



T.C.
BAYINDIRLIK ve İSKÂN BAKANLIĞI
AFET İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
DEPREM ARAŞTIRMA DAİRESİ

DEPREM ARAŞTIRMA BÜLTENİ

37



Deprem Araştırma Bülteni (DAB)

*Bulletin of Earthquake Research
(Bull. Earthq. Res.)*



Nisan [April] / 1982
Cilt [Volume]: 9

Sayı [Issue]: 37

İÇİNDEKİLER [INDEX]

Sayfa [Page]

ARAŞTIRMA [RESEARCH]

Kaynak Parametrelerine Göre Kuzey Anadolu Fay Zonunda Faylanma
Dinamiğinin İncelenmesi [Investigation of Faulting Dynamics in the
North Anatolian Fault Zone According to Source Parameters]

Ülben EZEN, Cemil GÜRBÜZ 5-20

ARAŞTIRMA [RESEARCH]

Kumlu Zemin Tabakalarında Sıvılaşma [Liquefaction in Sandy Soil
Layers]

Atilla M. ANSAL 21-102

FERİT KURBAN
İng. Arş. B.

DEPREM ARAŞTIRMA BÜLTENİ

37

**DEPREM
ARAŞTIRMA
BÜLTENİ**

37

**DEPREM ARAŞTIRMA
BÜLTENİ**



Üç Ayda Bir Yayınlanır
Bilim ve Meslek Dergisi



Sahibi

İmar ve İskân Bakanlığı adına
Oktay Ergünay
Deprem Araştırma Dairesi Başkanı



Yazı İŞleri Müdürü

Erol Aytaç
Deprem Araştırma Dairesi
Yayın ve Dökümantasyon Müdür V.



Yönetim Yeri ve YazıŐma Adresi

Deprem Araştırma Dairesi
BaŐkanlıđı Yüksel Caddesi No. : 7/B



YeniŐehir/ANKARA



Telefon : 13 97 77 — 17 69 55



İlanlar Pazarlığa Tabidir



Saydam Matbaacılık Tel : 18 53 09

DEPREM ARAŞTIRMA BÜLTENİ

YIL : 9

SAYI : 37

NİSAN : 1982

BU SAYIDA

Kaynak Parametrelerine göre Kuzey Anadolu Fay Zonunda Faylanma Dinamiğinin İncelenmesi

Dr. Ülben EZEN
Dr. Cemil GÜRBÜZ

Kumlu Zemin Tabakalarında Sıvılaşma

Doç. Dr. Atilla M. ANSAL

KAYNAK PARAMETRELERİNE GÖRE KUZEY ANADOLU FAY ZONUNDA FAYLANMA DİNAMİĞİNİN İNCELENMESİ

Dr. Ülben EZEN*
Dr. Cemil GÜRBÜZ*

ABSTRACT

Field observations indicate that the amount of displacement occurred on the earth surface as a result of large earthquakes increases linearly with the fault length (L) and does not correlate with fault width (W)

These observations can be interpreted in the light of two possible classes of models that are W and L for large earthquakes. From the point of source parameters, at the dynamics of faulting for the W model, stress drop ($\Delta\sigma$) and seismic moment (M_0) increase linearly with L/W ratio and LW^2 term respectively. On the other hand, at the dynamics of faulting for the L model, stress drop is more or less constant and seismic moment increases linearly with L^2W term.

An acceptable model of the dynamics of faulting was investigated by interpreting the source parameters of seven large earthquakes ($6 \leq M_s \leq 8$) occurred along the North Anatolian Fault zone between 1939 - 1967 in the light of above mentioned empirical relations.

After interpretation of the source parameters which were calculated from the field observations of seven large earthquakes, it was concluded that an effective dynamics of faulting model at the North Anatolian Fault zone can only be explained by the W model.

The above mentioned dynamics of faulting indicates that fault is pinned at the base and is unrestrained at the surface. Therefore, this

* İ.T.Ü. Maden Fakültesi Jeofizik Bölümü

* İ.T.Ü. Maden Fakültesi Jeofizik Bölümü

causes maximum displacement and ruptures on the surface. In this type of faulting model rupturing starts from top to bottom and healing originates from the base of the fault.

ÖZET

Arazide yapılan gözlemler, büyük depremlerin yeryüzünde oluşturdukları yerdeğiştirme (kayma) miktarının; fayın boyu (L) ile doğru orantılı olarak arttığı buna karşılık fayın derinliği (W) ile bir korelasyonu bulunmadığı görünümünü vurgulamaktadır.

