



SAYI: 100

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

Sorumlu Müdür

Dr. Yusuf Z. GÜRESİNLİ

Yayın Kurulu

Dr. Yusuf Z. GÜRESİNLİ
Kadri YAŞAR
Bayram TIRYAKI
Taner ERCÖMERT
Kemal ŞAHİN
Nurettin KAYA
Servan YILDIRIM

BASILDIĞI YER

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

Etilik – Ankara

SAYI : 100

YIL : 2005

Üç ayda bir yayımlanır

İÇİNDEKİLER

1. Şanlıurfa Tünellerinde Enjeksiyon Çalışmaları..... 1
(Yazan: Yrd.Doç.Dr. M. İrfan YEŞİLNACAR)
2. Betonlarda Çelik Lişf Kullanılmasının Etkisi 19
(Yazanlar: Prof. Dr. Rüstem GÜL,
Araş. Gör. Oğuz Akın DÜZGÜN)
3. Avrupa Ülkelerinin, Sığ Temellerin Taşıma Kapasitelerini
Hesaplama Kullandıkları Yöntemlerin
Karşılaştırılması..... 31
(Yazanlar: J.G. Sieffert Ch.Bay-Gress
Çeviren: Araş. Gör. İbrahim ÇOBANOĞLU)
4. Silis Dumanı Kullanımının Betonun İşlenebilirliği
Üzerine Etkisi37
(Yazanlar: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU
Ali UĞURLU)
5. Bağlantılı Buharlaşan sistemlerde Suyun Ağır İzotop
Zenginleşmesi.....53
(Yazanlar: J.R. Gat ve C. Bowser
Çeviren: Abdullah DİRİCAN)

ŞANLIURFA TÜNELLERİNDE ENJEKSİYON ÇALIŞMALARI

Yazan: Yrd.Doç.Dr.M. İrfan YEŞİLNACAR*

ÖZET

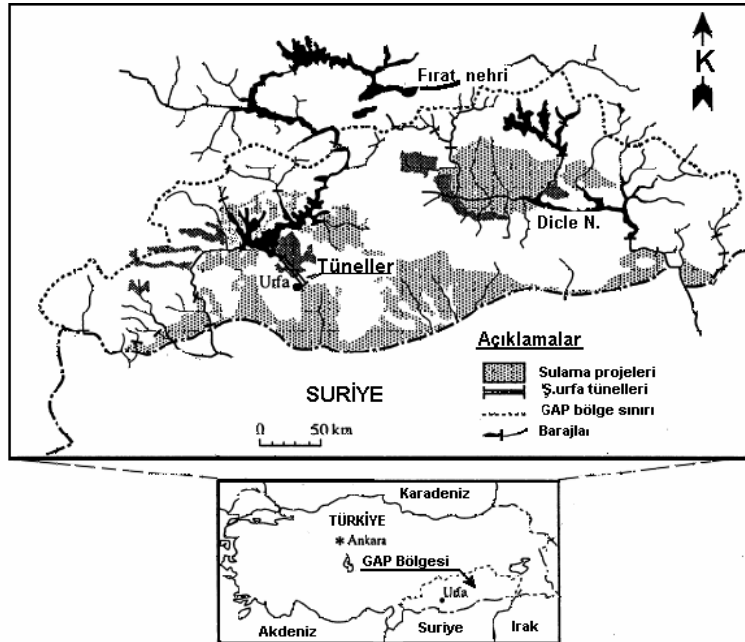
Tünel uzunluğu, kazı tekniği ve sağlayacağı fayda açısından GAP projesinin kilit yapılarından biri hiç kuşkusuz Şanlıurfa tüneller sistemidir.

Bu çalışmayla Şanlıurfa tünellerinin inşa yöntemi, kazı tekniği ve karakteristik özelliklerine kısaca değinilerek, tünellerde yapılan enjeksiyon çalışmaları ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

1. GİRİŞ

Şanlıurfa Tünelleri Güneydoğu Anadolu bölgesinde yer alır (Şekil 1). GAP (Güneydoğu Anadolu Projesi)' in en büyük kilit yapılarından biri olan tüneller, yaklaşık 358 000 ha cazibeyle ve 118 000 ha pompajla olmak üzere 476 000 ha araziye sulayacak şekilde planlanmıştır. Tüneller sistemi, her biri 7.62 m çapında ve 26.4 km

uzunluğunda iki adet dairesel kesitli, beton kaplamalı tünelden oluşur. Tünellerin toplam uzunluğu, ulaşım ve bağlantı tünelleri dahil 57.8 km' dir. Atatürk barajı gölünden tüneller vasıtasıyla alınan 328 m³/s miktarındaki su Harran ve Mardin ovalarına iletilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanı yer bulduru haritası

İki paralel tünelden oluşmuş sistemde, tünellerin eksenden eksene

mesafesi 40 m' dir. Tünellerden kazı malzemesinin kolay nakledilmesi, kazı ve

*Harran Üniv.Müh. Fak.
Osmanbey Kampusu, Ş.Urfa
mirfan@harran.edu.tr

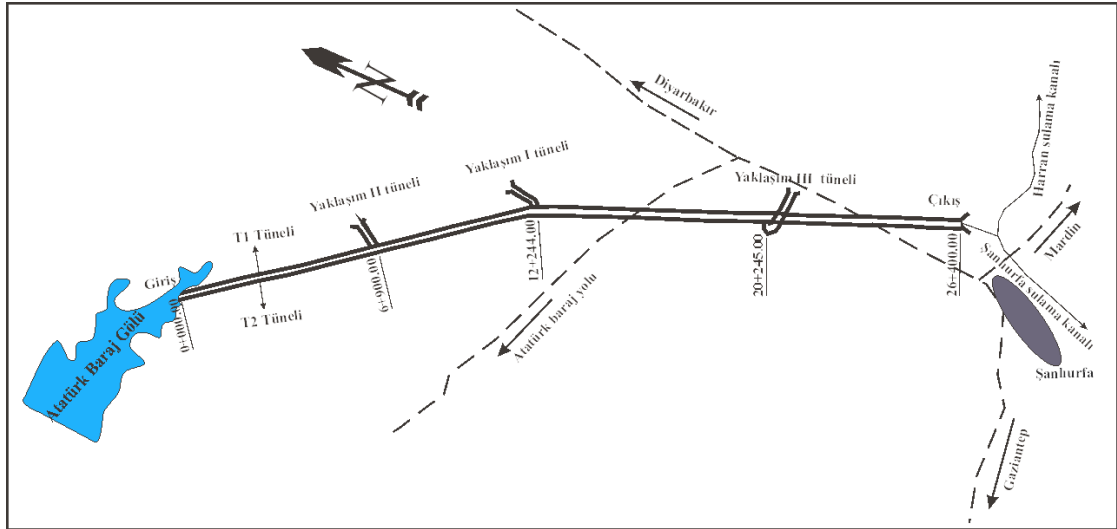
betonlama işlemlerinin aynı anda yürütülebilmesi için tüneller arasında her 500m' de bir irtibat tüneli açılmıştır. İrtibat tüneli toplam 52 adettir. Böyle uzun bir tünelde havalandırmanın iyi yapılabilmesi çok önemlidir. Bu amaçla, bacalar her iki tünele de hizmet vermesi için irtibat tünellerinin ortasına gelecek şekilde açılmıştır. Yaklaşık her 1500 m' de bir baca olup, derinlikleri 65.24 m ile 207.95 m arasında değişmektedir. Toplam baca sayısı 23 adettir.

Tüneller, su akış yönüne göre sol tarafta bulunan tünel T1, sağ tarafta bulunan tünel ise T2 olarak adlandırılmıştır. T1 tünelinin 6+900 km' sinde Yaklaşım-2 tüneli, 12+244 km' sinde Yaklaşım-1 tüneli ve T2 tünelinin 20+245 km' sinde Yaklaşım-3 tüneli bulunur (Şekil 2).

Tünellerin inşasına 1977 yılında başlanmıştır. Bugün itibariyle her iki tünelde faaldir. Tünellerin önemli bazı karakteristik özellikleri Çizelge 1' de verilmiştir.

Çizelge1. Şanlıurfa Tünelleri karakteristikleri

Tünel tipi	Dairesel teçizatlı beton kaplama
Tünel uzunluğu	Herbiri 26.4 km iki paralel tünel
Tünel eğimi	T1 – 0.62802 m/km T2 – 0.62948 m/km
Tünel kazı çapı	Yaklaşık 9.50 m
Tünel iç çapı	7.62 m
Betonarme kalınlığı	0.95 – 0.40 m
Kaya bulonu miktarı	4.600 ton
Püskürtme betonu miktarı	300.000 ton
Kazı miktarı	3.000.000 m ³
Beton miktarı	1.150.000 m ³
Sulanacak alan	476.000 ha
Jeolojik formasyon	Killi kireçtaşı, marn
Hidrolik yük	T1 – 40.25 m; T2 – 39.74 m
Tünel debisi	328 m ³ /s (iki tünel)
Tünel giriş taban kotu	515 m
Tünel çıkış taban kotu	498 m

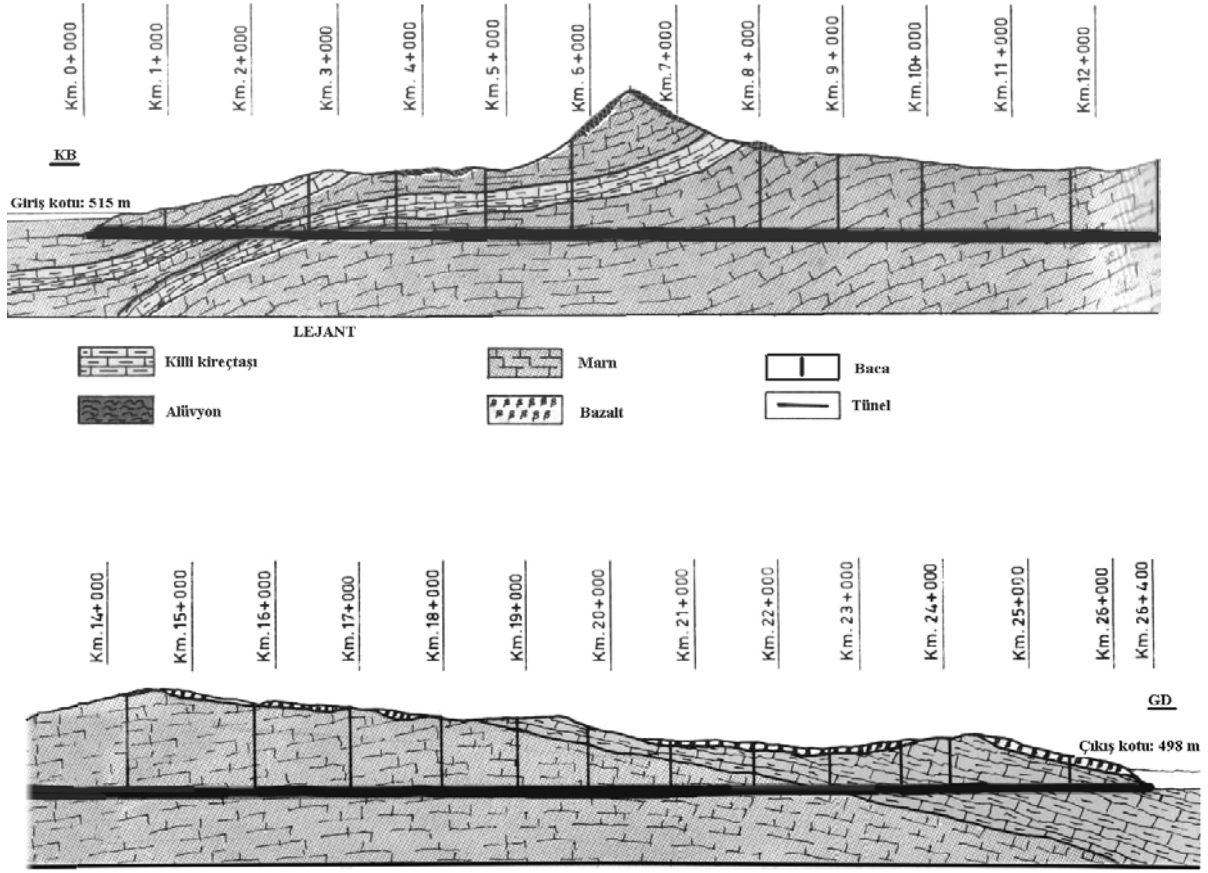


Şekil 2. Şanlıurfa tünelleri genel vaziyet planı (ölçeksiz)

2. JEOLJİ

Şanlıurfa tünelleri güzergahı boyunca yüzeylenen jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru marn, killi kireçtaşı, bazaltlar ve alüvyonlardır (Şekil 3). Tünel kazısı sırasında sadece marn ve killi kireçtaşı kesilmiştir. Enjeksiyon alışı değeri

açısından bu iki birim arasında önemli bir fark yoktur. Alış değeri bazı zonlarda kırık, çatlak ve ayrışma nispetine göre azda olsa değişiklik gösterir. Genelde alışın fazla olduğu zonlar, beton-kaya kontakındaki aşırı kazı nedeniyle ortaya çıkan boşluklarda görülür.



Şekil 3. Şanlıurfa tünelleri jeolojik boy kesiti

2.1. Marn

Tabanda bulunan Paleosen yaşlı birim, inceleme alanında geniş alanlarda yüzeylenmektedir. Görünür kalınlığı 500 m civarındadır. Rengi gri ve kremdir. Katmanlanma, uzaktan ve hava fotoğraflarında belirginse de, arazide, ayrışmadan dolayı belirgin değildir. Tabaka kalınlığı 50-60 cm' dir. Çoğunlukla kil ve CaCO_3 miktarı birbirine yakındır. Ayrıca arakatman olarak kiltası ve siltaşı da olmaktadır. Yumuşak bir özellik taşıdığından kazı yönünden önemli sayılabilecek bir problem çıkmamıştır. Bu birimin, hidrojeolojik yönden, akifer özelliği yoktur (Tanrıverdi, 1992).

2.2. Killi Kireçtaşı

Paleosen-Alt Eosen yaşlı bu birim alttaki marn ile ardalanmalıdır. Kil oranı az, CaCO_3 oranı fazladır. Saf kireçtaşından

yaşlı katmanlara, birim içinde rastlanılması olağandır. Lokal olarak sileks nodüllerine de rastlanılmaktadır. Katman kalınlığı 40-50 cm civarındadır (Erguvanlı, 1992). Paleosen yaşlı marn ile bu birim arasında kazı tekniği ve hidrojeolojik özellikler bakımından bir fark yoktur.

2.3. Bazaltlar

Güzergah boyunca, yüzeyde, birkaç tepede örtü halinde bazalt görülür. Bunlar Karacadağ volkanizmasının ürünüdür. Pliyosen yaşlı bazaltlar Diyarbakır ve Şanlıurfa ili dolaylarında geniş alanları kaplar ve tünel güzergahında yüzeyde örtü halinde gözlenir.

2.4. Alüvyon

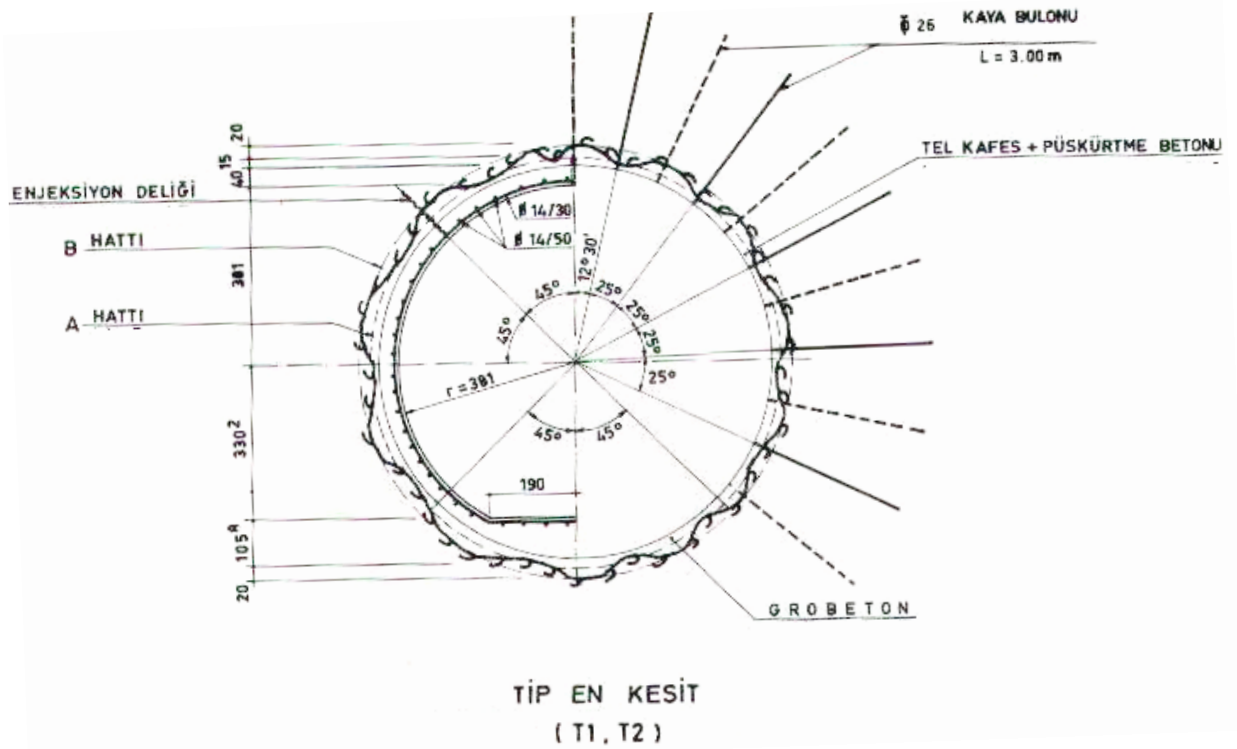
Kuvaterner yaşlı birim, alüvyon, yamaç molozu, toprak örtüsü ve birikinti

konisi şeklinde dere ve tepe yamaçlarında gözlenir. Bu malzemeler lokal olarak akifer özelliği taşıdığından kısmen de olsa sızma problemi olmaktadır.

İnceleme alanı sismik açıdan pasif bir zonda bulunmaktadır. Bölgede aktif bir fay olmadığı gibi hasar yapıcı depremlerin olma olasılığı da yoktur.

3. İNŞA YÖNTEMİ

Şanlıurfa tünelleri yapımı Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine (NATM) göre yapılmıştır. NATM, tel kafes, çelik iksa ve kaya bulonu ile takviye edilen dış kemerin püskürtme betonu işlemiyle kabuk durumuna getirilmesi yöntemidir (Golser, 1995) (Şekil 4).



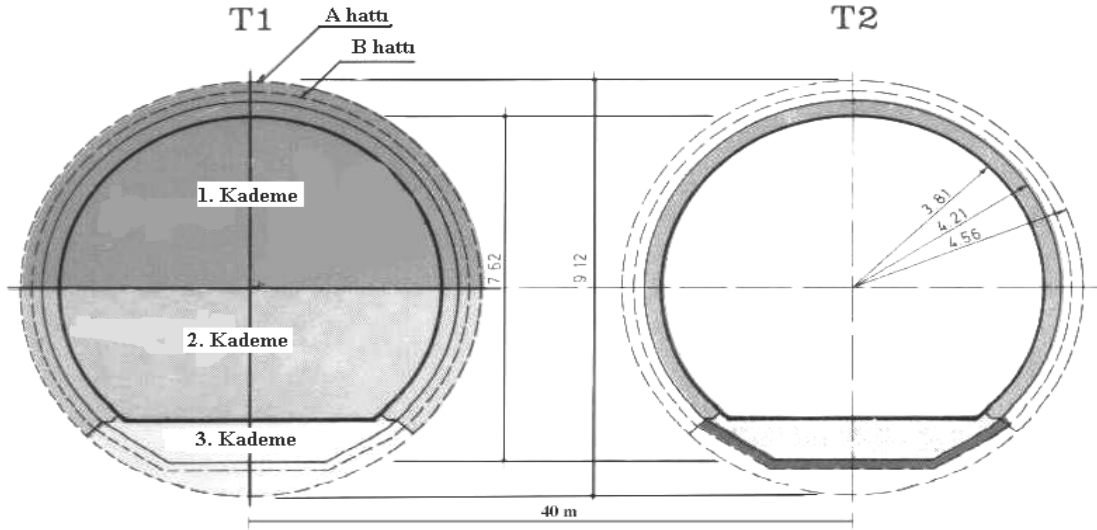
Şekil 4. Şanlıurfa tüneli tip en kesiti

4. TÜNEL KAZISI

Şanlıurfa tünelleri kazısı birbirini izleyen üç kademede yapılmıştır. Birinci kademe kazısı, yüksekliği 4.56 m alanı 35 m² olan yarım daire şeklinde bir kesite sahiptir. Bu kesit, tünel açma makinası Paurat E 134 veya delme-patlatma yöntemiyle yapılmıştır. Kazı yapılan kısımlar sistematik bulon, tel kafes, ve püskürtme betonuyla desteklenmiştir. Birinci kademe kazısı ve destekleme işlerinden sonra 3.4 m

yükseklik ve 25 m² kesit alanlı ikinci kademe kazısı yapılmıştır (Şekil 5).

Daha sonra kazılan kısımlar sistematik bulon, tel kafes, ve püskürtme betonuyla desteklenmiştir. Son olarak yaklaşık 1.16 m yükseklik ve 10 m² kesit alanlı üçüncü kademe kazısı yapılmış ve tünel tabanı 15 cm kalınlığındaki grobetonla kaplanmıştır.



Şekil 5. Şanlıurfa tüneli kazı yöntemi

5. TÜNEL ENJEKSİYONU

Tünel enjeksiyonu işleminde, betonun sertleşmesi bakımından, beton döküm tarihinden itibaren en az bir ay sonra enjeksiyona başlanması son derece önemlidir.

Tünelde genellikle iki tür enjeksiyon yapılır. Birincisi kontakt enjeksiyonu, ikincisi konsolidasyon enjeksiyonudur.

Ayrıca bu işlemlerin başarılı ve güvenli olması için daha sonra kesitler arasındaki muhtemel boşlukları doldurmak amacıyla kontrol enjeksiyonu yapılır. Son olarak, araştırma ve test kuyularıyla bu işlemler denetlenir. Test sonucu başarısız olan kuyular için onarım enjeksiyonuna başlanılır.

Şanlıurfa tünellerinde enjeksiyon ano boyu 12.10 m ve bir anodaki kesit sayısı üçtür. Enjeksiyon kuyu çapı 48 mm' dir. İki irtibat tüneli arasındaki 500 m' lik kısım tüp olarak adlandırılmıştır.

5.1. Kontakt Enjeksiyonu

Kontakt enjeksiyonunun temel amacı beton ile zemin arasındaki boşlukları doldurmaktır. Kontakt enjeksiyonu projesinde her kesitte 8 adet enjeksiyon kuyusu açılır (Şekil 6). Birbirini takip eden kesitlerde kuyular şaşırtmalı olarak delinir. Kuyular ano ve kesit numarasıyla belirtilir.

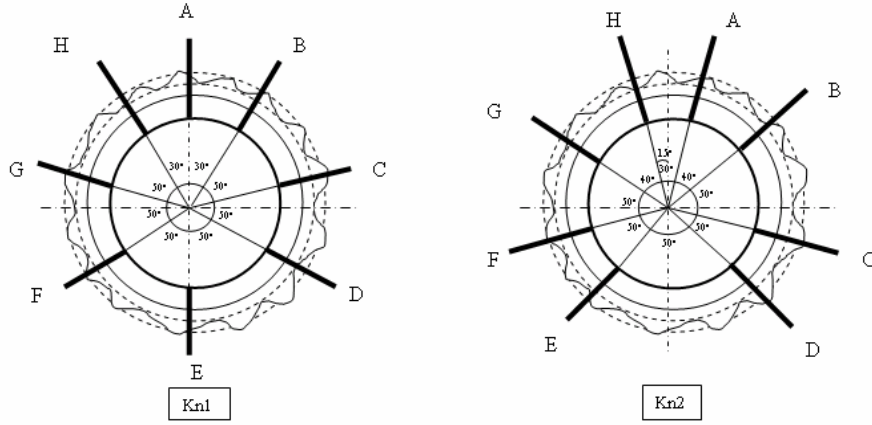
Her kesitte kuyular tepe deliğinden başlamak üzere saat ibresi yönünde "A, B, C, D, E, F, G ve H" harfleriyle gösterilir (Şekil 7).

Kuyu lokasyonları raporlara, örneğin, "Kn 185 – 2/B" şeklinde gösterilir. Bu ifade;

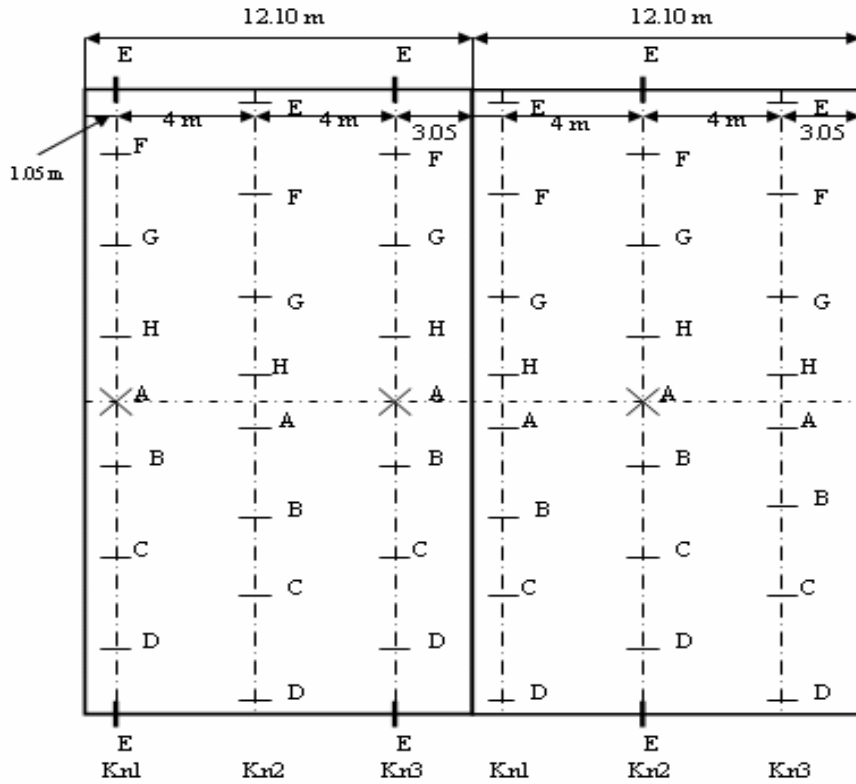
Kn: Enjeksiyon türünü, burada, kontakt enjeksiyonu,
185: ano numarasını,
2: kesit numarasını,
B: enjeksiyon kuyusunun konumunu belirtir.

