirtilen diğer stabilite analizlerinin de yapılması gerekmektedir.

- Yapının kendi içindeki kesitlerin tesir altında kaldığı gerilmeler
- Devrilme tahkiki (emniyet katsayısı \geq 1,5)
- Kayma tahkiki (emniyet katsayısı \geq 1,5)
- Yüzme tahkiki (emniyet katsayısı \geq 1,2)
- Temel zemininde meydana gelen gerilmelerin durumu (maksimum ve minimum zemin gerilmeleri ve gerilme dağılımı)

Yukarıda verilen 1,5 emniyet katsayıları normal yükleme hali için geçerli olup, depremli yükleme için u emniyet katsayıları 1,20'ye kadar azaltılabilmektedir.

3 ÖRNEKLER

3.1 Örnek 1

Bu örnekte, Şekil 2'de verilen ve geçirimli zemine oturan dolu gövdeli bir su çevirme yapısının sızma uzunluğu, borulanmaya karşı güvenliği ve yapının tesir altında kaldığı alttan kaldırma kuvvetleri incelenmiştir.

Kum ve orta çakıl karışımından oluşan geçirimli zemin için ortalama Lane sayısı $C = 4,75$ alınmıştır. Proje ile temin edilen sızma uzunluğu $ASM = 19,37$ m olup mevcut $C = 5,50$ dur. Buna göre borulanmaya karşı güvenlik sağlanmıştır ($5,50 > 4,75$).

Mansap radyesine tesir eden ortalama alttan kaldırma kuvveti aşağıda hesaplanmıştır:

$$(3,15 + 2,41) \times 0,5 = 2,78 \text{ t/m}$$

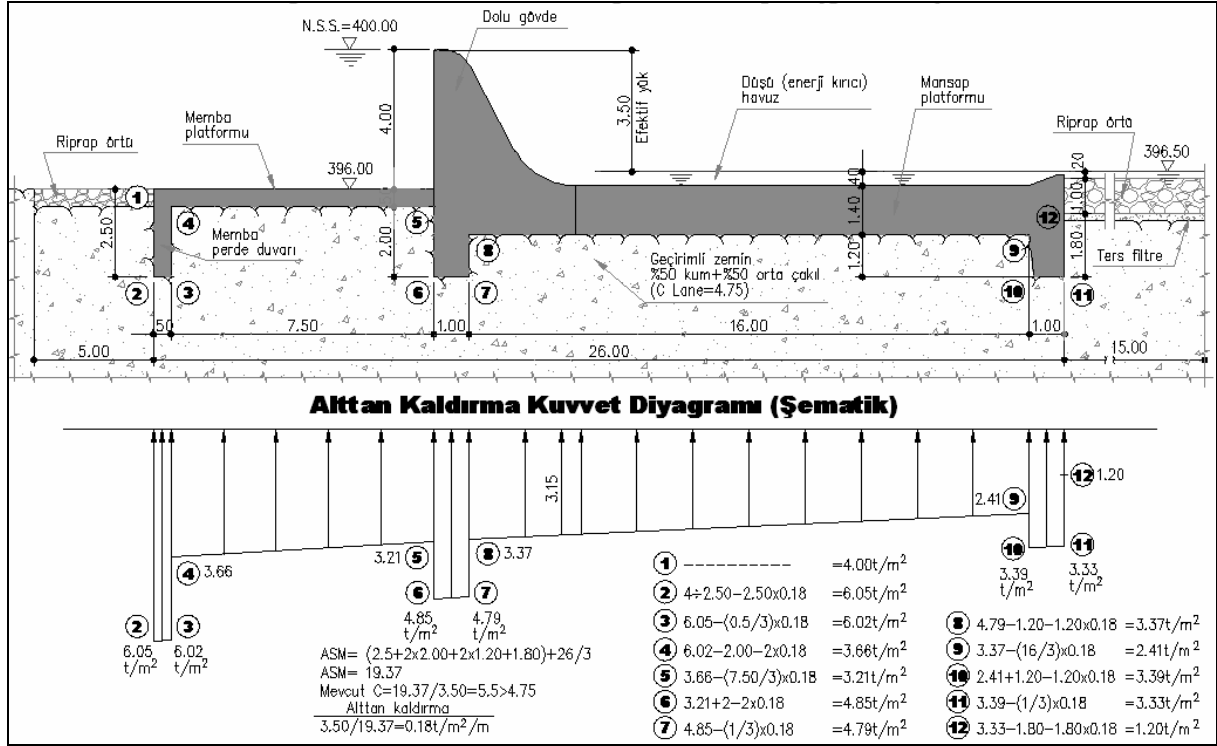
Yüzmeye karşı emniyet katsayısı ise:

$$1,4 \times 2,4 / 2,78 = 1,21$$

3.2 Örnek 2

Bu örnekte ise bir kanal santraline su temin eden ve $H_e = 7,20$ m bir çevirme yapısı ele alınmıştır.

Çevirme yapısı yerinde yapılan incelemede alüvyonun blok, çakıl, kum, silt ve kilden oluştuğu görülmüştür. Elek analizi sonuçlarına göre; % 70 çakıl, % 20 kum ve % 10 ince malzeme olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2 – Dolu gövdeli su çevirme yapısı (şematik)

Yamaçlarda konglomera kayacı bulunmaktadır. Yapılan temel araştırma sondajları ile 37,50 m derinliğe inilmesine rağmen ana kayaya ulaşılamamıştır. Civarda yapılan su sondajlarından alüvyon kalınlığının 60 m civarında olduğu öğrenilmiştir. Sızma uzunluğun artırılarak bu kalın alüvyon tabakasında borulanmayı önlemek amacı ile çevirme yapısının eşik altında alüvyona saplanan 10,00 m derinliğinde D = 0,65 m çapında kesişen kazıklarla askıda geçirimsizlik perdesi düşünülmüştür.

Çevirme yapısı yerinin geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla yapı yerinde derinliği 37,50 m ile 15,00 m arasında değişen altı adet temel araştırma sondajı açılmıştır. Alüvyonun ortalama permeabilite katsayısının $k = 5 \times 10^{-3}$ cm/s, zemin emniyet gerilmesinin ise 3 kg/cm² alınabileceği belirlenmiştir.

Çevirme yapısının en kesiti Şekil 3'de ve boy kesiti de Şekil 4'de verilmiştir. Alüvyonun dane dağılımı göz önüne alınarak hesaplanan ortalama Lane sayısı

$C = 4,7$ alınmıştır.

Temin edilen sızma uzunluğu ise:

$$(ASM) = 2,00 + 1,00 + 3,00 + 1,00 + 2,5 + 2 \times 10,00 + 43,00 / 3 = 43,83 \text{ m.}$$

$$C = 43,83 / 7,20 = 6,09 > 4,70$$

olduğundan borulanmaya karşı yeterli güvenlik temin edilmiştir.

Mansap radyesinin alttan kaldırma kuvvetine göre yüzme tahkiki;

$$7,2 / (ASM) = 0,162 \text{ t/m}^2/\text{m}$$

$$\text{radye ortasında alttan kaldırma kuvveti;} \\ = 7,20 - [2,00 + 1,00 + 3,00 + 1,00 + 2 \times 10,00 \\ + (9,50+8,00+11,50) / 3] \times 0,162 \cong 1,30$$

$$\text{Yüzmeye karşı emniyet katsayısı =} \\ 1,25 \times 2,4 / 1,30 = 2,30$$

Çevirme yapısı altında alüvyonda meydana gelen süzülme hızı ve sızma miktarının hesabı,

Alüvyonun permeabilitesi (k)

$$= 5 \times 10^{-3} \text{ cm/s (veya } 4,32 \text{ m/gün)}$$

Askıda olan 10,00 derinliğindeki sızdırmazlık perdesinin altında kalan alüvyon tabakasının süzülme alanı $A = 4500 \text{ m}^2$

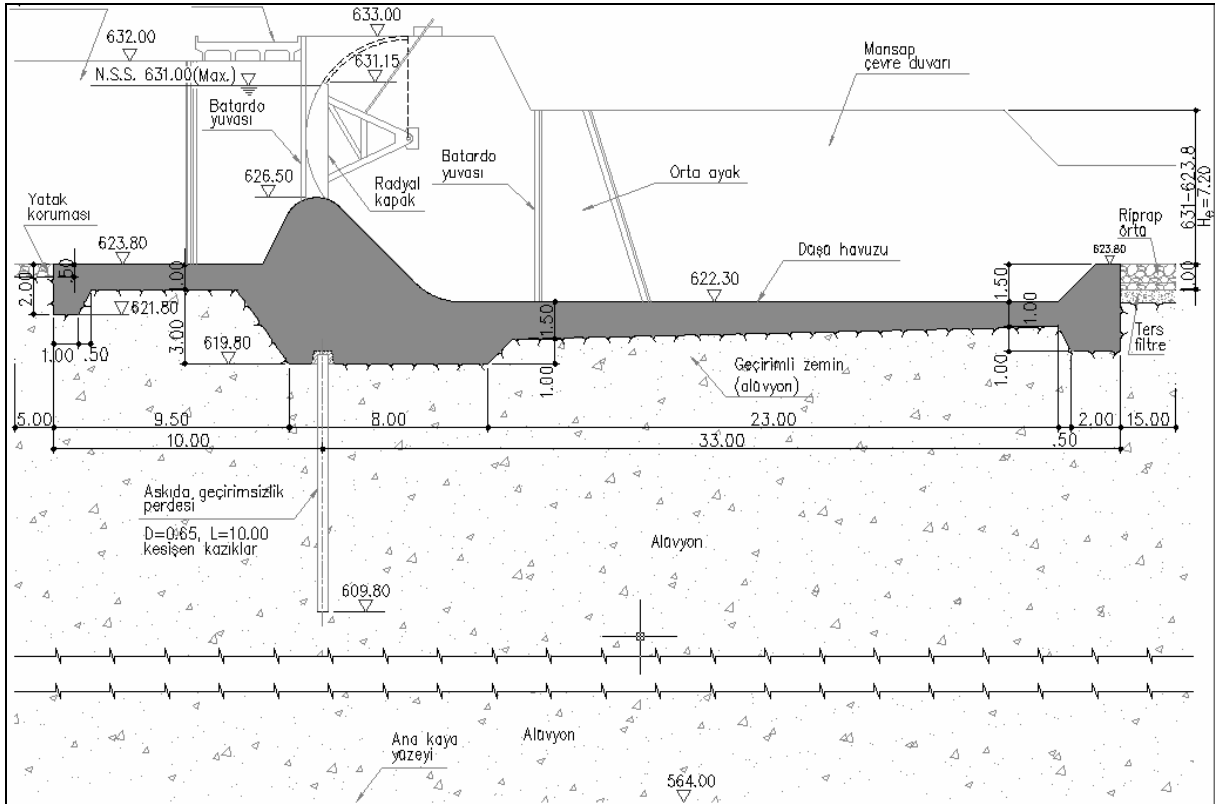
Bu süzülme alanı göz önüne alınarak (Şekil 3 ve Şekil 4) kabul edilen ortalama süzülme yolu uzunluğu yaklaşık $\cong 50,00 \text{ m}$ kabul edildiğinde,

$$\text{Hidrolik eğim } i = H_e/L = 7,20/50 = 0,144$$

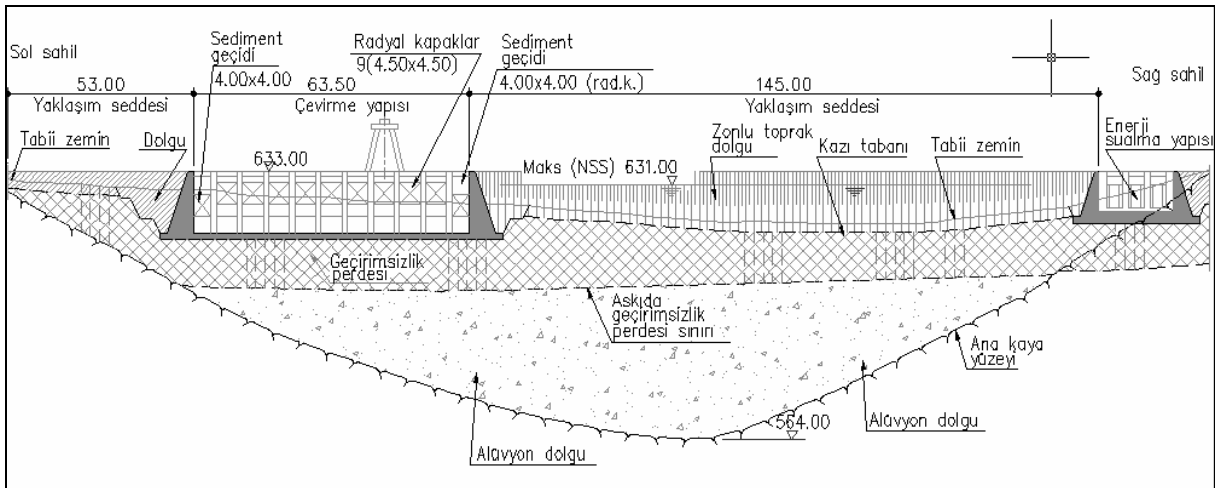
Alüvyonda süzülme (sızma) hızı = $4,32 \times 0,144$
= $0,623 \text{ m/gün}$ (veya $0,71 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s} \ll 5 \cdot 10^{-3}$)

$Q = 0,623 \times 4500$
= $2800 \text{ m}^3/\text{gün}$ (veya 32 Litre/s)

Çevirme yapısı altında sızma miktarı:



Şekil 3 – Çevirme yapısı en kesiti (şematik)



Şekil 4 – Çevirme yapısı boy kesiti (şematik)

4 SONUÇLAR

Su kaynakları yönetiminde su çevirme yapıları çok önemlidir. Bu yapılar genelde geçirimli zemin üzerine oturduğundan, yapının devrilme, kayma ve alttan kaldırma stabilite tahkikleri ve zeminin taşıma kapasitesine ilaveten temelin dengesinin korunması için zemin içinde suyun sızma hızı ve borulanma durumunun da titizlikle incelenmesi gerekmektedir. Bu makalede, mühendislere nümerik örneklerle geçirimli zemine oturan iki su çevirme yapısı ele alınmış ve hesapların nasıl yapılacağı gösterilmiştir.

5 KAYNAKLAR

- [1] Regülatör Projesi Kriterleri (DSİ Yayını Sayı 619).
- [2] Şentürk Fuat, Bağlamalar (DSİ Yayını Sayı 39).
- [3] U.S. Department of Interior Design of Small Dams.
- [4] Davis C.V. Handbook of Applied Hydraulics.
- [5] Dönmezer Hayrettin Su Kuvveti Tesisleri.
- [6] Tırnakçı Metin, Toprak Barajlar (DSİ Yayını Sayı 353).
- [7] Khosla A.N., N.K Bose and E.M. Taylor Design of Weirs on Permeable Foundation Central Board of Irrigation, India, Publication 12.
- [8] Irrigation Engineering S.R. Sahasrabudhe-SK Kataria&Sons Delphi-6.
- [9] Şentürk Fuat, Barajların Projelendirilmesinde Hidrolik Esaslar (DSİ yayını 1988).

BETONDA ELASTİSİTE KURAMI VE BARAJ KÜTLE BETONLARI İÇİN STATİK E MODÜLÜNÜN KOMPOZİT MODELLERLE TAHMİNİ

Ali UĞURLU

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, 06100, Yücetepe, ANKARA
aliu@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 17.03.2008, Bildirinin kabul tarihi: 09.05.2008)

ÖZET

Bu makalede betonda elastisite kuramı ve baraj kütle betonları için statik E-modülü tahminine yönelik kompozit modellemeler yardımı ile bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Betonun değişik fazlardan meydana gelmiş bir kompozit malzeme olduğu kabulünden hareketle betonda elastisite kuramı teorik olarak irdelenmiş ve bu teorik çıkarsamalar statik E-modülü hesaplamasında kullanılan ampirik formüller ve kompozit modellemeler ile desteklenmeye çalışılmıştır. Yük altında belirli bir gerilme düzeyine kadar elastik davranabilen betonun bu davranışının kompozit modellemeler ile açıklanabileceği ortaya çıkmışsa da bu eşitliklerin yeterli olmadığı görülmüştür. Özellikle baraj betonlarında, elastisite deneyi yapmanın zorluğu ile ilişkilendirilerek yürütülen çalışma; kompozit modellemelerin beton E-modülü hesaplaması ve tahmininde kullanılabileceğini ya da daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek amacıyla kullanılması gerektiğini; ama daha önce geliştirilip ve yıllardır kullanılan “ıslak eleme” gibi yöntemlerin de kesinlik taşımama durumu dikkate alınarak sonuçların betonda E-modülü değerini etkileyen diğer faktörlerle yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, elastisite, kompozit model, basınç dayanımı, baraj kütle betonu

THEORY OF ELASTICITY ON CONCRETE AND ESTIMATION OF THE STATIC MODULUS OF ELASTICITY FOR DAM MASS CONCRETE WITH COMPOSITE MODELS

ABSTRACT

In this article elastic theory of concrete and estimation of static E-modulus with composite models for dam mass concrete were examined. As it is known concrete is a composite material, which has different phases so elastic theory was examined theoretical and these theoretical results were supported with empirical formulas, used for calculating static E-modulus, and composite models. Concrete behave elastically under load, up to a specific tensile strength, so it was seen that this behavior of concrete can be explained with composite models, but it was not enough. Especially for dam concrete elasticity tests were hard to conduct owing to inconvenient conditions in dam construction and for this reason calculation and estimation of E-modulus of concrete with composite models became important, but first it has to be improved considering uncertain results of wet sifting methods and also results must be evaluated again due to other factors that affect E-modulus of concrete.

Key words: Concrete, elasticity, composite model, compressive strength, dam mass concrete

1 GİRİŞ

Elastik hesaplamaların dikkate alındığı yapısal tasarımlarda şekil ve yer değiştirmelerin belirlenebilmesi için betonun E-modülünün bilinmesi gerekir. Değişik yükler altında şekil değiştirebilen bir yapıya sahip bütün malzemeler gibi beton da üzerine gelen yükün tipinden, büyüklüğünden ve süresinden etkilenerek belirli ölçüde şekil değiştirme ya da başka bir deyişle deformasyon gösterir.