Bu görünüm büyük depremlerin faylanma dinamiğinin L ve W türünde iki ayrı modelle açıklanabileceği fikrini doğurmuştur. Kaynak parametreleri yönünden W modeli faylanma dinamiğinde; gerilme düşümü ($\Delta\sigma$) L/W oranı ile, sismik moment (M_0) LW^2 terimi ile doğrusal artmaktadır.

Diğer yandan L modeli faylanma dinamiğinde; gerilme-düşümü aşağı yukarı sabit kalmakta ve sismik moment bu kez L^2W terimi ile doğrusal artmaktadır. 1939-1967 döneminde Kuzey Anadolu Fay zonunda oluşmuş 7 büyük depremin ($6 \leq M_s \leq 8$) kaynak parametreleri bu ampirik ilişkiler yönünden irdelenerek etkin faylanma dinamiği modeli araştırılmıştır.

Deprem sonrası saha gözlemlerinden yararlanarak hesaplanan kaynak parametrelerinin bu tür irdelenmesi sonucu, Kuzey Anadolu Fay zonunda etkin faylanma dinamiği modelinin W türü modele çok benzediği saptanmıştır. Söz konusu faylanma dinamiği, fay bloklarının tabanda sabit, serbest yüzeyde oynaklığını içermekte dolayısıyla yüzeyde maksimum yerdeğiştirme (kayma) ve yırtılmalara neden olmaktadır.

W modeli faylanma dinamiğinde, faylanma esnasında kayma hareketi tabanda sıfır olacak şekilde yüzeyden derinlere doğrudur ve kırıkların kapanma işlemi tabandan yüzeye doğru gelişmektedir.

GİRİŞ :

Deprem sismolojisinde önemli problemlerden biride statik kaynak parametrelerinin fayın yırtılması ile olan ilişkilerine dinamik açıdan da özdeş bir yorum getirebilmektedir. Böyle bir yorumda kullanılacak temel kaynak parametreleri; yerdeğiştirme (displacement), gerilme-düşümü (stress-drop), fayın boyutları ve yırtılma hızıdır. Burada önemli olan küçük ve büyük depremleri bu yönden sınıflayabilmektir.

Günümüzde bu türden bir sınıflama kaynağın boyutlarına dayanarak yapılmaktadır. Örneğin W_0 derinliğinde r yarıçapında dairesel bir kırığın oluşturacağı deprem eğer $r \leq W_0/2$ koşulunu sağlıyorsa küçük deprem, $r > W_0/2$ koşulunu sağlıyorsa büyük deprem olarak kabul edilmektedir. Böyle bir kabul ise, küçük depremlerin dairesel bir kırık modeli, büyük depremlerin ise bir kenarı serbest yeryüzü olan dikdörtgensel bir kırık modeli ile simgelenebileceği düşüncesini doğurmuştur (Scholz 1982).

Bu düşünce aslında doğrudan doğruya deprem oluşumundaki faylanma dinamiğinin belirlenmesini, diğer bir deyişle statik ve dinamik kaynak parametrelerinin davranışına göre faydalanma dinamiği modelinin çıkarılmasını sağlayacaktır. Aki (1972), Thatcher & Hanks (1973) ve Hanks (1977) küçük depremler için gerilme-düşümü değerlerinin sabit ve kırığın boyutlarından bağımsız olduğunu göstermişlerdir. Bu sonuç; Madariaga (1976), Archuleta (1976), Das (1980) tarafından küçük depremler için geliştirilen sonlu dairesel kırık biçiminde bir faylanma modeli ile yorumlanabilmiştir. Bu yorum beraberinde basit olarak dinamik gerilme-düşümünün de küçük depremler için sabit kaldığı anlamını getirmiştir.

Eğer dinamik gerilme-düşümü değerleri büyük depremler içinde sabit kalıyorsa, kabul edilen dikdörtgensel kırık türündeki faylanma dinamiği modeli gereğince yüzeyde oluşacak yerdeğiştirme, fay düzlemi derinliğinin (W) doğrusal fonksiyonu olacaktır (Day 1979, Archuleta & Day 1980, Das 1981). Nevarki bugüne kadar gözlemlerden edinilen sonuçlar bu tahmini doğrulayamamıştır. Dolayısıyla kuramsal beklentiyi gerçekleştiremeyen gözlemsel sonuçlar, büyük depremlerin faylanma dinamiğinin sanıldığından dahada karışık bir modeli

içerdiği görüşüne ağırlık ve haklılık kazandırmıştır. Bu nedenle büyük depremlerin faylanma dinamiğinin modellenmesi kaynak parametreleri açısından tekrar tekrar incelenmeye çalışılmıştır.