Kontakt enjeksiyonunda; kuyu derinliği, beton dahil, en az 90 cm boyunda ve enjeksiyon basıncı 3 kg/cm² olarak projelendirilmiştir. Ancak uygulamada beton kaya kontağının saptanmasında karşılaşılan güçlükler ve refü basıncının düşük gelmesi nedeniyle proje revize edilmiştir. Bu revizyonun etkileri sonuçlar bölümünde tartışılacaktır. Buna göre; kuyu derinlikleri tavan ve yan kuyularda 2 m, taban kuyularda 2.5 m olarak standart hale getirilmiştir. Refü basıncı ise 5 kg/cm² olarak düzenlenmiştir.

Kontakt enjeksiyonuna ağırlıkça çimento/su oranı 1/1 olan karışımla başlanır. Bu oranda refü basıncına erişilemezse, ağırlıkça çimento/su oranı 7/5 olan karışım verilmeye başlanılır, yine refüye erişilemezse ağırlıkça çimento/su/ince kum oranı 1/1/1 olarak refü sağlanıncaya kadar enjeksiyona devam edilir.



Şekil 6. Şanlıurfa tünelleri kontakt enjeksiyonu delik tertip şekilleri



Şekil 7.Şanlıurfa tünelleri kontakt enjeksiyonu delgi paterni

5.1.1. Kontrol Enjeksiyonu

Kontakt enjeksiyonu tamamlanan anolardan başlanarak iki kesitin ortasına ve tavana dik gelecek biçimde 2.5 m derinliğinde kontrol kuyuları açılır. Bu kuyularda kontakt enjeksiyonu kriter ve şartlarına göre enjeksiyona devam edilir. Kontrol enjeksiyonunda amaç iki kesit arasında kalan muhtemel boşlukları doldurmaktır.

5.1.2. Test ve Araştırma Kuyuları

Test ve araştırma kuyularının delinmesine başlamadan önce kontakt ve kontrol enjeksiyonu tamamlanan tüpte temizlik yapılır. Tüpte muhtemel sızma varsa gözlemlenerek rapor edilir. Daha sonra kesit ve ano bazında enjeksiyon alış miktarları hesaplanır. Alış miktarı, toplam karışım miktarının toplam kontakt ve kontrol kuyuları boylarına oranı olarak hesaplanır. Kazı sırasındaki jeolojik profil de gözönüne alınarak uygun görülen yerlere test ve karotlu araştırma kuyuları açılması için ilgili kuyuların lokasyonunu gösteren liste (arazi talimatı) hazırlanır.

Test kuyularının derinliği, yukarıda anlatılan esaslar çerçevesinde yapılan değerlendirmelere göre, 2.5 – 4 m arasında önerilir. Araştırma kuyularının boyu 6 m olup karotlu delgi yapılır ve karot üzerinde gözle muayene edilerek varsa çimento izleri teşhis edilerek değerlendirilir. Test işlemi 0-4 m ve 4-6 m olmak üzere iki kademede yapılır.

Bu kuyularda, su testi ve enjeksiyon testi olmak üzere iki test uygulanır. Su testinde, bir kuyunun başarı kriteri 25 litre/m/10 dak.'dır. Bu kriteri sağlayamayan kuyuda enjeksiyon testi yapılır. Enjeksiyon testine ağırlıkça 1/3 (çimento/su) olan karışımla başlanır ve başarı koşulu 7 litre/m/10 dak.'dır. Bu kriteri sağladığı takdirde o kesitteki veya o anodaki kuyuların enjeksiyonunun başarılı olduğu kabul edilir. Aksi takdirde onarım enjeksiyonuna geçilir.

5.1.3. Onarım Enjeksiyonu

Su ve enjeksiyon testi sonucunda başarısız olan kuyuya komşu kuyular pas geçilerek kesitteki tüm kuyulara, kontakt enjeksiyonundaki şartlar ve kriterlere göre,

onarım enjeksiyonu yapılır. Bu sayede kontakt ve kontrol enjeksiyonu sırasında rastlanılmayan veya teknik nedenlerden dolayı noksan bırakılan boşluklar doldurulmuş olur.

5.2. Konsolidasyon Enjeksiyonu

Konsolidasyon enjeksiyonunun başlıca amacı beton çevresindeki kayaçların stabilitesinin sağlanmasıdır. Konsolidasyon enjeksiyonu, kontakt enjeksiyonu tamamlandıktan sonra delinecek araştırma kuyularından alınan karotların değerlendirilmesi sonucunda zayıf kaya koşulları ve sızma problemleri olan bölgelerde yapılması öngörülmüştür. Konsolidasyon enjeksiyonuna kontakt enjeksiyonun tamamlanmasından 15 gün sonra başlanmalıdır. Bu süre enjeksiyon karışımının priz alması açısından oldukça yararlı ve gereklidir.

Konsolidasyon enjeksiyonu için her kesitte 4 kuyu delinir (Şekil 8). Kuyu tertip şekli saat ibresi yönünde "A, B, C ve D" olarak gösterilir (Şekil 9). Birbirini takip eden kesitlerde kuyular şaşırtmalı olarak delinir. Kuyu boyları beton kalınlığı +6 m' dir.

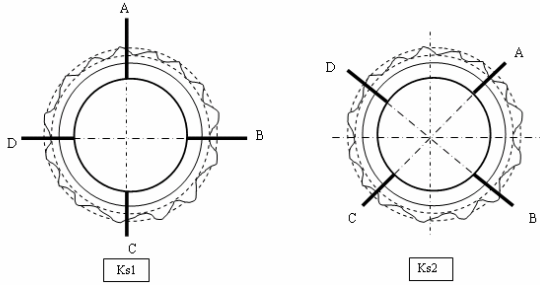
Enjeksiyon 2 kademede yapılır. Birinci kademede 2-6 m, ikinci kademede ise 0-2 m lik zonun enjeksiyonu yapılır. Her iki kademede 5 kg/cm² refü koşulu aranır. Refü sağlanana kadar işleme devam edilir.

Konsolidasyon enjeksiyonu, zemin alış değerlerinin değerlendirilmesi sonucunda, enjeksiyon projesi revize edilerek, konsolidasyon enjeksiyonu programdan çıkarılmıştır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

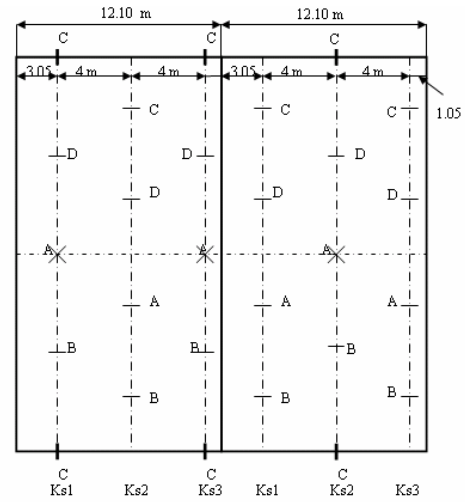
Tüneller, çeşitli mühendislik disiplinlerinin ortaklaşa çalıştığı ve karar verdiği projelerdir. Bu gibi büyük mühendislik yapılarının planlama, araştırma, projelendirme ve inşaat aşamalarında jeoteknik, jeoloji, inşaat ve jeodezi mühendisliği vd. açısından önemli deneyimler elde edilir. Bu deneyimler, bilimsel ve teknik ortamlarda tartışılıp sonuçları yayınlanabilirse gelecekte yapılacak bu tür tesisler için referans olabilir. Aksi takdirde, kontakt ve konsolidasyon enjeksiyonu bölümünde bahsedildiği gibi

kuyu boyu 90 cm den 2 - 2.5 m ye artırılması ve konsolidasyon enjeksiyonun önce uygulanması daha sonra programdan çıkarılması gibi proje revize edilmek zorunda kalınır ve bu da büyük finans ve zaman kaybına neden olur. Ayrıca, Yaklaşım-1 ve Yaklaşım-2 tüneli T1 tüneline bağlanacak biçimde tasarlanmış ve açılmıştır. Yani Yaklaşım-3 tüneli projeye başlanırken dahil edilmemiştir. Kazı ayna sayısını arttırmak ve proje tamamlandıktan sonra bakım çalışmaları yapmak için Yaklaşım-3 tüneli T2 tüneline bağlanacak biçimde daha sonra tasarlanmış ve açılmıştır.



Şekil 8. Şanlıurfa tünelleri konsolidasyon enjeksiyonu delik tertip şekilleri

Bu makalede; Ş.Urfa tünellerindeki enjeksiyon uygulamaları, benzer projelere bir nebze de olsa ışık tutması amacıyla tartışılmıştır. Ayrıca, planlama ve uygulamada yaşanan deneyimler, uygulayıcılara katkı sağlaması açısından vurgulanmıştır.



Şekil 9. Şanlıurfa tünelleri konsolidasyon enjeksiyonu delgi paterni

KAYNAKLAR

- ERGUVALI, K., 1964, Fırat Halfeti Barajı Rezervuarı Jeolojik Etüdü Kısım II (Karakaya-Samsat Arası, E.İ.E.İ. Raporu (Yayınlanmamış), Ankara.
- GOLSER, J., 1995. History, definition and principles of NATM, IACES Bureau of Vienna, NATM Summer course July 2- July 8, 1995, pp. 4/1-4/11.
- KOLARS, J.F., MITCHELL, W.A., 1991, The Euphrates River and the Southeast Anatolia Development Project, Southern Illinois University Press, 297p., U.S.A.
- ÖNALP, A., 1982, İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, KTÜ Yayın No:187, Cilt:1-2, 1224s., Trabzon.
- TANRIVERDİ, İ., 1992, Şanlıurfa Tünelleri Planlama, Araştırma, Projelendirme ve İnşaatı, DSİ, 110s., Ankara.

- TARHAN, F., 1996, Mühendislik Jeolojisi Prensipleri, KTÜ Müh.-Mim. Fak. Yayın no:41, 384s., Trabzon.
- YEŞİLNACAR, 1990, Şanlıurfa Tünelleri Jeolojik-Jeoteknik Etüdü, Akd.Üniv. Müh. Fak. Jeo. Böl. Bitirme Ödevi (Yayınlanmamış), Isparta.
- YÜKSEL, A., 1997, Enjeksiyon ve Şanlıurfa Tünellerindeki Uygulamaları, HR.Ü. Müh. Fak. İnş. Müh. Böl., Bitirme Ödevi (Yayınlanmamış), Şanlıurfa.

BETONLARDA ÇELİK LİF KULLANILMASININ ETKİSİ

Yazarlar : Prof. Dr. Rüstem GÜL
Arş. Gör. Oğuz Akın DÜZGÜN

ÖZET

Beton günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Betonun basınç mukavemetinin yüksek, buna karşılık çekme ve eğilme mukavemetinin düşük olması ve darbe etkilerine karşı dayanıklılığını artırma arzusu araştırmacıları hem basınç, hem çekme, ve hem de eğilme mukavemeti yüksek olan betonlar üretmeye yöneltmiştir. Bu arayışlar neticesinde lifli beton teknolojileri ortaya çıkmış ve gelişmiştir. Yapılan çalışmalar beton üretiminde lif kullanıldığını, betonun mekanik özellikleri üzerinde çok olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Bu çalışmada, çelik lifli betonlar üzerinde yapılmış bazı araştırmalar incelenerek, çelik lifli betonlar hakkında bir sentez çalışması sunulmuştur.

1. GİRİŞ

Beton, genel olarak çimento, su, agrega, ve gerektiğinde katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup, zamanla sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir.

İlk olarak 1824'de Portland çimentosunun bulunması betonda yeni gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Özellikle 1850'li yıllarda Coignet ve Monier (1) tarafından yapılan çalışmalarda beton içerisine çelik çubuklar yerleştirmek suretiyle yeni bir malzeme elde edilmiştir. Betonarme denilen bu malzeme, yapı malzemesi olan betonun uygulama alanlarını oldukça genişletmiştir. Beton özellikle yük altındaki davranışı, ekonomik oluşu ve kolay işlenebilirliği nedeniyle diğer yapı malzemelerine oranla çok büyük kullanım alanı bularak, dünyada en yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi haline gelmiştir.

Çeşitli yapısal uygulamalar için basınç etkisi altındaki mekanik davranışı elverişli olan yapı malzemelerinin çekme ve eğilme etkisi altındaki davranışı çoğu zaman uygun olmamaktadır. Bu tür malzemelerin uygun olmayan mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi yapı mühendislerinin uğraşlarının başında gelmiştir (2).

Bilindiği gibi; betonarme betonundaki donatıların yapı elemanları içerisindeki yerlerinin ve miktarının tespiti işlemi, buna ilave olarak da bu donatıların yapım sırasında yerleştirilmesi işlemi inşaat süresini ve maliyeti etkileyen faktörlerdendir. Özellikle zaman kaybından dolayı araştırmacılar daha avantajlı yapı malzemeleri arama yoluna gitmişlerdir. Başka bir deyişle hem basınç, hem çekme ve hem de eğilme dayanımı yüksek olan ve salt metal yapı malzemesi- lerinden daha ekonomik olan farklı bir yapı malzemesi aranmaya başlanmıştır. Bu arayışlar neticesinde lifli beton teknolojileri ortaya çıkmış ve gelişmiştir (2).

Gerçekte 4500 yıl öncesinden beri yapı malzemesi olarak kullanılan saman takviyeli kil harcının (kerpiç) esin kaynağı (2) olduğu lifli betonlarla ilgili ilk çalışmalar 1962'de A.B.D.'de James Romualdi tarafından yapılmıştır. Bu araştırmaların ümit verici sonuçları bir çok araştırmacıyı bu konuya yöneltmiştir. Bu araştırmacıların, çalışmaları neticesinde lifli beton, normal betona göre üstün özellikleri deneysel çalışmalarla ispatlanmış bir yapı malzemesi olarak ortaya çıkmıştır (3).

2. ÇELİK LİFLİ BETON

Genel olarak agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan beton karışımlarına belirli oranlarda lif katılmasıyla elde edilen malzemeye lifli beton denilmektedir. Yalnızca çimento ve liflerden oluşan kompozit malzemeler de lifli beton teriminin kapsamı içerisine girmektedir. Betonun özelliklerini iyileştirmek amacıyla taze beton içerisine ilave edilen lifler, değişik malzemelerden üretilmiştir.

Tablo 1'de değişik malzemelerden üretilmiş lifler ve bu liflere ait bazı özellikler bulunmaktadır (4, 5).

Liflerin kesin tanımı yapılamamaktadır. Lifleri tanımlayan öğeler lifin sahip olduğu mekanik özellikler ile onun sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan lifin çekme gerilmesi, geometrik yapısı ve görünüm oranı gibi biçimsel özellikleridir. Ancak lifleri tanımlayan en uygun sayısal parametre görünüm oranıdır (aspect ratio). Görünüm oranı, lif boyunun lif çapına bölünmesiyle elde edilir. Şayet en kesit dairesel değilse o zaman lifin en kesit alanına eşdeğer alana sahip dairenin çapı esas alınarak görünüm oranı hesaplanır (5, 6, 7).

Çelik lifli beton; içerisinde aralıklarla dağıtılmış küçük çelik teller bulunan ince veya ince ile iri agrega ve çimento kullanılarak üretilmiş kompozit bir malzemedir. Çelik lifler puzolanlar ve normal betona ilave edilen katkı maddeleri ile de ortak olarak kullanılabilir (2, 5, 8).

Bu çalışmaya konu olan çelik lifler birbirinden farklı, değişik yöntemlerle üretilmektedirler (7):
soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi
sıcak çekme yöntemi
çelik plakaların kesilmesi yöntemi
çelik tellerin öğütülmesi yöntemi

Betona çelik lif ilave etmekle betonun çekme mukavemetini, tokluğunu, eğilme mukavemetini, yorulma mukavemetini, parçalanma ve kırılmaya karşı dayanıklılığını, darbe etkilerine karşı dayanımını ve tokluk gibi teknik özelliklerini artırmak mümkündür (2, 8 – 15). Betonun bu tür özelliklerindeki performans artışı; betonun karışım oranlarına, liflerin karışım

içerisindeki dağılımlarına (yerleşim yönlerine), özellikle liflerin geometrik şekline ve miktarına bağlıdır (6, 14, 16). Bu nedenle bir çok değişik geometrik formda çelik lif üretilmekte ve kullanılmaktadır. 1970'li yıllarda sadece düz çelik lifler kullanılırken sonraları üreticiler uçları çengelli, kıvrımlı, yüzey pürüzlülüğü artırılmış, özel deformasyonlar verilmiş ve daha değişik geometrilerde çelik lifler üretmişlerdir. Ancak araştırmalar göstermiştir ki, betonun özellikleri üzerindeki en büyük iyileştirmeyi düz çelik lifler ve ucu çengelli lifler sağlamaktadır. Çelik lifli betonları daha ekonomik hale getirmek için değişik üretim metotları denenmiş ve sonuçta dairesel kesitli olmayan (yarım daire, dikdörtgen ve düzensiz en kesitli gibi) çeşitli tipte lifler üretilmiştir (2, 6, 7).

Beton içerisindeki liflerin görünüm oranları (uzunluk/çap oranı) ve miktarı betonun performansını etkiler. Teorik olarak liflerin görünüm oranı ve miktarı ne kadar yükseğe betonun darbe etkilerine karşı dayanıklılığı, tokluğu ve düktilitesi gibi teknik özellikleri de o kadar yüksektir. Fakat ne yazık ki lif görünüm oranı ve miktarının yüksek olması karıştırma ve yerleştirme aşamalarında zorluk çıkarmaktadır. Bu nedenle çelik lifli betonlarda kullanılacak lif miktarının sınır değerleri vardır (7). Çelik liflerin beton içerisine katılma oranı hacimsel olarak %0.5–2.5 arasında olabilmektedir. Ancak yapılan araştırmalar göstermiştir ki optimum fayda bu oranın % 1–2 olması halinde sağlanmaktadır. Bu değerden daha az katılması halinde, normal beton özelliği üzerinde çok olumlu bir gelişme sağlanamamaktadır. Daha yüksek oranda katılması durumunda ise betonun işlenebilirliğini zorlaştırmasından ve liflerin daha fazla topaklaşmasından dolayı normal betonun basınç mukavemetinden daha düşük bir değer elde edilmektedir (2). Betona ilave edilen çelik liflerin görünüm oranlarının (uzunluk/çap oranı) 100'den büyük olması işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediğinden, betonun teknik özelliklerini iyileştirmesi bakımından görünüm oranının 100'den küçük olması gerekmektedir (6).

3. ÇELİK LİFLERİN BETON İÇERİSİN-DEKİ DAVRANIŞI

Genellikle çelik lifler kullanıldıkları betondaki donatıları destekleyici bir rol oynarlar. Çelik lifler aynı zamanda betonda

oluşan çatlakların ilerlemesini sınırlar, yorulma, darbe, rötre veya ısısal gerilmeler gibi etkenlere karşı betonun direncini artırır (6). Bu nedenle çelik liflerin beton içerisindeki davranışı ile betonda kullanılan donatının işlevi hiçbir zaman birbirine karıştırılmamalıdır. Birçok yerde donatı ve çelik lif belli bir yere kadar aynı işlevi görebilirler. Fakat bunlar arasındaki en önemli fark beton içerisindeki liflerin fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır (2).

Statik hesaplar yapılırken çelik lifler eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. Çelik lifleri betonun yapısını değiştiren ve onu sünek davranışa zorlayan bir malzeme olarak görebiliriz. Çelik lifli betonun özelliği onun artırılmış elastikiyet ve enerji tutma yeteneğidir. Yani normal betonların yük – deformasyon eğrisinde maksimum yükten sonra yükün azalma hızı çok yüksek ve yapabileceği deformasyonun çok düşük olmasına karşılık çelik lifli betonlarda çelik lifler yük altında sünek bir davranış gösterdiklerinden maksimum yükten sonra da belli deformasyona kadar yük taşıyabilirler. İşte bu nedenle çelik lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon neticesinde yükün azalma hızı çok düşük olup, yük – deformasyon eğrisinde maksimum yükten sonra azalan bir kuyruk kısmı oluşmaktadır. Dolayısıyla liflerin betondan ayrılması ve böylece betonun göçmesi için gereken enerji de oldukça büyüktür. Başka bir ifade ile betonun deformasyon yapma kabiliyeti oldukça fazladır (2).

Çekme gerilmeleri, bir çatlaktan pek çok çatlağın yayılmasına sebep olarak betonda göçmeye neden olur. Çatlak gelişimine karşı betonun direncini ve düktilitesini artırmak için betonun liflerle güçlendirilmesi etkili bir yoldur. İşte çelik liflerde en büyük etkiyi çatlakların ilk oluşum anında, çatlak sonlarındaki gerilmeleri kendi üzerlerine ve sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirirler. Lifsiz betonlarda ise betona herhangi bir gerilme uygulandığında oluşan mikro çatlaklar gerilmenin artmasıyla çeşitli yönlere doğru

yayılarak bir süre sonra betonda göçmeye neden olurlar (2, 17).

Soroushian ve Lee (1990), yaptıkları çalışmada lifsiz betonun çekme mukavemetinin çok düşük olduğunu, betonun çekme mukavemetini artırmanın bir yolunun betonda meydana gelen iç kusurların (mesela mikro çatlakların) yayılmasını engellemek olduğunu, bunun da betona homojen bir şekilde çelik lif ilave etmekle mümkün olabileceğini belirtmişlerdir (17).

4. ÇELİK LİFLERİN BETON ÜZERİN-DEKİ ETKİSİ

4.1. Çelik Liflerin Taze Beton Üzerin-deki Etkisi

Betona ilave edilen çelik lifler betonun taze haldeki özelliklerini değiştirmektedir. Taze beton özelliklerinden bahsedildiğinde ilk akla gelen betonun taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılma aşamalarında en etkili özellik olan betonun işlenebilir-liğidir. Yapılan tüm çalışmalar betona lif ilave edilmesinin işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Bu olumsuz etki üzerindeki en önemli parametreler betona ilave edilen liflerin geometrisi, miktarı ve görünüm oranı (uzunluk/çap oranı)'dır. Bu önemli parametrelerin dışında liflerin betona katılması, karıştırma teknikleri ve lifli betonların karışım hesaplarının Swamy ve Jojagha (1982), yaptıkları bir çalışmada, hafif agregası olarak sinterlenmiş uçucu kül (Lytag), normal agregası olarak doğal kum, ayrıca farklı geometrilere (düz, kıvrımlı, çengelli ve palet şeklinde) ve farklı görünüm (uzunluk/çap) oranına (50 ve 100) sahip çelik lifleri kullanarak ürettikleri çelik lifli hafif beton karışımlarında lif tipinin betonun işlenebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak betona ilave edilen liflerin görünüm oranlarının ve geometrilerinin betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilediğini belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca kullanılan farklı geometrilere sahip lif türlerinden işlenebilirliği en fazla çengelli liflerin, en az da düz liflerin etkilediği bildirilmiştir (18).

Tablo 1. Çeşitli Lif Türlerinin Tipik Özellikleri

Lifin türü	Lifin Çapı (mm)	Özgül Kütle (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Uzama (%)
Akrilik	0.02 – 0.35	1.1	0.2 – 0.4	2	1.1
Asbest	0.0015 – 0.02	3.2	0.6 – 1.0	83 – 138	1 – 2
Pamuk	0.2 – 0.6	1.5	0.4 – 0.7	4.8	3 – 10
Cam	0.005 – 0.15	2.5	1.0 – 2.6	70 – 80	1.5 – 3.5
Grafit	0.008 – 0.009	1.9	1.0 – 2.6	230 – 415	0.5 – 1.0
Naylon	0.02 – 0.40	1.1	0.76 – 0.82	4.1	16 – 20
Polyester	0.02 – 0.40	1.4	0.72 – 0.86	8.3	11 – 13
Polipropilen	0.02 – 0.40	0.95	0.55 – 0.76	3.5	15 – 25
Suni İpek	0.02 – 0.38	1.5	0.4 – 0.6	6.9	10 – 25
Taş Yünü	0.01 – 0.8	2.7	0.5 – 0.76	~ 0.6	0.5 – 0.7
Çelik	0.1 – 1.0	7.84	0.3 – 2.0	200	0.5 – 3.5
Çimento Matrisi	-	1.5 – 2.5	0.003 – 0.007	10 - 45	0.02

4.2. Çelik Liflerin Sertleşmiş Beton Üzerindeki Etkisi

Bilindiği gibi betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetine göre oldukça küçüktür. Betona belirli oranda çelik lif ilave edilmesiyle betonun başta çekme mukavemeti olmak üzere bir çok teknik özelliklerinde gözle görülebilir bir iyileşme sağlanmaktadır (2, 8 – 15). Çelik lifli beton, basınç duktilitesi gösterir. Yani beton taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Yapılan çalışmalar ayrıca çelik lifli betonlarda kesme, burulma ve yorulmaya karşı dayanıklılığın fazla, çatlamların, dökülmelerin, parçalanmaların ve dağılma-ların az olduğunu göstermişlerdir (2, 10).

Sharma (1986), çelik lifli beton kirişlerin kesme kuvvetleri altındaki davranışlarını incelemiştir. Boyları 50 mm ve çapları 0.6 mm olan düşük karbonlu çengelli çelik lifleri kullanarak ve 28 günlük silindirik basınç mukavemetini ortalama 45 MPa değerinde tutarak hazırladığı iki grup (etrisiz ve etriyeli) kiriş numune üzerinde yaptığı deneyler sonucunda ilk gruptaki liffsiz numunelerin kesme bir artışla 3 MPa olduğunu, ikinci gruptaki liffsiz numunelerin kesme mukavemetleri ise ortalama

2.9 MPa iken lifli numunelerin kesme mukavemetlerinin %29'luk bir artışla 3.8 MPa olduğunu belirlemiştir (19).

Nanni (1990), çelik lifli betonların burulma mukavemeti üzerine yaptığı çalışmada ise betona çelik lif ilave edilmesinin hem etriyeli hem de etrisiz kirişlerin burulma mukavemetini normal betona göre yaklaşık %60 oranında artırdığını belirtmektedir (20).

Yapılan araştırmalar betona ilave edilen çelik liflerin basınç ve çekme mukavemetleri üzerinde de etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Bu etkinin olumlu veya olumsuz olması liflerin beton içerisindeki dağılımına bağlıdır. Yani yükleme eksenine dik olan lifler mukavemet üzerinde herhangi bir etki etmezken, liflerin yükleme eksenine paralellikleri arttıkça mukavemet üzerindeki olumlu etkileri de artmaktadır (14, 16, 17).

Betonun çekme ve basınç mukavemetinin yanında kırılma enerjisi de oldukça önemli bir malzeme parametresidir. Çelik lifli beton, özellikle maksimum yükten sonra oldukça yüksek bir duktilite gösterir. Bu nedenle lif oranı

artıkça kırılma enerjisi de artış göstermektedir. Çelik lifli betonların bu tür özelliklerini ortaya koymak üzere literatürde bir çok ampirik tanımlama yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi Barr'ın geliştirdiği tokluk indeksi tanımlamasıdır. Lifli betonun gerilme-birim boy değişimi eğrisinin ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alanın, eğri altındaki toplam alana oranı tokluk indeksi olarak tanımlanmıştır (2).