Betonda E-modülü tayini betonun elastik davranabildiği sınırlar içerisindeki yükleme düzeylerinde standartlarda tanımlandığı üzere genellikle Ø 150x300 mm boyutlarındaki silindirik şekilli numuneler üzerinde yapılır. Kütle betonu olarak isimlendirilen baraj betonlarında ise betonda kullanılan agrega en büyük tane çapının büyümesi sonucu gerek basınç dayanımı ve gerekse E-modülü tayini gibi deneyler yukarıda bahsedilen numuneler

üzerinde gerçekleştirilemez. Deneyler için daha büyük numunelerin kullanıldığı bu çalışmalarda numune boyutlarının büyümesi ile çok yüksek kapasiteli deney preslerine ve büyük deney aparatlarına gerek duyulur. Çok az araştırma laboratuvarının dışında bunları bulmak olanaksızdır. Bu nedenle adı geçen deneylerin yapılabilmesi için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en çok uygulananı *ıslak eleme* olarak adlandırılan; taze beton içerisinden 38 (ya da 32) mm'den büyük agregaların beton henüz taze iken eleme suretiyle alınıp geriye kalan kısmı ile numune hazırlanıp deneylerin bu numuneler üzerinde gerçekleştirilmesi yöntemidir. Pratikte bu yöntemin kullanılması; numune homojenitesinin bozulması, faz dengelerinin değişmesi, çimento hamuru-agrega ara yüzeyi toplam alanının küçülmesi gibi önemli sayılan nedenlerle hala tartışılmakta ve elde edilen değerlere de şüphe ile bakılmaktadır.

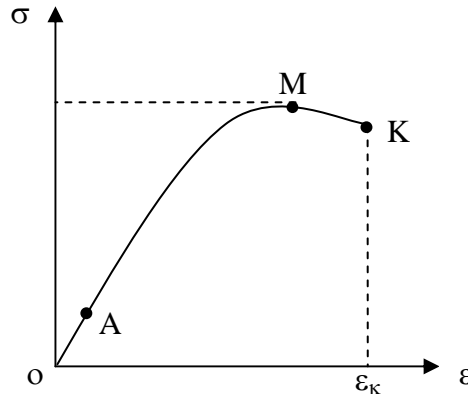
Bu çalışmanın bütününde daha geniş olarak tartışılacak bu faktörlerin etkisini en aza indirebilmek amacıyla elde edilen deneysel sonuçların betonun agrega, matris ve agrega-çimento hamuru temas bölgesinden oluşan üç

fazlı bir kompozit olduğu tezinden hareketle beton için geliştirilmiş kompozit malzeme kuramlarıyla yeniden değerlendirilmiştir.

2 BETONDA ELASTİSİTE KURAMI

Üç fazlı anizotropik gevrek bir malzeme olarak tanımlanan beton üzerine gelen değişik yükler nedeniyle farklı davranışlar gösterir. Elastik özellikteki malzemeden elde edilmiş olan bir elemanın P yükü altında göstereceği toplam deformasyon miktarı o elemana uygulanan yükün büyüklüğü ve elemanın boyu ile doğru orantılı, elemanın kesit alanı ile ters orantılıdır [1]. Bu durum $\Delta L \propto PL / A$ ya da $\Delta L/L \propto P/A$ olarak ifade edilebilir.

Beton, gevrek ve farklı fazlardan oluşan bir kompozit olduğundan elastik bir malzeme değildir. Ancak küçük gerilmeler altında elastik özellik gösterebilir. Teorik olarak bu basınç dayanımının % 30 ile 40'ı arasındaki bir değere karşılık gelir [1]. Buna karşılık beton, mühendislik hesaplamalarında elastik bir malzeme olarak kabul edilir [2,3]. Betonun elastik davranışını açıklamakta kullanılan σ - ϵ ilişkisi deneysel yöntemlerle belirlenebilir.



Şekil 1 - Betonun tipik σ - ϵ eğrisi

Şekil 1'de betona ait tipik bir σ - ϵ davranışı görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere betonda gerilme arttıkça numunede doğru orantılı olarak deformasyon da artmaktadır. A noktasına kadar bu durum doğrusal olup beton üzerindeki bu kısa süreli elastik yükün kaldırılmasıyla birlikte herhangi kalıcı bir deformasyon görülmez. A noktasında numuneye daha büyük gerilmelerin uygulanmasıyla eğri doğrusallıktan sapar ve bu durum M noktasına kadar eğimin artmasıyla devam eder. A noktasından sonra gerilmenin artması ile betondaki mikro çatlaklar hızla çoğalır ve M noktasında beton paralanmaya başlar. K noktasında ise göçme veya kırılma meydana gelir. K noktasındaki gerilme değeri

σ_k betonun kırıldığı andaki gerilme değerini ϵ_k ise birim deformasyon değerini gösterir. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlarla çizilen σ - ϵ eğrisi üzerinden betonun statik E-modülü hesaplanır. Bunun için değişik yöntemler kullanılabilir.

2.1 E-Modülü Değerinin Elde Edilmesinde Kullanılan Değişik Yöntemler

Betonda statik E-modülü elde edilirken genellikle yukarıda anlatılan deneysel yöntem kullanılır. Bu yöntemde TS 3502 ve ASTM C 469'da tanımlanan deney numuneye uygulanarak σ - ϵ eğrisi elde edilir ve bu eğri üzerinde değişik yöntemler ile statik E-modülü değeri hesaplanır [4,5]. Türk Standartları, Avrupa Beton Komitesi

(CEB) ve Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) betonun birim ağırlığı ve basınç dayanımından hareketle beton E-modülünün hesaplanmasına yönelik ampirik bağıntılar da geliştirmiştir. *TS 500 Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları* olarak bilinen standardında [6],

$$E=14000+3250\sigma^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

statik E-modülü hesaplaması için (1) bağıntısı verilmiştir. Avrupa Beton Komitesi (CEB) ise basınç dayanımından E-modülünü hesaplayabilmek için [7],

$$E=9500(\sigma+8)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

tanımlamıştır. ACI ise beton statik E-modülü hesaplamasında basınç dayanımı ile birlikte birim ağırlığı da dikkate alan ampirik bir bağıntı geliştirmiştir, [8].

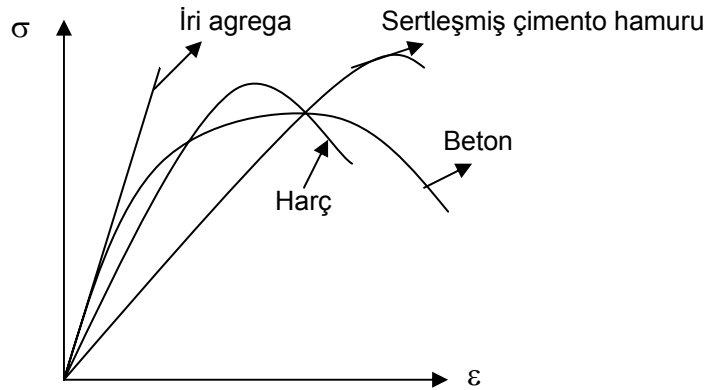
$$E= 0,043 W^{3/2} \sigma^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Burada E: Beton basınç dayanımının % 40'ına denk gelen gerilme düzeyinin temel alınarak sekant yöntemi ile belirlenen E-modülü değeri, W: Normal ağırlıklı betonun birim ağırlığı (yoğunluk), σ : standart silindir numunelerle elde edilen basınç dayanımıdır. Görüleceği üzere yukarıdaki ampirik bağıntılar yardımı ile de beton E-modülü hesaplanabilir. Bu bağıntılar sonuç olarak birbirine yakın değerler vermektedir [1]. Anılan bu kuruluşların geliştirmiş olduğu ampirik bağıntılar dışında sonik ya da ultrasonik yöntemler kullanılarak

da beton E-modülü hesaplanabilir. Adına *dinamik E-modülü* denilen bir başka yöntem ise ultrasonik ses dalgalarının beton içerisinden geçişi esasına dayanır. Bu yöntemde ultrasonik dalgaların beton içerisinden geçiş hızı hesaplanır ve daha sonra kullanılan ampirik bağıntılar yardımıyla betonun dinamik E-modülü bulunur. Dinamik yöntemler ile hesaplanan E-modülü değeri statik yöntemlerle elde edilen E-modülü değerinden biraz daha yüksektir. Bu durum deney sırasında numune üzerine yük uygulanmaması gerçeği ile ilgilidir. Dinamik yöntemlerle bulunan E-modülü değerine en yakın olan statik E-modülü değeri başlangıç teğet yöntemi ile bulunan değerdir. Yalnız bu yaklaşımların hepsinde E-modülü için oldukça önemli olan beton yaşı, agreganın E-modülü ve boyutu gibi faktörler ihmal edilmektedir. Bu nedenle adı geçen bağıntılar yardımı ile hesaplanan E-modülü değerleri gerçek E-modülü değerini hiçbir zaman temsil etmez.

2.2 Betonun E-Modülü Değerini Etkileyen Faktörler

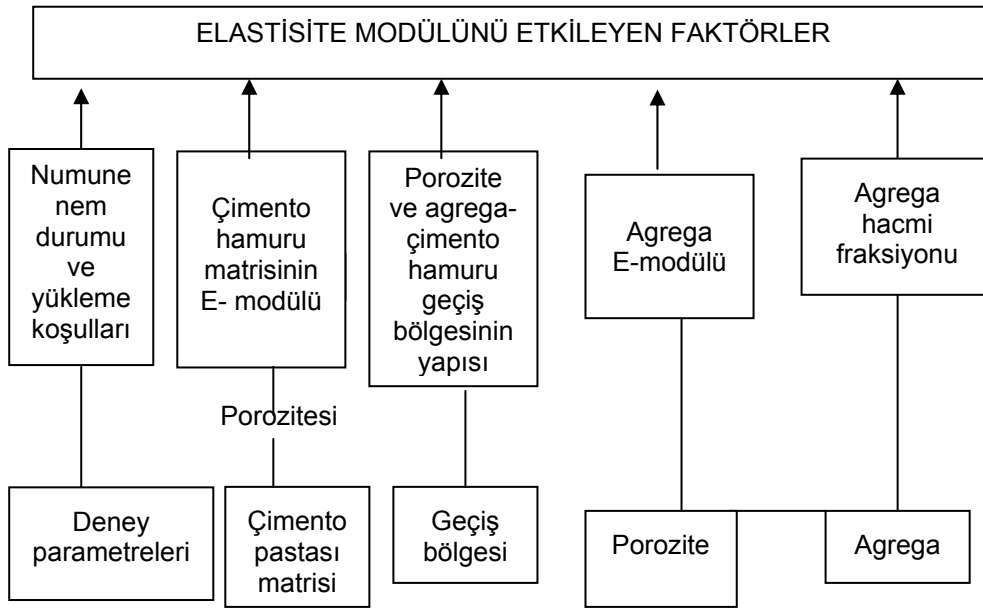
Heterojen bir yapıya sahip olan beton içyapısı, yükleme sırasında agrega, çimento hamuru matrisi, değişik boşluk sistemleri, agrega-çimento hamuru ara yüzeyi gibi sahip olduğu değişik fazlar nedeniyle farklı davranış gösterir [9]. Bu nedenle bunların birisinin nicelik veya niteliğindeki değişiklik beklenen sonuçların çok farklı çıkmasına neden olabilir. Örneğin aynı basınç dayanımına sahip fakat bileşim özellikleri ve bileşenleri farklı olan betonların elastisite değerleri de farklı olabilir.



Şekil 2 - Betonun ve betonu oluşturan malzemelerin σ - ϵ eğrileri

Şekil 2'den de görüleceği üzere betonun ve betonu oluşturan bileşenlerin gerilme-deformasyon davranışları birbirinden oldukça farklıdır [2]. Şekilden anlaşılacağı üzere beton içerisindeki fazlardan agreganın ve sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımı beton ve harcın dayanımına göre daha yüksektir. Buna karşılık beton kendi bileşenlerine göre daha sünek bir davranış göstermektedir. Yani

betonun diğer fazlar ve bileşenlere göre inelastik davranışı daha yüksektir. Şekilden görüleceği üzere betonun gösterdiği deformasyon söz konusu faz ve bileşenlere göre eşdeğer bir basınç dayanımı için daha yüksektir. Bu olguların hepsi sonuçta malzemenin kırılma anındaki davranışını, rijitliğini, E-modülünü ve deformasyon



Şekil 3. Betonun E-modülünü etkileyen faktörlerin sınıflandırılması

kapasitesini belirler. E-modülünü etkileyen faktörler Şekil 3'teki gibi sınıflandırılabilir. Şekil 3'te verilen bu temel öğelerin hepsi önemli olmakla birlikte agrega porozitesi ve agreganın E-modülü, çimento hamuru matrisinin özellikleri, çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi ve deney parametreleri en önemli faktörlerdir. Agreganın porozitesi ve E-modülü onun rijitliğini belirleyen önemli bir öğedir. Bu nedenle yüksek yoğunluklu boşluksuz agregaların ve bunların kullanıldığı betonların da E-modülü yüksek olur. Çimento hamurunun E-modülü ve çimento hamurunun özellikleri ise deyim yerindeyse tamamıyla su/ çimento oranı tarafından belirlenir. Su/çimento oranının küçülmesi ile harç fazının E-modülü artar. Bu durum harç fazı/iri agrega E-modülü oranının artmasına neden olur. Bu değişim ise iri agrega çimento hamuru temas bölgesindeki gerilmelerin azalması yönünde etki yapar. Değişik nedenlerle ortaya çıkan çimento hamuru porozitesi de betonun E-modülü üzerinde önemli bir rol oynar. Çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi de beton E-modülü için önemli bir parametredir. Genelde hava boşlukları, mikro çatlaklar ve dağılmış kalsiyum hidroksit kristallerinin yoğun olduğu bu bölgenin betonun kırılma ve elastik özellikleri üzerinde ne kadar önemli bir işlevinin olduğu son yıllarda elektron mikroskoplarıyla yapılan içyapı incelemeleri sonucu ortaya çıkmıştır. Agregası ve çimento hamurunun özellikleri bu bölgenin davranışı üzerinde önemli bir rol oynar. Bu iki farklı fazın E-modüllerinin farklı olması nedeniyle betona yük uygulanması sırasında agrega taneleri ile çimento hamuru temas bölgesinde ortaya çıkan çekme, kayma

gibi kuvvetler de artar. Bu durum sonuçta büyük çatlaklara ve kırılmalara da yol açabilir.

3 BARAJ BETONU E-MODÜLÜNÜN TAHMİNİ

Baraj gibi büyük kütle betonu yapılarında E-modülü; elastik hesabı dikkate alan yapısal tasarımlar ile birim şekil ve yer değiştirmelerin kestirimi için bilinmesi gerekli bir parametredir. Barajlar gibi çok büyük yapılar için beton tasarımı yapılırken teknik ve ekonomik nedenler dikkate alınarak adına kütle betonu denilen ve günlük hayatımızdaki yapı tiplerinde rastlamadığımız bir beton tasarımı yapılır.

Genelde en büyük tane çapı 80–200 mm arasındaki agregalar ile üretilen bu betonlardan gerek numune hazırlanması ve gerekse de hazırlanan numunelerin deneylere tabi tutulması; kullanılan kalıp boyutları, numunelerin taşınması, deney düzeneği ve deney için yüksek kapasiteli aletlerin temin edilmesi konusunda ciddi sıkıntıları da beraberinde getirir [10].

Baraj ya da kütle betonu olarak tanımlanan bu betonlardan yapılacak basınç, elastisite gibi deneyler için Ø450x900 mm'lik kalıplar ile numune alınır. Bu büyüklükteki numuneler üzerinde deneyler yapabilmek için çok yüksek kapasiteli basınç preslerine ve deformasyon ölçecek aparatlara gereksinim duyulur. Gerek şantiyelerde ve gerekse laboratuvarların birçoğunda anılan teknik koşulların sağlanması neredeyse olanaksızdır. Bu nedenle baraj betonları için E-modülü tayini ve tahminine yönelik bazı farklı yaklaşımlar geliştirilmiş ve

denenmiştir. Bu yöntemlerin en çok bilineni ve kullanılanı; kütle betonunun henüz beton taze iken 38 mm'lik elekten elenerek elekten geçen kısmı ile hazırlanan numunelerin test edilmesine dayanan ve adına *ıslak eleme* denen yöntemdir.

Bu yöntemde taze beton elenerek elekten geçen malzemenin agregaya en büyük tane boyutu küçültülür, agregaya en büyük tane boyutu küçülen beton için uygun olan Ø 150x300 mm' lik silindir kalıplar kullanılarak numune hazırlanır ve deneyler bu numuneler üzerinde gerçekleştirilir. Ancak, yapılan bu işlemler elenme sonrası kalan betonun; iri agregası alındığı için çimento (harç)/ iri agregaya oranı yükselir, toplam hacimdeki iri agregaya konsantrasyonu azalır, su/ çimento oranı küçülür, iri agregaya-çimento hamuru temas yüzeyi toplam alanı ve uzunluğu azalır. Bu gelişmeler orijinal (elenmemiş) betona göre ıslak elenmiş bu yeni betonun kırılma ve kırılma anındaki şekil değiştirme parametrelerini önemli ölçüde etkiler.

Belli hacimdeki iri agregaya-çimento hamuru temas yüzeyi (aderans) hattı uzunluğunun toplam olarak azalması durumu beton içyapısındaki zayıflıkların azalması ya da içyapının gerilmeler karşısında güçlenmesi olarak değerlendirilir. Bunun yanı sıra yüklemenin belli bir aşamasında iri agregaya yüzeylerinde artan kuvvetler nedeniyle ortaya çıkan aderans kopmaları ve bunun sonucunda çatlamlar da azalır. Su/çimento oranının küçülmesi sonucunda ise porozite azalır. Kısaca özetlersek bu gelişmelerin hepsi betonun gerilme-şekil değiştirme davranışını etkileyerek daha sünek bir beton davranışı ve daha düşük bir E-modülü ortaya çıkmasını sağlar. Bu durumda ıslak elenmiş betonla yapılan basınç dayanımı değeri daha yüksek elde edilir. Buna karşılık E-modülü değerinin ise daha düşük çıkmasına neden olur. Araştırmalar ıslak elenmiş betonla elde edilen basınç dayanımı değerinin % 85'inin alınmasının uygun olacağını göstermiştir [11,12]. Bu durum E-modülü değeri tahminini daha da zorlaştırır.