Bu konuda gözlemsel verilere dayalı bir çalışma Scholz (1982) dan gelmiştir. Scholz (1982) yerdeğiştirme miktarı, gerilme-düşümü ve sismik moment gibi kaynak parametrelerinin; fay düzleminin boyu (L) ve derinliği (W) ile olan ilişkilerine göre iki tür faylanma dinamiği modeli geliştirmiştir. Scholz (1982) un büyük depremler için geliştirdiği bu modellerden biri derinlik (W) ve diğeri uzunluk (L) modelidir.

W modeline göre; gerilme-düşümü ($\Delta\sigma$) L/W oranı ile, sismik moment (M_0) LW^2 terimi ile doğrusal artmaktadır ve yerdeğiştirme miktarı ile gerilme-düşümü fayın W derinliğinden saptanabilir. Buna karşılık L uzunluk modelinde; gerilme-düşümünün sabit kaldığı ve sismik momentin L^2W terimi ile doğrusal arttığı kabul edilmektedir. Ayrıca W modelinde kısa bir yükseliş zamanı (rise time) içinde sabit bir kaynak-zaman fonksiyonu öngörülürken, L modelinde nisbeten daha uzun bir yükseliş zamanı içinde doğrusal bir kaynak-zaman fonksiyonu öngörülmektedir.

İşte bu çalışmada büyük depremler için geliştirilen bu iki faylanma dinamiği modeli, Kuzey Anadolu Fay zonunda oluşan büyük depremlere uyarlanmaya çalışılmıştır. İncelediğimiz depremlerin ilgili kaynak parametreleri her iki model açısından irdelenip en uygun faylanma dinamiği modelinin seçimi yapılmıştır.

«L» ve «W» Modellerinin Fiziksel Tanımı :

Her iki faylanma dinamiği modelinde de düşünülen kırığın geometrisi L uzunluğunda ve W eninde dikdörtgensel bir fay düzlemidir. Bu fay düzlemi, depremi oluşturan faylanmayı karakterize eden fay bloklarının arakesit yüzeyidir.

W modeli bir faylanma dinamiği düşünüldüğünde, fay blokları tabanda birbirine kenetlenmiş eş deyişle perçinlenmiş kabul edilmektedir. Buna karşılık serbest yüzeyde fay bloklarının rahat hareket edecekleri (oynak) varsayılmaktadır. Böyle bir varsayım göre faylanmayı oluşturan kayma hareketi tabanda sıfır olacak şekilde, yüzeyden derinlere (tabana) doğru bir yarılmayı doğuracaktır. Diğer deyişle kayma serbest yüzeyde en büyük değerine erişerek maksimum düzeyde bir yırtılma uzunluğuna ve yerdeğiştirmeye neden olacaktır.

W modelinde fay bloklarının tabanda perçinli kabul edilişi dikdörtgensel kırığın W derinliğinin sabit kalması demektir. Ancak serbest yüzeydeki oynaklıktan ötürü oluşacak kırığın boyu değişken bir karakter kazanacağından L/W oranında sabit kalmayıp devamlı değişecektir. Bundan ötürüdür ki W faylanma dinamiği modeline uyarlanan depremlerde gerilme-düşümü değerleri ile L/W oranı arasında ki doğrusal ilişki gözden geçirilmektedir. Ayrıca W modeli faylanmada depremin ardından kırıkların kapanması işlevi dikdörtgensel kırığın bütün kenarları boyunca ve tabandan yüzeye doğru bir süregelişi simgelemektedir (Day 1979).