Barr ve Noor (1983), su/çimento oranını (0.46) sabit tutarak lif miktarının (hacimce %0.03, 0.15, 0.3, 0.6, ve 0.9) çelik lifli betonların tokluk indeksi (betonun enerji emme kapasitesi) üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada betonun yük – deformasyon eğrisi altındaki alandan hesap edilen tokluğun çelik lifli betonların en önemli özelliklerinden birisi olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan deneyler-de lif miktarının artmasıyla tokluğun arttığı belirlenmiştir. Nitekim lif miktarının hacimce %0.03'den %0.9'a çıkması tokluğu (betonun enerji emme kapasitesi) %100 oranında artırdığı görülmüştür (21).

5. ÇELİK LİFLİ BETONUN TİPİK KULLANIM ALANLARI

Genellikle, yapısal uygulamalarda çelik lifli beton sadece kırılmayı önlemek için kullanılmaz, aynı zamanda betonun dinamik yükleme veya darbe mukavemetini arttırmak ve malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek için de betona çelik lif ilave edilmektedir (6, 8, 10).

Kirişlerde, kolonlarda ve kat döşemelerinde olduğu gibi diğer yapı elemanlarında da eğilme veya çekme kuvvetleri meydana gelir. Bu basınç, eğilme ve çekme kuvvetlerinin birlikte oluşturduğu gerilme-lerden dolayı yapı elemanlarının donatı ile birlikte çelik lifler ile kuvvetlendirilmesi mukavemeti oldukça önemli mertebede artırılabilir (2).

Aşağıda çelik lifli betonun kullanım alanlarından bazı örnekler verilmiştir:

- Endüstri Yapılarında
Çelik lifli beton endüstri yapılarında darbe rijitliğini sağlamak, ısısal ve dinamik etkilere karşı dayanıklılığı artırmak için kullanılmaktadır (2).

- Hidrolik Yapılarda
Barajlar, kanallar, dinlendirme havuzları ve dolu savaklarda aşınmaları engellemek amacıyla, kaplama olarak kullanılır (8).

- Yol Döşemelerinde
Beton yol uygulamalarında kaplama kalınlığının daha ince olmasının istendiği durumlarda çelik lifli betonlar kullanılır (8). Günümüzde çelik lifli betonlar yollarda, otobanlarda, köprülerde ve hava alanlarında başarıyla kullanılmaktadır (3, 10, 15).

- Püskürtme Beton (Shotcrete) Uygulamalarında
Püskürtme beton karışımları genellikle yüksek çimento yüzdesiyle hazırlanan karışımlardır. Bu da çoğunlukla rötre çatlaklarına neden olmaktadır. Üstelik püskürtme beton uygulaması yapılan eğri yüzeyler çatlama çok büyük eğilim gösterirler ve bu tür yüzeylerin kür edilmesi çok zor olmaktadır. İşte çelik lifler hem ıslak hem de kuru püskürtme beton uygulamalarında çatlak kontrolü için ekonomik ve de pratik bir çözüm sunmaktadır. Bu nedenle çelik lifli püskürtme beton uygulaması barajların tamirinde, tünellerde, su kemerlerinde, iskelelerde, kanallarda, dolu savaklarda ve bu tür yapılarda başarıyla kullanılmaktadır (3).

- Şev Stabilitesinin Sağlanmasında
Çelik lifli beton ayrıca karayollarını ve demiryollarını kesen, yer üstündeki kaya veya topraktan oluşan dik şevlerin veya toprak setlerin stabilitesinin sağlanmasında kullanılır (8).

- İnce Kabuk Yapılarda
Lifli betonun üstün nitelikleri kesit kalınlıklarının azaltılmasını mümkün hale getirdiğinden, ince kabuk yapılarda, kubbelerde, katlanmış plaklarda ve çeşitli mimari nedenlerle ince olması gereken yapı elemanlarında kullanılmaktadır (2, 8).

- Patlamaya Karşı Dayanıklı Olması Gereken Yapılarda
Genellikle normal donatı çubukları ile birlikte kullanıldığında, güç santralleri ve askeri tesislerin yapımında çok uygun bir kullanım arz etmektedir. Özellikle çok önemli askeri tesislerin yapımında bu özelliğinden dolayı kullanımı tercih edilmektedir. Uzun yıllardan beri Amerikan askeri tesis yapım şartnamelerinde yer almakta ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (2).

- Ön Yapımlı Beton Elemanlarda
Ön yapımlı beton üreticileri çatlak oluşmasını ve yayılmasını engellemek, betonun yük altında daha elastik davranmasını sağlamak, betonun dağılıp ufalanmasını azaltmak, ve betonun

koroz-yona karşı performansını artırmak için çelik lifli betonları kullanırlar (3).

- Çok Yüksek Mukavemetli Betonlarda
Günümüzde yüksek mukavemetli betonlara ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu betonların normal mukavemetli olanlara göre olumsuz tarafı göçme sırasında bağıl olarak az enerji yutmalarıdır. Böylece gevrek davranış gösteren yüksek mukavemetli betonların yerini sünekliği artırılmış yüksek performanslı sahip ultra yüksek mukavemetli betonların alması söz konusu olmaktadır. Ultra yüksek mukavemetli çimento esaslı kompozitlerin üretiminde ince agrega ve çimentoya ilave olarak 0.15 mm çapında ve 5 – 10 mm boyunda kısa kesilmiş çelik tel, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır. Bu kompozitleri üretmekle betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega – çimento hamuru arasındaki boşluklar ve harçtaki kusurlar minimum yapılabilmekte ve gevrek davranışa sahip bu çok yüksek mukavemetli betona kısa kesilmiş ince çelik tellerle sünek davranış özelliği kazandırılmaktadır (22).

- Depreme Dayanıklı Yapılarda
Çelik lifli betonlarla inşa edilen süneklik düzeyi yüksek betonarme yapıların deprem kuvvetleri altındaki davranışı olumlu yönde değişecektir. Ülkemizin deprem kuşağında olduğu göz önüne alındığında gevrek bir malzeme olduğu bilinen betonun bu zayıf yönünü iyileştirmenin önemli olduğu açık bir gerçektir. Bu yapıların dinamik etkilere karşı enerji emme yeteneği geleneksel yapılara göre daha yüksek olduğundan bu tür etkiler sonucu meydana gelebilecek yapısal hasarlar en alt düzeye indirilecektir. Çelik liflerin betonda kullanılmasının önemi karşı karşıya bulunduğumuz depremin yapılarda meydana getirdiği hasarlar incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır (14).

6. ÇELİK LİFLİ BETONLAR İLE İLGİLİ YAPILAN BAZI ÇALIŞMALAR

Swamy ve Jojagha (1982), uçucu kül kökenli hafif agrega ve çapları 0.418 mm – 0.76 mm arasında, boyları da 25 – 50 mm arasında değişen farklı geometrilere sahip çelik lifleri kullanarak ürettikleri çelik lifli taşıyıcı hafif betonların ağırlık düşürme deney düzeneği kullanarak betonun darbe etkilerine karşı dayanıklılığını araştırmışlardır. Yapılan çalışma neticesinde numunelerin basınç mukavemetleri arttıkça darbe etkisine karşı dayanıklılığın da arttığı görülmüştür. Çalışmada betonların darbe

etkisine karşı dayanıklılığının liflerin şekli, geometrisi, lifin uzun veya kısa olması ve lif görünüm (uzunluk/çap) oranı gibi parametrelere bağlı olduğu belirlenmiştir. Nitekim en düşük darbe mukavemeti 25 mm uzunluğunda ve görünüm oranı 60 olan kıvrımlı liflerden üretilmiş numunelerden elde edilmiş, en yüksek darbe mukavemeti ise 50 mm uzunluğunda ve görünüm oranı 70 – 100 olan çengelli liflerden üretilmiş numunelerden elde edilmiştir (23).

Gopalaratnam ve Shah (1985), darbe etkisine maruz kalan çelik lifli betonun özelliklerini incelemişler ve darbe yüklerine maruz kalan betonun kırılmaya karşı direncini artıran metotlardan birisinin de betona lif ilave etmek olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, ürettikleri numunelerin dinamik davranışını incelemek üzere darbe deneyleri için hazırlanmış Charpy adı verilen düzeneği kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonunda lif hacminin %1.5 oranına çıkması betonun basınç mukavemetini yaklaşık %35 artırdığı belirlenmiştir. Eğilme mukavemeti deneylerinde ise kontrol betonlarındaki değerlere göre %0.5 oranında lifli numunelerde %79, %1.5 oranında lifli numunelerde ise %111 değerlerinde artış kaydedilmiştir (9).

Wafa ve Ashour (1992), yüksek mukavemetli beton içerisine çelik liflerin ilavesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlar ve yaptıkları deneysel çalışma sonucunda çelik liflerin hacimce %1.5 oranına kadar karışıma ilavesinin işlenebilirliği fazla etkilemediğini, fakat daha fazla karıştırma süresinin gerektiğini belirlemişlerdir. Ayrıca yüksek mukavemetli beton çok gevrek olmasına karşılık bu betona çelik liflerin ilavesinin betonun tokluğunu (enerji emme kapasitesi) artırdığı belirlenmiştir. Lif ilavesi ayrıca çatlak genişliğini azaltmış ve böylece betonun deformasyona karşı direncini artırmıştır. Betona %1.5 oranında lif katılması basınç mukavemetini %4.6 oranında, eğilme mukavemetini %67 oranında, ve çekme mukavemetini de %159.8 oranında artırmıştır (24).

Balaguru ve Dipsia (1993), yaptıkları çalışmada çelik liflerin 90 kg/m³ oranına kadar karışıma kolayca ilave edilebileceğini, 0.35 oranında su / çimento oranında ve çimento ağırlığının %15'i kadar silis dumanı ilavesiyle oldukça işlenebilir çelik lifli beton elde edilebileceğini, liflerin ilavesinin basınç mukavemetinde %20, çekme mukavemetinde

%160, elastisite modülünde %80, eğilme mukavemetinde %90 ve kesme mukavemetinde %80 oranlarında artış sağladığını ve sonuç olarak liflerin ilavesiyle yalnızca yüksek basınç mukavemetine değil, aynı zamanda yüksek eğilme, kesme mukavemetine, yüksek elastisite modülüne ve iyi bir düktiliteye sahip çelik lifli yarı hafif beton elde etmenin mümkün olacağı sonucuna varmışlardır (25).

Torrenti ve Djebri (1995), çelik lifli betonların iki eksenli basınç yükleri altındaki davranışını incelemişlerdir. Çalışmada düzensiz en kesitli demir lif ve çengelli çelik lif olmak üzere iki farklı tür lif kullanarak ürettikleri numunelere iki eksenli basınç yükü uygulamışlardır. Sonuçta liflerin betondaki yerleşim yönlerinin betonun mukavemetini etkilediğini, lifli betonların kontrol betonlarına göre daha sünek davrandığını belirlemişlerdir. Çelik lifli betonlarda kırılma, yükleme yönüyle 20 – 45° açı yapan kesme çatlakları şeklinde oluşmuştur, Demir lifli betonlardaki kırılma ise yükleme yönüne paralel çatlakların oluşmasıyla meydana gelmiştir (26).

Chenkui ve Guofan (1995), yaptıkları çalışmada maksimum tane çapı 20 ve 40 mm olan agregaya, ve 25, 35, ve 45 mm uzunluğunda çelik lif kullanarak ürettikleri betonların mekanik özelliklerini ve yorulma etkisi altındaki davranışını incelemişlerdir. Numunelerin basınç mukavemetleri lif ilavesiyle en fazla %20 oranında artmıştır. Maksimum tane çapının artmasının basınç mukavemetine etkisi ise dikkate alınmayacak kadar az olduğu belirlenmiştir. Betonların çekme mukavemetleri ise kontrol betonlarına kıyasla lif miktarına da bağlı olarak en fazla %58 oranında artmıştır. Yorulma deneylerinde de lifli betonlar kontrol betonlarına kıyasla oldukça iyi bir performans göstermişlerdir (15).

Balaguru ve Foden (1996), su / çimento oranını (0.35) ve maksimum agregaya boyutunu (19 mm) sabit tutarak ürettikleri 1650 kg/m³ birim ağırlığındaki hafif betonlar üzerinde yaptıkları çalışmada çelik liflerin karışıma 90 kg/m³ oranına kadar kolaylıkla ilave edilebildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca bu çelik liflerin hafif betonun birim ağırlığını 100 kg/m³ oranında artırmasına ve işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemesine rağmen basınç mukavemetini yaklaşık %30 oranında, elastisite modülünü %30 oranında, eğilme ve çekme mukavemetlerinde ise %100'den fazla artış sağladığını, sonuç olarak betona silis dumanı ve akışkanlaştırıcı katkıları da ilave etmek

suretiyle çelik lifli hafif betondan 42 MPa değerinde basınç mukavemeti, ve 6.5 MPa değerinde eğilme ve çekme mukavemeti elde edilmesinin mümkün olabileceğini belirtmişlerdir (27).

Boratav ve Yeğınobalı (1997), yaptıkları çalışmada hafif agregaya kullanarak elde ettikleri 1900 kg/m³ birim ağırlığındaki yüksek mukavemetli hafif betona lif ilave ederek bu liflerin hafif beton üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve hafif betonlarda görülen kırılma çatlaklarının çelik lif kullanılmasıyla azaldığını, Ayrıca lifsiz numunelerin maksimum basınç gerilmesine ulaştığında patlarcasına kırıldığını bunun yanında çelik lif içeren numunelerde ise gerilme deformasyon eğrisinde maksimum gerilmeden sonra alçalan bir kuyruk kısmı oluştuğundan kırılmanın daha uyarıcı bir süre içerisinde olduğunu ve 60 kg/m³ miktarında çelik lif kullanılmasıyla çekme mukavemetinde %80, eğilme mukavemetinde ise %15 oranlarında artış sağlandığını belirtmiştir. Çalışmada ayrıca çelik lifli numunelerin ısı iletkenlik katsayısı 0.50 – 0.60 kcal/m.h.°C arasında değişirken, lifsiz numunelerin ısı iletkenlik katsayısının yaklaşık 1.3 kcal/m.h.°C olduğu bildirilmiştir (28).

Çelik ve Eren (1997), yüksek mukavemetli beton karışımları içerisinde 60, 75 ve 83 görünüm (uzunluk/çap) oranlarına sahip, hacimce % 0.5, % 1, % 2 oranlarında çelik lif ilave ederek bu çelik liflerin yüksek mukavemetli beton üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada lif hacmi ve lif görünüm oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin ve beton içindeki hava miktarının azaldığını belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca çelik liflerin yüksek mukavemetli betona ilavesiyle basınç mukavemetinde %28'lik, çekme mukavemetinde ise %129'luk artış sağlandığı bildirilmiştir (29).

Gao ve arkadaşları (1997), yaptıkları çalışmada yüksek mukavemetli hafif beton karışımlarına çelik lif ilavesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla maksimum tane çapı 15 mm olan hafif agregaya (genleştirilmiş kil), dikkörtgen en kesitli ve 20, 25, 30 mm uzunluğundaki çelik lif, ve naftalin kökenli akışkanlaştırıcı katkı kullanarak ürettikleri betonlar üzerinde yapılan deneyler sonunda betona çelik lif ilavesinin basınç mukavemetini yaklaşık %20 oranında, çekme mukavemetini %80, ve eğilme mukavemetini ise %90 oranında artırdığı tespit edilmiştir (12).

Toutanji ve Bayasi (1998), yaptıkları çalışmada kür şartlarının ve karışımdaki çelik lif dağılımının betonun eğilme ve basınç mukavemetleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla maksimum tane çapı 19 mm olan normal agregaya, 0.8 mm çapında ve 51 mm uzunluğunda çelik lif, akışkanlaştırıcı katkı kullanarak ürettikleri betonları üç farklı kür şartına (normal su kürü, buhar kürü, ve hava kürü) tabi tutmuşlardır. Yapılan deneyler neticesinde su kürüne kıyasla buhar kürünün numunelerin basınç mukavemetini %22 oranında artırdığı, eğilme mukavemetini değiştirmedığı, hava kürünün ise basınç mukavemetini %15, eğilme mukavemetini de %70 oranında azalttığı sonucuna varmışlardır. Çalışmada ayrıca eğilme deneylerine tabi tutulan numunelerin kalıba yerleştirme yönüne dik olarak yüklenmesiyle elde edilen sonuçların, kalıba yerleştirme yönüne paralel olarak yüklenmesiyle elde edilen sonuçlardan yaklaşık %14 – 30 arasında düşük olduğu görülmüştür (16).

Pigeon ve Cantin (1998), yaptıkları çalışmada çelik lifli betonların 0°C'den düşük sıcaklıklardaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Bu nedenle çelik lif, akışkanlaştırıcı katkı, silis dumanı kullanarak ürettikleri betonları 20, -10, ve -20 °C'de deneye tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak sürekli 0°C'den düşük sıcaklıklarda bulunan betonların boşluklarındaki suyun donması neticesinde boşluk oranının azaldığı ve böylece betonun mukavemetinin ve yük taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir (30).

Sancak ve Ünal (1999), pomzanın hafif agregaya olarak kullanılmasıyla elde edilen karışımlara ilave edilen liflerin tipinin ve miktarının betonun özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla 0.6 mm çapında, 40 mm uzunluğunda ve 0.5 mm çapında, 30 mm uzunluğunda iki farklı çengelli çelik lifi hacimce %0.5, 1, ve 1.5 oranlarında betona ilave ederek ürettikleri hafif betonlar üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda lif miktarının artmasının karışımın işlenebilirliğini azalttığını, karışım-daki lif ve hafif agregaya miktarının üretilen numunelerin su emme ve kompasitelerini olumsuz yönde etkilediğini, karışıma ilave edilen liflerin basınç mukavemetini en fazla %20 oranında artırdığını ve uzun liflerin kısa liflere oranla işlenebilirliği daha fazla etkilemesi ve beton içerisinde fazla oranda boşluk oluşturması nedeniyle basınç mukavemetini

kısa liflere kıyasla daha az (yaklaşık %8) etkilediğini tespit etmişlerdir (31).

Nataraja ve arkadaşları (1999), yaptıkları çalışmada betona 39, 58, ve 78 kg/m³ oranlarında kıvrımlı çelik lif ilave edilmesinin betonun basınç yükleri altındaki davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta betona lif ilave edilmesinin lifsiz numunelere kıyasla basınç mukavemetini yaklaşık %15 – 18 oranlarında artırdığı, gerilme – deformasyon eğrisinde, yük maksimumuna ulaştığında betonun yaptığı deformasyonu da %44 – 76 oranlarında artırdığı belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca gerilme – deformasyon eğrisinin maksimum yükten sonraki kısmın eğiminin betondaki lif miktarının artmasıyla azaldığı böylelikle betonun tokluğunun (enerji emme kapasitesi) arttığı belirtilmiştir (10).

Almansa ve Cánovas (1999), yaptıkları çalışmada normal ve çelik lifli betonların darbe yükleri altındaki davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla çapı 0.5 mm ve uzunluğu 50 mm olan çengelli çelik lif kullanarak ürettikleri 60x60 cm boyutlarındaki beton levhaları (mermi fırlatmak suretiyle) darbe yüklerine maruz bırakmışlardır. Çalışmanın sonucunda betonun darbe etkisiyle zarar görmemesi için bir analitik model önerilmiştir. Bu modele göre lifli betonların darbe yüklerinden etkilenmemesi için minimum beton kalınlığının $\geq (1,2 \cdot \text{lif boyu})$ olması gerekmektedir. Yapılan darbe deneylerinde normal betonlara fırlatılan mermiler beton kalınlığının %45 – 50'sine kadar saplanır-ken, lifli betonlarda %60'lara varan bir iyileşme görülmüştür (32).

Luo ve arkadaşları (2000), çelik lifli betonların darbe yükleri altındaki davranışını incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, ürettikleri yüksek mukavemetli donatılı beton (donatıların çapı 6 mm) ve çelik lifli beton (kullanılan liflerin uzunluk/çap oranları 60 ve 35) numuneler üzerinde yaptıkları darbe deneyleri sonucunda donatılı betonların darbe etkisiyle parçalandıkları buna karşılık lifli betonların parçalanmadan kaldıkları belirtilmiştir. Bunun nedeninin lifli betonların darbe etkisiyle betonda oluşan çatlakların ilerlemesini engellemesi ve betonu daha sünek bir davranışa zorlaması olabileceği bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca uzunluk/çap oranı 35 olan liflerin kullanıldığı betonlarda oluşan çatlakların, uzunluk/çap oranı 60 olan liflerin kullanıldığı betonlarda oluşan çatlaklara kıyasla daha geniş olduğu tespit edilmiş ve böylelikle lifin geometrik şeklinin de

betonun darbe mukavemeti üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır (33).

Ding ve Kusterle (2000), yaptıkları çalışmada erken yaşlardaki (9 – 81 saatlik) çelik lifli betonların basınç yükleri altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma sonunda betona lif ilave edilmesinin betona erken yaşlarda bile daha sünek bir davranış kazandırdığı belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca betona çelik lif ilavesinin normal betona kıyasla basınç mukavemetini 9. – 81. saatler arasında yaklaşık %2 – 34 oranlarında artırdığı belirtilmiştir. Sonuç olarak betona lif ilave edilmesinin sadece uzun sürelerde değil, çok kısa bir zamanda bile mukavemet üzerinde oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır (11).

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çelik lifli betonlar ile ilgili daha önceden yapılmış bazı çalışmalardan kısaca aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Betona çelik lif ilave etmekle betonun basınç mukavemetini, çekme mukavemetini, tokluğunu, eğilme mukavemetini, yorulma mukavemetini artırmak mümkündür. Özellikle eğilme ve çekme mukavemetinde önemli artışlar meydana gelmektedir.
- Beton üretiminde lif kullanılması, betonun parçalanma ve kırılmaya karşı dayanıklılığını, darbe etkilerine karşı dayanımını ve deformasyon yapabilme yeteneği gibi teknik özelliklerini artırmaktadır.
- Beton içerisindeki lif miktarı arttıkça taze betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. İşlenebilirlik kaybını önlemek için akışkanlaştırıcı katkıları kullanılması önerilmektedir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında, lifli beton yapının hangi kısmında kullanılacaksa ona uygun karıştırma ve yerleştirme teknikleri uygulanarak, ayrıca uygun lif geometrisi seçilerek, ve işlenebilirliği fazla etkilemeyecek optimum lif miktarı kullanılarak mekanik özellikleri normal betona göre daha iyi olan betonların üretilmesinin mümkün olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, U., 1987, Betonarme, Temel İnkeler ve Taşıma Gücü Hesabı. Evrim Yayınevi ve Ticaret Ltd. Şti. yayını, İstanbul, (üçüncü baskı), Cilt 1, s 1 – 61.
2. Aslan, A., ve Aydın, A. C., 1999, Lifli betonların genel özellikleri. Hazır Beton Dergisi, Yıl 6, Sayı 36, s 67 – 75.
3. Vondran, G. L., 1992, Applications of steel fiber reinforced concrete. ACI Compilation 27, American Concrete Institute, p 14 – 19.
4. Mobasher, B., 1999, Fiber reinforced cementitious composites. Center for Advanced Cement Based Materials, Northwestern University, p 83.
5. American Concrete Institute, 1982, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544 – 1R, p 22.
6. American Concrete Institute, 1988, Design considerations for steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544 – 4R, ACI Structural Journal, p 18.
7. Morgan, D. R., 1992, Steel fiber reinforced shotcrete for support of underground openings in Canada. ACI Compilation 27, American Concrete Institute, p 20 – 28.
8. American Concrete Institute, 1984, Guide for specifying, mixing, placing and finishing steel fiber reinforced concrete. ACI Committee 544 – 3R, ACI Structural Journal, p 9.
9. Gopalratnam, V. S., and Shah, S. P., 1985, Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. ACI Journal, p 117 – 126.
10. Nataraja, M. C., Dhang, N., Gupta, A. P., 1999, Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. Cement and Concrete Composites, 21, p 383 – 390.
11. Ding, Y., Kusterle, W., 2000, Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age. Cement and Concrete Research, 30, p 1573 – 1579.
12. Gao, J., Sun, W., Morino, K., 1997, Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high strength, lightweight concrete. Cement and Concrete Composites, 19, p 307 – 313
13. Eren, Ö., and Çelik, T., 1997, Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete. Construction and Building Materials, v. 11, p 373 – 382.
14. Yılmaz, K., ve Cavga, Ş., 1999, Agregat granülometrisindeki değişimin çelik tel takviyeli betonların performansı üzerine etkileri. Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, İstanbul.
15. Chenkui, H., and Guofan, Z., 1995, Properties of steel fibre reinforced concrete

containing larger coarse aggregate. Cement and Concrete Composites, 17, p 199 – 206.

16. Toutanji, H., and Bayasi, Z., 1998, Effects of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete. Cement and Concrete Research, v. 28, 1, p 115 – 124.

17. Soroushian, P., and Lee, C. D., 1990, Tensile strength of steel fiber reinforced concrete: correlation with some measures of fiber spacing. ACI Materials Journal, v.87, p 541 – 546.

18. Swamy, R. N., and Jojagha, A. H., 1982, Workability of steel fibre reinforced lightweight aggregate concrete. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 4, 2, p 103 – 109.

24. Wafa, F. F., and Ashour, S. A., 1992, Mechanical properties of high – strength fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, v. 89, 5, p 449 – 455.

25. Balaguru, P., and Dipsia, M. G., 1993, Properties of fiber reinforced high – strength semilightweight concrete. ACI Materials Journal, v. 90, 5, p 399 – 405.

26. Torrenti, J. M., and Djebri, B., 1995, Behaviour of steel fibre-reinforced concretes under biaxial compression loads. Cement and Concrete Composites, 17, p 261 – 266.

27. Balaguru, P., and Foden, A., 1996, Properties of fiber reinforced structural lightweight concrete. ACI Structural Journal, v. 93, 1, p 62 – 78.

28. Boratav, S. S., ve Yeğınobalı, A., 1997, Lif takviyeli yüksek dayanımlı hafif beton. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, III. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, O.D.T.Ü., Ankara, 255 – 266.

29. Çelik, T., ve Eren, Ö., 1997, Çengelli çelik liflerin yüksek mukavemetli betona etkisi. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, III. Teknik

19. Sharma, A. K., 1985, Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. ACI Journal, p 624 – 628.

20. Nanni, A., 1990, Design for torsion using steel fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, v.87, 6, p 556 – 564.

21. Barr, B., and Noor, M. R., 1983, The toughness index of steel fiber reinforced concrete. ACI Journal, p 622 – 629.

22. Taşdemir, M. A., 1999, Çelik tel takviyeli yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışı. Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, İstanbul.

23. Swamy, R. N., and Jojagha, A. H., 1982, Impact resistance of steel fibre reinforced lightweight concrete. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 4, 4, p 209 – 220.

Kongre, Bildiriler Kitabı, O.D.T.Ü., Ankara, 267 – 276.

30. Pigeon, M., and Cantin, R., 1998, Flexural properties of steel fiber-reinforced concretes at low temperatures. Cement and Concrete Composites, 20, p 365 – 375.

31. Sancak, E., ve Ünal, O., 1999, Çelik liflerin hafif betonlarda kullanılması üzerine bir araştırma. Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, İstanbul.

32. Almansa, E. M., Cánovas, M. F., 1999, Behaviour of normal and steel fiber-reinforced concrete under impact of small projectiles. Cement and Concrete Research, 29, p 1807 – 1814.