Bu düşünce; baraj betonunun ıslak eleme yapılması neticesinde içerisindeki 38 mm'den büyük iri agregaların alınması sonucu beton bileşim oranlarının değişeceği ve sonuçta harç/agrega oranının büyümesi sonucu sertleşmiş beton özelliklerinin değişmesi tezine dayanır. Teorik olarak böyle düşünmekle birlikte kaba olarak iki fazlı bir kompozit olarak kabul edilen anizotrop yapıdaki betonun yük altında nasıl davranacağını kestirmek oldukça

karmaşıktır. Bu durum, beton özelliklerini belirleyen parametrelerin çokluğundan ve bu parametrelerin birbirinin özelliklerini etkilemesi ile doğrudan ilgilidir. Örneğin, basınç dayanımları aynı olan fakat bileşim özellikleri farklı olan iki betonun E-modülü değerleri eşit olmayabilir. Kırılma ya da şekil değiştirmelerde harç ve agregaya kadar agregaya-harç ara yüzeyinin de önemli olduğu son yıllarda anlaşılmıştır. Yani harç dayanımı agregaya dayanımından yüksek olan bir betonun şekil değiştirme indeksi agregaya dayanımı harç dayanımından yüksek olan (tersi durum) bir betonla aynı olmaz. Bu her iki farklı durumda, yük altında betondaki temas yüzeyinin kırılma anındaki fonksiyonu farklıdır. Birinci durumda aderans kuvvetlerinin işlevi ikinci duruma göre daha önemsizdir [13].

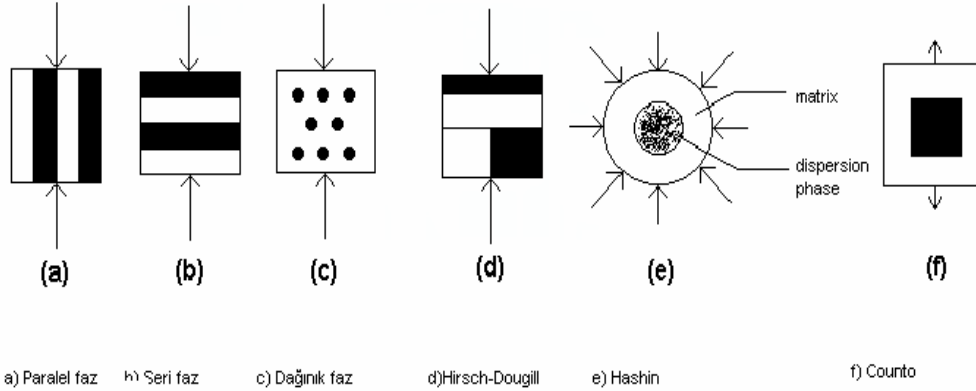
Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılacağı üzere ıslak eleme yapılarak elde edilen E-modülü değeri ile gerçek orijinal numuneler üzerinden belirlenen E-modülü değeri arasında fark vardır. Bu nedenle sonuçların daha farklı yaklaşımlarla doğrulanması ya da sınanması gereklidir. Basınç dayanımından hareketle E-modülünün tahmin edilmesini sağlayan klasik ampirik formüllerden madde 2'de söz edilmişti. Yalnız bu bağıntıların kullanılması durumunda E-modülü için önemli olan baraj betonun yaşı, iri agregaya ve numune boyutunun ihmal edildiği gözden kaçırılmamalıdır [14]. Deneylerden ya da ıslak eleme yönteminden elde edilen sonuçlar betonun agregaya ve çimento hamuru matrisinden meydana gelmiş iki fazlı bir kompozit olduğu kabulüne dayanan paralel, seri ve her iki fazın birlikte kullanıldığı model ve kuramlar ile yeniden değerlendirilerek baraj betonu için E-modülü tahminine yönelik yaklaşımlar denenebilir [13]. Ama unutulmaması gereken çok önemli bir nokta daha vardır ki o da bütün bu modellemelerin hepsinin betonun agregaya ve harçtan meydana gelmiş iki fazlı bir kompozit olduğu kabulüne dayanması gerçeğidir. Ne yazık ki bu kabul, son yıllarda elektron mikroskopları ile varlığı daha iyi anlaşılan ve betonun yük altındaki davranışında çok önemli bir işlevi olan agregaya-harç temas yüzeyi bölgesini dikkate almadığından günümüz koşullarında yeniden değerlendirilmesi gerekir.

3.1 Kompozit Modellemeler Yardımı İle E-Modülünün Belirlenmesi

Kaba olarak çimento hamuru ve agregadan meydana gelen bir kompozit malzeme olarak kabul edilen betonun E-modülünün tayini için basit kompozit sistemlere uygulanan modellerden yararlanılabilir. İki fazlı malzemelerin elastik davranışını açıklamada

pek çok kompozit modelde paralel ve seri fazlı düzenlemelerle Şekil 4'de olduğu gibi temel kompozit modeller kullanılır [15,16]. Bu modellerin kullanılmasında;

- beton, matris ve iri agrega olarak tanımlanan iki homojen ve izotropik fazın üç boyutlu olarak bileşimidir,
- söz konusu bu iki faz betonun lineer elastik bölgesinde doğrusal davranır,



Şekil 4 . Kompozit modeller

gibi kabulleri esas alır [17]. Bunlarla birlikte yine betonun karışım oranları, agrega birim ağırlıkları veya hacim oranları ve her bir fazın E-modülü de bilinmelidir.

Şekil 4'te bazı iki fazlı beton kompozit modelleri görülmektedir. Bunlar içerisinde en fazla kullanılanları Voight'in paralel ve Reuss'un seri modelleridir. Voight'in paralel modellemesinde, kompozit malzeme üzerinde sabit birim deformasyon olduğu kabul edilerek E-modülü hesaplaması için aşağıdaki bağıntı yazılır;

$$E_b = E_{ch} V_{ch} + E_a V_a \quad \dots \dots \dots (4)$$

Reuss'un seri modellemesinde ise kompozit malzeme üzerinde sabit gerilme olduğu kabul edilir ve E-modülü tayini için aşağıdaki eşitliği yazılır;

$$1/E_b = V_{ch} / E_{ch} + V_a / E_a \quad \dots \dots \dots (5)$$

Yukarıda verilen her iki bağıntıdan da görüleceği üzere betonun ya da kompozitin E-modülü hem çimento hamurunun, hem agreganın, hem de bunların beton içerisindeki hacimsel miktarlarının bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Seri ve paralel fazların eşit

oranlandığı Hirsch modellemesinde de beton kabaca iki fazlı bir malzeme olduğu kabulü ile

$$1/E_b = (1-x) [C/E_a + 1-C/E_{ch}] + x [1/C E_a + (1-C) E_{ch}] \quad \dots \dots \dots (6)$$

eşitliği yazılır. Eşitlik (6) ile verilen Hirsch modelinde E-modülü; betonun iki fazlı bir malzeme olduğu, agrega ve matris fazının hacim fonksiyonu ve ampirik sabitin E-modülü üzerinde etkisi olduğu temeline dayanır, [2, 5].

4 KOMPOZİT MODELLERLE E-MODÜLÜ HESAPLAMALARINA ÖRNEKLER

Madde 3.1'de verilen kompozit modeller yardımı ile şimdiye kadar bazı çalışmalar yapılmışsa da bu çalışmalarda E-modülünü tahmin etmenin dışında konu tartışılmamıştır [12,14,18]. Daha önceki bölümlerde de açıklandığı üzere beton iç yapısı ve davranışının açıklanamadığı dönemlerde yazılmış olan birim hücre modellemesine dayanan kompozit eşitliklerin günümüzde yapılacak pratik çalışmalar ile yeniden yazılması gereklidir. Bu doğrultuda son yıllarda Villardell vd. yapmış oldukları çalışmada bazı hususlara açıklamalar getirecek şekilde sonuçlara ulaşılmış ve sonuçlar Çizelge 1'de gösterilmiştir [17].

Çizelge 1 - Farklı şekilde düzenlenmiş aynı betona ait değişik yaşlardaki E-modülü değerleri

Deney yaşı, gün	E-Modülü, GPa		
	Harç	Islak elenmiş beton	Baraj betonu, (elenmemiş)
7	19,6	24,8	30,3
28	23,8	34,5	37,3
90	28,2	35,1	43,0
180	30,7	37,2	42,2

Bu çalışmada baraj betonu 120 mm'lik agregaya en büyük tane çapı ile hazırlanmıştır. Daha sonra bu beton taze halde iken 38 mm'lik elek ile elenerek ıslak elenmiş beton elde edilmiştir. Bu beton da 4 no'lu elekten elenerek harç numuneleri meydana getirilmiştir. Çizelge 1'de verilen deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde deney süresi ya da numune yaşının artması ile E-modülü değerinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca baraj betonu olarak bilinen elenmemiş betonunun E-modülü değerinin ıslak elenmiş beton ve harç numunelere göre daha yüksek olduğu görülecektir.

E-modülü değeri sıralaması büyükten küçüğe doğru sıralanacak olursa; baraj betonu (elenmemiş), ıslak elenmiş beton ve harç şeklindedir. Bilindiği üzere bu sonuçlar agregaya E-modülü değeri ile yakından ilgilidir. Agregaya E-modülü değerinin artması ile betonun E-modülü değeri de artmaktadır. Bu durum agregaya E-modülü değerinin çimento hamuru E-modülü değerinden daha yüksekse olduğu durumlar için geçerlidir. Ters durumda ise sonuç daha farklı olacaktır. E-modülü yüksek olan fazın hacim oranı da önemli bir parametredir.

4.1 Deneysel Çalışmalar

Yukarıdaki bölümlerde açıklanan kuramsal sentezlerin pratikte değerlendirilmesi ve doğrulanması amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, pratikte ölçülen elastisite modülü gerçek değerleri ile kompozit malzemelere ait model eşitliklerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması temeline dayanmaktadır.

Bu amaçla J. Villardell ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadan yararlanılmıştır [17]. J. Villardell ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışma sonuçları ve karışım parametreleri kullanılarak model eşitlikler için veriler üretilmiş ve buradan kompozit model eşitlikleri yardımıyla statik E-modülü hesaplamaları yapılmıştır. J. Villardell ve arkadaşları yaptıkları çalışmada agregaya olarak kullanılacak kayalardan boy/çap oranı 2 olan karot numuneler alıp bunların ayrı ayrı

elastisite modülü değerlerini ölçmüşlerdir. Elde edilen kayaların elastisite modülü değerleri sırasıyla 35, 50 ve 60 GPa bulunmuştur.

Adı geçen kayalar kırma eleme tesisinde kırılıp, öğütülerek karışımlarda kullanılmak üzere (0-1,25), (1,25-5), (5-19), (19-60) ve (60-120) mm boyutlarındaki beş farklı tane grubuna ayrılmıştır. Karışımlarda Tip I 45A (CEN Class I 42,5R) çimentosu, 130 kg; uçucu kül, 89 kg; ince kum (0-1,25 mm), 398 kg; iri kum (1,25-5 mm), 234 kg; ince çakıl (5-19 mm), 392 kg; orta boy çakıl, (19-60 mm), 646 kg; kaba çakıl (60-120 mm), 558 kg; akışkanlaştırıcı 0,55 litre ve su 45 kg ölçülerinde kullanılmıştır. Kullanılan agregalar baraj yakınlarındaki Segre nehrinden alınmış olup esas olarak kireçtaşından oluştuğu belirlenmiştir. Baraj betonuna ilaveten bu beton için tane boyutu 5 mm'ye kadar olan çakılsız harçlar da üretilmiştir.

Çalışma kapsamında önce, en büyük tane çapı 120 mm olan agregaya kullanılarak beton karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımdan 450x450x450 mm boyutlarında prizmatik numuneler alınmış ve *Baraj Betonu* olarak etiketlenmiştir. Aynı beton tazeliğini kaybetmeden 38 mm'lik elekten ıslak eleme yöntemi ile elenerek elekten geçen, yani agregaya en büyük tane çapı 38 mm'ye düşürülen betondan deney yapmak üzere Ø 150x300 mm boyutlarında silindir şekilli numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler de *Islak Eleme Betonu* olarak isimlendirilmiştir. En büyük agregaya tane çapı 38 mm'ye düşürülen bu beton yine tazeliğini kaybetmeden 4 nolu (5 mm) elek ile elenerek Ø 150x300 mm boyutlarında silindir şekilli *Harç Numuneleri* hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri bir gün sonra kalıplardan sökülerek deney anına kadar 23±2 °C'deki kür havuzlarında tutulmuştur. Kür havuzunda 90 gün boyunca bekletilen numuneler bu sürenin sonunda havuzlardan çıkartılarak doygun kuru yüzey durumuna getirilmiş ve deneye tabii tutulmuştur. Her silindir numunesindeki şekil değiştirme, numunenin düşey ekseninin ortasına yerleştirilmiş üç strain-gage yardımıyla

ölçülmüştür. Strain-gage'lerin uzunlukları harç için 30, ıslak elenmiş betonlar için ise 120 mm'dir. Prizma şekilli numunelerde ise referans noktalarını gösteren strain-gageler iki karşılıklı düşey yüze yapıştırılmışlar ve DEMEC tipi 15 cm gage uzunluğundaki mekanik ekstensometre ile bitişik diskler arasındaki şekil değiştirmeler elle ölçülerek kaydedilmiştir. Strain-gage'lerin şekil değiştirmeleri bilgisayar kontrollü veri toplayıcı sistem ile bulunmuştur.

Numuneler MTS 458 kapalı devre kontrollü servo hidrolik basınç presinde 4,5 MN'lik tek eksenli basınç altında yüklenmişlerdir. Aynı eksenel şekil değiştirmenin sağlanması için piston yükleme hızı silindir numunelerde 0.004 mm/sn, prizmalarda 0.012 mm/sn olarak

sabitlemiştir. Bu yükleme hızı ile silindir numunelerde yaklaşık 4 dakika sonra kırılma gerçekleşmiştir. Deney numuneleri preste kırılana kadar yüklenmiştir. E-modül değerleri, kırılma gerilmesinin % 30'luk kısmına karşılık gelen eğri üzerinde (doğrusal kısım) iki nokta işaretlenerek ve bu iki noktadan geçirilen bir doğrunun eğiminden hesaplanmıştır. Deneysel olarak elde edilen bu sonuçların gerilme-şekil değiştirme eğrileri grafiksel olarak bilgisayar ortamında matematiksel eşitlikler yardımıyla çözümlenmiş ve nümerik hale getirilmiştir. Çizelge 2'deki hacim oranları kullanılarak farklı kompozit modelleri için yazılmış eşitlikler yardımıyla on dört farklı kompozit model için elastisite modülü hesaplanmış ve Çizelge 3'te deneysel sonuçlarla birlikte verilmiştir.

Çizelge 2 - Hesaplamalarındaki harç ve agregaların hacim fraksiyonları

Kodu	V _{harç}	V _{agrega}
H	0,555	0,445
IE	0,405	0,595
B1	0,725	0,275

H: Harç, **IE:** Islak elenmiş beton, **B1:** Baraj

Doksan günlük olarak gerçekleştirilen pratik deneylerde her üç farklı E-modülündeki agrega için; harç numunelerden elde edilen E-modülü değerinin en düşük sonuçları verdiği görülmüştür. Islak eleme uygulanmış betonların E-modülü değerinin harç E-modülü değerinden daha yüksek olduğu buna karşılık baraj betonu E-modülü değerinden ise daha düşük olduğu belirlenmiştir, (Çizelge 3). Yani sıralama $E_{Baraj} > E_{Islk.Elm} > E_{Harç}$ şeklindedir. Bu, beton içerisindeki agrega hacmi, agrega ve çimento hamurunun E-modülü değeri ile ilgili bir durumdur. Agreganın E-modülünün 35 GPa'dan 65 GPa'a artması ile harç, ıslak eleme ve baraj betonu E-modülü değerleri de artmaktadır. Bu durum agreganın hacminin artması ve E-modülü değerinin değişmesi ile ilgilidir. Bu sonuç aynı zamanda E-modülü 35 GPa alan agrega ile üretilen betonlar hariç diğer iki farklı agrega E-modülüne sahip (50 ve 65 GPa) agrega ile üretilen betonların; agrega fazı E-modülü değerinin harç fazı E-modülü değerinden daha yüksek olduğunu da gösterir. E-modülü 35 GPa olan agrega ile üretilen betonlarda ise bu durum sonuçlardan görüleceği üzere tersinedir.

Üç farklı agrega E-modülüne sahip agrega ile üretilmiş betonların deneysel E-modülü sonuçları ile kompozit eşitliklerden elde edilen E-modülü değerleri karşılaştırıldığında; baraj ve ıslak eleme betonu olarak tanımlanan

betonların deneysel sonuçları ile kompozit modellerden matematiksel olarak elde edilen sonuçlar, harç numune sonuçları hariç birbirine yakındır. Harç numunelerinde ise kompozit eşitliklerinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir, (Çizelge 3).

Deneysel sonuçların kompozit modellemeler ile yapılan doğrulama hesaplamalarında Voight'in paralel modeli ile paralel ve seri fazların eşit oranlandığı Hirsch-Dougill ($x:0,8$) modellemesi kullanılarak elde edilen değerlerin deneysel sonuçlara en yakın değerleri verdiği görülmüştür. Toplam 11 farklı kompozit model esas alınarak yapılan hesaplamalar içerisinde Popovics kompozit eşitliği kullanılarak hesaplanan E-modülü değerlerinin deneysel sonuçlardan en fazla sapmayı gösteren bir model olarak karşımıza çıkması da çalışmanın bir başka ilginç sonucudur, (Çizelge 3)

Çizelge 3 - Agregada E-modülleri farklı; ıslak-elenmiş, baraj betonları ve harç numunelerinin kompozit modellerine göre E-modülü değerleri, (90 günlük)

Gün	E _a GPa	Kodu	DeneySEL sonuç	Paralel Model	Seri Model	Hirsch-Dougill, (x=0,3)	Hirsch-Dougill, (x=0,5)	Hirsch-Dougill, (x=0,8)	Popovics	Illston	Mehmel-Kern	Counto	Hashin-Hansen	Hobbs	Maxwell	Bache -Nepper-Christensen
90	35	H	28	31	30	30	31	31	15	31	31	31	31	31	31	31
		B	33	32	31	31	32	32	16	32	32	32	32	32	32	32
		IE	35	35	35	35	35	35	17	35	35	35	35	35	35	35
	50	H	32	37	34	35	36	37	18	37	36	36	36	36	36	36
		B	43	41	38	38	39	40	20	40	39	39	39	39	39	39
		IE	39	39	38	38	38	39	19	39	38	38	38	38	38	38
	65	H	37	44	37	39	40	43	22	42	40	40	40	40	41	40
		B	48	50	42	44	46	48	25	47	46	46	45	45	46	46
		IE	43	43	40	41	41	42	21	42	41	41	41	41	41	41

H: Harç, **IE:** Islak elenmiş beton, **B1:** Baraj betonu

5 SONUÇ

Beton ya da betonarme yapılarda değişik yükler altında betondaki şekil değiştirmelerin sayısal ifadesi olarak kabul edilen betonun E-modülü elastik hesaplamaların dikkate alındığı baraj gibi yapı tiplerinde oldukça önemli bir parametredir. Bilindiği üzere, özel bir beton olarak tanımlanan baraj betonlarında E-modülü değerini belirlemek oldukça zordur. Şimdiye kadar kullanılan bazı kestirimler ve adına ıslak eleme denilen yöntemle tayin edilen E-modülü değeri de hep kuşku ile karşılanmıştır.