Buna karşılık L modeli faylanma dinamiği düşünüldüğünde, fay blokları hem tabanda hem tavanda (yüzeyde) hareketli (oynak) kabul edilmektedir. Ancak kayma hareketi W modelinin aksine tabanda maksimum düzeyde gelişmektedir. Böylece serbest yüzeye ulaşan kayma miktarı tabandaki mevcut kayma miktarından daha az olacaktır. Eş deyişle yeryüzündeki kayma, sonsuz derinlikteki fayın yüzeyindeki dinamik bir açılımını yansıtmış olmaktadır. Ayrıca bu tür modelde kırıkların kapanması işlevi sadece kırığın kenarlarının uç noktalarında tavandan tabana doğru bir süregelişi simgelemektedir (Day 1979).

Dinamiğini veya kinematiğini açıklamaya çalıştığımız bu iki faylanma dinamiği modeli Şekil 1 A ve B de şematik olarak görülmektedir.

Elâstik davranış yönünden W modeli elâstik bir model, L modeli ise anelâstik bir model olarak yorumlanmaktadır (Scholz 1982).

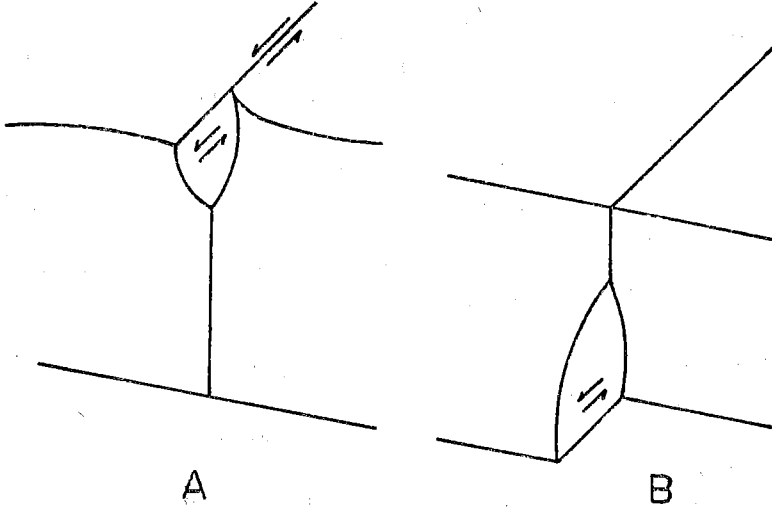
Kaynak Parametrelerine Göre W ve L Modellerinin Tanımı :

Kaynak parametrelerine göre W ve L modellerini irdelerken ilgileneceğimiz parametreler gerilme-düşümü ($\Delta\sigma$), yerdeğiştirme (\bar{U}), sismik moment (M_0) ile dikdörtgensel kırığın L boyu ve W derinliği (genişliği) dir.

W modelinde gerilme-düşümü $\Delta\sigma$ fayın (W) genişliği ile orantılı olarak

$$\Delta\sigma = C\mu \frac{\bar{U}}{W} \quad (1)$$

verilebilir (Scholz 1982). Burada μ rijidite modülü ($3.3 \cdot 10^{11}$ CGS), \bar{U} ortalama yerdeğiştirme (cm) ve C geometrik bir katsayıdır. $L > 2W$



Şekil 1. Şekil 1 (A) daki W modeli faylanmada, faylanma süresince gelişen kayma fay bloklarının tabanında sıfır serbest yüzeyde maksimumdur. Buna karşılık 1 (B) de görülen L modeli faylanmada, kayma hareketi serbest yüzeye oranla fay bloğunun tabanında maksimum düzeydedir. Aslında 1 (B), L modeli bir faylanmayı oluşturacak deprem öncesi bir durumu simgeleyen şekildir. Zira deprem oluşunca tabandaki mevcut maksimum kaymanın bir miktarı kendini, serbest yüzeyde dinamik bir açılım şeklinde gösterecektir (Scholz 1982).

koşulunda C sabite yakın bir değer kabul edilmektedir (Sykes & Quittmeyer 1981). Öte yandan sismik moment (M_0),

$$M_0 = \mu \bar{U} L M \quad (2)$$

olduğuna göre (Aki 1966, 1972) (1) bağıntısını M_0 cinsinden yazmaya çalışırsak

$$M_0 = \frac{\Delta \sigma}{C} L W^2 \quad (3)$$

elde edilir (Scholz 1982). Yine Scholz (1982) W modeli faylanma dinamiğinde yerdeğiştirmeyi fayın boyu ile orantılı düşünerek,

$$\bar{U} = \alpha L \quad (4)$$

şeklinde bir doğrusal bağıntı ile vermekte ve orantı sabitini doğrultu atımlı faylarda $\alpha = 1.25 \cdot 10^{-5}$ bindirme türünden faylarda $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ olduğunu belirtmektedir. Öte yandan yerdeğiştirmenin (\bar{U}) (4) teki değeri (1) bağıntısında yerine konduğunda gerilme-düşümü $\Delta\sigma$ değeri ile L/W oranı arasında

$$\Delta\sigma = C_{\mu\alpha} \frac{L}{W} \quad (5)$$

bağıntısı elde edilmiş olur.