33. Luo, X., Sun, W., Chan, S. Y. N., 2000, Characteristics of high-performance steel fiber reinforced concrete subject to high velocity impact. Cement and Concrete Research, 30, p 907 – 914.

AVRUPA ÜLKELERİNİN, SIĞ TEMELLERİN TAŞIMA KAPASİTELERİNİ HESAPLAMADA KULLANDIKLARI YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Yazanlar : J.G. Sieffert *

Ch.Bay-Gress **

Çeviren : Arş. Gör. İbrahim ÇOBANOĞLU ***

ÖZET

Zeminlerin taşıma gücü uzun yıllardan beri bir çok araştırmacı tarafından üzerinde önemle durulan bir konu olmuştur. Bunun nedeni, taşıma gücü değerlerinin doğrudan tasarım hesaplarında kullanılıyor olmasıdır. Terzaghi tarafından ortaya konulan ve taşıma gücü konusunda atılmış ilk ve en önemli adım olan temel taşıma gücü bağıntısı daha sonraları farklı araştırmacılar tarafından da değişik biçimlerde kullanılır olmuştur. Günümüz modern zemin mekaniğinde ise mevcut gelişmelerden dolayı klasik zemin mekaniği bağıntılarının kullanımı azalmıştır. Farklı tasarımcı ve uygulamacılar tarafından değişik biçimlerde hesaplanan taşıma gücü değerleri gerçekte birbirlerinden oldukça farklı sayısal değerler ortaya koymaktadır. Bu durum değişik ülkeler tarafından yapılan uygulamalarda da karşımıza çıkmaktadır.

Bu makale, farklı Avrupa ülkelerinin taşıma gücünü hesaplamada kullandıkları yöntemleri karşılaştırmalı bir şekilde ele almış olmasından dolayı önem arz etmektedir. Yaşadığımız son depremlerden sonra konunun güncel olarak ülkemiz için de önemli olduğu yadsınamaz bir gerçektir.

Bu makalenin amacı, Avrupa ülkelerinin sığ temellerin taşıma kapasitelerinin hesaplanmasında kullandıkları yöntemlerin karşılaştırmasını yapmaktır. Taşıma kapasitesi faktörleriyle birlikte derinlik ve şekil faktörleri, yük eğim ve eksantrisite faktörleri de karşılaştırılmıştır. Bu çalışma N_c , N_q , N_γ taşıma kapasitesi faktörleri ile sınırlandırılmıştır. Farklı metotlar kullanılmakla birlikte ancak sınırlı

sayıda olanları Avrupa ülkeleri tarafından kullanım bulmaktadır (örneğin presiyometrik yöntem Fransa'da oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir).

Sonuçta, elde edilen taşıma kapasitesi değerlerinin büyük ölçüde ülkeye bağlı olduğu görülmektedir. Bu yüzden, taşıma kapasitesi değerinin hesabı yeni parametrik ve sayısal analizlere ihtiyaç duymaktadır.

(*): Professor, Laboratory of Study and Research in Civil Engineering, Strasbourg.

(**): Assistant, Laboratory of Study and Research in Civil Engineering, Strasbourg.

(***): Jeo.Yük. Müh., Çukurova Üniversitesi Müh-Mim Fak. Jeoloji Müh. Bölümü, Adana.

Bu makale, Proc. Instn Civ.Engrs Geotech. Engng, Nisan 2000, 143. (p. 65-74) sayısından alınarak çevrilmiştir.

Notasyonlar :

A : temel yüzey alanı (m^2)	q' : birim alana gelen ek yük (kN)
a : temel in adhezyonu (kPa)	q_u : nihai taşıma kapasitesi (kN)
B : temel genişliği (m)	s_c, s_q, s_γ : şekil faktörleri
B' : indirgenmiş temel genişliği (m)	V_u : nihai düşey yük (kN)
c : zeminin kohezyonu (kPa)	w : temel in düşey yer değıştirmesi
c_u : zeminin drenajsız kohezyonu (kPa)	γ : birim hacim ağırlığı (kN/m^3)
e : yük eksantrisitesi (m)	δ : yük eğimi (derece)
i_c, i_q, i_γ : yük eğim faktörleri	θ : zemin ile temel arasındaki adhezyonu kapsayan yük eğimi
L : temel uzunluğu (m)	ϕ : içsel sürtünme açısı
N_c, N_q, N_γ : taşıma kapasitesi faktörleri	

1. GİRİŞ

Bu çalışma Avrupa Faaliyeti COST C7 üyelerinin katkıları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada atıfta bulunulmayan ülkelerden, mümkün olmamıştır. Belçika'dan alınan bilgiler

kullanılan standartlara ilişkin bilgi alınması ise bu çalışmadaki analizlerde kolay bir şekilde değerlendirilecek olmadığından alınmamıştır. Sonuçta, bu çalışmada 17 ülke ile ilgili bilgilere sahip olunmuştur. Ancak bunlardan bazılarının

Tablo 1 : Standart, yönetmelik ve uygulamalar

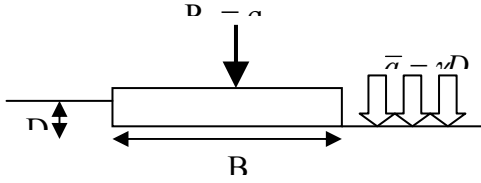
Ülkeler	Standart, yönetmelik veya uygulama
Avusturya	ÖNORM B 4432
Çekoslovakya (CZ)	Çekoslovakya Standardı 731001
Almanya (D)	DIN V 4017-100 ²
Fransa (F)	DTU 13.12 ³
Finlandiya (FIN)	Tasarım Uygulaması
Yunanistan (G)	Alman standardı veya US yönetmeliği
İrlanda (IRL)	UK tasarımı ⁴
Norveç (N)	Danimarkalı Brinch Hansen değerleri veya Janbu'nun uygulaması (Norveç için burada sadece Hansen'in metodu ele alınacaktır).
Portekiz (P)	Terzaghi, Meyerhof, Hansen veya Vesic'in tasarımı değerleri
İngiltere (UK)	BS 8004 (temeller için standart)
İsveç (S)	Uygulama Tasarımı
Slovenya (SLO)	Sırbistan yönetmeliği, UL SFRJ 15/90 ⁵

farklı yönetmelik ve standartlar kullanmalarından dolayı sadece 12 ülke bu karşılaştırma çalışmasında doğrudan kullanılmıştır. Tablo 1, bu ülkelerin kullandıkları

standart ya da yönetmelikleri göstermektedir. Bu listeden sadece 4 ülke standart kullanmakta, 2 ülke ise değişik yönetmelikler uygulamaktadır.

2. GENEL BAKIŞ

Temel bağıntılar, simetri düzleminde düşey yüklü şerit şekilli bir temel için geliştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1: Şerit şekilli temel

Bu bağıntılardan ilki Terzaghi⁶ tarafından verilmiştir :

$$q_u = 0.5 * B * \gamma * N_\gamma + q' * N_q + c * N_c \quad (1)$$

Üç ülke Eşitlik (1)'i farklı bir şekliyle kullanmaktadır. *Almanya ve Avusturya* 0.5

atsayısını N_b değeri içinde olacak şekilde şu bağıntıyla birleştirmişlerdir :

$$q_u = B * \gamma * N_b + q' * N_q + c * N_c \quad (2)$$

Slovenya sadece iki taşıma kapasitesi faktörü değerini kullanmaktadır :

$$q_u = 0.5 * B * \gamma * N_\gamma + q' + (c + q' * \tan \phi) * N_c \quad (3)$$

Temel şekli ve yük gibi unsurların değiştiği karmaşık durumlar için (örneğin temelin dikdörtgen olması, yük eksantritesinin bulunması vb.) her taşıma kapasitesi faktörü düzeltme faktörüyle çarpılarak kullanılır. Bunlar;

dikdörtgen temel için biçim (şekil) faktörü, eksantrik yük için eksantrite düzeltme faktörü, eğimli yük için eğim faktörü

3. TAŞIMA KAPASİTESİ FAKTÖRLERİ

Bu bölümde sadece merkezden düşey olarak etkiyen şerit şekilli temeller ele alınacaktır.

3.1. Klasik Formüller

En sık kullanılan bağıntılar Bowles⁷ tarafından Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2 : Taşıma kapasitesi faktörlerine ait klasik bağıntılar

Araştırmacı	N_γ	N_c	N_q
Terzaghi ⁶	$\frac{\tan \phi}{2} \left(\frac{K_{p\gamma}}{\cos^2 \phi} - 1 \right)$ $K_{p\gamma}$ tablolarla verilmektedir	$(N_q - 1) * \cot \phi$	$\frac{a^2}{2 \cos^2 \left[\left(\frac{\pi}{4} \right) + \left(\frac{\phi}{2} \right) \right]}$ $a = \exp \left[\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \tan \phi \right]$
Meyerhof ⁸	$(N_q - 1) * \tan(1.4\phi)$	$(N_q - 1) * \cot \phi$	$\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) * \exp(\pi * \tan \phi)$
Hansen ⁹	$1.5 * (N_q - 1) * \tan \phi$	$(N_q - 1) * \cot \phi$	$\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) * \exp(\pi * \tan \phi)$
Vesic ^{10,11}	$2(N_q + 1) * \tan \phi$	$(N_q - 1) * \cot \phi$	$\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) * \exp(\pi * \tan \phi)$
Eurocode 7 ¹²	$2(N_q - 1) * \tan \phi$	$(N_q - 1) * \cot \phi$	$\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) * \exp(\pi * \tan \phi)$

3.2. Her Ülke Tarafından Kullanılan Metotlar

Tablo 3, farklı ülkeler tarafından kullanılan taşıma kapasitesi değerlerini göstermektedir.

Bunların bir kısmı taşıma kapasitesi bağıntılarını kullanırlarken bir kısmı da değişik tablo ve abaklar kullanılmaktadır.

Tablo 3: Taşıma kapasitesi faktörlerinin bulunmasında kullanılan metotlar.

Ülkeler	N_q	N_c	N_γ	Formül	Eğriler	Tablolar
Avusturya (A)	Spesifik	Spesifik	Spesifik	Yok	Var	Var
Çekoslovakya (CZ)	Meyerhof	Meyerhof	Hansen	Var	Var	Yok
Almanya (D)	Meyerhof	Meyerhof	E7	Var	Var	Var
Fransa (F)	Meyerhof	Meyerhof	Giroud ¹³	Yok	Yok	Var
Finlandiya (FIN)	Meyerhof	Meyerhof	Hansen	Var	-	-
İrlanda (IRL)	Meyerhof	Meyerhof	Hansen	Yok	Var	Yok
Norveç (N)	Meyerhof	Meyerhof	Hansen	Yok	Yok	Yok
Portekiz (P)	Terzaghi Meyerhof	Terzaghi Meyerhof	Terzaghi Meyerhof Hansen Vesic	Var	Var	Var
İsveç (S)	Meyerhof	Meyerhof	Spesifik	Var	Yok	Yok
Slovenya (SLO)	Meyerhof	Meyerhof	E7	Yok	$N_c - N_\gamma$	Yok
Eurocode 7	Meyerhof	Meyerhof	Spesifik	Var	Yok	Yok

3.3. Özel Bağıntılar

Birkaç ülke hesaplama için özel değerler kullanılmaktadır. *Almanya* ve *Avusturya* 0.5 katsayısını N_b değeri içinde ele almakta ve yukarıdaki özel bağıntıyı kullanılmaktadır.

Her iki ülke için ;

$$N_\gamma = 2 \cdot N_b \quad (4)$$

Almanya aşağıdaki N_b değerini kullanılmaktadır

$$N_b = (N_q - 1) \cdot \tan \phi \quad (5)$$

Avusturya N_b değeri için çeşitli tablo ve eğriler kullanılmaktadır.

Fransa, Giroud tarafından tablo halinde verilen N_γ değerlerini kullanılmaktadır.

İsveç tarafından kullanılan formül ise Hansen'in bağıntılarına benzemektedir

$$N_\gamma = F(\phi) \left[\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \exp(5 \cdot \pi \cdot \tan \phi) - 1 \right] \quad (6)$$

Bu bağıntıda,

$$F(\phi) = 0.08705 + 0.3231 \cdot \sin 2\phi - 0.04836 \sin^2 2\phi$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi *Slovenya* sadece iki taşıma kapasitesi faktörü kullanılmaktadır. Klasik formdaki (3) bağıntısı değiştirilerek şu bağıntı elde edilmektedir :

$$N_q = 1 + N_c \cdot \tan \phi \quad (7)$$

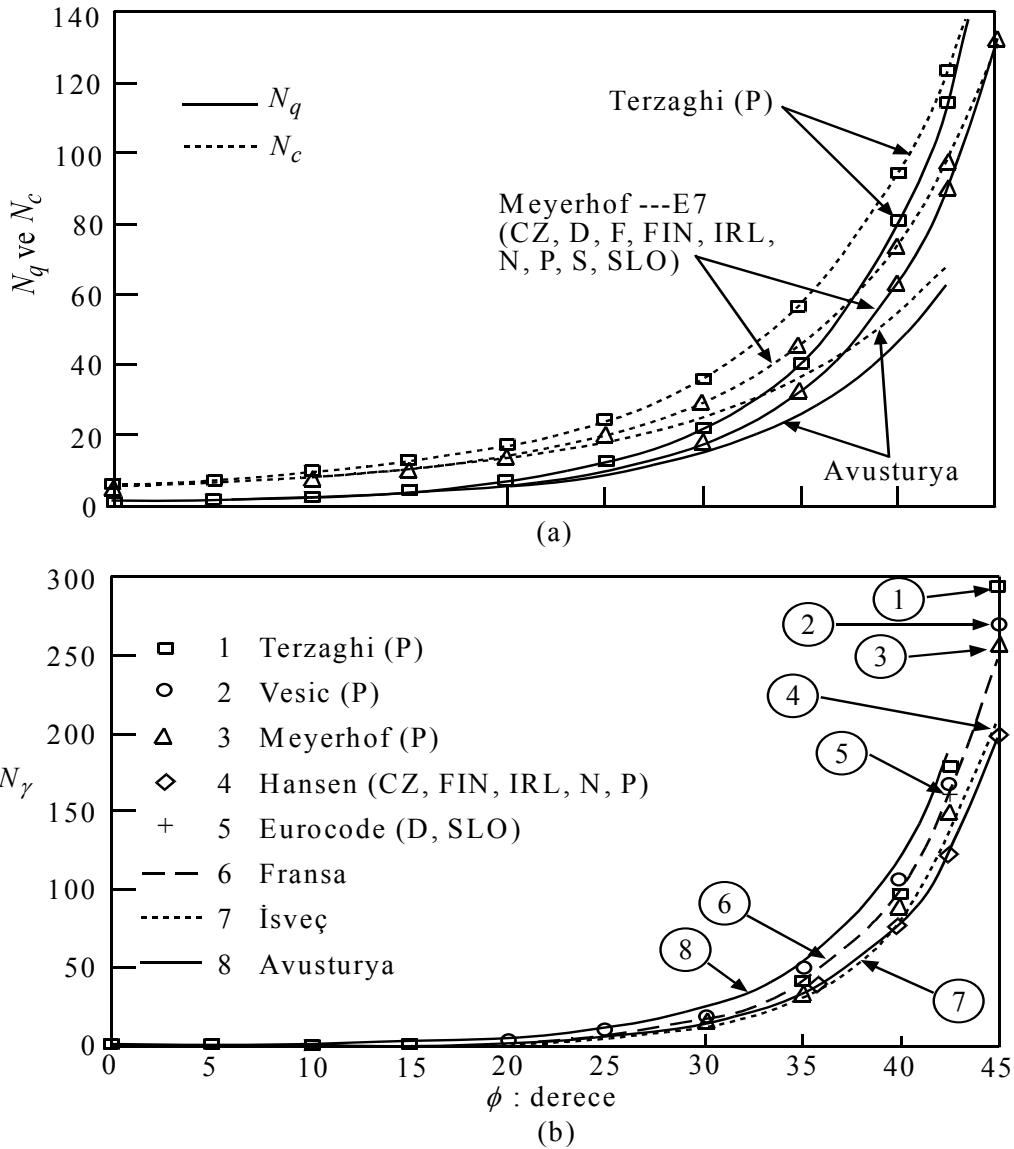
veya aynı şekilde,

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi \quad (\text{bu bağıntı da zaten Terzaghi bağıntısının aynısıdır}) \quad (8)$$

3.4. Sonuçların Karşılaştırılması

N_q ve N_c değerleri Şekil 2 (a)'da gösterilmiştir. Burada şu belirtilmelidir ki, Avusturya'nın kullandığı taşıma kapasitesi faktörleri diğer ülkelerin kullandıklarından daha düşük olmaktadır. Daha yüksek değerler ise Terzaghi tarafından verilmektedir.

N_γ değerleri Şekil 2 (b)'de gösterilmiştir. Bu Şekilde Eurocode tarafından kullanılan değerlerin Fransa'nın değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Eurocode tarafından elde edilen değerler, Hansen'in değerleri ile Avusturya'nın değerleri arasında yer almaktadır. Bu değerlerin yüksek sayılabilecek sayısal değerler oldukları dikkati çekmektedir.

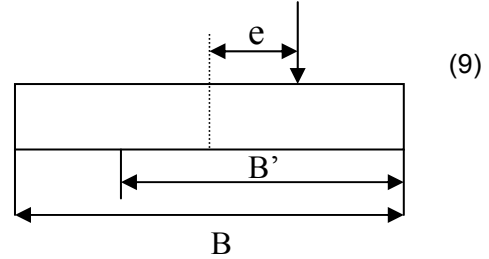


Şekil 2: ϕ değerine bağlı olarak belirlenmiş taşıma kapasitesi faktörleri (a): N_q ve N_c (b): N_γ

3.5. Eksantrisite Düzeltmesi

Bütün ülkeler Meyerhof tarafından önerilen metodu kullanmaktadırlar. Bu metotta, temel genişliği yerine B' efektif temel genişliği eksantrisite mesafesine göre ele alınmakta (Şekil 3) ve aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir. Bağıntıda e , yükün uygulandığı noktanın simetri merkezine olan uzaklığıdır. Dikdörtgen bir temel için genişlik ve uzunluk doğrultuları üzerinde çift eksantrisitenin olması durumunda Eşitlik (9) kullanılarak her doğrultuda ayrı ayrı olmak üzere çift düzeltme yapılır.

$$B' = B - 2e$$



Şekil 3: Efektif genişlik

4. BİÇİM FAKTÖRLERİ

Yukarıda bahsedilen taşıma kapasitesi faktörleri şerit şekilli temeller içindir. Sonsuz bir uzunluğa sahip olmayan dikdörtgen şekilli temeller dikkate alındığında her taşıma kapasitesi faktörü için s_f biçim faktörü tariflenmektedir :

$$q_u = 0.5 * B * \gamma * N_\gamma * s_\gamma + \bar{q} * N_q * s_q + c * N_c * s_c \quad (10)$$

Temelin B genişliğinde, L uzunluğunda ve $B \leq L$ olduğu varsayılır. Yazarlarca bahsedilen biçim faktörleri Tablo 4'de gösterilmiştir. Terzaghi'nin değerleri kare şekilli

temeller için geçerlidir, ancak B/L 'nin fonksiyonu olarak genişletilebilirler.

Bu tablodan Meyerhof dışında tüm araştırmacılar için $s_\gamma \leq 1$ olduğu görülmektedir. Eğer Tablo 4'deki formüle N_q ve N_c değerleriyle verilen Eşitlik (7) ve Vesic'in s_q faktörü eklenirse şu bağıntı elde edilecektir ;

$$s_c = 1 + \frac{N_q B}{N_c L} = 1 + \frac{N_q (s_q - 1)}{N_q - 1} = \frac{N_q s_q - 1}{N_q - 1} \quad (11)$$

Tablo 4 : Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen biçim faktörleri.

Yazarlar	s_q	s_c	s_γ
Terzaghi (kare)	1	1.2	0.8
Meyerhof $K_p = \tan^2 \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right]$	$1 + 0.1 * K_p \frac{B}{L} \quad (\phi > 10)$ $1 \quad (\phi = 0)$	$1 + 0.2 * K_p \frac{B}{L}$	$1 + 0.1 * K_p \frac{B}{L} \quad (\phi > 10)$ $1 \quad (\phi = 0)$
Hansen	$1 + \frac{B}{L} * \sin \phi$	$1 + \frac{N_q B}{N_c L} \quad (\phi \neq 0)$ $1 + 0.2 \frac{B}{L} \quad (\phi = 0)$	$1 - 0.4 \frac{B}{L} \geq 0.6$
Vesic	$1 + \frac{B}{L} * \tan \phi$	$1 + \frac{N_q B}{N_c L}$	$1 - 0.4 \frac{B}{L} \geq 0.6$

4.1. Ülkelere Göre Biçim Faktörleri

Tablo 5, farklı ülkelerin kullandığı biçim faktörleri değerlerini göstermektedir. Tablo 4 ve Tablo 5'in karşılaştırması Tablo 4'deki araştırmacıların bağıntılarının bu ülkeler tarafından etkili şekilde kullanıldığını göstermektedir.

Sadece s_c biçim faktörü içsel sürtünmesiz olacak şekilde bütün ülkelere kullanılmaktadır. Bazı ülkeler için diğer faktörler sadece temel boyutuna, bir kısım ülkeler içinse hem temel boyutuna ve hem de içsel sürtünme açısına bağlı olmaktadır.

Slovenya Eşitlik (3)'e bağlı bir başka özel taşıma kapasitesi eşitliği (Eşitlik 12)

kullanmaktadır. Bu bağıntıda da sadece 2 taşıma kapasitesi değeri (S_c ve S_γ) görülmektedir ;

$$q_u = 0.5 * B * \gamma * N_\gamma * S_\gamma + \bar{q} + (c + \bar{q} * \tan \phi) * N_c * S_c \quad (12)$$

Bu eşitliğin (11) bağıntısıyla karşılaştırılmasından ve (7) eşitliğinin eklenmesiyle şu elde edilir;

$$s_\gamma = S_\gamma \quad (13)$$

$$s_q = \frac{1 + s_c * N_c * \tan \phi}{1 + N_c * \tan \phi}$$

$$s_c = S_c$$

Tablo 5: Ülkelere göre biçim faktörleri.

Ülkeler	s_q	$s_c (\phi \neq 0)$	$s_\gamma (\phi = 0)$	s_γ
Avusturya (A)	$1 + \frac{B}{L} * \sin \phi$	$\frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.3 * \frac{B}{L}$
Çekoslovakya (CZ)	$1 + \frac{B}{L} * \sin \phi$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.3 * \frac{B}{L}$
Almanya (D)	$1 + \frac{B}{L} * \sin \phi$	$\frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.3 * \frac{B}{L}$
Fransa (F)	1	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.2 * \frac{B}{L}$
Finlandiya (FIN)	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.4 * \frac{B}{L}$
İrlanda (IRL)	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.4 * \frac{B}{L}$
Norveç (N)	$1 + \frac{B}{L} * \sin \phi$	$1 + \frac{N_q * B}{N_c * L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.4 * \frac{B}{L}$
İsveç (S)	$1 + \frac{B}{L} * \tan \phi$	$1 + \frac{N_q * B}{N_c * L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.4 * \frac{B}{L}$
Slovenya (SLO)	$\frac{1 + s_c N_c * \tan \phi}{1 + N_c * \tan \phi}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.4 * \frac{B}{L}$
Eurocode 7	$1 + \frac{B}{L} * \sin \phi$	$\frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1}$	$1 + 0.2 * \frac{B}{L}$	$1 - 0.3 * \frac{B}{L}$

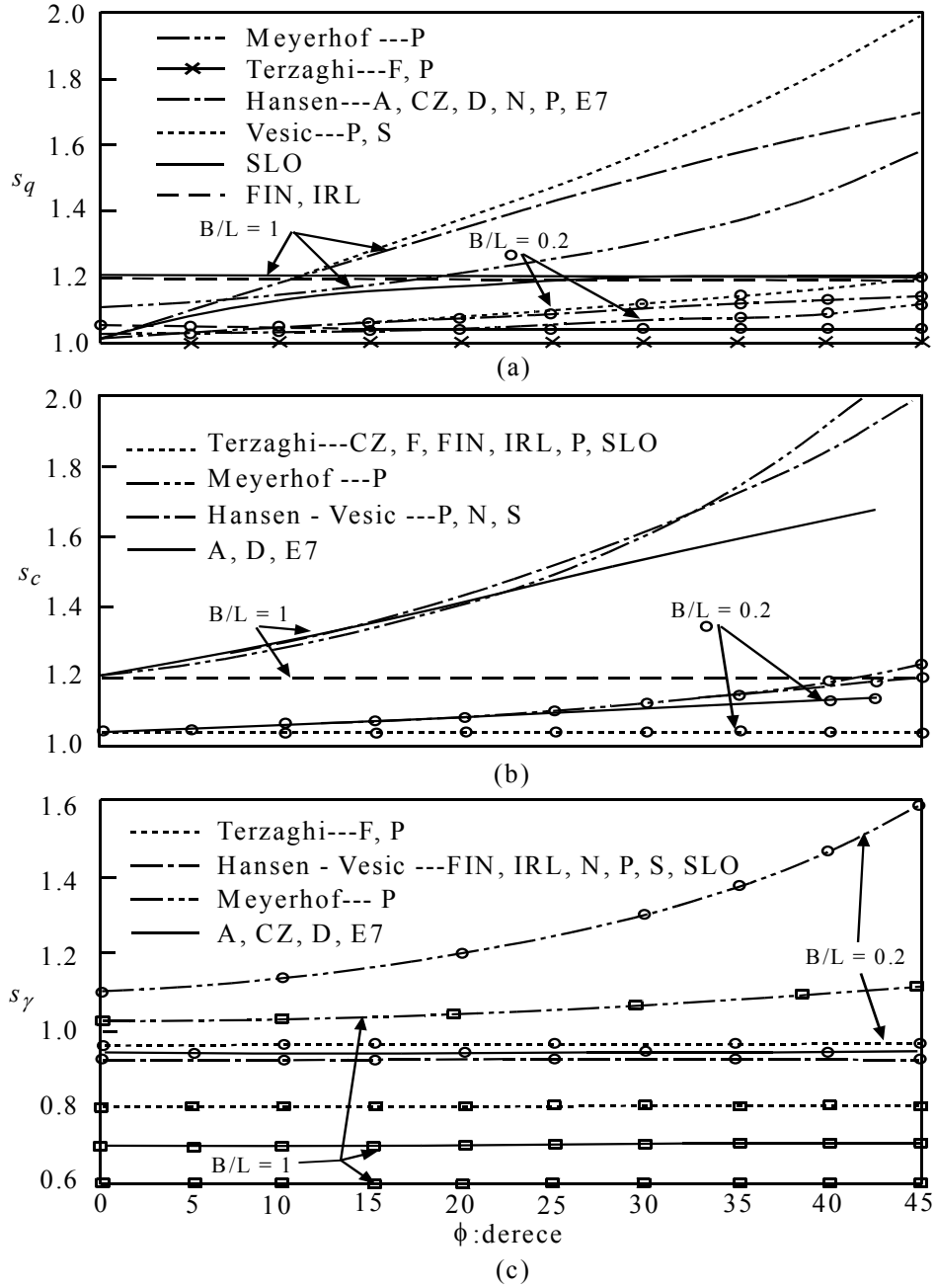
Sayısal sonuçlar Şekil 4'de görülmektedir. Bu şekil sonuçlarının bir ülkeden diğerine oldukça büyük farklılıklar gösterdiğini ortaya

koymaktadır. Almanya ve Avusturya s_c biçim faktörü için ($\phi \neq 0$) aynı formülü kullanılmaktadır, ancak N_q taşıma kapasitesi

değerinde farklılıkları bulunmaktadır. Bununla beraber s_c için elde edilen sayısal değerler her iki ülke için de birbirine yakın kalmaktadır.

farklı metod kullandığını görmekteyiz. Örneğin Çekoslovakya Cumhuriyeti s_q değerini Hansen bağıntısı ile, s_c değerini Terzaghi bağıntısıyla ve s_γ değerini de özel bir bağıntı ile hesaplamaktadır.