Yukarıda irdelenen konunun teorik temellerinden anlaşılacağı üzere de E-modülü tahmini veya kompozit eşitliklerinden E-modülü hesaplanmasında dikkate alınması gereken parametre sayısının çokluğu nedeniyle ancak deneysel çalışma sonuçları güvenilir olarak kabul edilebilir. Çok fazlı anizotropik bir malzeme olması dolayısıyla betonun kırılma veya şekil değiştirme mekaniğini tam olarak açıklamak oldukça zordur. Bu konudaki yaklaşımlar belirli kabuller üzerine inşa edilmiştir. Bu nedenle kompozit birim hücre modellemeleri esas alınarak yazılmış olan E-modülü eşitlikleri betonun gerçek anlamda elastik davranışını sayısal olarak tam ifade etmekten uzaktır. Ancak bir fikir edinilmesi açısından belirli bir yere kadar güvenilir olarak kullanılabilir. Bunun yanı sıra adı geçen eşitliklerin yazılımında; betonun şekil değiştirme ve kırılma anında çok önemli bir rolü olan agrega-çimento hamuru bölgesi ihmal edilmiştir. Elektron mikroskopları ile beton içyapısı incelenmeye başlandıktan sonra betonun

morfolojisi adeta yeniden tanımlanarak bu bölgenin beton davranışında ne kadar önemli olduğunu anlaşılmıştır. Bu bölge yapısı itibari ile süreksizlik sınırı öncesinde beton davranışını etkilemekte ve plastik deformasyon oluşma sürecinin ötelenmesine yol açabilmektedir. Yine bunların yanı sıra kullanılan kompozit model eşitliklerinde beton içerisindeki boşluk yapısı ve dağılımı ile agreganın E-modülü dışındaki fiziksel özellikleri de ihmal edilmiştir. Bu nedenle anılan eşitlikler kullanılarak elde edilen sonuçlar ancak "E-modülü tahmini" için dikkate alınmalı kesin sonuçlar olarak kabul edilmemelidir.

Buna karşılık deneysel sonuçlar içerisinde ıslak eleme yapılarak elde edilen betondan ölçülen E-modülü de tartışmalıdır. Çünkü bu yöntemle elde edilen sonuçlar elenmemiş (baraj betonu) betona göre, agregada E-modülü değerinin 50 ve 65 GPa olduğu betonlarda yaklaşık % 10-15 daha düşüktür. Agregada E-modülü değerinin 35 GPa olduğu çalışmada ise ıslak eleme ile elde edilen deneysel E-modülü değeri baraj betonlarından elde edilen deneysel E-modülü değerine göre ise daha yüksektir. Bu durum kompozit eşitliklerinden elde edilen sonuçlar için de böyledir. Bu; ıslak eleme sonrası faz hacimlerinin değişmesi ve ara yüzey etkisi ile ilgilidir.

Çalışma, sonuçları açısından kısaca özetlenirse;

- Betonun E-modülü; beton bileşenleri ve özelliklerinden bağımsız değildir. Özellikle agreganın E-modülü, şekli gibi fiziksel özellikler ile çimento hamurunun yapısı sonuçlar üzerinde önemli derecede etkilidir.
- Betonun anizotropik yapısı nedeniyle, içerisindeki fazlar ve bu fazların hacimsel oranı betonun şekil değiştirmesi üzerinde oldukça önemli bir etkisi vardır. Bu fazların yanı sıra agrega-çimento hamuru ara yüzeyi de betonun elastik veya inelastik davranışı üzerinde önemli bir rol oynar.
- Kompozit modelleme esaslarına göre yazılmış olan E- modülü eşitlikleri baraj betonu E-modülü hesaplamasında kullanılabilir. Fakat elde edilen sonuçlar kesin sonuç olarak kabul edilmemelidir. Bu kabulde beton yaşı özellikle dikkate alınmalıdır. Voight'in paralel ve Hirsch-Doughill'in karma modelleri sonuçları açısından en güvenilir olarak kabul edilebilir.
- Kompozit model eşitlikleri betonu iki fazlı homojen ve izotropik fazın üç boyutlu bileşimi olarak tanımlanmış ve eşitlikler ona göre yazılmıştır. Bu tanımda betonun şekil değiştirme ve kırılma davranışında çok önemli bir rolü olan agrega-çimento hamuru ara yüzeyi dikkate alınmamıştır. Bu nedenle kompozit eşitliklerinden elde edilen sonuçlar hiçbir zaman tam olarak deneysel sonuçlara eşit değildir.
- E-modülünü tahmin etmek üzere yazılmış olan kompozit model eşitlikleri ile betonun E-modülünü tam olarak belirlemek zordur. Bu nedenle adı geçen eşitliklerinden elde edilen sonuçlar elastik hesaplamalarda bir yaklaşım veya tahminin dışında veri olarak kullanılmamalıdır.
- Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde E-modülü açısından $E_{Baraj} > E_{İslk.Elml.} > E_{Harç}$ şeklinde bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Bu durumda pratikte kullanılan ıslak eleme numunelerinin gerçek (elenmemiş) numuneleri temsil etmediği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle ıslak eleme yöntemi kullanılarak elde edilen beton E-modülü değeri ancak basit elastik hesaplamalarda kullanılmalıdır. Baraj gibi kritik yapılar söz konusu ise değişen iri agrega/ harç fazı oranı ve ara yüzey etkisi de dikkate alınarak deneyler en az 90 veya 180 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmelidir.

6 KAYNAKLAR

- [1] Mehta, P.K, Concrete, Prentice-Hall Inc., USA.
- [2] Erdoğan, T.Y., Beton, Middle East Technical University Press, Ankara, 2003.
- [3] Mindess, S., Young, J.F., Concrete, Prentice- Hall Inc., New Jersey, USA, 1981.
- [4] TS 3502, Betonda E-modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1981.
- [5] ASTM C 469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standarts, 1994.
- [6] TS 500, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [7] Committee Euro-International du Beton, CEB-FIB Model Code for Concrete Structures, Bull. 124/ 125, April 1978.
- [8] ACI 312-92, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI Manuel of Concrete Practice, Part 3, 1994.
- [9] Shah, S. P., Lange A.D., Li, Z., Mitsui, K., Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of the Paste-Aggregate interface, ACI journal, Vol. 91, No 1, pp. 30-39, January-February 1994.
- [10] R. Sanchez Trejo, Quality Control of Concrete, Report for the Committee on Materials for Dams, Bulletin 47, ICOLD, Paris, 1983
- [11] Tuthill, L.H., Sarkaria, G.S. and Cortright, C.D., Transactions of the 10. Int. Congress on Large Dams, (Montreal, 1970) IV. 181-197, ICOLD, Paris, 1970.
- [12] Topçu, İ.B., Alternative Estimation of the Modulus of Elasticity for Dam Concrete, Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 11, pp. 2199-2202, 2005.
- [13] Uğurlu, A., Betonda Agreg-Çimento Hamuru Aderansı, THBB, Hazır Beton Dergisi, Yıl 9, Sayı 49, ss. 66-74.
- [13] Soares, J.P., Mora, J. and Florentine, C.A., Transactions of the 16. International Congress on Large Dams (San Francisco, 1988), III, 483-491, ICOLD, Paris, 1988.
- [14] Topçu, İ.B., Hafif Beton Özelliklerinin Kompozit Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 1988, İstanbul, 126s.
- [15] Topçu, İ.B., Analysis of Rubberized Concrete as a Composite Material, Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 8, pp. 1135-1139, 1997.

[16] Villardell, J. Aguado, A., Agullo, L. and Gettu, R., Estimation of the Modulus of elasticity for dam concrete, Cement and Concrete Research, No. 1, pp. 93-101, 1998.

[17] Neville, A.M., Properties of Concrete, Longman Scientific and Technical, England, 2004

BASAMAKLI KASKAT HAVALANDIRICILARIN OPTİMAL TASARIMI

Tamer BAĞATUR
Yrd. Doç.Dr., Dicle Üni. Müh.-Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl. 21280 DİYARBAKIR
tbagatur@dicle.edu.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 25.03.2008, Bildirinin kabul tarihi: 15.05.2008)

ÖZET

Basamaklı kaskat havalandırıcıların en yüksek verimleri 20° ile 25° arasındaki kaskat açılarında gözlemlenmektedir. Bu değer optimal olarak 22° açı için uygunluk göstermektedir. Bu çalışmada, basamaklı kaskat havalandırıcılar ile ilgili yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen verilere bağlı olarak bu yapıların tasarım parametreleri analiz edilmekte ve optimal şartlara göre geliştirilen tasarım eşitlikleri verilmektedir. Optimal tasarım eşitliklerinin kullanımı, bir içmesuyu arıtma tesisinin havalandırma ünitesi için bir örnek uygulama üzerinde gösterilerek tasarım ile ilgili pratik bilgiler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Basamaklı kaskatlar, havalandırma, optimal tasarım, havalandırma verimi, nap akımı

OPTIMAL DESIGN OF STEPPED CASCADE AERATORS

ABSTRACT

The maximum values of aerator efficiency of stepped cascade aerator are observed between 20° and 25°. For practical design, the stepped cascade angle can be selected as 22°. Moreover, this value is optimal. Therefore, this study aims optimal design of stepped cascades depending on aeration efficiency of one individual step. New equations for optimal design of stepped cascade aerators are developed. A stepped cascade design in terms of aeration efficiency can be optimized using these new equations. The detailed example for given the predictive model of aeration efficiency and optimal design equations is presented.

Key words: Stepped cascades, aeration, optimal design, aeration efficiency, nappe flow

1 GİRİŞ

İçme suyu temini için su kaynaklarımızı içeren ham sular, birçok işlemler serisi ile arıtma işlemine tabii tutulur. Bu işlemlerin amacı, kimyasal olarak güvenli, zararlı mikroplardan arınmış, koku, tat ve görüntü yönünden içmeye elverişli temiz bir su elde etmek olacaktır. Temiz su, günlük hayat akışımız için önemli bir esastır. Çözünmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu su kalitesinin önemli bir göstergesidir. Havalandırma işleminin amaçlarından biride atmosfer ile su arasında kütle transferi ile çözünmüş oksijen konsantrasyonu değerlerini artırmaktır. Son zamanlarda bilimsel araştırmalar, hidrolik yapılarda hava girişi ve oksijen transferi konuları üzerinde yoğunlaşmıştır.

Sifon, kapalı kondüitler [Ervine, 1998], çarpmalı jet yapısı, ağızlıklardan deşarj edilen dalmalı su jetleri [Bin, 1993; Bağatur vd., 2002; Bağatur ve Sekerdag, 2003], klasik dolusavaklar [Gulliver vd.,1998], basamaklı dolusavaklar [Essery ve Horner, 1978; Chamani ve Rajaratnam, 1994 ve 1999; Chanson, 1995 ve 2002; Baylar ve Emiroglu, 2003; Baylar vd., 2006; Baylar vd., 2007], savak yapıları [Gameson, 1957; Avery ve Novak, 1978; Nakasone, 1987; Watson vd.,1998; Baylar ve Bağatur, 2000; Baylar vd., 2001a; Baylar vd., 2001b], ve labirent savaklar [Wormleaton ve Soufiani, 1998] atmosferden hava girişinin görüldüğü hidrolik yapılardır. Bu yapılar, çözünmüş oksijen seviyelerini arttırabilirler.

Basamaklı yapı sistemleri, uzun yıllardan beridir enerji sönümlenme ve havalandırma yapıları olarak kullanıla gelmiştir. Basamaklı kaskat yapılar, mühendislikte havalandırma yapıları olarak bilinir. Basamaklı kaskat havalandırıcılar, nap akım durumunda yeterli hava kabarcığı girişi, uzun bekleme zamanı ve türbülanslı karışım özelliklerinden dolayı etkili havalandırma yapılarından biridir. Toombes ve Chanson (2000) çalışmalarında, basamaklı yapıların eğimli-düz kanallara göre 10 kat daha fazla oksijen verimi sağladıklarını buldular.

Bazı arıtma tesisleri demir, manganez ve nitrat uzaklaştırma işleminde suyun oksijenlendirilmesine gerek duyar. Bu basit bir kaskat yapısı ile başarılabilir. Kaskat havalandırmada, su akımı ince bir formda birçok basamaklar üzerinden aşağılara doğru akar (Fotoğraf 1). Küçük debili sistemlerde, suyun oksijen doygunluğuna ulaşmak için toplam yüksekliği 1-2 m olan bir veya birkaç basamaklı yapı yeterli olacaktır. Basamaklı yapı suyun yüzey alanını artırır ve gazların salınmasına izin verir.

Basamaklı kaskat havalandırıcılar aşağıdaki amaçlar için tercih edilmektedir.

1. Çözünmüş oksijen seviyelerini doyma noktasına getirmek
2. Demir ve manganezin oksitlenmesini sağlayarak bu maddeleri çözünmez forma dönüştürmek ve çökeltme ve filtreleme aşamalarında arıtılmalarını sağlamak
3. Sudaki karbonat dengesini ayarlamak için sistemden CO₂ uzaklaştırmak
4. Hidrojen sülfür, metan, uçucu yağlar ve Zararlı kimyasalları gidermek
5. Havalandırılmış suya ön dezenfeksiyon amaçlı klorlama yapmaktır.

Çizelge 1 - DSİ tarafından yaptırılan içmesuyu arıtma tesisleri ve debi değerleri

Arıtma tesisi adı	Debisi, m ³ /gün
İstanbul Ömerli İçmesuyu Arıtma Tesisi	300 000
İstanbul Kağıthane İçmesuyu Arıtma Tesisi	300 000
İstanbul Yeni Emirli İçmesuyu Arıtma Tesisi	500 000
İstanbul Cumhuriyet İçmesuyu Arıtma Tesisi	7200 000
Ankara İvedik İçmesuyu Arıtma Tesisi	2x564 000
Ankara Kayaş-Bayındır İçmesuyu Arıtma Tesisi	30 000
Ankara Pursaklar İçmesuyu Arıtma Tesisi	75 000
Samsun İçmesuyu Arıtma Tesisi	200 000
Bursa İçmesuyu Arıtma Tesisi	2x250 000
Mersin İçmesuyu Arıtma Tesisi	3x130 000
Konya İçmesuyu Arıtma Tesisi	104 000
Gaziantep İçmesuyu Arıtma Tesisi	120 000
İzmir Tahtalı İçmesuyu Arıtma Tesisi	520 000
Manavgat İçmesuyu Arıtma Tesisi	250 000
Diyarbakır İçmesuyu Arıtma Tesisi	255 000
Balıkesir İçmesuyu Arıtma Tesisi	220 000
Şanlıurfa İçmesuyu Arıtma Tesisi	270 000



Fotoğraf 1 - Basamaklı kaskat havalandırıcı
(Diyarbakır içmesuyu arıtma tesisi)

Ülkemizde bu amaçlar için DSİ tarafından birçok içmesuyu arıtma tesisi yapılmıştır. Bu tesislerin adları ve debileri Çizelge 1'de verilmiştir. Literatürde, basamaklı kaskat havalandırıcıların oksijen transfer verimleri için geliştirilen uygun hesap eşitlikleri mevcut değildir [Koduri ve Barkdoll, 2003]. Essery ve Horner (1978), Chamani ve Rajaratnam (1994, 1999), Chanson (1995, 2002) ve Hewlett ve ark.,(1997) basamaklı dolusavakların hidrolik tasarımı üzerinde yoğunlaştılar. Pratikte basamaklı dolusavaklar savak akımının enerjisini sönümlenmek için uygulanmaktadır. Basamaklı kaskatlar ise havalandırma işlemi için kullanılmaktadır.

2 BASAMAKLI KASKATLAR İÇİN TASARIM DÜŞÜNCELERİ

Çözünmüş oksijen konsantrasyonu verilerine bağlı olarak havalandırma verimleri aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [Gulliver vd.,1990]:

$$E_{20} = (C_f - C_i) / (C_{sat} - C_i) = 1 - (1/r) \quad (1)$$

Burada;

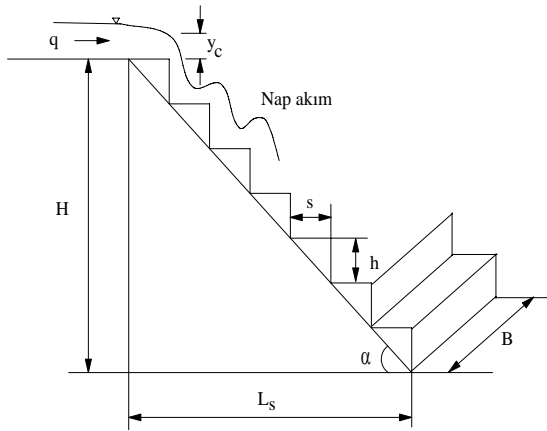
C_f Kaskat yapısının sonundaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (basamaklı kaskatın bitiminde),

C_i Başlangıçtaki çözülmüş oksijen konsantrasyonu (basamaklı kaskatın başlangıcında),

C_{sat} Su sıcaklığı ve atmosfer basıncının bir fonksiyonu olarak çözülmüş oksijenin doyma konsantrasyonu ve

r Çözülmüş oksijenin eksiklik oranıdır. Basamaklı kaskat yapılarının tasarım parametreleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Şekil 1):

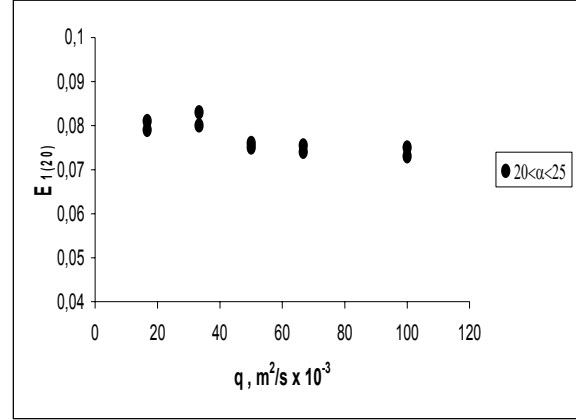
- 1.Kaskat akımının birim debisi
- 2.Havalandırma verimi
- 3.Basamaklı kaskatın açısı
- 4.Basamak yüksekliği
- 5.Basamaklı kaskat yapısının yüksekliği
- 6.Basamaklı kaskat yapısının uzunluğu
- 7.Basamak sayısı
- 8.Basamaklı kaskat yapısının kapladığı yüzey alanı
- 9.Basamaklı kaskat yapısının kapladığı beton hacmi



Şekil 1 - Basamaklı kaskat yapılarının tasarım parametreleri

2.1 Kaskat Akımının Birim Debisi

Baylar vd.,(2006, 2007) tarafından elde edilen havalandırma verimleri (E_{20}) toplam basamak sayılarına bölünerek bir bireysel basamağın havalandırma verimi ($E_{1(20)}$) olarak tanımlanmıştır. Şekil 2 kaskat açısına bağlı olarak birim debi ile bir bireysel basamağın göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi birim debi ile bireysel basamağın havalandırma verimi arasında sabit kabul edebileceğimiz bir ilişki vardır. Bir başka deyişle, birim debinin bireysel basamağın havalandırma verimi üzerinde fazla bir etkinliği olmamaktadır.



Şekil 2 - Birim debi ile bir bireysel basamağın havalandırma verimi arasındaki ilişki

2.2 Havalandırma Verimi

Bir bireysel basamağın havalandırma verimi aşağıdaki eşitlikle verilmektedir (Baylar ve diğerleri., 2007):

$$E_{1(20)} = 1 - \exp \left[-5,730 q^{-0,035} h^{0,998} (\cos \alpha)^{12,042} (\sin \alpha)^{1,590} \right] \quad (2)$$

Burada;

$E_{1(20)}$ Bir bireysel basamağın havalandırma verimi (20 °C),

q Birim debi ($q=Q/B$),

h Basamak yüksekliği ve

α Kaskatın açısıdır.

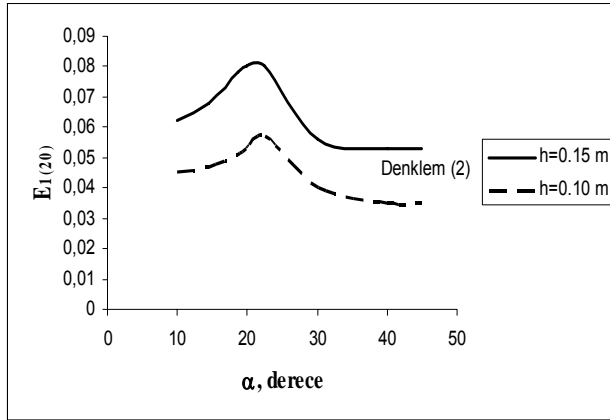
2.3 Basamaklı Kaskat Yapısının Açısı

Baylar vd., (2006, 2007) basamaklı dolusavak ve kaskat yapılarının havalandırma verimlerini üzerinde bir seri deneysel çalışmalar yürüttüler. Deneyler 0,30 m genişliğinde, 0,50 m derinliğinde olan eğimli bir dikdörtgen kanal üzerine yerleştirilen basamaklı bir model üzerinde yapıldı. Çalışma debisi 5-50 L/s, kanal açısı 10-40 derece arasında seçildi. Basamak yükseklikleri 5, 10 ve 15 cm olarak ayarlandı. Model yüksekliği 2,50 m olarak yapılandırıldı. Çözülmüş oksijen miktarları Hanna Model bir oksijenmetre yardımı ile tayin edildi. Belirtilen model üzerinde yürütülen çalışmalara bağlı olarak; basamaklı kaskat havalandırıcıların en yüksek verimleri 20° ile 25° arasındaki değişim gösteren kaskat açılarında gözlemlenmektedir. Bu değer optimal olarak 22° açı için uygunluk göstermektedir (Şekil 3).

2.4 Minimum Basamak Yüksekliği

Basamaklı kanallarda akım; sıçramalı, geçiş ve nap akım olarak sınıflandırılmaktadır. Son zamanlarda, Baylar ve Emiroglu (2003), Baylar vd., (2006, 2007) yürüttükleri deneysel çalışmalarda nap akımı şartlarının oksijen içeriği yönünden etkin rol oynadığını buldular. Nap akımı şartları; kaskat açısının azalması,

basamak yüksekliğinin artması durumlarında elde edilmektedir.

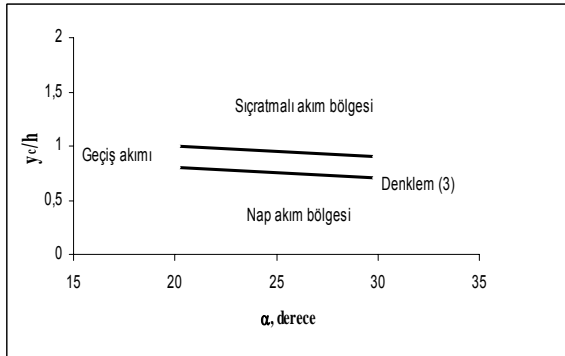


Şekil 3 - Bir bireysel basamağın havalandırma verimi ile kaskat açısı arasındaki ilişki

Ohtsu vd., (2001), Yasuda vd., (2001) Şekil 4'te tanımlandığı gibi akımları üç bölgeye ayırdılar. Nap akımı şartları için basamak yüksekliğinin minimum değeri için aşağıdaki eşitliği verdiler (Eşitlik (3)).

$$(h_{\min}/y_c) = 0,57 (\tan\alpha)^3 + 1,30 \quad (3)$$

Bu durumda, basamak yüksekliğinin bu değerden daha büyük seçilmesi uygun olacaktır ($h \geq h_{\min}$). Şekil 4'e bağlı olarak basamak yüksekliğinin minimum değeri Eşitlik (3) ile hesaplanabilir.



Şekil 4 - Nap akım için kritik sınır

Kritik akım derinliği ise Eşitlik (4) ile bulunabilir.

$$y_c = (q^2/g)^{1/3} \quad (4)$$

Burada,

- y_c Kritik akım derinliği,
- h_{\min} Minimum basamak yüksekliği,
- g Yerçekimi ivmesi,
- q Birim debi ve
- α Kaskatın açısıdır.

2.5 Basamak Sayısı

Kaskat havalandırıcısının basamak sayısı, maksimum havalandırma verimi ($E_{\max}=1$) veya

istenilen havalandırma verimine (örneğin; $E_{\text{istenilen}} = \% 85$) göre hesaplanır. Maksimum havalandırma veriminin 1 değerine ulaşması oksijen transferinin doygunluk seviyeye ulaştığını göstermektedir. Optimal basamak sayısı (N_{opt}), Eşitlik (5) yardımıyla hesaplanabilir.

$$N_{\text{opt}} = E_{\max(20)}/E_{1(20)} = 1,00/E_{1(20)} \quad (5)$$

Burada;

- N_{opt} Optimal basamak sayısı (hesaplanan değerler tam sayıya yuvarlatılır),
- $E_{\max(20)}$ Maksimum havalandırma verimi (20 °C sıcaklıkta),
- $E_{1(20)}$ Bir bireysel basamağın havalandırma verimidir (20 °C).

Tasarım aşamasında arzu edilen havalandırma verimi esas alınabilir. Bu durumda, istenilen havalandırma verimi ($N_{\text{istenilen}}$) Eşitlik (6) yardımıyla hesaplanabilir.

$$N_{\text{istenilen}} = \% E_{\text{istenilen}} / (E_{1(20)} 100) \quad (6)$$

Burada,

- $N_{\text{istenilen}}$ İstenilen havalandırma verimine bağlı basamak sayısı (hesaplanan değerler tam sayıya yuvarlatılır),
- $\% E_{\text{istenilen}}$ İstenilen havalandırma verimi (20 °C sıcaklıkta),
- $E_{1(20)}$ Bir bireysel basamağın havalandırma verimidir (20 °C).

2.6 Basamaklı Kaskat Yapısının Yüksekliği

Basamaklı kaskat yapısının yüksekliği, basamak sayısı ve basamak yüksekliğine bağlı olarak Eşitlik (7) yardımıyla hesaplanabilir.

$$H_{\text{opt}} = N_{\text{opt}} h \quad (7)$$

Burada,

- H_{opt} Optimal basamaklı kaskat yapısının yüksekliği (hesaplanan değerler tam sayıya yuvarlatılır),
- N_{opt} Optimal basamak sayısı (hesaplanan değerler tam sayıya yuvarlatılır) ve
- H Basamak yüksekliğidir.

2.7 Basamaklı Kaskat Yapısının Uzunluğu

Basamaklı kaskat yapısının uzunluğu, basamak sayısı ve basamak genişliğine bağlı olarak Eşitlik (8) yardımıyla hesaplanabilir.

$$L_s = N_{\text{opt}} s \quad (8)$$

Burada,

- L_s Basamaklı kaskat yapısının uzunluğu,
- N_{opt} Optimal basamak sayısı (hesaplanan değerler tam sayıya yuvarlatılır),
- s Basamak genişliğidir.

2.8 Basamaklı Kaskat Yapısının Kapladığı Yüzey Alanı

Basamaklı kaskat yapısının kapladığı yüzey alanı, kaskat yapısının genişliği ve kaskat yapısının uzunluğuna bağlı olarak Eşitlik (9) yardımıyla hesaplanabilir.

$$A = B L_s \quad (9)$$

Burada,

- A Basamaklı kaskat yapısının kapladığı yüzey alanı,
 L_s Basamaklı kaskat yapısının uzunluğu,
 B Basamaklı kaskat yapısının genişliğidir.

2.9 Basamaklı Kaskat Yapısının Beton Hacmi

Basamaklı kaskat yapısının beton hacmi Eşitlik (10) yardımıyla hesaplanabilir.

$$V = (L_s H B) / 2 + (s h B N) / 2 \quad (10)$$

Burada,

- V Basamaklı kaskat yapısının beton hacmi,
 L_s Basamaklı kaskat yapısının uzunluğu,
 $N_{opt} (=N)$ Optimal basamak sayısı (hesaplanan değerler tam sayıya yuvarlatılır),
 B Basamaklı kaskat yapısının genişliği,
 H Basamaklı kaskat yapısının yüksekliği,

- H Basamak yüksekliği,
 s Basamak genişliğidir.

3 SONUÇLAR

Basamaklı kaskat havalandırıcıların en yüksek verimleri 20° ile 25° arasındaki kaskat açılarında gözlemlenmektedir. Bu değer optimal olarak 22° açı için uygunluk göstermektedir. Bu çalışmada, basamaklı kaskat havalandırıcılar ile ilgili yürütülen deneysel çalışmalardan elde edilen verilere bağlı olarak bu yapıların tasarım parametreleri analiz edilmekte ve optimal şartlara göre geliştirilen tasarım eşitlikleri Çizelge 2'de verilmektedir. Verilen optimal tasarım eşitliklerinin kullanımı ile bir içmesuyu arıtma tesisinin havalandırma ünitesi için basamaklı kaskat havalandırıcıların tasarımı kolayca yapılabilir.

4 UYGULAMA

Bu bölümde, bir içmesuyu arıtma tesisinin havalandırma ünitesi için verilen optimal tasarım Eşitliklerinin kullanımı bir uygulama üzerinde gösterilerek tasarım ile ilgili pratik bilgiler sunulmaktadır.

Çizelge 2 - Optimal şartlara göre geliştirilen basamaklı kaskat havalandırıcıların tasarım Eşitlikleri (kaskat açısı= 22°)

Sıra no	Tanımlama	Eşitlik
1	Birim debi, m ² /s	$q = Q / B$
2	Kritik akım, m	$y_c = (q^2/g)^{1/3}$
3	Nap akım için minimum basamak yüksekliği, m	$(h_{min}/y_c) = 1,34$
4	Basamak genişliği	$s = 2,475 h$
5	Bir bireysel basamağın havalandırma verimi	$E_{1(20)} = 1 - \exp [-0,482 q^{-0,035} h^{0,998}]$
6	Basamak sayısı, adet (hesaplanan değerler tam sayıya yuvarlatılır)	$N_{opt} = E_{max(20)}/E_{1(20)} = 1,00/E_{1(20)}$
7	İstenilen havalandırma verimine bağlı basamak sayısı, adet	$N_{istenilen} = \% E_{istenilen} / (E_{1(20)} 100)$
8	Basamaklı kaskat yapısının yüksekliği, m	$H_{opt} = N_{opt} h$ veya $H_{opt} = N_{istenilen} h$
9	Basamaklı kaskat yapısının uzunluğu, m	$L_s = 2,475 H_{opt}$
10	Basamaklı kaskat yapısının kapladığı yüzey alanı, m ²	$A = B L_s$
11	Basamaklı kaskat yapısının beton hacmi, m ³	$V = (L_s H B) / 2 + (s h B N) / 2$

Tasarım Örneği: Debisi, $Q= 2,95 \text{ m}^3/\text{s}$ (veya $255000 \text{ m}^3/\text{gün}$) ve genişliği, $B = 6 \text{ m}$ olan basamaklı bir kaskat yapısının kanal açısını seçiniz.

Birim debiyi hesaplayınız.

Kritik akım derinliğini hesaplayınız.

Minimum basamak yüksekliğini bulunuz.

Bir bireysel basamağın havalandırma verimini hesaplayınız.

$E_{\max} = 1$ ve $E_{\text{istenilen}} = \% 85$ için basamak sayısını hesaplayınız.

Basamak genişliği, kaskat yapısının yükseklik ve yatay uzunluğu değerlerini hesaplayınız.

Tasarım parametrelerini basamak kaskat yapısının genişliklerini sırasıyla $B = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ ve 10 m için hesaplayarak karşılaştırınız.

Çözüm:

Basamaklı kaskat yapısının kanal açısı:

Basamaklı kaskat yapısının kanal açısı $20^\circ \leq \alpha_{\text{opt}} \leq 25^\circ$ için etkin değerler vermektedir. Pratik olması yönünden bakıldığında, basamaklı kaskat yapısının kanal açısı 22° seçilmesi uygundur. $\alpha = 22^\circ$ için, $\tan 22^\circ = 0,404$, $\cos 22^\circ = 0,927$ ve $\sin 22^\circ = 0,374$ 'tür.

Birim debi: $q = Q/B = 2,95/6 = 0,491 \text{ m}^2/\text{s}$

Kritik akım derinliği: $y_c = (q^2/g)^{1/3} = (0,491^2/9,81)^{1/3} = 0,29 \text{ m}$

Minimum basamak yüksekliği:

$(h_{\min}/y_c) = 0,57(\tan \alpha)^3 + 1,30 = 0,57(\tan 22^\circ)^3 + 1,30 = 1,34$

$h_{\min} = 0,29 \times 1,34 = 0,39 \text{ m}$

Sonuç olarak $h=0,40 \text{ m}$ seçilebilir.

Bir bireysel basamağın havalandırma verimi:

$$E_{1(20)} = 1 - \exp \left[-5,730 q^{-0,035} h^{0,998} (\cos \alpha)^{12,042} (\sin \alpha)^{1,590} \right]$$

$$= 1 - \exp \left[-5,730 (0,491)^{-0,035} (0,40)^{0,998} (0,927)^{12,042} (0,374)^{1,590} \right]$$

$$E_{1(20)} = 0,179$$

$E_{\max}=1$ ve $E_{\text{istenilen}} = \% 85$ için basamak sayısı:

$$N_{\text{opt}} = E_{\max(20)}/E_{1(20)} = 1,00/0,179 = 5,58$$

ve N_{opt} 6 adet basamak seçilebilir.

$$N_{\text{istenilen}} = \% E_{\text{istenilen}} / (E_{1(20)} 100)$$

$$= 85/(0,179 \times 100) = 4,74$$

$N_{\text{istenilen}} = 5$ adet basamak seçilebilir.