Meyerhof'un metodu en az kullanılanıdır. Bir çok ülkenin her faktör için



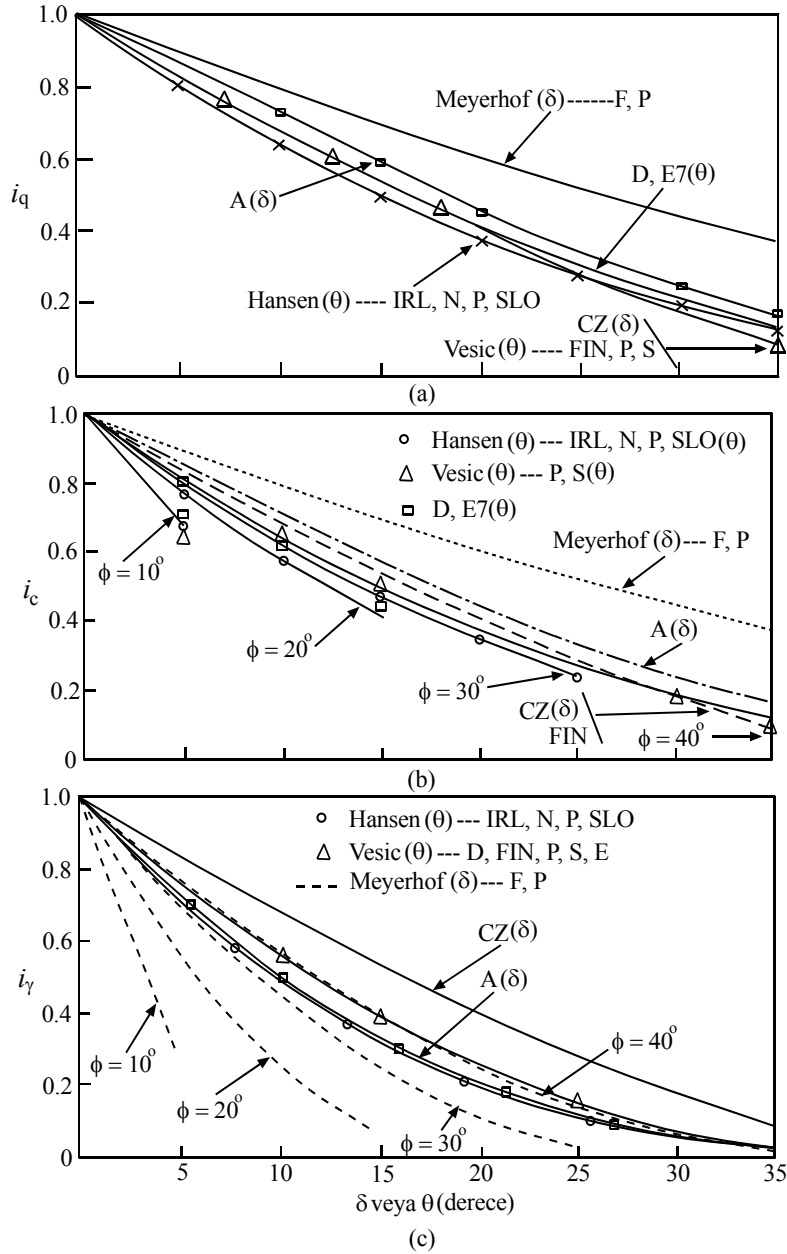
Şekil 4: İçsel sürtünme açısı ve B/L değerine bağlı olarak (a) s_q , (b) s_c , (c) s_γ değerleri

5. EĞİM FAKTÖRLERİ

Yukarıda bahsedilen taşıma kapasitesi faktörleri düşey yük durumu için geçerli olmaktadır. Yükün eğimli olması durumunda

i_i eğim faktörü (Şekil 5) her taşıma kapasite faktörüne yansıtılır ;

$$q_u = 0.5 * B * \gamma * N_\gamma * i_\gamma + \bar{q} * N_q * i_q + c * N_c * i_c \quad (14)$$



Şekil 5: δ , θ ve ϕ değerlerine karşı eğim faktörleri : (a) i_q , (b) i_c , (c) i_γ

5.1. Parametreler

Eğimli yükü karakterize eden iki parametre vardır. Bunlar, yükün V düşey bileşeni ve H yatay bileşenidir (Şekil 6). Bu bakımdan eğim, δ açısı parametresi kullanılarak şu şekilde ifade edilebilir ;

$$\tan \delta = \frac{H}{V} \quad (15)$$

Bu konudaki diğer bir husus ise temel ile zemin arasındaki a adhezyon kuvvetidir. Bu yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlı olmaktadır. Sonuç olarak ilk formda yazılan formül θ açısı ile tariflenecek şekilde şu biçimde ifade edilir ;

$$\tan \theta = \frac{H}{V + A * a * \cot \phi} \quad (16)$$

Bu bağında;

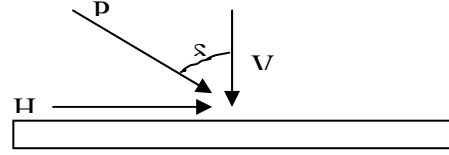
A , temel – zemin temas yüzeyinin efektif alanıdır.

δ ve θ değerleri kohezyonsuz zeminler ($c = 0$) veya tamamen pürüzsüz temeller için birbirlerine eşittirler. Ancak bahsedilen pürüzsüz temel yüzeyi durumu pratikteki uygulamalar için pek de gerçekçi olmamaktadır. Klasik formüller Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Eğim faktörleri için klasik formülasyonlar.

Yazar	i_q	$i_c (\phi \neq 0)$	$i_c (\phi = 0)$	i_γ	Yorumlar
Meyerhof	$\left(1 - \frac{2\delta}{\pi}\right)^2$	$\left(1 - \frac{2\delta}{\pi}\right)^2$	$\left(1 - \frac{2\delta}{\pi}\right)^2$	$\left(1 - \frac{\delta}{\phi}\right)^2$	-
Hansen	$(1 - 0.5 \tan \theta)^{\alpha_1}$	$\frac{i_q N_g - 1}{N_q - 1}$	$0.5 - \sqrt{\left(1 - \frac{H}{Aa}\right)}$	$(1 - 0.7 \tan \theta)^{\alpha_2}$	$2 \leq \alpha_1 \leq 5$ $2 \leq \alpha_2 \leq 5$
Vesic	$(1 - \tan \theta)^m$	$\frac{i_q N_g - 1}{N_q - 1}$	$1 - \frac{mH}{AaN_c}$	$(1 - \tan \theta)^{m+1}$	$m = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$
Eurocode 7	$1 - \frac{H}{V + Ac' \cot \phi'}$	$\frac{i_q N_g - 1}{N_q - 1}$	$0.5 \left[1 + \sqrt{\left(1 - \frac{H}{Ac'_u}\right)} \right]$	$1 - \frac{H}{V - Ac' \cot \phi'}$	-

adhezyon, zeminin kohezyonundan daha küçük veya ona eşit olur. Bu değer temel



Şekil 6: Eğimli yük durumu

Eurocode, a adhezyonunun zeminin içsel sürtünme açısına eşit olduğunu kabul etmektedir.

Vesic'in, temel şeklini de eğim faktörleri içine kattığı görülmektedir.

Hansen bu faktörlerle ilgili tablo ve eğriler yayınlamıştır. Ancak bu eğrilere tekabül eden α_1 ve α_2 değerlerini belirtmemiştir. Hansen'in eğrilerinin analizinden α_1 ve α_2 ile belirtilmiş olan iki değer çıkarılmıştır. Bu değerler ;

$$\alpha_1 \approx 4.8 \quad (17 a)$$

$$\alpha_2 \approx 5.5 \quad (17 b)$$

Bahsedilen bu değerler daha sonra kullanılacaktır. Ayrıca bu değerlerden ikincisi zaten Hansen tarafından oran dışı bırakılmıştır.

5.2. Formülasyonlar

Tablo 7, farklı ülkeler tarafından kullanılan bağıntıları göstermektedir. Bazı ülkeler doğrudan Meyerhof, Hansen veya Vesic'in bağıntılarını kullanırlarken bazıları da ifadelere farklı katsayılar veya bileşenler eklemektedirler.

Avusturya tarafından verilen sonuçlarda bu değerler taşıma kapasitesi faktörlerinde doğrudan yer almaktadırlar.

Bağıntının (10) eşitliğiyle karşılaştırılması ve (7) eşitliğinin eklenmesiyle şu eşitlikler elde edilmektedir;

$$i_\gamma = I_\gamma \quad (19 a)$$

Ancak bunlar eğim olmadan kullanılan değerler vasıtasıyla da bulunabilirler.

Slovenya Eşitlik (3)'e uygun özel bir bağıntı önermektedir ve yine 2 faktörü (I_c ve I_γ) kullanmaktadır:

$$q_u = 0.5 * B * \gamma * N_\gamma * i_\gamma + \bar{q} + (c + \bar{q} \tan \phi) * N_c * I_c \quad (18)$$

$$i_q = \frac{1 + (N_q - 1) * i_c}{N_q} \quad (19 b)$$

$$i_c = I_c = \frac{N_q i_q - 1}{N_q - 1} \quad (19 c)$$

5.3. Sonuçların Karşılaştırılması:

Karşılaştırmaları δ değeri kullanılan ve θ değeri kullanılan metotlara ayırarak yapabiliriz. Bunların ikisini genel durum içinde karşılaştırmak anlamlı olmaz. Ancak sonuçların sunumunu basitleştirmek için Şekil 5'de

görülen eğriler her iki yöntemden (Vesic analizi sadece şerit şekilli temeller için geçerli olmaktadır) elde edilen değerleri göstermektedir.

Tablo 7 : Eğim faktörleri için klasik bağıntılar.

Ülkeler	i_q	$i_c(\phi \neq 0)$	$i_c(\phi = 0)$	i_γ
Avusturya (δ)	N. içinde birleştirilmiştir	N. içinde birleştirilmiştir	N. içinde birleştirilmiştir	N. içinde birleştirilmiştir
Çekoslovakya (δ)	$(1 - \tan \delta)^2$	$(1 - \tan \delta)^2$	$(1 - \tan \delta)^2$	$(1 - \tan \delta)^2$
Almanya (θ)	$(1 - 0.7 \tan \theta)^3$	Hansen & Vesic	$0.5 + 0.5 \sqrt{\left(1 - \frac{H}{Aa}\right)}$	Vesic m=2
Fransa (δ)	Meyerhof	Meyerhof	Meyerhof	Meyerhof
Finlandiya (θ)	Vesic m=2	$(1 - \tan \theta)^2$	Vesic m=2	Vesic m=2
İrlanda (θ)	Hansen	Hansen	Hansen	Hansen
Norveç (θ)	Hansen	Hansen	Hansen	Hansen
İsveç (θ)	Vesic	Vesic	Vesic	Vesic
Slovenya (θ)	-	Hansen	Hansen	Hansen
Eurocode 7 (θ)	$(1 - 0.7 \tan \theta)^3$	Hansen	$0.5 + 0.5 \sqrt{\left(1 - \frac{H}{Aa}\right)}$	$(1 - \tan \theta)^3$

5.3.1. δ Metodu Kullanılarak Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Avusturya'nın kullandığı 3 faktöre göre elde edilen hesaplama sonuçları ϕ değerine bağlı olmamaktadır. Bu durumda bu faktörler zeminin içsel sürtünmesine bağlı değil gibi görünmektedirler.

i_q ve i_c değerleri için Avusturya ile Çekoslovakya Cumhuriyetinin elde ettiği

sonuçlar arasındaki farklar çok önemli olmamaktadır. Genel olarak Meyerhof tarafından verilen ve Fransa tarafından kullanılan sonuçlar i_γ ve $\phi = 40^\circ$ değerleri hariç olmak üzere Avusturya ve Çekoslovakya Cumhuriyetinin elde ettiği değerlerden oldukça farklı olmaktadır.

5.3.2. θ Metodu Kullanılarak Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Adı geçen ülkelerin elde ettiği değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Aynı zamanda θ değerini kullanan metotlar arasındaki farklılıkların δ

değerinin kullanan metotlardan elde edilenlerden daha sınırlı oldukları görülmektedir.

5.3.3. Genel Karşılaştırma

Tüm yazarlar ve ülkeler için, i_q , ϕ değerine bağlı olmamaktadır. Aynı zamanda Hansen, Vesic ve Eurocode 7, i_c 'nin ϕ açısına bağlı olduğunu, Meyerhof ise ϕ açısına bağlı olmadığını savunmaktadır. Bunun tersine, Meyerhof hariç tüm araştırmacılar ve ülkeler için i_γ değeri ϕ açısına bağlı olmamaktadır. Kohezyonsuz zeminler için bazı özel durumlarda δ ve θ değerleri birbirlerine eşit

olmaktadır. Karşılaştırma i_q ve i_γ değerlerince sınırlanmaktadır. Çünkü i_c faktörü kohezyonsuz zeminle doğrudan ilgili değildir. i_q ile ilgili olarak da, Meyerhof'un benzeri bir bağıntı kullanan Fransa hariç diğer tüm ülkelerce aynı sonuçlar elde edilmektedir. i_γ değerini ele alındığında, Çekoslovakya Cumhuriyeti dışındaki tüm ülkelerce benzer sonuçlar (Fransa'nın $\phi = 40^\circ$ değeri hariç) elde edildiği görülür. Çekoslovakya Cumhuriyeti diğer ülkelerden daha büyük katsayılar kullanmaktadır.

6. ÖRNEKLER

Tüm bu metotlarla elde edilen değerler arasındaki farklılığı açıklamak için düzeltme

faktörleri ve taşıma kapasitesi faktörlerinin kullanıldığı 2 örnek üzerinde tartışılacak

Örnek 1:

İlk örnek, taşıma kapasitesi testleri Bochum Üniversitesi'nde yapılan sıg birtemele

aıttır. Prototipteki temele ait özellikler Tablo 8'de görülmektedir.

Tablo 8: Zemin ve temel karakteristikleri

Zemin	ϕ (derece)	c (kPa)	γ (kN/m ³)	Temel	B (m)	D/B
Kuru kum	35	0	17	Kare	1	0

Sayısal Taşıma Kapasitesi: Taşıma kapasitesi faktörlerinden önemli olanlar

Tablo 9'da görülmektedir. Bu örnek sonuçlar arasındaki büyük farklılığı da sergilemektedir.

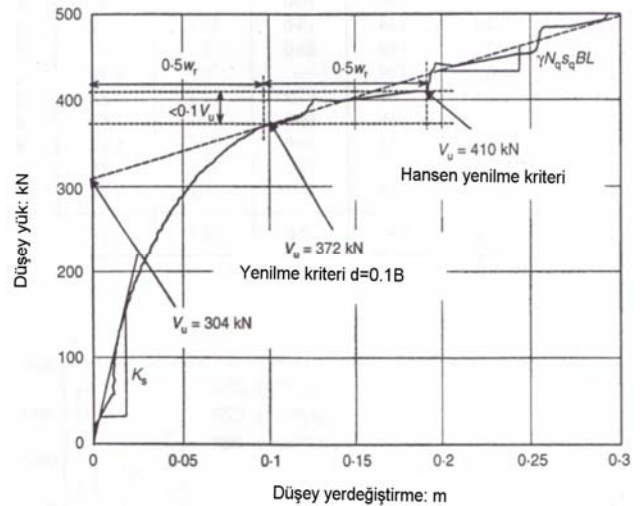
Tablo 9: Faktörler ve taşıma kapasiteleri

Yazarlar ve Ülkeler	N_γ	s_γ	V_u (kN)
Terzaghi	42.4	0.8	288
Meyerhof	37.2	1.4	443
Hansen	33.9	0.6	173
Vesic	48.0	0.6	245
İsveç	31.4	0.6	160
Finlandiya	33.9	0.6	173
İrlanda	33.9	0.6	173
Norveç	33.9	0.6	173
Çekoslovakya	33.9	0.7	202
Slovenya	45.2	0.6	245
Almanya	45.2	0.7	269
Fransa	41.1	0.8	279
Avusturya	54.0	0.7	321
Eurocode 7	45.2	0.7	269

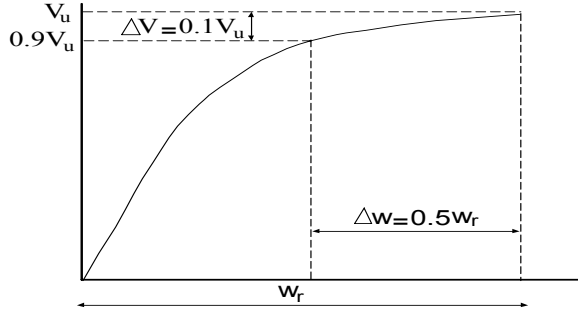
Sadece Meyerhof s_γ biçim faktörünü 1'den büyük olarak düşünmüştür. Böylece onun elde etmiş olduğu sonuç çok özel bir değer olarak alınabilir. Diğer yazar ve ülkelere göre ise taşıma kapasiteleri 160 – 321 kN (oran 1 : 2)

arasında değişmektedir. En küçük değerleri İsveç'in kullandığı görülmektedir. Buna göre bu ülkenin elde ettiği taşıma kapasitesi değeri de oldukça küçük olmaktadır.

Deneysel Taşıma Kapasiteleriyle Karşılaştırma: Deneye ait yük testleri Bochum Üniversitesi santrifüj laboratuvarında yapılmıştır. Yük–yer değiştirme eğrisi Şekil 7'de görülmektedir. Bu eğri üç farklı yenilme kriteri metodu ile analiz edilebilir : (a) yüke bağlı olarak yer değiştirme oranı $d \leq \% 10$, (b) Hansen'in yenilme kriteri kullanılarak elde edilen yük, (c) yük – yer değiştirme eğrisinin son kısmının lineer regresyonu ile elde edilen yük.



Şekil 7: Yük – yer değiştirme eğrisi



Şekil 8 : Hansen'in yenilme kriteri

İlk metotta, $d = w / B$ 'dir. Burada w temelin düşey yer değiştirmesidir. İkinci metotta, yer değiştirmenin yarısı yenilme yüküne çok yakın bir değere (% 10'dan daha az) karşılık gelmektedir (Şekil 8).

Üçüncü metotta, başlangıç değeri ve yük – yer değiştirme eğrisinin son kısmının eğimi elde edilmektedir. Başlangıç değeri deney koşullarının başlangıcındaki nihai yük değeri gibi bulunur.

Tablo 10, bu dört testten elde edilen sonuçları göstermektedir. Her metot için yapılan hata % 6'yı geçmemektedir. Bu durum testlerin güvenilirliğini doğrulamaktadır. Bu örnek aynı zamanda taşıma kapasitesi değerinin kullanılan metoda bağlı olduğunu da kanıtlamaktadır. Her metot için ortalama değer 307 ile 423 kN arasında (oran 1:1.4) değişmektedir.

Tablo 10 : Yenilme kriterleri için birkaç yorumsal metot ve deneysel nihai yük değerleri.

Test	Nihai düşey yük (kN)		
	$d \leq \% 10$ (a)	Hansen yenilme kriteri (b)	Lineer regresyon (c)
2	384	440	302
19	372	410	304
25	384	428	310
31	384	414	314

160 – 423 kN arasında değişen sayısal taşıma kapasitesi değerleri (Meyerhof'un 323 kN olan değeri hariç tutulacak olursa) karşılaştırıldığında, deneysel değerlerin sistematik olarak sayısal değerlerden daha büyük olduğu açık bir şekilde görülür. Üçüncü metodun verdiği değerler, sayısal analiz

değerlerine yakın çıkmaktadır. Çünkü hesaplama üçüncü analizde olduğu gibi sadece başlangıç koşulları dikkate alınarak yapılmıştır. Bu noktadan bakılacak olursa, Avusturya metodu sonuçlarında deneysel değerlere daha yakın değerler elde edilir.

Örnek 2:

İkinci örnek de aynı sığ temele aittir, ancak zemin yüzü sürtünmeli, zemin kohezyonlu ve eğimli bir yükü yüklenmiştir.

Zeminin ve temelin özellikleri Tablo 11'de verilmiştir. Burada $\tan\delta$ ve $\tan\theta$ değerlerinin birbirlerinden önemli derecede farklı olmadıkları varsayılmıştır

Tablo 11: Zemin ve temel özellikleri

Zemin	ϕ (derece)	c (kPa)	γ (kN/m ³)	Temel	B (m)	D / B	Yük eğimi
Doğgun olmayan kum	35	10	19	Kare	1	0.6	$\delta = 10^\circ$

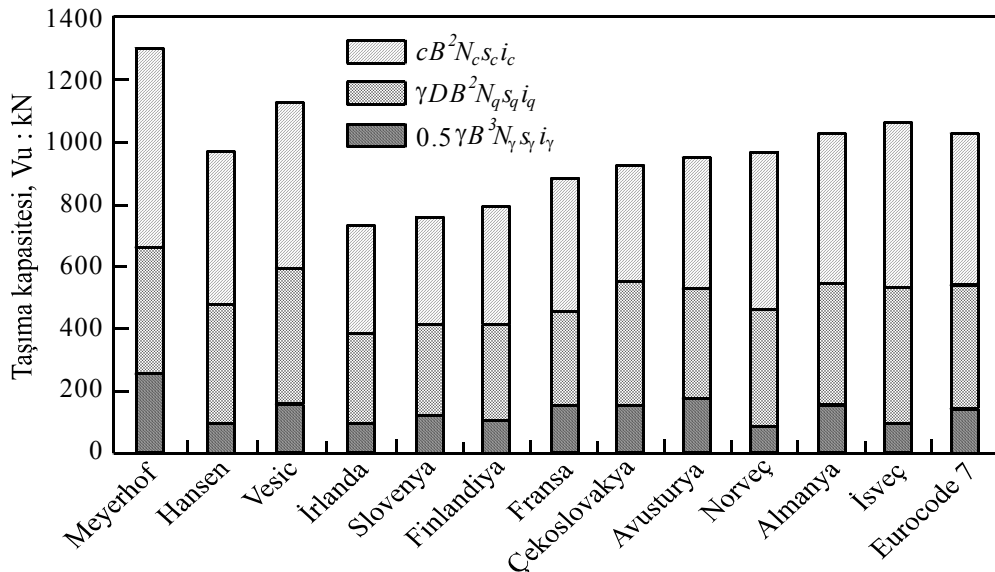
Çok önem taşıyan faktörlerin elde edilen taşıma kapasitesi değerleri de Şekil 9'da gösterilmiştir. Taşıma kapasitesi değerleri de Şekil 9'da görülmektedir.

Tablo 12: Taşıma kapasitesi faktörleri

Yazarlar ve Ülkeler	N_γ	s_γ	i_γ	N_q	s_q	i_q	N_c	s_c	i_c
Meyerhof	37.2	1.1	0.51	33.3	1.37	0.79	46.1	1.74	0.79
Hansen	33.9	0.6	0.48	33.3	1.57	0.64	46.1	1.73	0.63
Vesic	48	0.6	0.56	33.3	1.7	0.68	46.1	1.72	0.67
İrlanda	33.9	0.6	0.48	33.3	1.2	0.64	46.1	1.2	0.63
Slovenya	45.2	0.6	0.48	33.3	1.19	0.64	46.1	1.2	0.63
Finlandiya	33.9	0.6	0.56	33.3	1.2	0.68	46.1	1.2	0.68
Avusturya	27.8	0.7	-	19.5	1.57	-	26.5	1.6	-
Fransa	41.1	0.8	0.51	33.3	1	0.79	46.1	1.2	0.79
Çekoslovakya	33.9	0.7	0.68	33.3	1.57	0.68	46.1	1.2	0.68
Norveç	33.9	0.6	0.48	33.3	1.57	0.64	46.1	1.72	0.63
Almanya	45.2	0.7	0.56	33.3	1.57	0.67	46.1	1.59	0.66
İsveç	31.4	0.6	0.62	33.3	1.7	0.68	46.1	1.72	0.67
Eurocode 7	45.2	0.7	0.56	33.3	1.57	0.67	46.1	1.59	0.66

Bu örnek, sonuçlar arasındaki büyük farklılığı da göstermektedir. Taşıma kapasitesi değerleri 734 – 1297 kN (oran 1 /1.8) arasında değişmektedir. Bunlardan İsveç ve Almanya

(Eurocode 7) çok yüksek nihai taşıma değerleri elde ederlerken İrlanda, Slovenya ve Finlandiya çok düşük değerler elde etmektedirler.



Şekil 9: Taşıma Kapasiteleri

7. SONUÇLAR

En önemli sonuç, incelenen taşıma kapasitesi değerlerinin büyük oranda kullanılan metoda bağlı olduğudur. Kullanılan metot ülkeden ülkeye değişmektedir. Sadece eksantrisite düzeltilmesi tam bir birliktelikle kabul edilmektedir; yine de bu, düzeltmenin tam ve yanlışsız olduğunu göstermez. Daha önceki örnekler ülkeler tarafından elde edilen değerlerin sistematik olarak büyük ya da küçük olmadığını göstermiştir. İsveç, Örnek 1'de görüldüğü gibi düşük (Tablo 8) ve Örnek 2'de ise büyük (Tablo 9) taşıma gücü değerleri elde etmektedir. Aynı şekilde Meyerhof yönteminin her iki örnekte de aşırı yüksek değerler verdiği

görülmektedir. Bu değerlendirmelerden Eurocode 7 ile hesaplanan sonuçların, bu çalışmada kullanılan Avrupa metotlarından elde edilen yüksek ortalama sonuçlar içerisinde yer aldığı sonucuna varabiliriz.

Böylece, taşıma kapasitesi daha iyi anlaşılabilir yeni parametreler ve sayısal analizlere ihtiyaç duymaktadır. Sığ temellerin taşıma kapasitelerinin tariflenmesi ve deneysel veya sayısal olarak analizleri ile ilgili bir diğer bilinmezlik onların yer değiştirmeleri ile ilgili olmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar aşağıda isimleri geçen Avrupa Grubu COST 7 üyelerine ve onların desteklerine teşekkür ederler:

KAYNAKLAR

1. ÖNORM B 4432. Erd-und ; Zulassige Belastungen des Baugrundes. Grundbruchberechnung, 1980.
2. DIN V 4017-100 (Vornorm). Baugrund, Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen, Vol 100: Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, Schlußmanuskript, 1995, NABau-LG FB 05, No. 29-95.
3. DTU 13.12, Regles pour le Calcul des Foundations Superficielles. CSTB Paris, AFNOR DTU P 11-711, 1988, pp. 28-30.
4. Tomlinson M.J. & Boorman R. Foundation Design and Construction. Addison Wesley Longman, Harlow, 1996, pp. 43-46.
5. UL SFRJ 15/90. Regulation of Technical Standards for Foundation of Building Structures. Official Gazette of SFRJ 15/90, Belgrade, 1990, pp. 653-667.
6. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York, 1943.
7. Bowles J.E. Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill, New York, 1996.
8. Meyerhof G.G. Some recent research en the bearing capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, 1963, 1, No.1, 16-26.
9. Hansen J.B.A. Revised and Extended Formula for Bearing Capacity of Foundations. Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, 1970, bulletin No.28.
10. Vesic A. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, 99, No. SMI, 45-73.
11. Vesic A. Foundation Engineering Handbook, 1st edn (Winterkorn H.F. and Fang H.Y. (eds)). Van Nostrand Reinhold, 1975, chapter 3.
12. Eurocode 7. Calcul Geotechnique. AFNOR, XP ENV 1997-1, 1996.
13. Giroud J.P., Tran-Vo-Nhiem and Obin J.P. Mechanique des Sols/Tables pour le Calcul des Foundations, Vol 3, Force Portante. Donud, Paris, 1973.
14. Grande (Norveç), W. Haegeman (Belçika), J. Laue (Almanya), T. Orr ve M. Long (İrlanda), I. Pinto (Portekiz), J. Rantala (Finlandiya), S. Semprich (Avusturya), L. Trauner (Slovenya)
15. A.Avdelas (Yunanistan), A. Axelson (İsveç), S. Borel (Fransa), J.Feda (Çek Cumhuriyeti)

SİLİS DUMANI KULLANIMININ BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Yazanlar: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU (*)
Ali UĞURLU (**)

ÖZET

Betonda, uygun oranda mineral bir katkı maddesi olan silis dumanı (SD) ile birlikte süper akışkanlaştırıcı kullanılması durumunda yüksek performanslı beton elde edilebilir. Bu deneysel çalışmada iki farklı tip çimento ile 0.50 su/bağlayıcı oranında % 1.6 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılarak; 300, 350 ve 400 dozajlı silis dumansız kontrol betonları ve 200, 250, 300, 350 ve 400 dozajlı % 5, 10 ve 15 oranında silis dumanı içeren betonlar üretilmiştir. Üretilen betonlar tazeyken çökme, Ve-Be, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Her iki çimento türünde de taze beton deneyleri % 10 oranında silis dumanı kullanılmasının en iyi işlenebilirliği verdiğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Yüksek Performanslı Beton, Silis Dumanı, İşlenebilirlik.

INFLUENCE OF SILICA FUME ON THE WORKABILITY OF CONCRETE

ABSTRACT: Use of silica fume (SF) as an additive is necessary for obtaining high performance concrete. Adding silica fume and superplasticizer at appropriate ratios in to the mixtures can produce high quality concrete. In this experimental study, two different types of cement were used in concretes with 0.50 water/binder and 1.6 % superplasticizer ratios. The control concretes were produced with cement dosages of 300, 350 and 400 without silica fume. Other concretes involving silica fume at ratios of 5 ,10 and 15 % were produced at cement dosages of 200, 250, 300, 350 and 400. Slump, Ve-Be, flow-table and unit weight tests were carried out on fresh concretes. Using of 10 % silica fume in mixtures resulted the most proper workability.

KEYWORDS: High-Performance Concrete, Silica Fume, Workability.

1. GİRİŞ

Kentsel ve endüstriyel atıklar da dahil olmak üzere betonda yeni malzemelerin kullanılması sonucu betonun bazı özellikleri iyileşerek kullanım alanları artmıştır. Özellikle 20. yüzyılın ikinci

yarısında sanayide ortaya çıkan endüstriyel atıkların inşaat sektöründe ilave yada ikame malzeme olarak yada kendi başına kullanılmasıyla sınırlı doğal kaynakların hızlı tüketimi ve atıkların neden olduğu

(*) :Osmangazi Üniv., Müh.-Mim. Fak., İnş. Müh. Böl., 26480 Batı Meşelik ESKİŞEHİR.

(**):DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı, 06100 Yüce-tepe, ANKARA

çevre problemlerinin yaşanması önlenmiştir. İnşaat sektöründe kullanılan bu malzemeler içersine katıldıkları esas malzemenin birçok özelliğini değiştirmiştir. Bu malzemelerden uçucu kül, cüruf ve silis dumanı (SD) gibi belli bir puzolanik aktivitesi olanları ise daha çok çimento ve beton üretiminde kullanılmışlardır. Uçucu kül ve cürufun çimento ve betonda kullanılması oldukça eski olmasına karşın silisyum metali veya ferro silisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen; silis dumanı, baca tozu yada mikro silika olarak bilinenin betonda kullanımı ise oldukça yenidir. Çok ince taneli oluşu ve yüksek orandaki amorf silis içeriği nedeni ile etkin bir puzolan olan silis dumanı düzenli olarak ancak 1980'li yılların başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır, [1,2]. Yaklaşık 20 yıldan bu yana betonda silis dumanı (SD) ve süper akışkanlaştırıcıların (SA) birlikte kullanımı ile daha yüksek performanslı betonlar (YPB) üretilmeye başlanmış ve bu betonların son zamanlarda özellikle çok katlı yüksek yapıların inşasında kullanımı yaygınlaşmıştır. Performans kavramı, beton kalitesinde ölçü alınan basınç dayanımının dışında dayanıklılık, geçirimsizlik, kimyasal ve biyolojik etkilere dayanıklılık gibi özellikleri içermektedir. Yağışlı ve kurak ortamlar, ısınma-soğuma ile donma-çözülme gibi hava koşullarından dolayı meydana gelen değişmelerin yarattığı etkiler de buna dahildir. Ayrıca asit ve sülfat etkileri ile betonda çeliğin paslanması gibi kimyasal bozulmalar da beton performansı açısından değerlendirilmektedir, [3].

Değişik ölçülerde betona katılan silis dumanı fiziksel ve kimyasal yapısı sonucu taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde etkili olmakta ve betonun bir çok niteliğini olumlu anlamda etkilemektedir. Silis dumanı; 13 000 ila 20 000 m²/kg arası çok yüksek bir özgül yüzeye sahip ve yapısındaki amorf silis oranının % 85'in üzerinde olması gibi nedenlerle puzolanik aktivitesi çok yüksek bir malzemedir. Bu özellikleri nedeniyle; yani gösterdiği tane boyutu ve çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireç ile yaptığı puzolanik reaksiyon etkisi neticesinde betonun bir çok özelliğini olumlu anlamda etkiler. Çimento hamuru – agrega ara yüzeyindeki bağlanmayı güçlendirmesi, beton mikro yapısındaki boşlukları doldurarak daha yoğun bir yapı yaratması, basınç ve çekme dayanımlarını arttırması, terleme ve plastik rötre oluşumunu

önlemesi, geçirgenliği azaltması, beton yapısını zararlı kimyasallara karşı güçlendirmesi gibi faydaları en çok bilinenleridir, [1,2,3,4]. Bu olumlu etkilerinin yanı sıra su ihtiyacı, işlenebilme, kıvam, terleme, rötre, priz süresi gibi taze beton özellikleri de betonda silis dumanı kullanımından etkilenmektedir.

Yukarıda özetlediğimiz taze beton özellikleri, adına işlenebilirlik dediğimiz bir kavram ile açıklanır. İşlenebilirlik; taze betonun ayrışmaya uğramadan taşınması, dökülmesi, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve sonlanması işlemlerinin kolaylıkla yapılabilmesi özelliği olarak tanımlanır. Kısacası işlenebilirlik; kıvam, kohezyon, ayrışmama ve kolay yerleşebilirliktir. Beton bileşenleri ve bileşim parametreleri işlenebilirliği etkileyen en önemli öğelerdir. Silis dumanı işlenebilirlik şemsiyesi altındaki beton özelliklerinden sadece kıvamı (çökme) olumsuz olarak etkiler. Silis dumanının çok ince tane yapısına sahip olması nedeniyle karışımın özgül yüzeyi büyür ve belirli bir kıvam için betonun ihtiyaç duyduğu karma suyu miktarı artar. Su ihtiyacının artması betonda arzu edilir bir durum değildir. Çünkü işlenebilir bir karışım hazırlama nedeniyle betona ilave edilen su, betonun su/çimento oranını arttırarak sertleşmiş beton özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olur. Fakat bu sorun, günümüzde betonda akışkanlaştırıcı yada süper akışkanlaştırıcıların (SA) kullanımıyla ortadan kalkmıştır.

Beton teknolojisindeki hızlı gelişmeler, nüfus artışına bağlı olarak yapılaşmanın hızlanması ve projelerin kısa sürede bitirilmesi talepleri beton katkı maddelerinin yaygın olarak kullanılmasını hızlandırmıştır. SD içeren betonların yüksek dayanım, yüksek dayanıklılık ve taze haldeyken mükemmel işlenebilmeye sahip oldukları bilinmektedir, [4]. Mineral katkıların taze betonun işlenebilme, su gereksinimi gibi reolojik özellikleri ile terleme, ayrışma, hava sürüklenme, hidratasyon ısısı ve rötre gibi özelliklerine de etki ettiği bilinmektedir. Süper akışkanlaştırıcılar SD ile birlikte kullanıldığında taze betonda çimento parçacıklarının daha iyi dağılmasına yardımcı olmakta, özellikle düşük su/bağlayıcı (S/B) oranlı betonlarda SA kullanımı ile betonun işlenebilirliği yüksek oranda artmaktadır, [5]. Küçük kürecikler halindeki SD taneleri daha büyük çimento

tanelerinin arasındaki su ile yer değiştirerek karışımın kompasitesini iyileştirmekte, kohezyonu artırmakta ve serbest su miktarını yükseltmektedir. Bu olumlu etkiye rağmen SD taneleri ıslanması gereken toplam yüzey alanını artırdıklarından, su gereksinmesi SD miktarı ile orantılı olarak artmaktadır. Bu 1 m³ betona her 1 kg SD için 1 lt su ilavesi şeklinde olmaktadır. Düşük dozlu betonlarda veya SD'nın ağırlıkça çimentonun % 5'i civarında katılması halinde su ilavesine gerek kalmayabilmektedir. Ancak, normal olarak SD katılması artsa bile su miktarını artırmadan ve hatta azaltarak aynı işlenebilmeyi sağlamak süper akışkanlaştırıcılarla mümkündür, [6,7]. Boşluk yapısının daha küçük olması nedeniyle SD'lı betonlarda kuruma rötresi daha düşük olmaktadır. SD'nın betonda kuruma büzülmesine olan etkisi; su/bağlayıcı oranı, beton yaşı ve ilk günlerdeki bakım koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0.60'dan küçük olan betonlarda büzülme katkısız betonlardan farklı değildir, [8].

2. AMAÇ

Bir mineral katkının çimento ve betonda puzolanik amaçla kullanılması halinde beton özelliklerine olan etkilerinin veya etki derecelerinin hangi düzeyde olabileceğinin bilinmesi gereklidir. Bu çalışmada Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesinde, silikaferrokrom üretimi sırasında filtrelerde toplanan SD kullanımın taze beton özelliklerine etkisi açıklanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla işlenebilirlik açısından taze beton özelliklerini belirlenmek için çökme, yayılma, Ve-Be ve birim ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada PKÇ ve KÇ çimento türlerinden çeşitli dozajlarda SD'sız ve SD'lı SA içeren betonlar üretilmiş ve SD'nın mineral katkı olarak kullanılmasının işlenebilirliğe etkileri incelenmiştir,[9].

3. SİLİS DUMANI

SD, silisyum metali veya ferro silisyum alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli bir tozdur, [8]. Yan ürün olarak elde edilen SD'nın değerlendirilmesi konusunda ilk çalışma 1950'li yıllarda Norveç'te başlamıştır. Bu

konudaki uygulama ve çalışmalar daha ziyade İskandinav ülkelerinde 1980'li yıllara kadar yavaş ilerlemiştir.

Ülkemizde silika dumanı Etibank Elektrometalurji İşletmesi'nin Antalya'daki tesislerinde elde edilmektedir. Fabrikada ferrosilisyum (FeSi) ve silikoferrokrom (SiFeCr) fırınlarından özel filtreli toz tutucularla elde edilen SD'larının fiyat, satış şekli ve üretim kapasitesi Çizelge 1'de verilmiştir. Elde edilen silis dumanı; doğal puzolan veya uçucu kül ile karşılaştırıldığında, yüksek SiO₂ içeriği, sabite yakın kimyasal bileşimi, çok düşük safsızlığı, camı faz yapısı ve oldukça yüksek inceliği nedeniyle beton üretimine uygun bir katkıdır.

Ferro silisyum tesisi 1978-1981 yıllarında kurulmuş olup, kuruluş kapasitesi 5.000 Ton/Yıldır. 1993 yılında üretim kapasitesi 5.100 Ton/Yıl olarak gerçekleşmiştir. İşletme tesislerinde % 78 Si içeren ferrosilisyum üretimi yapılan 6000 KVA gücündeki ark-direnç fırını, kuvarsit (% 95 SiO₂), demir-çelik hurdası veya demir cevheri ile metalurjik kok belirli oranlarda tartılarak karıştırıldıktan sonra beslenir. Demir oksitler ve SiO₂ karbon ile indirgenerek ferrosilisyum alaşımını oluşturur. Alaşım fırın tabanında birikir ve uygun mal alma oluklarının uygun zaman aralıklarında açılması ile demir kalıplara alınır. Soğuyan bloklar kırılıp net 500 kg'lık sandıklarda satışa sunulur, [6]. Üretim aşamasında fırın bacasından çıkan ve torba filtrelerde toplanan SD silolarda birikir. Ferrosilisyum, demir-çelik endüstrisinde oksit giderici, korozyon direnci ve dayanım sağlayan alaşım olarak, silisyumlu yay çeliklerinin üretiminde kullanılır [10].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kullanılan Malzemeler

Mineral katkı: Etibank Elektrometalurji İşletmesinden sağlanan SD kullanılmıştır. Ferro silisyumun (FeSi) fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çimento: Çalışmalarda; ESÇİM Anonim Şirketi, Eskişehir Çimento Fabrikasının ürettiği, TS 12143'e uygun [11] Portland Kompoze Çimentosu (PKÇ/B 32.5R) ve Set Çimento anonim Şirketi, Afyon Çimento Fabrikasının ürettiği,

TS 10156'e [12] uygun Katkılı Çimento (KÇ 32.5) kullanılmıştır. Bu çimentolara ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

Agrega: Beton karışımlarında Eskişehir-Osmaneli kumu ve Söğüt Zemzemiye kırmataşları kullanılmıştır. Agreganın en büyük tane boyutu 31.5 mm'dir. Agreganın granülometri eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Agregaların karışım granülometrisi TS 707'deki [13] elek sistemi ve TS 706'da [14] belirtilen referans eğrilerine uygun olarak yapılmıştır.

Süper akışkanlaştırıcı Katkı (SA):

Karışımların tamamında toplam bağlayıcı miktarının % 1.6'sı kadar, TS 3452'ye [15] göre F tipi süper akışkanlaştırıcı ve su azaltıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır.

Üretilen Beton Tipleri ve Deneyler

Kontrol betonları PKÇ/B 32.5R ve KÇ 32.5 çimentolarıyla 300, 350 ve 400 dozlu, SD'sız ve çimento ağırlığının % 1.6'sı kadar SA kullanılarak hazırlanmıştır. Aynı çimentolarla 200, 250, 300, 350 ve 400 kg/m³ dozajlarında, her doz için çimento ağırlığının % 5, 10 ve 15'i ölçüsünde SD'ı ve bağlayıcı (Ç+SD) ağırlığının % 1.6'sı kadar aynı süper akışkanlaştırıcı kullanılarak SD'lı betonlar üretilmiştir. Üretilen 36 seri karışımda taze betonda çökme, Ve-Be, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Beton karışım oranları Çizelge 3'de verilmiştir.

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Taze betonda işlenebilirliği belirlemek üzere çökme, yayılma, Ve-Be ve birim ağırlık deneyleri yapılmış olup sonuçlar aşağıda verilerek şekil ve tablolarla değerlendirilmiştir.

5.1 Çökme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Çökme deneyi kıvamı gösteren, beton yerleşebilirliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilen, betona katılan su ve süper akışkanlaştırıcının etkisini gösteren bir deneydir. Çökme deneyi TS 2871'e göre

çökme hunisi yöntemi ile her karışımda iki defa yapılmıştır,[16]. Elde edilen sonuçlar çizelge 4'de verilmiştir. Çizelge 4 incelendiğinde, hem PKÇ hem de KÇ çimentosu ile hazırlanan bütün karışımlarda çimento dozajının artması ile birlikte çökme değerlerinde bir artış görülmektedir. Özellikle 300 kg/m³ çimento dozajından sonra bu etki oldukça belirgindir. Bunda kullanılan iri agreganın kırmataş olmasının da etkisi büyüktür. Çizelge düşey olarak incelendiğinde yani betonda kullanılan silika dumanı miktarının artmasıyla betonların çökme değerlerinde anlamlı bir değişiklik olmamakla birlikte her iki cins çimentonun kullanıldığı % 10 silika dumanı içeriğindeki karışımlarda çökme değeri biraz daha iyi denebilir, Şekil 2 .

5.2 Ve-Be deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Ve-Be, beton için oldukça önemli olan kıvam, kohezyon, yerleşebilirlik gibi taze beton parametreleri konusunda bir fikir veren ve daha çok kuru yada çökmesi düşük karışımlar için uygun bir deneydir. İki farklı tipteki çimento ile farklı çimento ve SD içeriklerinde gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5 incelendiğinde, çimento dozajının artması ile Ve-Be sürelerinde belirgin bir azalma olduğu gözlenmektedir. Bu azalma özellikle 300 kg/m³ çimento dozajından sonra daha belirgindir. Ve-Be süreleri, silika dumanı içeriğinin artması ile düşük dozajlı betonlarda artmakta buna karşılık 300 kg/m³ çimento dozajının üzerindeki betonlarda ise pek fazla değişmemektedir, şekil 3. En düşük Ve-Be değerleri her iki çimento türünde de % 10 SD içeriğinde sağlanmaktadır, Şekil 3.

5.3 Yayılma deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi

Sarsma tablası üzerine yerleştirilmiş betonun sabit sarsma altında yayılmasını kıvamın göstergesi olarak alan, betonun ayrışma, kohezyon ve çökmesi konusunda fikir veren bir deneydir. Sarsma tablası 25 kez düşürüldükten sonra yayılan betonun ortalama çapı yayılmadan önceki çapa oranlanır ve taze betonun işlenebilirliği hakkında bilgi edinilir.

Çizelge 6 incelendiği zaman çimento dozajının artması ile yayılma oranının da doğrusal olarak arttığı görülür. Bu artış 300 kg/m³ çimento dozajının üzerindeki betonlarda daha belirgindir. Yayılma oranındaki aynı doğrusal artış silika dumanının artması ile de görülmektedir, şekil 4. Silika dumanı içeriğinin % 10 geçmesi durumunda yayılma oranındaki artış pek fazla değildir. Bu da SD'nin karışımdaki suyu tuttuğunu göstermektedir. Sonuçlar çimento cinsleri açısından değerlendirildiğinde, çimento türüne göre yayılma oranlarında pek bir fark olmadığı görülecektir.

5.4 Birim ağırlık sonuçlarının değerlendirilmesi

Taze betonun birim ağırlığı; belirli bir hacim içerisinde sıkıştırılarak yerleştirilmiş taze betonun birim hacmine isabet eden ağırlığını ifade eder. Bu deney taze betonun su/çimento oranı, hava ve agregası içeriği, sıkışabilirliği hakkında önemli bilgiler verir. Birim ağırlığın küçük olması betonun içinde fazla boşluk olduğunun yada betonun iyi yerleşmediğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

Hazırlanan karışımlarda TS 29412'e göre ölçülen birim ağırlık değerleri çizelge 7' de verilmiştir,[17]. Bu çizelge incelendiğinde çimento dozajının artması ile birim ağırlıklarda az da olsa bir artış tespit edilmiştir. Bu durum daha çok iri agregası olarak betonda kırmataş kullanılmasıyla ilgilidir. Bilindiği üzere kırmataş ile hazırlanan betonlarda tane şekliyle kaynaklanan işlenebilirlik problemleri yaşanır. Ortamda yeterli miktarda çimento bulunmaması durumunda taneler birbiri üzerinden kayıp rahatça hareket edip yerleşemez. Sonuçta betonun iyi sıkıştırılmaması nedeniyle beton birim ağırlığı da düşük olur. Silika dumanı içeriğinin artması ile de beton birim ağırlıklarında bir artış olduğu tespit edilmiştir, şekil 5. En yüksek birim ağırlık değerleri ise % 10 silika dumanı içeriğindeki betonlara ait sonuçlardan elde edilmiştir. Silika dumanı ile birlikte beton birim ağırlıklarında bir artışın meydana gelmesi silika dumanının tane etkisini göstermektedir. Silika dumanının çimentodan çok daha ince olması nedeniyle bu malzeme çimento taneleri arasında kalan boşlukları doldurarak daha yoğun bir beton yapısının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Çimento türüne göre ise birim ağırlıklarda meydana gelen değişim anlamlı değildir.

6. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Farklı çimento dozajlarında silika dumanının beton işlenebilirliği üzerindeki etkisini araştırmak üzere yapılan taze beton deneyleri silika dumanının beton işlenebilirliği ile ilgili çökme, yayılma, Ve-be ve birim ağırlık gibi parametreleri etkilediği tespit edilmiştir. Bilindiği üzere silis dumanı katılan çimento hamurunda; belirli kıvam için gerekli su ihtiyacı, kohezyon, viskozite, terleme ve özellikle agregası ara yüzeyindeki iç yapıya değişikliğe uğrar, [2]. Çok ince ve yuvarlak olan silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iter ve taze hamurun kıvamı üzerinde etkili olurlar. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu büyük yüzey alanı su ihtiyacını arttırarak kıvamı olumsuz etkiler. Süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımıyla bu olumsuzluk ortadan kaldırılabilmektedir. Silis dumanının bir önemli etkisi de taze beton kohezyonunu arttırarak betonun ayrışmasını engellemesi olayıdır, [2,3].

Ölçümü yapılan bütün taze beton deneylerinden elde edilen sonuçlar silika dumanının taze beton deneyleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koyar yöndedir. Silika dumanı sertleşmiş beton özellikleri kadar olmasa da taze betonla ilgili parametreleri de etkilemektedir. Kısaca sıralarsak;

- Silika dumanı, gerek tane boyutu ve gerekse de puzolanik etkisini gösterebilmesi için karışımda optimum bir çimento içeriğine ihtiyaç duyar. Çalışmalarımız için bu değer 300 kg/m³ ve üzeridir.
- Betonun kıvamında silika dumanının çok yüksek inceliği nedeniyle bir azalma meydana gelse de bu olumsuzluk süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanımıyla giderilebilmektedir.
- Silika dumanı kullanımı ile taze beton özellikleri olumlu yönde etkilenmektedir.
- Betonda çimento ağırlığının % 5'i ölçüsünde kullanılan silika dumanı taze beton özellikleri üzerinde pek etkili olamamaktadır. Çimento ağırlığının % 15'i ölçüsünde kullanılan silika dumanı

kullanılması sonucunda ise bazı taze beton özellikleri ya değişmemekte yada olumsuz olarak etkilenmektedir.

- Betonda çimento ağırlığının % 10' u ölçüsünde silika dumanı kullanılması ile taze beton özelliklerinde önemli iyileşmeler gözlenmektedir.
- Betonda silika dumanı kullanımı ile; taze beton özellikleri ve işlenebilirliğinde meydana gelen değişimler üzerinde, kullandığımız Portland Kompoze (PKÇ/B 32.5 R) ve Katkılı Çimentoların (KÇ 32.5) olumlu yada olumsuz herhangi bir etkisi tespit edilememiştir.

KAYNAKLAR

[1] Koca, C., "Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Cüruf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı", İMO, 4. Ulusal Beton Kong., s. 381-394, 1996, İstanbul.

[2] Yeginobalı, A., Silis Dumanı ve Çimento ve betonda Kullanımı, TÇMB/AR-GE, 2001, Ankara

[3] Mehta, P.K. ve P.C. Aitcin, "Principles Underlying Production of High-Performance Concrete", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, pp. 70-78, 1990.

[4] Ay, N. ve İ.B. Topçu, "The Influence of Silicoferrochromium Fume on Concrete Properties", CCR, Vol. 25, No. 2, pp. 387-394, 1995.

[5] Duval, R. ve E. H. Kadri, "Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of HPC", CCR, Vol. 28, No. 4, pp. 533-547, 1998.

[6] Ekinci, C.E., "Antalya Etibank Elektro İşletmesi SD'larının Çim. ve Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 1995, Elazığ.

[7] Yeğınobalı, M.A., "SD'nın Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi", İMO, End. Atık. İnş. Sektöründe Kullanılması Semp., ss.149-167, Ekim 1997, Ankara.

[8] ACI Committee 226., "Silica Fume in Concrete", ACI Materials Journal, 84, pp. 158-166, March-April 1987.

[9] Kaval, M., "Silis Dumanının Hazır Betonda Kullanımının Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000, Eskişehir.

[10] Uysal, M., "Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesinde Baca Tozlarının Tutulması", 1993, Antalya.

[11] TS 12143, "Çimento-Portland Kompoze", TSE, Mart 1997, Ankara.

[12] TS 10156, "Çimento-Katkılı Çimento", TSE, Nisan 1992, Ankara.

[13] TS 706, "Beton Agregaları", TSE, 1980, Ankara.

[14] TS 707, "Beton Agregalarında Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi ", TSE, 1980, Ankara.

[15] TS 3452, "Beton Kimyasal Katkı Maddeleri (Priz Süresini ayarlayan ve Karışım Suyunu Azaltan)", TSE, Şubat 1984, Ankara.