Basamak genişliği, kaskat yapısının yüksekliği ve kaskat yapısının yatay uzunluğu:

$$\tan \alpha = h/s \text{ ve } s = h/\tan \alpha = 0,40/0,404 = 0,99 \text{ m}$$

$$H_{\text{opt}} = N_{\text{opt}} h = 6 \times 0,40 = 2,40 \text{ m}$$

$$L_s = N_{\text{opt}} s = 6 \times 0,99 = 5,94 \text{ m}$$

Tasarım parametrelerini basamak kaskat yapısının genişliklerini sırasıyla $B=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ ve 10 m için hesaplanması: Hesaplanan parametreler Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3 - $B = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ ve 10 m için tasarım parametrelerini

B (m)	q (m ² /s)	y _c (m)	h _{min} (m)	h (m) (seçildi)	E ₁₍₂₀₎	N _{opt}	N _{opt} (seçildi)	H (m)	s (m)	L _s (m)	A (m ²)	V (m ³)
2	1.475	0.60	0.80	0.80	0.316	3.2	4	3.20	1.98	7.92	15.84	31.68
3	0.983	0.46	0.62	0.65	0.269	3.7	4	2.60	1.61	6.44	19.32	31.39
4	0.737	0.38	0.51	0.55	0.235	4.3	5	2.75	1.36	5.44	21.76	37.40
5	0.590	0.33	0.44	0.45	0.198	5.0	5	2.25	1.11	5.55	27.75	37.46
6	0.491	0.29	0.38	0.40	0.179	5.6	6	2.40	0.99	5.94	35.64	49.89
7	0.421	0.26	0.35	0.35	0.160	6.3	7	2.45	0.87	6.09	42.63	59.68
8	0.368	0.24	0.32	0.35	0.160	6.3	7	2.45	0.87	6.09	48.72	68.21
9	0.327	0.22	0.29	0.30	0.140	7.1	8	2.40	0.74	5.92	53.28	71.93
10	0.295	0.21	0.27	0.30	0.140	7.1	8	2.40	0.74	5.92	59.20	79.92

5 KAYNAKLAR

- [1] Avery, S.T. and Novak, P., "Oxygen transfer at hydraulic structures". J. Hydr. Div., 104, 11, 1521-1540, 1978
- [2] Bagatur, T., Baylar, A. and Sekerdag, N., "The effect of nozzle type on air-entrainment by plunging water jets". Water Qual. Res. Can., 37, 3, 599-612, 2002.
- [3] Bagatur, T and Sekerdag, N., "Air-Entrainment Characteristics in a Plunging Water Jet System Using Rectangular Nozzles with Rounded Ends". Water SA, 29, 1, 35–38, 2003.
- [4] Baylar, A. and Bagatur, T., "Aeration Performance of Weirs". Water SA, 26, No. 4, 521–526, 2000.
- [5] Baylar, A., Bagatur, T. and Tuna, A., "Aeration Performance of Triangular Notch Weirs at Recirculating System". Water Qual. Res. Can, 36, 1, 121–132, 2001a.
- [6] Baylar, A., Bagatur, T. and Tuna, A., "Aeration Performance of Triangular-Notch Weirs". J. Chartered Institution of Water and Environ. Management, 15, 3, 203–206, 2001b.
- [7] Baylar, A. and Emiroglu, M. E., "Study of aeration efficiency at stepped channels". Proc. Instn Civil Engrs Wat., Marit. and Energy, 156, WM3, 257–263, 2003.
- [8] Baylar, A., Emiroglu, M. E. and Bagatur, T., "An experimental investigation of aeration performance in stepped spillways". Water and Environment Journal, 20, 1, 35–42, 2006.
- [9] Baylar, A., Bagatur, T. and Emiroglu, M. E., "Aeration efficiency with nappe flow over stepped cascades". Proc. Instn. Civil Engrs., Water Management, 160, WM1, 43–50, 2007.
- [10] Bin, A. K., "Gas entrainment by plunging liquid jets". Chem. Eng. Sci., 48, 3585-3630, 1993.
- [11] Chamani M. R. and Rajaratnam N., "Jet flow on stepped spillways". J. Hydr. Engrg, 120, 2, 254–259, 1994.
- [12] Chamani M. R. and Rajaratnam N., "Characteristics of skimming flow over stepped spillways". J. Hydr. Engrg, 125, 4, 361–368, 1999.
- [13] Chanson H., "The hydraulics of stepped chutes and spillways". Balkema, Lisse, The Netherlands, 2002.
- [4] Chanson H. and Toombes L., "Experimental study of gas-liquid interfacial properties in a stepped cascade flow". Envir. Fluid Mech., 2, 3, 241-263.,2002.
- [5] Ervine D. A., "Air entrainment in hydraulic structure: a review". Proc. Instn Civil Engrs Wat., Marit. and Energy, 130, Sept, 142–153, 1998.
- [16] Essery, I. T. S., and Horner, M. W., " The hydraulic design of stepped spillways". Report 33, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA),1978.
- [17] Gameson, A.L.H., "Weirs and the aeration of rivers." J. Inst. Water Eng., 11, 477–490, 1957.
- [18] Gulliver J. S., Thene J. R. and Rindels A. J., "Indexing gas transfer in self-aerated flows". J. Envir. Engrg., 116, 3, 503-523, 1990.
- [19] Gulliver, J. S., Hibbs, D.E. and McDonald, J.P., "Predictive capabilities in oxygen transfer at hydraulic structures". J. Hydr. Engrg, 127, 10, 664–671, 1998.
- [20] Hewlett H. W. M., Baker R., May R. W. P., and Pravdivets Y. P. " Design of stepped-block spillways". Special publication 142, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), 1997.
- [21] Koduri S. and Barkdoll B. D., "Evaluation of Oxygen Transfer at Stepped Cascade Aerators". World Water and Envir. Resources Congress, June 23–26, Pennsylvania, USA, 2003.
- [22] Nakasone, H., "Study of aeration at weirs and cascades." J. Envir. Engrg., 113, 1, 64-81,1987.
- [23] Ohtsu I., Yasuda Y. and Takahashi M., "Discussion of 'Onset of skimming flow on stepped spillways". J. Hydr. Engrg., 127, 6, 522-524, 2001.
- [24] Toombes L. and Chanson H., "Air-Water Flow and Gas Transfer at Aeration Cascades: A Comparative Study of Smooth and Stepped Chutes". International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, 77–84, Zurich, Switzerland, 2000.
- [25] Watson, C., Walters, W.R. and Hogan, S.A., "Aeration performance of low drop weirs." J. Hydr. Engrg. 124, 1, 63–49, 1998
- [26] Wormleaton P. R., and Soufiani E., " Aeration performance of triangular platform labyrinth weirs". J. Environmental Engrg.,124, 8, 709-719, 1998.
- [27] Yasuda Y., Takahashi M. and Ohtsu I., "Energy dissipation of skimming flows on stepped-channel chutes". Proceeding of the 28th Congress of IAHR, , D 2–18, September, 531–536, 2001.
- [28] www.dsi.gov.tr

GÖMÜLÜ ÇELİK BORU TASARIMI

Köksal Buğra ÇELİK
İnşaat Yüksek Mühendisi, DSİ Proje ve İnşaat Dairesi Başkanlığı, 06100 Yücepete ANKARA
koksalc@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 01.05.2008, Bildirinin kabul tarihi: 02.06.2008)

ÖZET

Gömülü boru tasarımında borunun yük altındaki davranışına bağlı iki temel yaklaşım mevcuttur. Yük altında nispeten daha fazla deformasyon yapan, taşıma kapasitesinin önemli bir kısmını kendini saran zeminden sağlayan boru esnek olarak adlandırılır. Bu çalışmada, gömülü esnek çelik boru tasarımı AWWA M11, Çelik Boru Tasarım ve Yerleştirme Kılavuzu'ndaki tavsiyeler doğrultusunda değerlendirilmiştir. Esnek çelik borunun taşıma kapasitesi, çapta yük altında oluşan deformasyona ve burkulmaya karşı gösterdiği dirence göre değerlendirilir. Hareketli yük ve vakumun birlikte tasarım şartlarında bulunması halinde AWWA M11 her iki durumda ayrı yük kombinasyonlarının dikkate alınmasını önerir. Bunun sebebi vakum yüklerinin genelde kısa bir süre için etkimesi ve vakum ile azami yüzey yüklerinin birlikte etkimesi ihtimalinin oldukça düşük olmasıdır. Dolgunun cinsi ve sıkıştırılma derecesi ile yakından ilgili olan pasif itki esnek boru deformasyonunda baskın faktördür.

Anahtar Kelimeler: İç basınç, vakum, taşıt yükleri, burkulma, boru sıklığı, zemin yükleri, Iowa Eşitliği

BURIED STEEL PIPE DESIGN

ABSTRACT

There are two fundamental approaches to design of buried pipe, based on the pipe behaviour under load. Pipe that exhibits relatively large deformations under loads, and obtains a large part of its supporting capacity from the surrounding soil, is referred to as flexible. In this article buried flexible steel pipe design is reviewed according to the recommendations of AWWA M11, Steel Pipe - A Guide for Design and Installation. The structural capacity of flexible steel pipes is evaluated on the basis of resistance to buckling and diametrical deflection under load. In case vacuum load and surface live load are both included in the design conditions, AWWA M11 recommends that separate load combinations be considered for each. That is because vacuum loads usually occur only for a short time and the probability of vacuum and maximum surface load occurring simultaneously is very small. The passive resistance, which is closely related to the type of backfill and its degree of compaction, is the dominant influence on the deflection of flexible pipes.

Key Words: Internal pressure, vacuum, vehicle loads, buckling, pipe stiffness, soil loads, Iowa Formula

1 GİRİŞ

Katı maddeler esnek ve kırılğan olmak üzere iki gruba ayrılır. Mühendislik uygulamalarında bu iki kategori yükleme durumunda farklı davranışlar gösterdikleri için, ayrı ayrı ele alınır. Esnek maddeler akma sınırı diye adlandırılan gerilme derecesinde belirgin bir plastik deformasyon gösterir ve kırılmadan önce önemli miktarda uzama gösterirler. Kırılğan maddelerde ise plastik deformasyon tam belirgin değildir ve kırılmadan önceki son

uzama miktarı oldukça azdır [4, 6 ve 7]. Bu çalışmada esnek olarak kabul edilen çelik borular incelenecektir.

Borulu iletim sistemleri yaklaşık 4000 yıldır kullanılmakta olup geçmişte pişmiş toprak, ahşap, taş, kurşun gibi malzemeler boru imalinde kullanılmıştır [11]. 18. yüzyılda font borunun su, doğalgaz ve kanalizasyon hatlarında kullanılmaya başlanması ile birlikte boru teknolojisinde önemli gelişmeler

kaydedilmiştir. Çelik boruların 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren kullanılmaya başlanması ve 1920'lerin sonuna doğru boru birleşimlerinde kullanılan elektrik kaynağının geliştirilmesi ile birlikte yüksek iç basınçlara mukavim, sızdırmaz ve büyük çaplı boru hatlarının inşası gerçekleştirilmeye başlanmıştır [14]. Çelik boruların başlıca avantajları iç basınçlara, dolgu yüklerine, sürşarj yüklerine, vakuma, su darbesine ve dalga şoklarına karşı gösterdikleri yüksek mukavemettir [5]. Bu boruların en büyük dezavantajı olan korozyon hasarları ise iç-dış kaplamalar ve katodik koruma ile minimuma indirilebilmektedir.

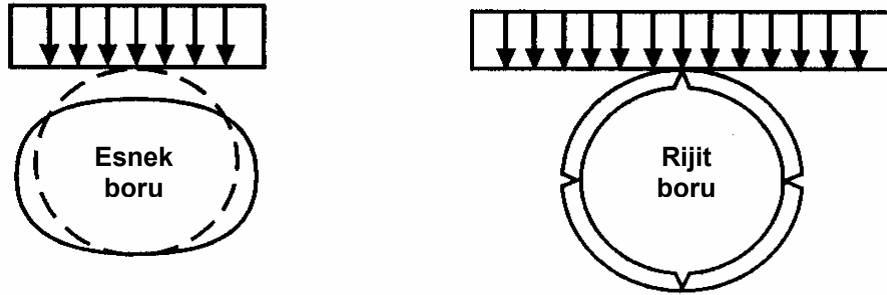
Bu çalışmada gömülü esnek boru tasarımı Amerikan Su İşleri Birliği (AWWA) tarafından hazırlanan AWWA M11, Çelik Boru Tasarım ve Yerleştirme Kılavuzu'ndaki tavsiyeler doğrultusunda incelenmiş olup kılavuzda detaylı olarak ele alınmayan konular da analiz edilmiştir. Öncelikle esnek ve rijit borular arasındaki yapısal farklılıklar değerlendirilmiş, bunu takiben gömülü esnek çelik borularda iç basınç ile taşıma ve montaj için gerekli minimum cidar kalınlığının saptanması ele alınmıştır. Daha sonra gömülü esnek çelik boruya etkileyen sabit yüklerin hesabı ve sürşarj yüklerine ait esaslar özetlenmiştir. Sabit yükler gerek kemerlenme etkisini dikkate alan "Marston yükü" gerekse hendek genişliğinden bağımsız hesap imkânı sağlayan ve esnek

boruların projelendirilmesinde yaygın şekilde kullanılan "prizma yükü" kabullerine göre incelenmiştir. Yatay deformasyonu etkileyen gecikme faktörü, yataklanma sabiti gibi faktörler kısaca özetlenirken, özellikle zemin reaksiyon modülü üzerinde ayrıntılı şekilde durulmaya çalışılmıştır. Gömülü esnek çelik borularda iç ve dış kaplama cinslerine göre müsaade edilen deformasyon oranları bir alt başlık halinde incelenmiştir.

Son olarak flambaj (burkulma) ve eğilme gerilmeleri bahisleri özetlenmiştir. Çalışmada verilen bütün eşitliklerin düzenlenmesinde SI birim sistemi tercih edilmiştir.

2 ESNEK VE RİJİT BORU

Hemen hemen bütün borular yükleme sırasında gösterdikleri performansa göre rijit ve esnek borular olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Esnek borular; yük altında yapısal hasara uğramadan önemli miktarda deformasyon yapan ve taşıma kapasitesinin büyük bir bölümünü kendini saran zeminin pasif itkisinden sağlayan borulardır. Rijit borular ise çatlak benzeri önemli yapısal hasarlar olmadan oldukça sınırlı miktarda deformasyon yapan, üzerine etkileyen yüke zeminin pasif itkisinden fazlaca yararlanmadan direnç gösteren borular olarak tanımlanabilir, Şekil 1 [18].



Şekil 1 - Rijit borular üzerine etkileyen yük esnek borulara nispeten daha fazladır [2]

Başlıca esnek borular; polietilen, çelik, CTP (Cam elyaf Takviyeli Plastik) gibi borulardır [3, 7]. AÇB (Asbestli Çimento Boru) ve betonarme borular da rijit borulara örnek olarak gösterilebilir. Boru-zemin etkileşimi farklılık gösterse de gerek esnek gerekse rijit borular için uygun dolgu şartları sağlanmalıdır. Esnek borular proje mühendisine çok sayıda yapısal faydalar sunar. Boru-zemin etkileşimi açısından birçok durumda doğru yerleştirilmiş esnek borular aynı şekilde yerleştirilmiş rijit borulara oranla daha derine gömülebilir.

Üzerindeki dolgu ve sürşarj yüklerini deformasyon yapmadan veya çok az deformasyon yaparak taşımaları beklenen rijit borular, yüklerin büyük bir kısmını cidarları vasıtası ile hendek tabanına iletir. Rijit boru genelde kendini saran zemine oranla daha fazla sıklığa (sertlik, stiffness) sahiptir¹. Bunun aksine esnek boru kendini saran zemine oranla genelde daha az sıklığa sahiptir.

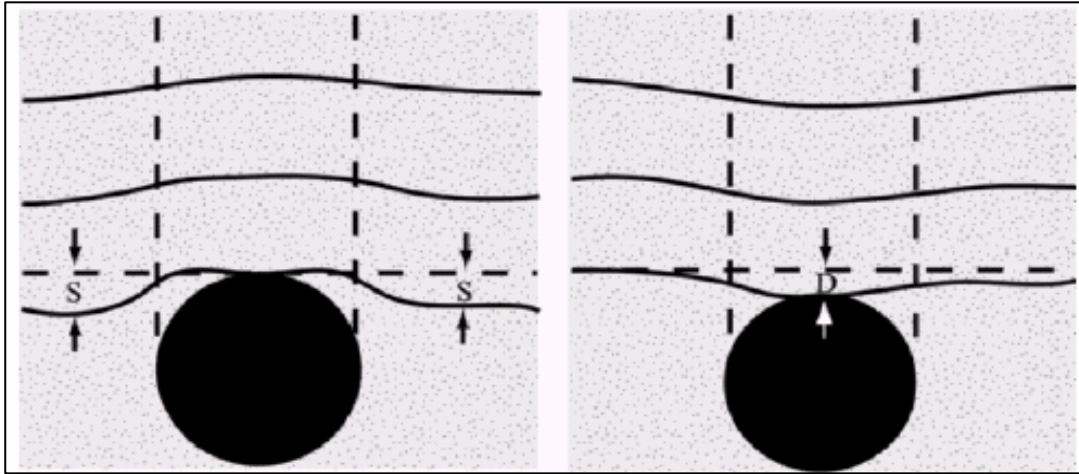
¹ Bu çalışmada kullanılan sıklık terimi malzemenin deformasyona karşı direncini ifade etmektedir.

Esnek boru zemine gömüldüğünde boru ve boruyu saran zemin dış yüklerle karşı birlikte çalışır. Bu sistem statik olarak kararsız bir sistemdir. Boru deformasyonu, boruya etkiyen yükün fonksiyonu olduğu gibi, boruya etkiyen yükte deformasyonun bir fonksiyonudur [18]. Deformasyon yolu ile zeminin pasif itkisinden yararlanma eğiliminde olan esnek boru üzerindeki dolgu yükünün önemli bir kısmını kemerlenme yolu ile kendini saran zemine iletir. Fakat bu olay sadece kemerlenme sonucu değil aynı zamanda boru çevresindeki zeminin

deformasyona karşı gösterdiği direnç sonucu oluşur.

Esnek borular plastik veya metal olarak üretilir. Metaller elastik özellik gösterirken plastik borular zamana bağlı viskoelastik davranış sergilerler.

Şekil 2'de S rijit bir boru için dolgunun oturma miktarını, D ise esnek bir borunun toprak basıncı altında yaptığı düşey deformasyonu göstermektedir.

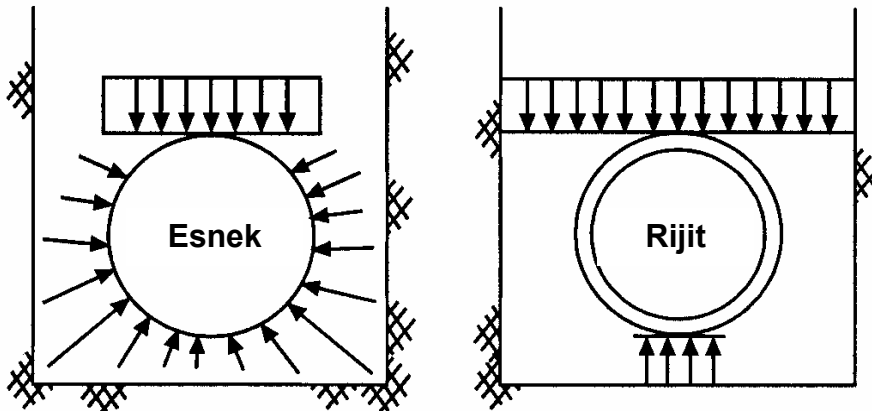


Şekil 2 - Zemin oturmasının rijit ve esnek borular üzerindeki etkisi [18]

Esnek borular üzerindeki yüklerin ve bu yüklerle borunun gösterdiği direncin hesaplanmasında kullanılan çok sayıda ampirik ve analitik eşitlik mevcuttur. Bu eşitlikler birçok durumda yeterli olmakla birlikte, zemini bir mühendislik malzemesi olarak tanımlamaktaki güçlükler, zeminin homojen olmayan yapısı, zemin-boru etkileşiminin kompleksliği ve inşaat esnasındaki belirsizlikler sebebiyle mutlak eşitlikler değildir. Borunun taşıma mukavemeti dolgu malzemesinin cinsi ve sıkıştırılma derecesine

bağlı olduğu için yapısal davranışı yapı-zemin etkileşimi (doğrudan boru sehmindeki değişikliklere bağlıdır) göz önünde bulundurularak analiz edilmelidir.