[16] TS 2871 taze beton kıvam deneyi (çökme hunisi metodu ile)

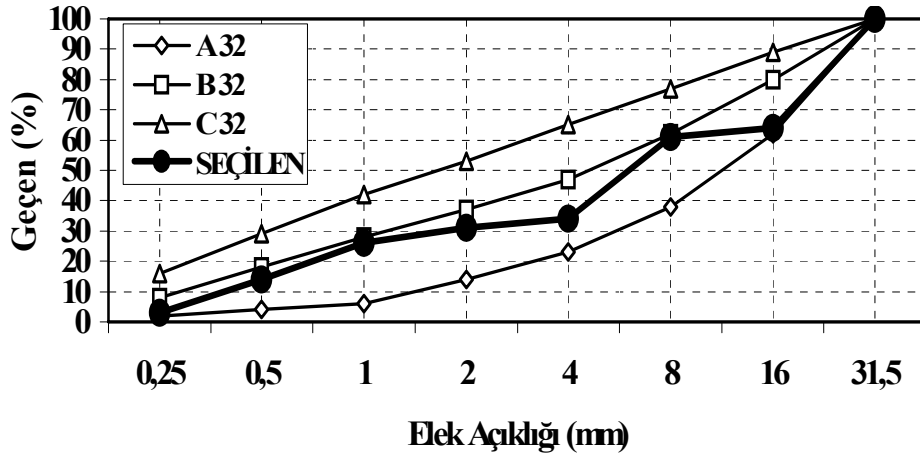
[17] TS 2941 Taze betonda Birim ağırlık, verim ve hava miktarının ağırlık yöntemi ile tayini

Çizelge 1. Silis dumanlarının fiyat, satış şekli ve üretim kapasitesi

Silis Dumanı	Torba Ebadı(cm)	Torba Ağırlığı (kg)	Fiyatı (\$/Ton)	Üretim (Ton/Gün)	Üretim (Ton/Yıl)
FeSi ve SiFeCr	60x80x100	500	31	2.6	360-400

Çizelge 2. Beton karışımlarında kullanılan silika dumanı ve çimentoların özellikleri

Malzeme Türü	Çimento		SD
	PKÇ/B 32.5R	KÇ 32.5	FeSi
Kimyasal Bileşim (%)			
SiO ₂	31.53	28.61	94.94
Al ₂ O ₃	7.06	6.34	0.70
Fe ₂ O ₃	3.29	2.81	0.60
CaO	48.89	52.83	0.83
MgO	1.46	2.26	0.71
SO ₃	2.01	2.78	0.21
Kızdırma Kaybı	4.55	2.14	-
Tayin Edilemeyen	0.05	0.50	1.48
Çözülmez Kalıntı	0.27	0.29	2.16
Fiziksel Özellikler			
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.85	2.96	2.36
Özgül Yüzey (m ² /kg)	3574	3948	-
Basınç Dayanımları (MPa)			
2 Günlük	12.8	13.2	-
7 Günlük	26.9	25.2	-
28 Günlük	42.5	38.4	-
Elek Analizi (mm)			
+0.250	0.00	0.00	0.04
-0.250 +0.125	0.40	1.40	0.26
-0.125 +0.074	7.00	10.00	1.57
-0.074 +0.044	25.00	28.50	1.04
-0.044 +0.032	33.00	33.27	97.07
-0.032 +0.003	55.00	52.05	-



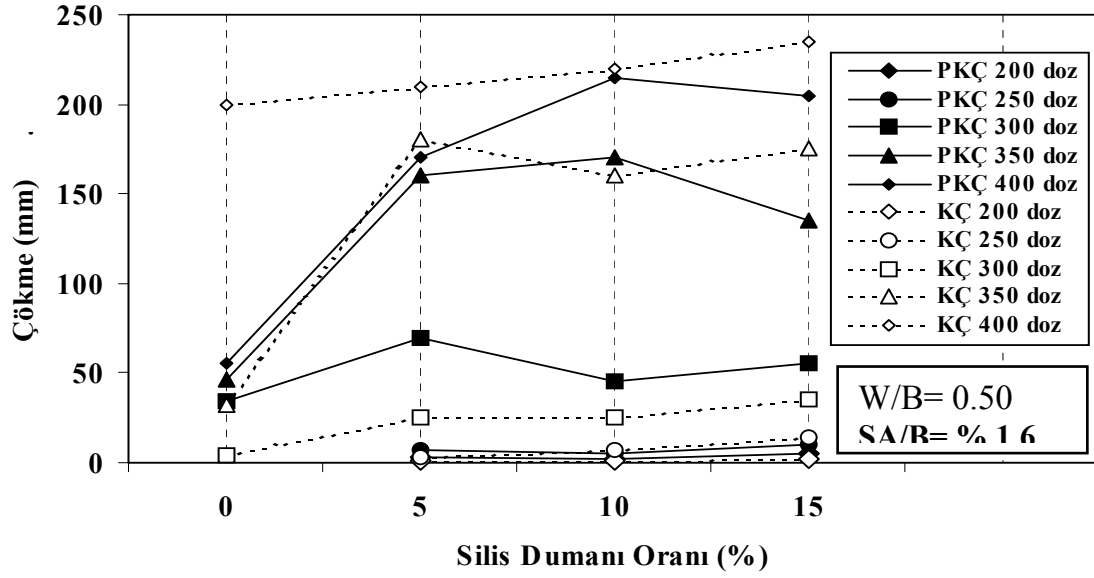
Şekil 1. Karışımlarda kullanılan agregaya ait granülometri eğrisi.

Çizelge 3. Beton karışımlarına giren için malzeme miktarları, [8]

KPÇ/B 32.5R KÇ 32.5	Çimento (kg)	SD (kg)	SA (kg)	Su (W) (kg)	Kum (kg)	K.taş I (kg)	K.taş II (kg)
300	300	0.0	4.80	150.00	696	619	725
350	350	0.0	5.60	175.00	657	584	684
400	400	0.0	6.40	200.00	618	549	643
200 S5	200	10.0	3.36	105.00	751	668	782
200S10	200	20.0	3.52	110.00	728	647	758
200S15	200	30.0	3.68	115.00	704	626	733
250 S5	250	12.5	4.20	131.25	706	628	735
250S10	250	25.0	4.40	137.50	677	602	705
250S15	250	37.5	4.60	143.75	647	576	674
300 S5	300	15.0	5.04	157.50	661	588	688
300S10	300	30.0	5.28	165.00	626	557	652
300S15	300	45.0	5.52	172.50	591	525	615
350 S5	350	17.5	5.88	183.75	616	548	641
350S10	350	35.0	6.16	192.50	575	511	599
350S15	350	52.5	6.44	201.25	534	475	556
400 S5	400	20.0	6.72	210.00	571	508	595
400S10	400	40.0	7.04	220.00	524	466	546
400S15	400	60.0	7.36	230.00	477	425	497

Çizelge 4. Farklı silika dumanı içeriğindeki betonlarda çökme değerinin değişimi, (mm)

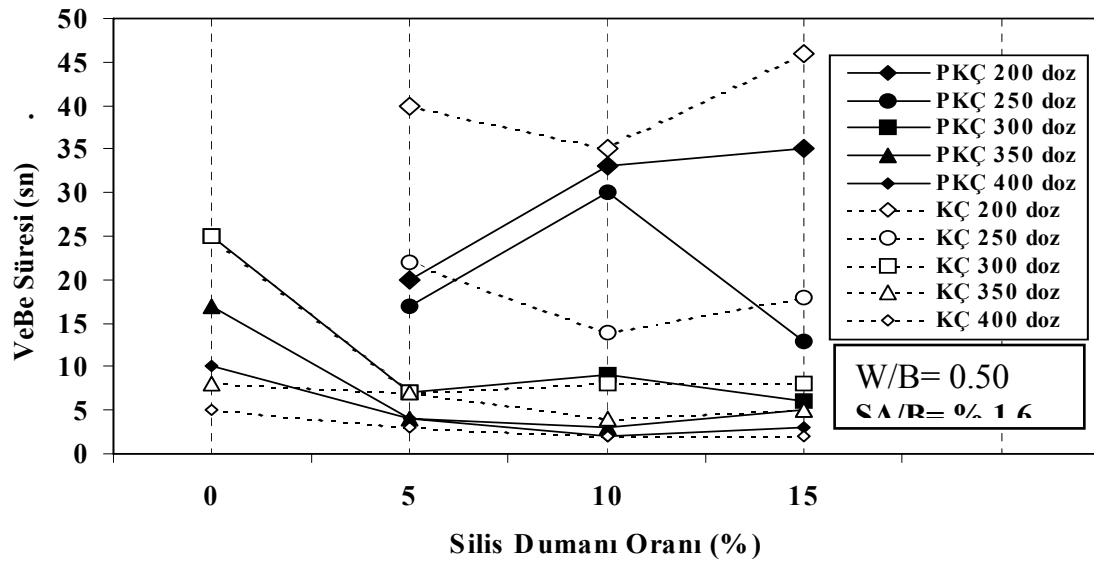
Çimento Türü	PKÇ/B 32.5R					KÇ 32.5				
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
Çimento Dozajı										
SD % 0 (kontrol)	0	0	34	46	55	0	0	4	32	200
SD % 5	0	7	70	160	170	0	0	25	180	210
SD % 10	0	5	45	170	215	0	7	25	160	220
SD % 15	5	10	55	135	205	0	14	35	175	235



Şekil 2. PKÇ ve KÇ çimentolu taze betonun çökme değerinin SD içeriği ile değişimi

Çizelge 5. Farklı silika dumani içeriğindeki betonlarda Ve-Be deneyi sonuçlarının değişimi, (sn)

Çimento Türü	PKÇ/B 32.5R					KÇ 32.5				
	200	250	300	350	400	200	250	300	350	400
SD % 0 (kontrol)	-	-	25	17	10	-	-	25	8	5
SD % 5	20	17	7	4	4	40	22	7	7	3
SD % 10	33	30	9	3	2	35	14	8	4	2
SD % 15	35	13	6	5	3	46	18	8	5	2



Şekil 3. PKÇ ve KÇ çimentolu taze betonun Ve-Be süresi ile SD içeriği ilişkisi

BAĞLANTILI BUHARLAŞAN SİSTEMLERDE SUYUN AĞIR İZOTOP ZENGİNLEŞMESİ

Yazan : Joel R. Gat ve Carl Bowser⁽¹⁾
Çeviren: Abdullah Dirican⁽²⁾

OZET

Buharlaşan sistemlerin oluşturduğu bağlantılı bir seride hidrojen ve oksijen ağır izotop türlerinin izotopik bakımdan zenginleşmesi, atmosferik nemin geri-beslenimi ile sınırlıdır. Bu yazıda buharlaşmış nemin atmosfere katkısını içeren bir takım geri-besleme şemaları denenmiş ve nisbi nemin kontrol edici bir parametre olduğu bulunmuştur. Buna göre, ağır izotopların büyük ölçüde izotopik açıdan zenginleşmesi kurak bölgelerin bir özelliği olduğu söylenebilir.

$\delta_L - \delta_A = \epsilon/h$ bağıntısı daha fazla ağır izotop zenginleşmesinin meydana gelmediği bir sınırlı durumu tarif etmektedir.

GİRİŞ:

Buharlaşmaya uğrayan bir su kütlesinin izotopik kompozisyonundaki değişimin anlatıldığı bir çok makale mevcuttur (Dinçer, 1968; Merlivat, 1970; Gat, 1981, 1991 Gonfiantini, 1986). Buharlaşma akısı, $H_2^{18}O$ ve HDO ağır izotop türleri açısından su kütlesine nazaran daha fakirdir. Bunun sonucu olarak buharlaşma sonucu arta kalan su ağır izotop bakımından zenginleşir. İzotop kompozisyonu ortalama okyanus suyuna göre binde olarak ifade edilir (CRAIG, 1961) ve ağır oksijen türleri için \square_{18} , hidrojen izotopları için \square_D terimleri ile gösterilir.

Buhar akısının izotopik kompozisyonu Craig-Gordon doğrusal direnç modeli esasına göre aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\delta_E = \frac{\alpha^* \delta_L - h \delta_a - \epsilon}{(1-h) + \Delta \epsilon / 1000} \approx \frac{\delta_L - h \delta_a - \epsilon}{(1-h)} \quad (1)$$

Burada h su yüzeyinde doymuş buhar basıncına göre normalleştirilmiş nisbi nem, δ_a atmosferik nem ve δ_L suyun izotopik kompozisyonu, a^* denge ayırım faktörüdür. e^* ise aşağıdaki eşitlik ile a^* değerinden elde edilir.

$$\epsilon^* = (1-a^*) \cdot 10^3; \quad \epsilon = \epsilon^* + \Delta \epsilon$$

Burada $\Delta \epsilon = (1-h)C_K$ olup C_K hava/su ara yüzeyinde izotopik su moleküllerinin difüzyonundan ileri gelen dengesizlik ayırımını ifade eden bir parametredir. Buna göre denklem 1 aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\delta_E - \delta_L \approx \frac{h(\delta_L - \delta_a) - \epsilon}{(1-h)} \quad (1a)$$

Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein The Geochemical Society, Special publication No:3 1991.

Fizikçi, Hidrojeoloji Yük. Müh.: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, Ankara Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi, Nükleer Fizik Bölümü

Bu eşitlikte görüldüğü gibi; buharlaşma olayına bağlı olarak daha fazla bir ayrışma meydana gelmez.

$$\delta_L - \delta_a \geq \frac{\varepsilon}{h} \quad (1b)$$

Bu bağıntıdan daha sonra aşağıda bahsedilecektir.

Giriş akısı F_+ ve F_+ 'nın ağırlıklı ortalama izotopik kompozisyonu δ_+ , buharlaşma akısı E ve çıkış akısı F_- ile gösterildiğinde, hidrolojik kararlı-durum' da V =sabit ve $F_+ = F_- + E$ olduğu zaman V hacmindeki bir su kütlesinin izotopik değeri çıkış akımının su kütlesinin izotopik kompozisyonuna göre farklılık göstermediği kabul edildiğinde $\delta(F_-) = \delta_L$ olur;

$$V \frac{d\delta_L}{dt} = F_+ \delta_+ - F_- \delta_L - E \delta_E \quad (2)$$

Verilen bu ifade denklem 1 'deki δ_E değeri yerine konularak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{d\delta_L}{dt} \frac{F_+}{V} (\delta_+ - \delta_L) - \frac{E}{V} [h(\delta_L - \delta_a) - \varepsilon] \quad (3)$$

Bu denklem kararlı-durum için çözüldüğünde; giriş akısına nazaran su kütlesinin ağır izotop zenginleşmesi için aşağıdaki denklem yazılabilir;

$$\Delta = \delta_{SS} - \delta_+ = \frac{\left(\delta_a - \delta_+ + \frac{\varepsilon}{h} \right)}{1 + \frac{F_+ (1-h)}{E h}} \quad (4)$$

Bu denkleme göre, δ_a ve δ_+ 'nın verilen değerleri için ağır izotop zenginleşmesi ile ilgili saptanacak parametreler; bir tarafta faz değişiminin tabiatında bulunan ε^* ve C_K terimleri, diğer tarafta ise yukarıda verilen formülde açıkça görülen ve ortamın yegane parametresi olan nemlilik teriminden ibarettir. Fakat, hem ε^* hem de h su yüzeyindeki hakim sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, ortam sıcaklığı bunların içerisinde gizli bir şekilde yer almaktadır. Ayrıca, su/hava ara yüzeyinde rüzgar ve çalkantı C_K

parametresinin değerini kontrol etmektedir (Mervilat ve Coantic, 1975).

Çevreden etkilenmeyen izole edilmiş bir buharlaşma sisteminde h ve δ_a meteorolojik koşullar tarafından ayarlanır. δ_+ değeri gölün veya sistemin hidrolojik oluşumu tarafından tayin edilir. Orta-karasal bir bölgede yağış ve akış (δ_+ terimini birlikte oluşturan) ve atmosferik nem genellikle izotopik bakımdan dengededir (Craig ve Horibe, 1967; Matsui ve diğerleri, 1983). Bu nedenle, $\delta_a = \delta_+ - \varepsilon^*$ olur ve Denklem 4 aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir;

$$\Delta = \delta_{SS} - \delta_+ = \frac{(1-h)(\varepsilon^* + C_K)}{\left[h + (1-h) \frac{F_+}{E} \right]} \quad (4a)$$

Bu yazıda aşağıdaki bağlantılı mekanizmaların bir veya birkaçının yer aldığı çevre ve buharlaşma olayları arasında bir geri besleme olan, fakat izole edilmemiş bağlantılı sistemler tartışılacaktır:

-Herhangi bir buharlaşan sistemden bir mansap su gövdesinin içerisine izotopik bakımdan ağır sulann girişi;

-Buharlaşan nemin ortamdaki havaya katılımı ve daha sonra rüzgarla birlikte buharlaşan sistemi etkilemesi

Bu etkilerden birincisine bir "göller-dizisi denilmekte olup, denetimini δ_+ giriş akısı yapmaktadır. İkinci mekanizma h ve δ_a parametrelerine etki eden atmosfer yardımı ile bir birleşmenin meydana gelmesidir. Bu geri-beslemenin her ikisi de ($\delta_a - \delta_+$) değerim değiştirir. Dolayısıyla, denklem 4'e göre mansapta (veya rüzgar yönünde) yer alan buharlaşıcı bir sistemin içerisindeki ağır izotop türlerinin izotopik bakımdan zenginleşme derecesi (şayet düzensiz olmayan bir çevrede bulunursa) membada bulunandan daha küçük olacaktır.

Bir seri buharlaşan havuzlar için bazı geri-besleme şemaları Şekil 1' de görülmektedir. Farklı atmosferik geri-beslemeler ile birbiri ile bağlantılı göller takımının üç değişkeni ve bunun yanı sıra sadece atmosferik bağlantılı fakat sıvının

rüzgar yönüne doğru giriş kompozisyonu bakımından farklı olan sistemler görülmektedir.

Aşağıdaki bölümde bu sistemler içindeki izotopik değişimlerin yönü ve büyüklüğü tartışılacaktır.

Göller - Dizisi etkisi:

Buharlaştırıcı sistemlerin 1,...,n, arasında sıralanmış bir serisini ele alalım. Bu serinin çıkış akımı, serilerin içerisindeki ardışık sistemlerin giriş-akısını meydana getirsin. Bir nehir boyunca yer alan bir seri göller veya rezervuarlar böyle bir sisteme örnek olarak verilebilir. Ayrıca yağıştan oluşan yüzey suyu akışları ve topraktaki su, hidrolojik yol boyunca bazı buharlaşma oluşumları ile suların bitkilere, boşalma havuzlarına veya yer altı suyuna doğru hareket ettiği kurak-bölge hidrolojik sistemleri de birer örnek olarak verilebilir. Atmosferik nem üzerinde buharlaşmanın ihmal edilebilir küçük bir etkisinin olduğunu farz edelim. Bu durumda buharlaşma sistemlerinin her biri verilen bir h nemlilik değeri ve atmosferik nemin δ_a değeri ile karakterize edilen bir atmosfer ile etkileşir (model C, Şekil 1). Her bir buharlaşma aşamasında ağır izotopların oluşumunu açıklayan denklem 4'e göre mansaba doğru gidildikçe ağır izotop zenginleşmesi ilk sisteminkinden daha az olacağı açıktır. Bunun en basit nedeni ($\delta_a - \delta_{+,n}$) < ($\delta_a - \delta_{+,0}$) olmasıdır. Çünkü n' inci sisteme giriş için δ değeri olan $\delta_{+,n}$ $\delta_{+,0}$ 'dan daha büyük bir sayıdır.

Böyle bir serinin n' inci sisteminin ağır izotop serilerindeki zenginleşmesi denklem 4'e göre ve $\delta_{+,n} = \delta_{L,(n-1)}$ olduğu kabul edilerek aşağıdaki denklem ile verilir;

$$\Delta_{n,n-1} = \delta_{L,n} - \delta_{L,n-1} = \frac{\left(\delta_a - \delta_{L,n-1} + \frac{\varepsilon}{h} \right)}{1 + \frac{F_+ (1-h)}{E}} \quad (5)$$

kısaltılmış bir $a = (F_+/E(1-h)/h)$ ifadesi kullanılarak bu $\Delta_{n,n-1}$ değeri $\Delta_{1,0}$ serisindeki ilk elemana aşağıdaki şekilde ilişkilendirilir;

$$\Delta_{n,n-1} = \left[\prod_{i=1}^{n-1} \frac{a_X}{1 - a_X} \right] \Delta_{1,0} \quad (5a)$$

Basitleştirilmiş bir durumda hidrolojik bakımdan bütün sistemler eşit kabul edilirse $a_1 = a_2 = \dots$, olur ve denklem 5a basitleştirilerek üstel bir seri olur;

$$\Delta_{n,n-1} = \left(\frac{a}{1+a} \right)^{n-1} \Delta_{1,0} \quad (5b)$$

Seriler boyunca ağır izotop türlerinin zenginleşmesinin baştan başa toplamı aşağıdaki ifade ile verilir;

$$\Delta_{n,0} = \delta_{L_n} - \delta_{+,0} = \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{a}{1+a} \right)^i \right] \Delta_{1,0} \quad (6)$$

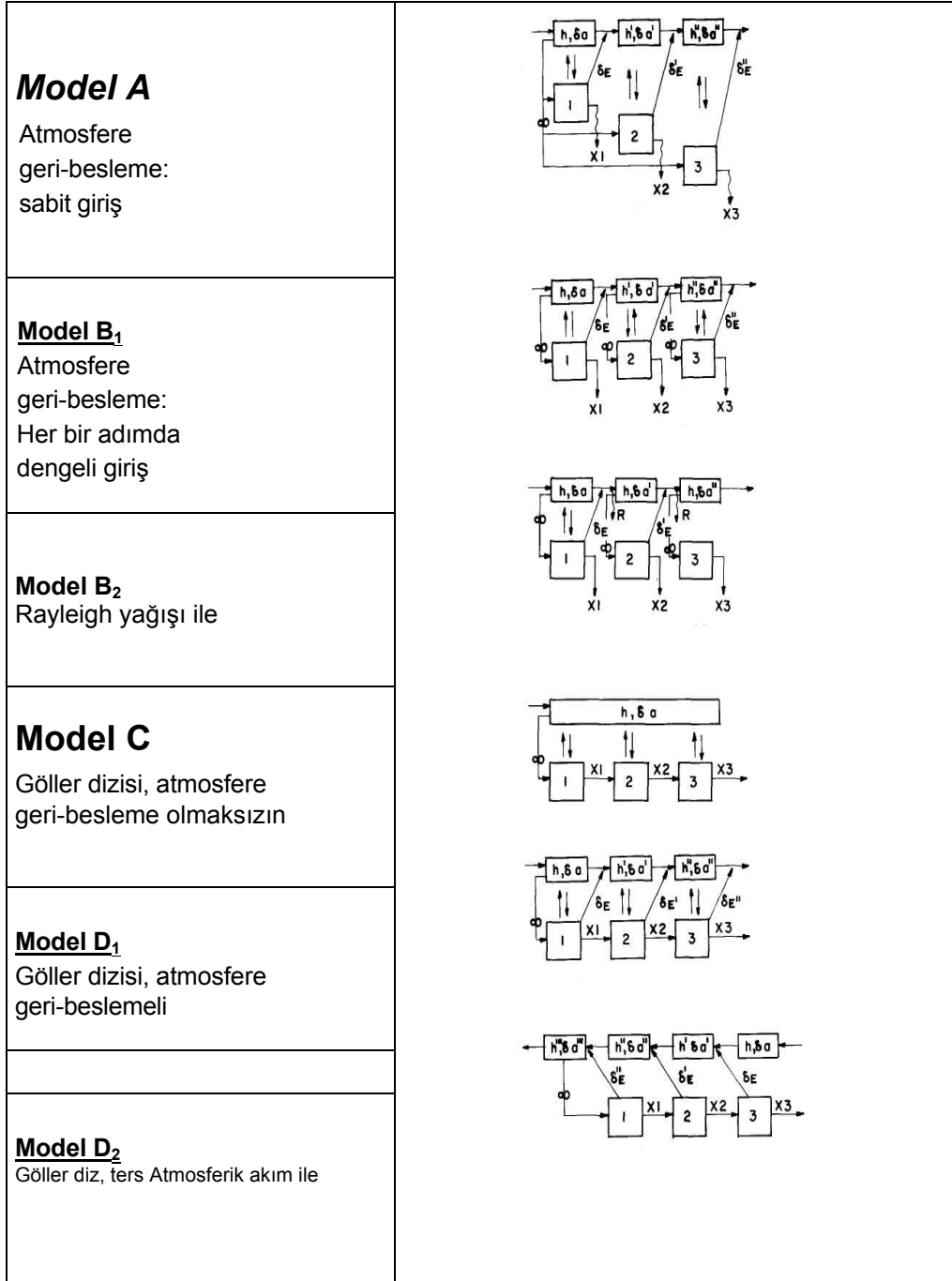
F+/E'nin farklı değerleri (F+/E → 1 sınır koşuluna kadar) için izotopik bakımdan ağır türlerin oluşumu nem oranının bir fonksiyonu olarak Şekil 2'de verilmiştir. Sadece tek bir buharlaşma sisteminin ağır izotop zenginleşmesi "a" yı oluşturan parametrelerin bir fonksiyonu olmayıp aynı zamanda bir seri buharlaşan sistemlerdeki ağır izotop zenginleşmesinin de bir yükselticisidir. Sistemlerin sonsuz bir seride erişilen maksimum ağır izotop zenginleşmesi basit olarak şöyledir;

$$\Delta_{\infty,0} = (1+a)\Delta_{1,0} = (\delta_a - \delta_{+,0}) + \frac{\varepsilon}{h} \quad (6a)$$

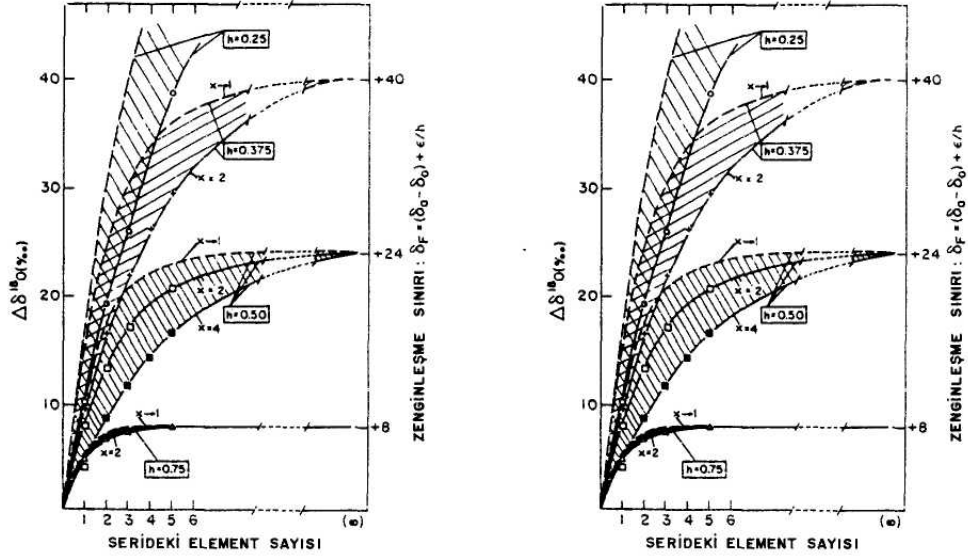
Bunun Eşitlik 1a da ileri sürülen koşula karşılık geldiği görülecektir. Ağır izotop zenginleşmesinin bu sonuncu derecesi artık F+/E parametresinin bir fonksiyonu değildir. Fakat Şekil 3'de görüldüğü gibi, bu sınır değerindeki oran "a" ya (veya h'ın verilen bir değeri için F+/E) ters orantılı bir bağıntı ile yaklaşır. En son ağır izotop zenginleşmesi nem oranı düşük olduğu zaman çok belirgindir. Fakat atmosferik akı giderek önem kazandığında, nem oranı %50' nin üzerindeki değerleri için daha fazla şekil değiştirir. Hakikatten nem oranı, bir seri içindeki ikinci veya üçüncü sistemlerde (buharlaşmanın nem oranını oldukça duyarlı tayin edilebilen her bir su dengesinin hakim bir bileşeni olması şartı ile) Şekil 2'de görülebileceği gibi kontrol edici bir parametredir. Göller-dizisi etkisinin bu özelliği, çöl bitkileri veya karbonat yumruları gibi oldukça yüksek buharlaştırıcı sistemlerin artan izotopik kompozisyonunu önemli paleomatik göstergeler yapar. Çünkü bunlar diğer değişebilir iklim parametrelerinden nispeten daha az

karışması nedeniyle hakim olan nem oranının oldukça yakın bir belirteci olmasını sağlarlar. Dikkat edilecek olunursa Fontes ve Gonfiantini (1967) tarafından anlatıldığı gibi buharlaşma ile devamlı su kaybeden bir çöl nehri sonsuz uzunlukta bir "göller-

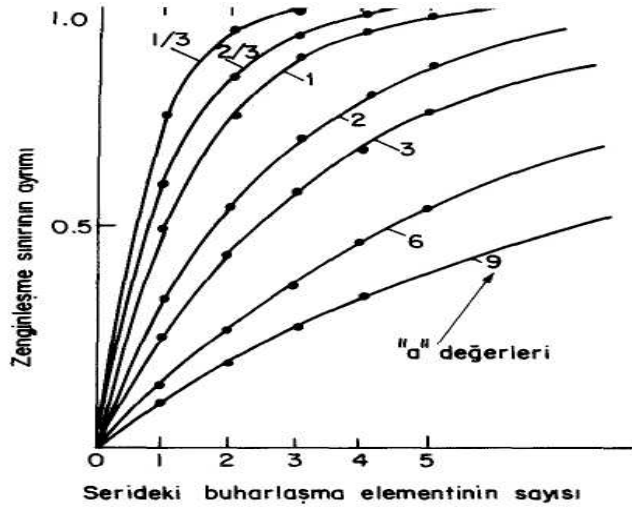
dizisi" ne örnek olarak verilebilir. Her bir ilave sistem bir baştan öbür başa yüksek bir akış oranı ve düşük bir izotopik zenginleşme gösterse bile böyle bir sistem sonunda yüksek δ değerine yaklaşır.