Rijit borularda yükler borunun alt ve üst kısmında yoğunlaşma eğiliminde iken esnek borularda belirli kısımlarda yoğunlaşmayıp boru çevresine daha düzenli olarak yayılırlar (Şekil 3).

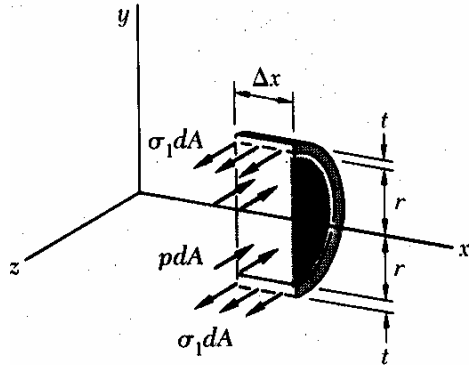


Şekil 3 – Esnek ve rijit borularda yük dağılımı [10]

3 İÇ BASINÇ İÇİN TASARIM

İç basınç için projelendirme yapılırken, borunun birim uzunluğundaki kesitine gelen çekme gerilmesi hesaplanır ve bu gerilmenin belirli bir seviyenin üzerine çıkmamasına özen gösterilir. Bu gerilme genellikle halka gerilmesi olarak adlandırılır. Projelendirmede kullanılan iç basınç değerinin, borunun gerçekte maruz kalacağı basınca eşit olması gerekir. Cazibe akışlarında basınç, boru akışı ile hidrolik profil arasındaki düşey mesafe olarak ölçülür. Boru hattı üzerinde hattı kesen vanalar mevcut ise, borunun vanalar arasında kalan kısmındaki maksimum basınç, boru akışı ile vanalar kapalı durumda iken statik seviye kotu arasındaki mesafeye eşittir. Terfi hatlarında basınç, pompaj işlemi ile sağlanan hidrolik profil ile boru eksenini arasındaki düşey mesafe ile ölçülür. Bu ölçüme çıkış ucundaki basınç ile sürtünme kayıpları da dâhildir [4, 6].

Δx uzunluğunda seçilen bir halkanın serbest cisim diyagramından, Şekil 4:



Şekil 4 - Δx uzunluğunda seçilen bir halkanın serbest cisim diyagramı [8]

$$\sum F_z = 0$$

Halka gerilmesi σ_1 ;

$$\sigma_1(2t \Delta x) - p(2r \Delta x) = 0 \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{p(2r \Delta x)}{(2t \Delta x)} = \frac{pr}{t} = \frac{pD}{2t} \quad (2)$$

Burada;

D Boru iç çapı (m),
r Boru iç yarıçapıdır (m).

Eksenel gerilme için yazdığımız $\sigma_1 = [(pD)/(2t)]$ eşitliğini σ_1 yerine s emniyet gerilmesini alarak t'ye göre yeniden düzenlersek;

$$t = \frac{pD}{2s} \quad (3)$$

halini alır. Eşitlikte D yukarıda da gösterdiğimiz gibi iç çapı göstermektedir. İç basınca maruz, üniform kalınlıktaki boş bir silindirin cidarında oluşan gerilmeyi hesaplamak için çeşitli eşitlikler mevcuttur. Asal gerilme, boru çevresine teğet yönde bir çekme gerilmesidir. Bu gerilme, boru cidarının dış yüzünde minimum olup cidar kalınlığına iç yüzde maksimum olacak şekilde artar. Gerilmenin hesaplanması için doğruluğu deneylerle kanıtlanmış daha hassas eşitlikler de vardır. Bu eşitliklerin verdiği gerilmeler, boru içindeki basıncın, boru cidarında oluşan çekme gerilmeleri ile dengeleneceğini varsayan statik denge eşitliklerine dayanan bir analiz ile bulunan gerilme değerinden daha yüksektir. Bu farkı gidermek ve hala tek bir eşitlik kullanabilmek amacı ile aslında gerçeğin tam tersi olmasına rağmen, iç basıncın borunun iç çapı yerine dış çapı boyunca etkidiği kabul edilir. Bu kabul denklem ile hesaplanan cidar kalınlığı boru çapının % 2'sine eşit veya daha küçük olduğu durumlarda teorik olarak doğrudur. Bu oranın daha büyük olması durumunda ise hesaplanan cidar kalınlığı gerekenden fazla olup ekonomik olmayan sonuçlar vermektedir [7]. Birçok otorite hem yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü hem de emniyetli tarafta kalmak ve sabit değer boru dış çapı olması, iç çapın borunun cidar kalınlığına bağlı olarak değişmesi, hesap kolaylığı gibi sebeplerle D için boru dış çapı değerini almaktadır [22].

Eşitlik kaynaklı birleşimin efektif mukavemeti ile ilintili e; kaynak birleşim verimlilik faktörü ile yeniden düzenlenirse aşağıdaki hali alır:

$$t = \frac{pD}{2se} \quad (4)$$

Burada;

t Cidar kalınlığı (m),
p İç basınç (MPa),
D Boru dış çapı (m),
s İzin verilen projelendirme gerilmesi (MPa),
e Kaynak birleşim verimliliği faktörü (genellikle 0,85 alınır, birimsiz),
 f_{yk} Çeliğin akma emniyet gerilmesidir (MPa).

İşletme basıncı için et kalınlığı hesabı yapılırken izin verilen projelendirme gerilmesi olarak çeliğin akma emniyet gerilmesinin (f_{yk}) % 50'si, deney basıncı için et kalınlığı hesabı yapılırken izin verilen projelendirme gerilmesi olarak çeliğin akma emniyet gerilmesinin (f_{yk}) % 75'i alınmalıdır. Deney basıncı olarak işletme basıncının minimum 1,25 katı verilerek hesap yapılır. Deney basıncı işletme basıncının 1,50 katını aşmamalıdır. Deney basıncının amacı arazide boru eklerinin sızdırmazlığının kontrolüdür. Boruların mukavemeti ise bilindiği gibi fabrikada denenmektedir.

Hesap sonucu bulunan cidar kalınlığı haddeleme toleransını da dikkate almak için % 12,5 oranında arttırılır.

4 KOROZYON

Gömülü boru cidarında oluşan korozyonun başlıca üç sebebi vardır. Bunlar: çelik borunun taşıdığı su, boruyla temas halindeki zemin ve yeraltısuyudur [12]. Çelik borunun taşıyacağı suyun ve yeraltısuyunun kimyasal analizinin yapılması oldukça önemlidir. Ayrıca boru etrafındaki zeminin kimyasal analizi yapılarak iletkenliği belirlenmelidir. Elde edilecek sonuçlar doğrultusunda çelik borularda korozyona karşı katodik korumaya ihtiyaç olup olmayacağına karar verilmelidir. Günümüzde çelik borularda kullanılan iç ve dış kaplama kalitelerinin artması hesapla elde edilen cidar kalınlığına korozyon payı eklenmesini gereksiz kılmaktadır.

5 TAŞIMA VE MONTAJ İÇİN GEREKLİ MİNİMUM CİDAR KALINLIĞI

$$t = \frac{D}{288} \quad (m) \quad (5)$$

(Eşitlik 5 iç çapları 1,37 m'ye kadar olan çelik borular için geçerlidir).

$$t = \frac{D + 0,51}{400} \quad (m) \quad (6)$$

(Eşitlik iç çapları 1,37 m ve daha büyük olan çelik borular için geçerlidir).

Yukarıdaki eşitlikler çapa bağlı taşıma ve montaj için gerekli minimum cidar kalınlıklarını vermektedir. Bu eşitliklerle bulunan değerlerin 2 mm'den az olması durumunda minimum cidar kalınlığı olarak 2 mm alınmalıdır [4].

6 DIŞ YÜKLER

Gömülü borular üzerine etkiyen yükler sabit yükler ve sürşarj yükleri olmak üzere ikiye

ayrılır. Sabit yükler dolgu ağırlığı ve yol üzerindeki kaplamanın ağırlığı gibi sürekli olan yüklerdir. Sürşarj yükleri ise yüzeye etkiyen, sürekli olan veya olmayan yüklerdir. Taşıt ve yapı yükleri gibi yükler sürşarj yüklerine örnek olarak gösterilebilir [10].

6.1 Sabit Yükler

Esnek çelik boru projelendirmesinde boru üzerine etkiyen dolgu yükünü dolgu kolonu ağırlığına veya başka bir deyişle "prizma eleman ağırlığına" eşit kabul ederek boru üzerine yansıtılmak yaygın olarak kabul gören bir yöntemdir.

Boruya üzerindeki dolgu sebebiyle iletilen yük gerçekte dolgu ve çelik borunun birbirlerine göre bağıl sıklıklarına bağlıdır. Boru üzerine etkiyen dolgu yükü prizma yüküne göre daha az olabilir. Bunun sebebi zemin kayma direnci yoluyla boru üzerindeki dolgu yükünün bir kısmının hendek kenarları ve tabanına iletilmesidir. Bu yük iletimine "kemerlenme" adı verilir.

Bu çalışmada hem kemerlenme etkisine göre hem de prizma yükü kabulüne göre hesap yöntemleri verilecektir.

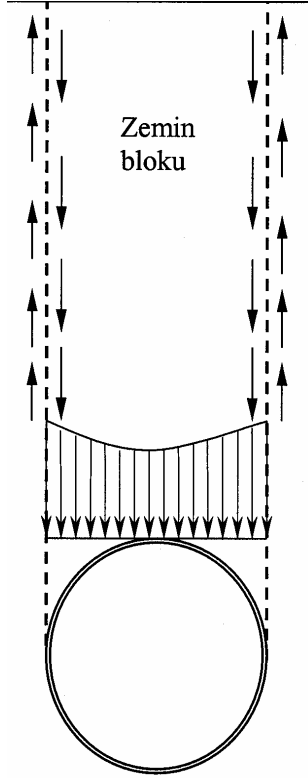
6.2 Kemerlenme

Teoride gömülü boru üzerine prizma yükünün etkimesi için boru ve boruyu çevreleyen zemin sıklıklarının birbirine eşit olması gerekir. Boru ve zeminin aynı sıklığa sahip olmaları pratikte mümkün olmayacağı için gerçekte boru üzerine etkiyen yük, boru ve zemin bağıl sıklıklarına göre prizma yükünden ya daha fazla ya da daha az olacaktır.

Boru sıklığı birçok esnek boru türünde olduğu gibi kendini çevreleyen zemin sıklığından daha az olduğu takdirde boru üzerindeki dolgu yükünü azaltıcı yönde etkiyecektir. Uygulanan yük ve prizma yükü arasındaki fark olarak tanımlanabilecek kemerlenme yükü, genelde düşey yükteki azalma olarak algılanmaktadır. Eğer boru üzerindeki düşey yük, prizma yükünden fazla ise aksi yönde kemerlenme oluşmaktadır.

Aşağı yönlü dolgu hareketi, gömülü boru üzerindeki dolgunun kemerlenme hareketine sebebiyet verir [9]. Bu hareket boru deformasyonu, derinlerdeki dolgu tabakalarının sıkışması veya boru altında oturma sebebiyle başlar. Esnek bir boru için kemerlenme etkisi boru tacındaki düşey deformasyon ile başlar. Boru üzerindeki dolgu, borunun düşey hareketini takip etmek istese de dolgudaki kayma yüzeyleri boyunca oluşan kayma direnci

(sürtünme kuvveti ve kohezyon) bu hareketi engeller. Bu sebeple boru üzerine etkiyen düşey dolgu yükü boru üzerindeki dolgu kütlelerinden, dolayısı ile prizma yükünden azdır. Stabil uygulamaların birçoğunda oluşan kemerlenme genelde kalıcıdır, Şekil 5.



Şekil 5 - Boru üzerine etkiyen yüklerin dağılımı [10]

Zemin kayma gerilmeleri sebebi ile oluşan kemerlenme, borunun büyük kapasiteli sıkıştırma makineleri altına yerleştirilmesi, taşıt trafiğine maruz sıg dolgu yükü altında kalması durumunda veya yumuşak, stabil olmayan dolgularda ortaya çıkmayabilir.

6.3 Marston Yük Kabulü

Marston 1930 yılında deney ve arazi ölçümlerine dayanarak gömülü boru projelendirilmesine ilişkin kemerlenmeyi de dikkate alan bir çalışma yayımladı. Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği dergisinde yayınlanan bu makale bilimsel çevrelerde büyük ölçüde kabul gördü. Marston teorisinin temel kabulü boru ve boruyu saran zemin sıklıkları arasındaki farka dayanmaktadır [20]. Marston, hendek içindeki dolgunun örselenmemiş hendek yanal yüzeyi boyunca oluşan kayma gerilmeleri tarafından destekleneceğini düşündü. Esnek boru, Marston Eşitliği'ne göre genişliği boru çapının iki katından daha dar olan bir hendeğin içine gömülürse üstündeki dolgu yükü aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$W = C_D \gamma B_d B_c \quad (7)$$

- B_d Boru üzerindeki hendek genişliği (m),
 B_c Boru dış çapı (m),
 C_D Hendek yük katsayısı (birimsiz),
 γ Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı (N/m^3),
 W Boru üzerindeki dolgu yükü (N/m),

$$C_D = \frac{1 - e^{-\frac{2Ku' H_c}{B_d}}}{2Ku'} \quad (8)$$

- e Doğal logaritma tabanı,
 K Rankine toprak basınç katsayısı (birimsiz),

$$K = \tan^2(45 - (\phi/2)) \quad (9)$$

- ϕ Zemin içsel sürtünme açısı ($^\circ$),
 u' Dolgu ve hendek arasındaki sürtünme katsayısıdır.

6.4 Prizma Yük Kabulü

Yatay bir yüzeye etkiyen düşey dolgu yükü eğer zemin büyük oranda boşluklu değil ve homojen bir yapıya sahipse en basit olarak prizma yükü şeklinde hesaplanır:

$$W_c = \gamma H_c B_c \quad (10)$$

- W_c Boru üzerindeki dolgu yükü (N/m),
 γ Dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı (N/m^3),
 B_c Boru dış çapı (m),
 H_c Boru üzerindeki dolgu yüksekliğidir (m).

6.5 Taşıt Yükleri

Derine gömülü olmayan borular için kamyon, tren ve diğer taşıtların tekerlek yükleri oldukça önem taşımaktadır. Boruda taşıt yükünün oluşturduğu gerilme; taşıtın ağırlığına, lastik hava basıncına, lastik ebadına, taşıt hızına, yüzey pürüzlülüğüne, yol kaplaması cinsine, yol kaplaması kalınlığına, zemin cinsine ve borunun noktasal yüke olan mesafesine bağlıdır.

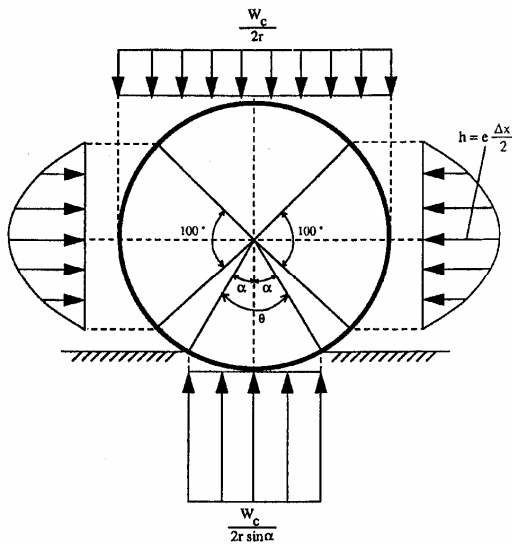
7 DEFORMASYON HESABI

Iowa State Üniversitesi profesörlerinden M. G. Spangler 1941 yılında gömülü çelik boruların deformasyon hesabında yaygın olarak kullanılan Iowa Eşitliği'ni yayımlamıştır [15]:

$$\Delta x = \frac{D_1 K W r^3}{E I + 0,061 e r^4} \quad (11)$$

- Δx Borunun yatay deformasyonu (mm),
 D_1 Deformasyon gecikme faktörü,
 K Yataklanma açısına bağlı olarak değişen yataklanma sabiti (birimsiz),
 W Borunun birim uzunluğuna gelen yük (N/mm),
 r Ortalama boru yarıçapı (mm),
 E Boru malzemesinin elastisite modülü (MPa) (çelik için 2×10^5 MPa),
 I Boru cidarı atalet momenti (mm^3),
 e Pasif direnç modülüdür (MPa/mm).

Spangler, eşitliği deneysel olarak gömülü esnek çelik boruların yerleştirilmelerinden çıkarmıştır. Spangler'in hipotezine göre halka üzerinde çeşitli noktaların yanıl hareketi bilinirse, her noktadaki hareketin pasif direnç modülü (e) ile çarpılması ile yanıl basınç dağılımı hesaplanabilir, Şekil 6.



Şekil 6 - Spangler hipotezine göre yük dağılımı [15]

Matematiksel uygunluk açısından yanıl basınç borunun orta kısmında 100 derecelik bir kısmı saran basit bir parabolik eğri olarak kabul edildi. Aynı zamanda toplam düşey yükün boru boyunca üniform olarak dağıldığını, zemin reaksiyonunun düşey yüke eşit olduğunu ve üniform olarak boru yatağı boyunca dağıldığını kabul etti.

Pasif direnç modülünün gerçek bir modül için doğru boyutlara sahip olmaması sebebiyle zemin özelliği olamayacağını keşfedilmesinden sonra 1955 yılında Spangler

ve Dr. R. K. Watkins zemin reaksiyon modülü için E' 'nü önermişlerdir:

$$E' = e r \quad (12)$$

Bu sebeple günümüzde kullanılan Iowa Eşitliği aşağıdaki son halini almıştır:

$$\Delta x = \frac{(D_1 K W)}{(E I / r^3) + (0,061 E')} \quad (13)$$

E' Zemin reaksiyon modülü (MPa).

Yukarıdaki eşitlik esnek çelik boruların projelendirilmesinde yaklaşık 50 yıldır başarıyla uygulanmaktadır. Eşitliğe göre deformasyon, boru cidarının sıklığına ve pasif itkinin etkisine bağlı olarak sınırlanır. Boru cidarı sıklığının dolgunun cinsi ve sıkıştırma derecesine bağlı olarak değişen zemin reaksiyon modülüne oranı sık kullanılan çelik boru boyutları için yaklaşık 1/20'dir. Bu sebeple çelik borunun mukavemetinin artırılarak gömülü borunun deformasyonunu sınırlamaya çalışmak bir çok halde hatalı olacaktır.