Şekil 1. Bağlantılı buharlaşma sistemleri için değişik geri-beslenme dönüşümleri ile akış modelleri. Her bir modelde kuruların üst serileri atmosferik rezervuarı ve alt serileri (ardışık olarak numaralandırılmış) buharlaşma sistemlerini temsil etmektedir.



Şekil 2. Farklı oranları ve bir $X= F_+/E$ sahası için bir buharlaşma serisinin sistemleri boyunca (göller-dizisi) ^{18}O zenginleşmesi. $X=2$ için boş semboller; $X=4$ için dolu semboller; $X \rightarrow 1$ in limitleri (terminal göl sistemleri) kesikli çizgiler ile gösterilmiştir, $n \rightarrow \infty$ olurken elde edilen en son izotopik bakımdan zenginleşme sağ kenarda gösterilmiştir; $\delta_f = (\delta_a - \delta_{n,+}) + \epsilon/h$.



Şekil 3. $F(n) = a^{(x-1)} / (1+a)^x$ formülüne göre $a = X[(1-h)/h]$ değerlerinin bir aralığı için "göller-dizisi" boyunca erişilen en son izotopik bakımdan zenginleşmenin ayırımı.

Ağır izotop türlerinin en son izotopik zenginleşmesinin $\delta_1 = (\delta_a - \delta_{+,0} + \epsilon/h)$ bağıntısı ile verilen değeri atmosferik h ve δ_a parametrelerinin değerine bağlıdır. Fakat $\Delta\epsilon$ nin değerini özellikle C_K nin değerini tayin ettiği için izotopik zenginleşmenin son aşamasının ayrışma mekanizmasını da dikkate almak gerekir. Allison ve diğerleri, (1983) tarafından gösterildiği gibi, buharlaşma tamamen gelişmiş bir sınır

tabakası boyunca yer aldığı zaman C_K nin değeri önemli derecede büyür. Buharlaşmanın toprak sütunu içinden veya bitkilerden oluştuğu durum ile buharlaşmanın serbest su yüzeyinden meydana gelmesi durumu karşılaştırıldığında C_K iki misli olabilir. Bu olaydan döteryum değerleri nispeten daha az etkilenirken, oksijen-18 değerlerindeki zenginleşme çok belirgindir:

Buharlaştırmanın iki uç mekanizması için ($\epsilon^* + C_K$) nin aralığı ^{18}O için binde olarak ($C_K^{18}=24 - 39$) değerleri ve döteryum için ($C_K^D=85 - 98$) sınırları arasında değişir. Sonuncu buharlaşma aşaması "göller-dizisi" durumunda en belirgin rolü oynar.

$\delta_{18} - \delta_D$ bağıntısında buharlaşıcı sistemlerin serileri boyunca izotopik kompozisyonların değişimini bir "buharlaştırma doğrusu" tarif eder ve bunun eğimi denklem 4 den aşağıdaki şekilde çıkarılır.

$$S = \frac{\left[\delta_a - \delta_+ + \frac{\epsilon}{h} \right]_D}{\left[\delta_a - \delta_+ + \frac{\epsilon}{h} \right]_{18}} \quad (7)$$

Gat(1971) tarafından belirtildiği gibi, atmosferik nem ve giriş akımı dengede olduğu zaman bu eğim h'den bağımsız olur; bu koşullar altında eğim aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$S = \frac{(\epsilon^* - C_K)_D}{(\epsilon^* - C_K)_{18}} \quad (7a)$$

Son bölümde anlatıldığı üzere; buharlaşan mekanizma değişirken C_K nin değerindeki nispi kayma buharlaşma doğrusu eğiminin değişmesinde kendisini açıkça gösterir.

Daha sonra anlatılacağı gibi bir "göller-dizisi" için tek bir buharlaşma doğrusunun bu kuralı, atmosferik bir geri besleme olması halinde dikkate alınmaz. Hakikatten, bu olay böyle geri beslemelerin oluşumu için bir ayırt edici özeldir.

Atmosferik geri-beslenme mekanizması boyunca buharlaşma sistemlerinin birleşimi

İzotopik oluşumun sınırlandığı, özellikle yüksek nem oranı buharlaşma olayı ile birlikte gelişen izotopik değişimde, atmosferik nem hakim bir rol oynar. Bu nedenle buharlaşan sistemin içindeki ağır izotopların oluşumunu etkileyen atmosferin içine buharlaşan nem akısının katıldığı görmek hiç de şaşırtıcı değildir. Hatta böyle bir olayın meteorik sular üzerinde bu geri

besleme etkileşiminin miktarını belirleyebilen izotopik bir iz bıraktığı gösterilmiştir.

Prensip olarak, atmosferik nem ile buharlaşan su arasında hava-su etkileşimi şemalarının birçok türünü düşünmek mümkündür. İlk önce gerçekte meydana gelen durumları kapsayan şekil I deki sadece bir kaç temsili ve iyi bir şekilde tanımlanmış sistemler tartışılacaktır. Daha sonra bu modellerin ışığında bazı gerçek sistemler üzerinde durulacaktır

Sabit giriş modeli:

En basit model, her biri özdeş izotopik kompozisyona sahip bir nehirden beslenen ve birinden diğerine mansap a doğru yer alan bir grup göllerdir (Şekil 1, model A). Hidrolojik açıdan fazla gerçekçi olmamakla birlikte, geri besleme parametreleri üzerinde ağır izotop zenginleşmesinin bağımlılığını araştırmak için bu model kullanılacaktır (çünkü bu model içerisinde akış yolu boyunca değişen yegane parametre atmosferik bileşendir).

Daha öncede olduğu gibi bu göl sisteminin baştan başa bir F_+/E akış oram için hidrolojik ve izotopik kararlı-durum içinde olduğu kabul edilecektir. Basitleştirmek için (δ_+) girişinin $\delta_a^{(1)}$ ilk sisteminin içindeki atmosferik nem ile izotopik bakımdan dengede olduğu kabul edilmiştir ($\delta_+ = \delta_a^{(1)} + \epsilon$). Aynı zamanda $b = h^1/h$ ardışık sistemlerin içindeki nemliliğin oranı olduğu zaman (h^1-h) farkının buharlaşan nemin δ_E kompozisyonum» oluşturduğu kabul edilmiştir. Böylelikle aşağıdaki denklemler grubu sistemin farklı sistemleri için ağır izotop oluşumunu açıklayacaktır.

$n=1$ sistemi için;

$$\delta_L^{SS} = \frac{(1-h)(\epsilon^* + C_K)}{[h + (1-h)X]} + \delta_+ \quad (8)$$

$$\delta_E = \frac{[\delta_L^{SS} - h\delta_a^{(1)} - \epsilon^* - (1-h)C_K]}{(1-h)} \quad (9)$$

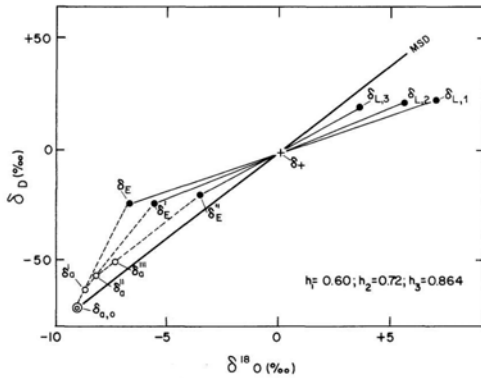
n' inci sistemi için giriş değeri (önceki gibi):
 $\delta_+ = \delta_a^{(1)} + \varepsilon^*$ ve atmosferik nem;

$$\delta_a^{(n)} = \frac{1}{b} \delta_a^{(n-1)} + \left(1 - \frac{1}{b}\right) \delta_E^{(n-1)} \quad (10)$$

$$h^{(n)} = b_n h^{(n-1)} \quad (11)$$

$$\delta_L^{SS} = \frac{h^{(n)}(\delta_a^{(n)} + \varepsilon^* + (1-h^{(n)})C_K) + \delta_+}{h^{(n)} + (1-h^{(n)})X_n} \quad (12)$$

$X=2$ ve $b=1.2$ durumu için çözümler Şekil 4'deki $\delta D - \delta^{18}O$ diyagramında gösterilmiştir. Bu durumda kontrol parametresinin nem oranı olacağı açıktır; çünkü nem oranı artarken buharlaşan sistemde ağır izotop oluşumu azalır. Bununla beraber en ilginç konu, atmosferik nemin döteryum fazlalığı değerindeki artıştır (Dansgaard, (1964) tarafından tanımlan "d" $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ eşitliği ile tarif edilir), "d" döteryum fazlalığı başlangıç da artar ($n=2, 3$ sistemleri için binde 8 kadar) fakat daha sonra değerini tersine çevirir ve $h \rightarrow 1$ sınır değerinde ilk meteorik su doğrusuna geri döner.



Şekil 4. $X=2$ ve $b=1.2$ için A modeli şemasına göre buharlaşma akısı (δ_E) tarafından oluşturulan atmosferik nemlilik ile, tamamı aynı giriş suyundan (δ_+) beslenen bir grup göller için ardışık $n=1...3$, buharlaşma sistemleri içindeki kararlı-durum izotopik değerlerinin $\delta D - \delta^{18}O$ bağıntısı.

Atmosferik rezervuarın "d" değerindeki ilk artışın giriş akısının

buharlaşımaya oranı yani X değerine ters orantılı olduğuna dikkat edilmelidir. Büyük bir F_x/E oran ile baştan başa bir akım sistemi için buharlaşan nemin "d" değeri en büyüktür. Bu arada alt sınır değeri $X \rightarrow 1$ olurken (terminal bir göl sisteminde) yeniden buharlaşan nemin izotopik kompozisyonu MDS üzerinde yer alır; böylelikle doğal olarak (kararlı durumda) $\delta_E = \delta_+$ olur.

Her bir ardışık sistem için buharlaşma doğrusunun eğimi artar, yine bu olayda da hakim parametre artan nem oranıdır.

Atmosferik/giriş denge sistemleri:

Şekil 1 model B, herhangi bir mansap buharlaşma sistemine girişin yerel (daha yüksek) nem ile izotopik dengede olması gerçeğe daha yakın bir modeli göstermektedir. Bu model iki değişken içinde düşünülebilir. Bunlardan birincisi $n=1$ den n sistemine kadar devamlı olarak bir nem oluşumu; ikincisi ise, ilave olan nemin tekrar yağışından dolayı oldukça sabit bir nem oranı oluşmasıdır. Son anlatılan durumda tekrar meydana gelen yağış bir Rayleigh kanununa göre izotopik kompozisyonun değişeceğini varsaymak doğaldır. Bu modelde her bir buharlaşma sistemine giriş atmosferik sularla dengede olduğu için S_r/n 'in matematiksel olarak ifadesi ilk modelden çok daha basit olacaktır (Tablo 1., Gat, (1991)).

Aşağıdaki ifadeler bu modelin iki değişkeni için izotopik kompozisyon ile ilgili bağıntılardır. Her iki durumda da ilk sistemin ($n=1$) içerisindeki δ_L^{SS} , δ_E , ve δ_a için verilen denklemler yukarıda verilen A modeli ile aynıdır. Mansap da oluşturulan bir durum için, $h^{(n)} = b h^{(n-1)}$ olur ve serilerin içerisindeki "n" sistemine aşağıdaki eşitlikler uygulanır:

Atmosferik giriş;

Sıvı girişi;

$$\delta_+^{(n)} = \delta_a^{(n)} + \varepsilon^*$$

$$\delta_a^{(n)} = \frac{1}{b} \delta_a^{(n-1)} + \left(1 - \frac{1}{b}\right) \delta_E^{(n-1)}; h^{(n)} = bh^{(n-1)}$$

Atmosferik girişi;

$$\delta_a^{(n)} = \frac{1}{b} \delta_a^{(n-1)} + \left(1 - \frac{1}{b}\right) \delta_E^{(n-1)} + \varepsilon^* \ln\left(\frac{1}{b}\right); h^{(n)} = h$$

$$\delta_{L,SS}^{(n)} = \frac{(1-h^{(n)})(\varepsilon^* + C_K)}{h^{(n)} + (1-h^{(n)})X_n} + \delta_+^{(n)} \quad (13)$$

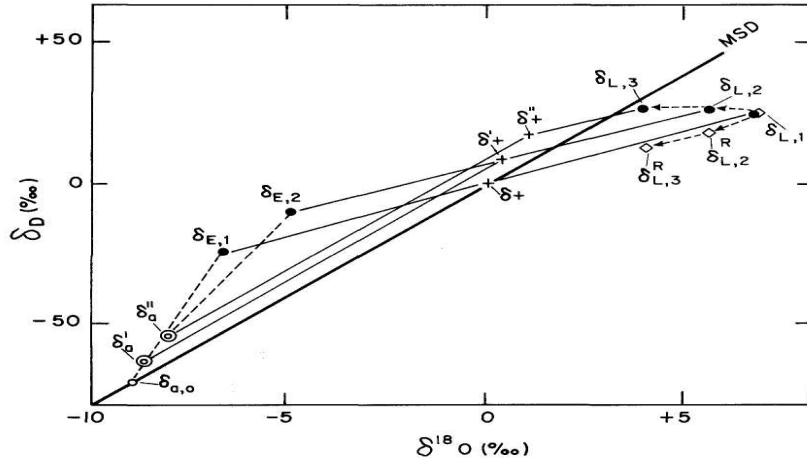
Sıvı girişi;

$$\delta_+^{(n)} = \delta_a^{(n)} + \varepsilon^*$$

$$\delta_E^{(n)} = \frac{\delta_{L,SS}^{(n)} - h^{(n)} \delta_a^{(n)} - \varepsilon}{(1-h^{(n)})} \quad (14)$$

Bu iki durum için parametrelerin sadece $X=2$ ve $b=1.2$ olması haline ait veriler Şekil 5'de gösterilmiştir. A modeli ile karşılaştırıldığında "d" fazlalığı oluşumunun daha büyük olduğuna dikkat edilmelidir. Bunun nedeni δ_+ girişi teriminin yüksek bir "d" değeri ile karakterize edilmesidir. Denge sistemleri oluşumunda buharlaşma doğrusunun eğimi Denklem 7a ile tutulur ve nemliliğin bir fonksiyonu olarak değişmez.

Yağış esnasında nemin sabit olduğu durumda atmosferik giriş için eşitlik değişir (bir Rayleigh formülüne göre).



Şekil 5. Bir atmosferik geri-beslenme boyunca bağlantılı olan ve sıvı girişi ($\delta_{+,n}$) ile atmosferik nem ($\delta_{a,n}$) arasında izotopik dengede bulunan buharlaşan sistemler için izotopik bağlantı. Noktalar $X=F_+/E=2$ için $h_{(1)}=0.6$, $h_{(2)}=0.72$, $h_{(3)}=0.864$ (bu demek ki $b=1.2$) gibi artan bir nem oranı ile BI modeline karşılık gelmektedir. Baklava biçimindeki semboller ise $h=0.6$ sabit nemlilikte "Rayleigh" yağışına sahip sistemi göstermektedir (model B2).

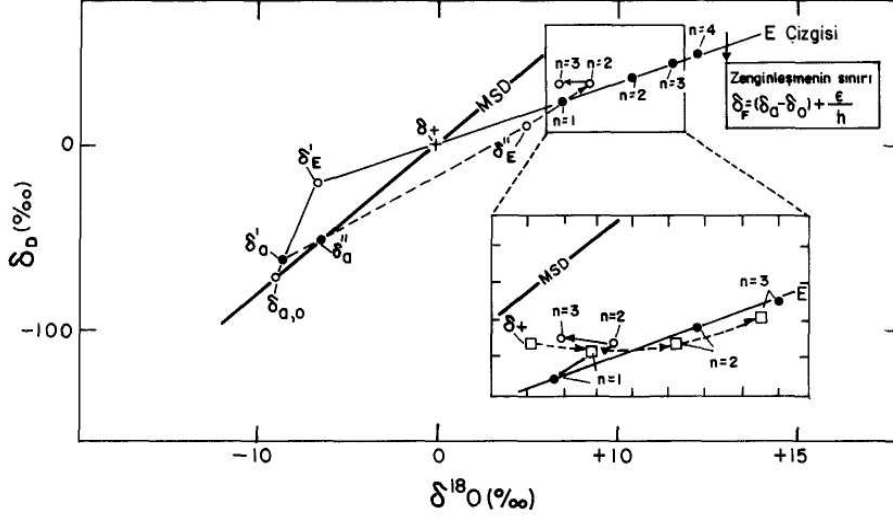
Tamamen bağlantılı sistemler:

Bir "göller dizisi" boyunca nehir akışına paralel olarak nem oluşumunun etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Atmosferik bir katkı olmaksızın, sistem karşılaştırılmasında nem katkısının (δ_a değerinin değişiminde daha az bir genişleme ile) mansap sistemleri içindeki ağır izotop zenginleşmesini sınırlayacak

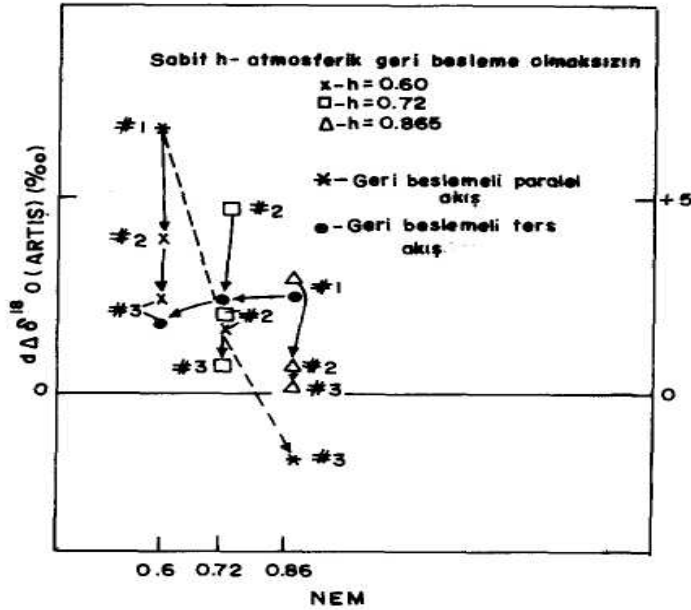
olması doğaldır. Hakikatten δ_{18} değerinin artma eğilimindeki geriye dönüş dikkat çekicidir. Buna karşın, hava ve yüzey suyu kaynaklarının ters bir şekilde işlediği durumda (Amazon havzasındaki gibi; Gat ve Matsui, 1991), nihai ağır izotop zenginleşmesi geri beslemesi olmayan göller zincirinin ağır izotop değerine yaklaşıp. Akış sisteminin son safhası olan nemin daha az olduğu yerlerde ağır izotop

zenginleşmesi daha fazla artmakla birlikte, bu işlem tersine dönmektedir, Şekil 7. Bu son durum bir kez daha, bu tür buharlaşan sistemlerdeki ağır izotop

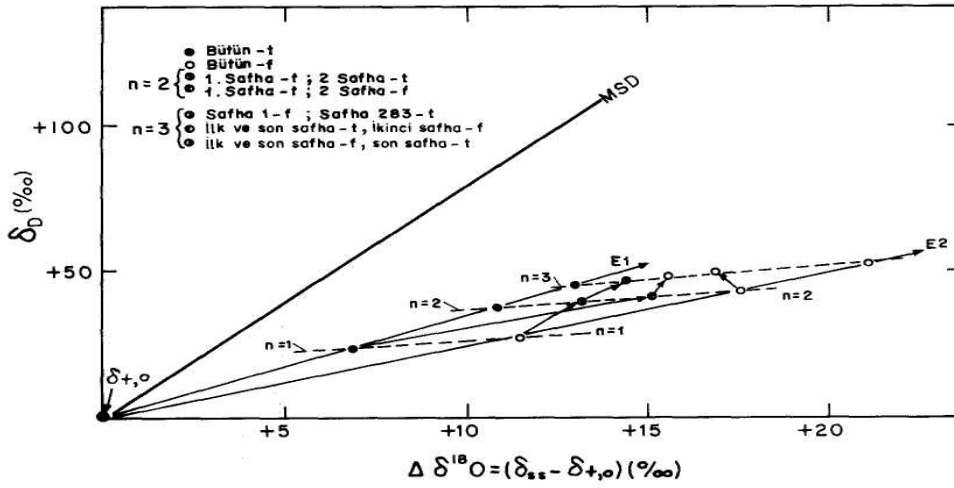
zenginleşme derecesinde, nemin büyük önem taşıdığını göstermiştir.



Şekil 6. $X=2$, $h_{ilk}=0.6$ kabul edilerek ve atmosferik su buhan ($\delta_{a,0}$) ile izotop dengede bulunan ilk giriş akımı (δ_+) ile bir göller dizisi boyunca kararlı-durum ağır izotop zenginleşmesi. İçerideki dolu noktalar: C modeli için δ_{SS} değerleri (nem oluşmaksızın). İçerideki boş noktalar: $b=1.2$ için buharlaşma akısından dolayı nem oluşumu ile D_1 modeli için δ_{SS} değerleri. İçerideki boş kareler geri-dönüşüm ters akım sistemi (model D_2) için δ_{SS} değerleri (sadece alt köşedeki şekilde gösterilmiştir).



Şekil 7. Paralel ve ters hava akımı ile giriş akısının, nemliliğin bir fonksiyonu olduğu durandaki bir göller dizisi boyunca giderek artan izotop zenginleşme.



Şekil 8. Farklı buharlaşma mekanizmaları ile buharlaşma sistemlerinin bir seri boyunca ağır izotop zenginleşmesi; Bu bir türbülans(t) veya tamamen gelişmiş(f) sınır tabakası demektir. 1. Çizgi(içi dolu noktalı) açık su yüzeyi sistemleri(t) için buharlaşma doğrusu; 2. Çizgi(içi boş noktalı) dağınık bir(f) sınır tabakalı sistemler için buharlaşma doğrusudur. Merkezi çizgilerin n=1...3, buharlaşma serilerinin ardı ardına gelen adımlarını göstermektedir.

Kurak yörelerdeki buharlaşan sistemler hakkında görüşler:

Suyun ağır izotop türlerinin yüksek derecede zenginleşmesi daha ziyade kuru ve sıcak iklimlere has bir olaydır. Kurak bölgelerde yüksek atmosferik nem seviyeleri oluşmayacağından buharlaşma hidrolojik çevrimin her bir halkasında büyük rol oynayabilir. Hakikatten kurak yörelerde; çöldeki arta kalan yüzey suları (Fontes ve Gonfiantini, 1967) veya kurak bölge bitkileri meyve ve yapraklarının içindeki sularda olduğu gibi izotopik bakımdan çok ağır sular gözlenmiştir (Nissenbaum ve diğerleri, 1974). Bu sistemler yakından incelendiği zaman, bunların bir seri zincirleme buharlaşan sistemleri temsil ettiği ortaya çıkar. Örneğin bitkilerin içerisinde izotopik bakımdan çok ağır su bulunması durumu; yağmur damlalarının yere düşmesi esnasında yüzeyde ve toprak sütunu içinde, sulama işlemleri esnasında(yağmurlama, püskürtme veya taşan su kanalları) ve son olarak da gözenekli ortamlarda buharlaşma olayı ile terleme işlemleri esnasında birbirini takiben oluşan buharlaşma safhaları nedeniyle meydana geldiği söylenebilir. Toprak sütunu içerisinde ve bitki yapraklardan buharlaşma olarak adlandırılan bu aşamaların ikisi (Alliso ve diğerlerinin, 1983 tarafından tarif edildiği gibi) "tam gelişmiş sınır tabakası" boyunca döteryuma nazaran ^{18}O zenginleşmesi yönünde oluşur.

Genel bir kural olarak, hidrolojik çevrim boyunca olağan bir ağır izotop zenginleşmesi gözlenebilir. Aynı zamanda kurak iklim koşullarında bile izotopik

bakımdan zenginleşme olayının tersi de gözlenebilir. En çok rastlanan olay tuzluluğun oluşumu ile ilgili olanıdır. Böyle bir durumda buharlaşan suyun üzerindeki doymuş buhar basıncında tuz etkisinden dolayı nemlilik görünür bir şekilde artar. Bu etki daha önce Gonfiantini, 1965, Gat, 1979 ve diğerleri tarafından incelenmiştir. Aşırı derecede pozitif δ değerlerinin beklendiği Ölü deniz gibi terminal bir buharlaşan sistemde gözlenen nispeten düşük ağır izotop zenginleşmesi bu etkiye bir örnek olarak gösterilmektedir (Gat,1984). Ağır izotop zenginleşmesinin tersinin gözlendiği diğer bir olay; akış yolu boyunca buharlaşma mekanizmasının değiştiği durumdur. Bu demek ki Şekil 8'de gösterildiği gibi tamamen gelişmiş bir sınır tabakasında bir buharlaşma safhası açık bir su yüzeyinden oluşan buharlaşmadan önce gelir.

SONUÇ:

Zincirleme göl ve buharlaşma sistemleri için olası senaryolar çok olmakla birlikte böyle bağlantılı sistemlerde ağır izotop zenginleşmesinin atmosferik geri-besleme halkası tarafından şiddetli bir şekilde zorlandığı ortaya konulmuştur. Buharlaşma olayının hidrolojik oluşumuna ek olarak izotopik bakımdan ağır izotop zenginleşme derecesini kontrol eden başlıca parametre nemliliktir. Bu nedenle, buharlaşma izotopik bakımdan zenginleşmenin ikinci bir ölçüsüdür. Herhangi bir durumda (lb) eşitliği ile belirlenen izotopik bakımdan zenginleşme değeri nihai bir sınır olarak kalır.