Iowa Eşitliği yeniden düzenlenerek terimler boru sehimini etkileyen üç ayrı faktör olarak tanımlanabilir:

$D_1 K W$	Yük faktörü
$E I / r^3$	Halka sıklık faktörü
$0,061 E'$	Zemin sıklık faktörü

Bu doğrultuda Iowa Eşitliği'ni yeniden yazarsak;

Toplam yatay deformasyon = yük faktörü / (halka sıklık faktörü + zemin sıklık faktörü) halini alır [2].

8 İZİN VERİLEN DEFORMASYON ORANLARI

Beton iç ve dış kaplamalı esnek çelik boru için boru çapının % 2'sine, beton iç kaplamalı ve esnek dış kaplamalı esnek çelik boru için boru çapının % 3'üne, içi kaplanmamış veya esnek iç ve dış kaplama ile kaplanmış esnek çelik boru için boru çapının % 5'ine kadar deformasyona müsaade edilebilir. % 5'e kadar olan deformasyonun borunun hidrolik fonksiyonu üzerindeki etkisi ihmal edilebilir mertebededir. Arazi gözlemleri işletmedeki çelik boruların deformasyonu, boru çapının yaklaşık % 20'sine erişince çökmenin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.

9 ZEMİN REAKSİYON MODÜLÜ

Spangler tarafından orijinal Iowa Eşitliği'ndeki "er" terimi değeri ile yer değiştirilmek üzere zemin reaksiyon modülü (E') geliştirilmiştir. Bunun sebebi Iowa Eşitliği'ndeki "e" değerinin (pasif direnç modülü) bir modül için doğru boyutlara sahip olmamasıdır. E' değerlerinin tespiti için hesap, laboratuvar ve arazi yöntemleri ile çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunlar arasında en çok kullanılanı Amster Howard değerleridir. Howard arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçları derleyerek ortalama E' değerleri için bir çizelge geliştirdi (Çizelge 1) [16, 17, 18 ve 19]. Boru sehim hesaplarının önemli bir parametresi olan E' değerlerinin çizelgeden özenle seçilmesi gerekir². E' değerleri gerçekte hem zemin hem de boru özelliklerine bağlıdır. Bu yüzden verilen zemin türü için E' değerlerini belirlemek amacıyla kullanılan uygun bir laboratuvar deneyi yoktur. Howard'ın tipik bir boru hattı boyunca sehim değişikliklerini kaydederek geliştirdiği çizelge esnek çelik boru tasarımında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dolgu yüksekliği arttıkça granüler malzeme üzerindeki zemin basıncı da artar. Granüler malzeme üzerindeki basınç arttıkça zemin tanecikleri birbirlerine daha sıkı kenetlenir ve sistemin toplam sıklığı artar. Dolgu yüksekliğinin 6 m'den küçük olduğu durumlarda geçerli olan derinlikle değişen zemin reaksiyon modülü ile ilgili bir çalışma da J. Hartley ve J. Duncan tarafından yayımlanmıştır (Çizelge 2) [10]. Her iki çalışma da gömülü esnek borunun prizma yüküne maruz kalması halinde yapılan hesaplarda kullanılmalı yani kemerlenme etkisini göz önüne alan Marston Yöntemi ile kullanılmamalıdır. Gömülü boru etrafında zemin oturması zemin taneciklerinin kayması veya kırılması sonucu oluşur. Hareket meydana geldikten sonra kemerlenme sonucu yük yeniden dağılır ve bu durumda yeni deformasyonlar oluşmaz. Çünkü bu yük artımı impuls yükleri gibi etki oluşturur ve boru bu duruma kısa dönem elastik modülü ile direnç gösterir.

Zemin reaksiyon modülü, zeminin kendine has jeolojik bir özelliği değildir. Arazide veya laboratuvarında ölçülebilecek bir özellik değildir. Zemin-boru sisteminin amprik bir özelliği olup ancak Iowa Eşitliği'ndeki diğer parametrelerin bilinerek yerine konulması sonucu hesaplama yolu ile bulunabilir.

Tabii zeminin cinsi, tabii zeminin yoğunluğu, tabii zemin modülü, hendek malzemesi cinsi,

² Çizelge dolgu yüksekliklerinin 15 m'den az olması durumunda kullanılmalıdır.

hendek malzemesi yoğunluğu, hendek malzemesi modülü, boru çapı, boru cidar kalınlığı, boru sıklığının zemin sıklığına oranı, dolgu yüksekliği, hendek genişliğinin boru çapına oranı, yeraltı su seviyesinin yeri gibi faktörler zemin reaksiyon modülünü etkileyen başlıca faktörlerdir [13, 21].

10 GECİKME FAKTÖRÜ

Gömülü boru uzun dönem deformasyonu boru ve zemin özellikleri tarafından belirlenir. Hakim faktör zemin özellikleridir. Deformasyonun önemli miktarı boru yerleştirilmesinden itibaren ilk bir kaç haftada oluşur. Teoride sonsuza kadar devam eden visko-elastik deformasyonun toplam deformasyona etkisi oldukça azdır. Spangler visko-elastik etkileri dikkate almak için Iowa Eşitliği'ndeki bir gecikme faktörü (D_1) ilave etmiştir. D_1 katsayısı 1,0-1,5 arasında değerler almaktadır. Marston yük kabulü kullanılması durumunda Spangler'in önerdiği D_1 değeri 1,5'tur. Deformasyon hesabında prizma yük kabulü kullanılması durumunda deformasyon gecikme faktörünün 1,0 alınması gerekir çünkü prizma yük kabulü boruya etkiyen nihai yükün hesabında kullanılır.

11 YATAKLANMA SABİTİ

Yataklanma sabiti, yataklanma açısına bağlı boyutsuz bir değerdir. Daha sert yatak malzemesi kullanılması daha küçük yataklanma açısının oluşumuna sebebiyet verir. Tercih edilen yatak malzemesi kolay sıkışabilirliği olan malzeme olmalıdır, Çizelge 3.

Çizelge 3 – Yataklanma sabiti değerleri [18]

Yataklanma açısı (θ)	Yataklanma sabiti (K)
0	0.110
30	0.108
45	0.105
60	0.102
90	0.096
120	0.090
180	0.083

Boru yerleştirilmesinde 0'a yakın küçük yataklanma açısına sahip malzemeler tercih edilmemelidir.

Çizelge 1 – Iowa Eşitliği için zemin reaksiyon modülü ortalama değerleri (başlangıç deformasyonu için) [16, 17, 18 ve 19].

Zemin Türü / Boru Bölgesinin Temel Dolgu Malzemesi (Birleşik Sınıflandırma Sistemi)	Sıkıştırılma Derecesine Göre E' Değerleri (MPa)			
	Sıkıştırılmamış	Hafif sıkıştırma <%85 bağıl yoğunluk <%40	Orta sıkıştırma %48-%95 bağıl yoğunluk %40-%70	Yüksek sıkıştırma > %95 bağıl yoğunluk > %70
İnce taneli zeminler (LL > 50) Orta-yüksek plastisiteli zeminler CH, MH, CH-MH	Bu kategorideki zeminlerde gerekli olan yoğunluk, rutubet oranı ve sıkıştırma derecesini belirlemek için özel analizlere ihtiyaç vardır. Aksi takdirde 0 kabul edilir.			
İnce taneli zeminler (LL < 50) / Plastisiteli orta veya hiç olmayan, iri taneleri %25'ten az olan zeminler CL, ML, ML-CL, CL-CH, ML-MH	0,34	1,38	2,76	6,89
İnce taneli zeminler (LL < 50) / Plastisiteli orta veya hiç olmayan, iri taneleri %25'ten fazla olan zeminler CL, ML, ML-CL, CL-CH, ML-MH ince taneleri olan iri taneli zeminler / ince taneleri %12'den fazla olan zeminler GM, GC, SM, SC	0,69	2,76	6,89	13,79
İnce taneleri çok az olan veya hiç olmayan iri taneli topraklar İnce taneleri %12'den az olan topraklar GM, GC, SM, SC	1,38	6,89	13,79	20,68
Parçalanmış kaya	6,89	20,68	20,68	20,68
Deformasyon hassaslığı (hesaplanan ve ölçülen arasında)	± % 2	± % 2	± % 1	± % 0.5

Çizelge 2 – Duncan-Hartley zemin reaksiyon modülü değerleri [10]

Zemin cinsi	Dolgu yüksekliği (m)	Standart AASHTO Bağıl Sıkıştırılmaları için E' değerleri (MPa)			
		% 85	% 90	% 95	% 100
Kum oranı %25'den az olan ince taneli zeminler (CL, ML, CL-ML)	0 - 1,50	3,45	4,83	6,89	10,34
	1,50 - 3,00	4,14	6,89	9,65	13,79
	3,00 - 4,50	4,83	8,27	11,63	15,86
	4,50 - 6,00	5,52	8,96	12,41	17,93
İnce taneleri bulunan iri taneli zeminler (SM, SC)	0 - 1,50	4,14	6,89	8,27	13,10
	1,50 - 3,00	6,21	9,65	12,41	18,62
	3,00 - 4,50	6,89	10,34	14,48	22,06
	4,50 - 6,00	7,58	11,03	9,65	25,51
İnce taneleri çok az olan veya hiç olmayan iri taneli zeminler (SP, SW, GP, GW)	0 - 1,50	4,83	6,89	11,03	17,24
	1,50 - 3,00	6,89	10,34	15,17	22,75
	3,00 - 4,50	7,24	11,03	16,55	24,82
	4,50 - 6,00	7,58	11,72	17,24	26,20

12 FLAMBAJ (BURKULMA)

Gömülü borular, yükler ve deformasyon neticesinde ortaya çıkan elastik dengesizlik yüzünden eğilebilir ve içeri çökebilir. Dış yüklerin toplamının burkulma emniyet basıncına eşit veya daha az olması gereklidir. Gömülü esnek çelik borular için müsaade edilen burkulma basıncı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanır:

$$q_a = \left(\frac{1}{FS}\right) \left(32R_w B' E' \frac{EI}{D^3}\right)^{1/2} \quad (14)$$

Bu eşitlik;

- a) Vakum olmaması hali: $0,61 \text{ m} \leq h \leq 24,38 \text{ m}$
 b) Vakum olması hali: $1,22 \text{ m} \leq h \leq 24,38 \text{ m}$
 olması durumlarında geçerlidir.

- q_a Müsaade edilen burkulma basıncı (MPa),
 FS Emniyet faktörü,
 FS 2,5 $h/D \geq 2$ için,
 FS 3,0 $h/D < 2$ için,
 E Boru malzemesinin elastisite modülü (MPa),
 E' Zemin reaksiyon modülü (MPa),
 D Boru dış çapı (m),
 R_w Su kaldırma katsayısı,
 I Boru cidarı atalet momenti (m^3),

$$R_w = 1 - 0,33 (h_w / h) \quad (15)$$

($0 \leq h_w \leq h$ olmak üzere)

- h_w Borunun üzerindeki su yüzeyi yüksekliği (m),
 h Borunun üstündeki dolgu yüksekliği (m),
 B' Deneysel elastik mesnet katsayısı (birimsiz),

$$B' = 1 / (1 + 4 e^{(-0,213 h)}) \quad (16)$$

Eşitlik, zemin reaksiyon modülünün, yeraltısuyu kaldırma etkisinin ve boru sıklığının fonksiyonudur.

13 VAKUM

İşletme sırasında bazı durumlar, gömülü boruda vakum oluşmasına sebebiyet verebilir. Birçok durumda vakum yüklemesinin uygulama süresi oldukça kısadır ve etkisi genelde diğer hareketli yüklerden ayrı olarak incelenir. Projelendirme şartlarında hem vakum hem de hareketli yüklerin bulunması durumunda AWWA M11, Çelik Boru Tasarım ve Yerleştirme Kılavuzu her iki durum için ayrı yük kombinasyonlarının kullanılmasını önerir. Bunun sebebi daha önce de belirtildiği gibi vakum yüklerinin sadece kısa

bir süre etkimesi ve vakum ile hareketli yüklerin aynı anda etkimesi ihtimalinin oldukça düşük olmasıdır:

$$\gamma_w h_w + R_w \frac{W_c}{D} + P_v \leq q_a \quad (17)$$

- h_w Borunun üzerindeki su yüzeyi yüksekliği (m),
 γ_w Suyun birim hacim ağırlığı (N/m^3),
 P_v Vakum basıncı (N/m^2),
 W_c Boru üzerindeki dolgu yükü (N/m),

$$\gamma_w h_w + R_w \frac{W_c}{D} + \frac{W_L}{D} \leq q_a \quad (18)$$

W_L boru üzerine etkiyen hareketli yük (N/m).

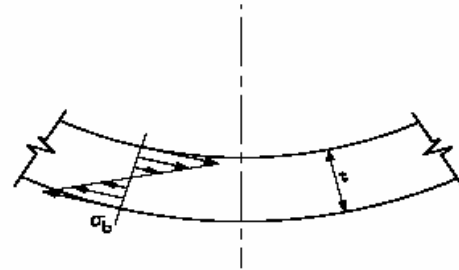
14 EĞİLME GERİLMELERİ

Dolgu ve trafik yüklerinin etkisiyle deformasyon yapan gömülü esnek çelik boruda eğilme gerilmeleri aşağıdaki gibi hesaplanır, Şekil 7 [1].

$$\sigma_b = 4E \left(\frac{\Delta x}{D}\right) \left(\frac{t}{D}\right) \quad (19)$$

σ_b Boru cidarında deformasyon sonucu oluşan eğilme gerilmeleri (MPa),

$\sigma_b < \frac{f_{yk}}{2}$ şartı sağlanmalıdır.



Şekil 7 – Boru cidarında deformasyon sonucu oluşan eğilme gerilmeleri dağılımı [1]

15 SONUÇ VE ÖNERİLER

Gömülü esnek çelik boruların cidar kalınlığının belirlenmesinde boruyu saran gömlek tabakasının cinsi ve sıkıştırılma derecesi büyük önem taşımaktadır. Gömlek tabakasının kalitesi ve sıkıştırılma derecesi arttıkça kullanılacak çelik borunun cidar kalınlığı dolayısı ile maliyeti azalarak daha ekonomik çözümler elde edilebilecektir.

Gömülü esnek çelik boruların flambaj (burkulma) hesaplarında borunun radyal (ışınal) gerilmelere maruz kalması durumu (su

altındaki hatlar ve gömülü olmayan borular) için verilen eşitlikler kullanılmamalıdır. Boru çapının en az % 0,5 oranında cidar kalınlığına sahip ve en az kendi çapına eşit bir toprak tabakası ile örtülü çelik borunun emme neticesinde ezilmesinin mümkün olmayacağı AWWA M11, Çelik Boru Tasarım ve Yerleştirme Kılavuzu'nda özellikle belirtilmektedir. Gömülü çelik boruya vakum yüklerinin sadece kısa bir süre etkimesi ve vakum ile hareketli yüklerin aynı anda etkimesi ihtimalinin oldukça düşük olması sebebiyle vakum ve hareketli yük etkileri ayrı ayrı değerlendirilmelidir.

Esnek borular ile rijit borular arasındaki yapısal farklılıklar, tasarımlarında kullanılacak eşitliklerin de farklı olmasını beraberinde getirmektedir. Çalışmada bu durum üzerinde ayrıntılı şekilde durulmaya çalışılmıştır.

16 KAYNAKLAR

- [1] Antaki, G. A., Hart, J. D., Adams, T.M., Chern, C., Costantino, C. C., Gailing, R.W. ve diğerleri. (2001). Guidelines for the design of buried steel pipe. ASCE.
- [2] American Concrete Pipe Association. "Buried Facts: Structural Design Considerations".
- [3] American Water Works Association. (1996). AWWA manual M45: Fiberglass pipe design. Denver: AWWA.
- [4] American Water Works Association. (1987). AWWA manual M11: Steel pipe-a guide for design and installation. Denver: AWWA.
- [5] American Iron and Steel Institute. (1996). Steel plate engineering data-volume 3: Welded steel pipe Washington: AISI.
- [6] Amerikan Su İşleri Birliği. (1982). AWWA manual M11: Çelik boruların projelendirme ve kullanım esasları. İstanbul: Ümran Spiral Kaynaklı Boru Sanayii A.Ş.
- [7] Amerikan Su İşleri Birliği. Su getirme uygulamaları el kitabı: Çelik boruların projelendirme ve yerleştirme esasları. İstanbul: Ümran Spiral Kaynaklı Boru Sanayii A.Ş.
- [8] Beer, F.P. ve Johnston, E.R. (1985). Mechanics of Materials. NewYork: McGraw-Hill.
- [9] Bulson, P.S. (1985). Buried structures: static and dynamic strength. London: Chapman and Hall.
- [10] C.P. Chemical Company LP (2003). The performance pipe engineering manual.
- [11] Çelik, K. B. (2008). "Türkiye'de Su İletiminde Kullanılan Borulu Sistemlerin Tarihsel Gelişimi". DSİ Teknik Bülteni.103.23–30.
- [12] Doyle, M. ve Fang, S. J. Chen, W. (1997). "Underground Pipe" (Handbook of structural engineering adlı kitabın içinde, Editörler: W. F. Chen ve E. M. Lui). New York: CRC Press.
- [13] Jeyapalan, J. ve Watkins, R. (2004). "Modulus of Soil Reaction (E') Values For Pipeline Design". Journal of Transportation Engineering, 130 (1), 43–48.
- [14] Liu, H. (2003). Pipeline engineering. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [15] Masada, T. (2000). "Modified Iowa Formula For Vertical Deflection Of Buried Flexible Pipe". Journal of Transportation Engineering, 126 (5), 440–446.
- [16] Mays, L. W. (2001). Hydraulic design handbook. NewYork: McGraw-Hill.
- [17] Mays, L. W. (2001). Water distribution systems handbook. NewYork: McGraw-Hill.
- [18] Moser, A.P. (2001). Buried pipe design. NewYork: McGraw-Hill.
- [19] Nayyar, L. M. (2000). Piping handbook. NewYork: McGraw-Hill.
- [20] Ren-peng, C., Yun-min, C., Dao-shen, L. (2000). "Analysis Of Vertical Pressure On Buried Pipeline With Case Study". Journal of Zhejiang University Science, 1(4), 414–420.
- [21] Sandford, T. C. (2000). "Soil-Structure Interaction of Buried Structures". A2K04: Committee on Subsurface Soil-Structure Interaction, University of Maine.
- [22] Sanks, R. L. (2001). Pumping station design. Oxford: Butterworth-Heinemann.