Öz olarak buraya değin verdiğimiz bütün ampirik bağıntılar W modeli faylanma dinamiğine sahip büyük depremlerdeki kaynak parametrelerinin kaynak boyutları (L, W) ile olan ilişkilerini simgelemektedir.

Öte yandan L modeli faylanma dinamiği gösteren büyük depremlerde yerdeğiştirme U , dinamik gerilme-düşümü $\Delta\sigma_d$ ve L fay boyu arasındaki ilişkiyi Scholz (1982),

$$\bar{U} = \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_d}{\mu} \right) L \quad (6)$$

bağıntısıyla vermektedir. (6) bağıntısından görüleceği gibi bu modeldeki yerdeğiştirme, dinamik gerilme-düşümü terimi ile orantılı olarak L fay boyunun fonksiyonudur. L modeli için sismik moment (M_0) bulunmak istenirse, (2) bağıntısından yararlanıp (6) bağıntı tekrar gözden geçirilirse,

$$\bar{U} = \frac{M_0}{\mu LW} = \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_d}{\mu} \right) L \quad (7)$$

ve

$$M_0 = \frac{1}{2} \Delta\sigma_d L^2 W \quad (8)$$

bağıntısı elde edilecektir. (8) bağıntısından görüldüğü gibi L modelinde sismik moment (M_0) W modelindeki LW^2 teriminin aksine L^2W teriminin doğrusal bir fonksiyonudur. Sonuç olarak (6) ve (8) bağıntılarının, L modeli faylanma dinamiği ile açıklanacak faylanma mekanizmasına sahip büyük depremlerin kaynak parametrelerince sağlanması gerekmektedir.

İşte bu çalışmada her iki modele göre, yukarıda ampirik ilişkileri verilen kaynak parametrelerinin; Kuzey Anadolu Fay zonunda oluşmuş büyük depremler için hesaplanmış değerleri irdelenerek, etkin faylanma dinamiği modeli saptanmaya çalışılmıştır.

Verilerin Analizi :

Bu araştırmada veri olarak 1939-1967 döneminde Kuzey Anadolu Fay zonunda oluşmuş ve tümü doğrultu atımlı faylanma gösteren 7 büyük depremin arazide gözlenmiş L fay boyları ve maksimum yanal (U_{max}) yerdeğiştirme miktarları kullanılmıştır. Hesaplamalarda bütün depremler için fay düzlemi derinliği $W = 15$ km kabul edilmiştir.

Çizelge 1 de sozunu ettiğimiz bu U_{max} , L ve W değerleri görülmektedir (Dewey 1976). İlk aşamada izelge 1 deki U_{max} , L ve W değerleri kullanılarak ve (2) bağıntısı yardımıyla M_o sismik momentler hesaplanmıştır. Bu hesaplamada ortalama yerdeğiştirme $U = 0.75 * U_{max}$ alınmıştır (Brune & Allen 1967)

Hesaplanan sismik moment değerleri izelge 1 de sütun 8 de verilmiştir. Bundan sonradır ki, çizelgede 1 deki değerlerin kullanılmasıyla Kuzey Anadolu depremleri W ve L modelleri yönünden yorumlanabilmiştir. Bu yorumlamada önce W modeli ele alınmış ve bu model için (1), (3) ve (5) bağıntıları yardımıyla kaynak parametrelerinin davranışı incelenmiştir. W modeli açısından yorumlama yaparken ilk adımda (2) bağıntısı ile bulunan sismik moment (M_o) değerleri LW^2 teriminin fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 2 de (3) bağıntısı ile ampirik ilişkileri verilen M_o ve LW^2 teriminin Kuzey Anadolu Fayı boyuncaki davranışı görülmektedir.

Şekil 2 deki 10,50 ve 100 Barlık sabit gerilme-düşümü eğrileri (3)

$$M_o = \frac{\Delta\sigma}{C} LW^2$$

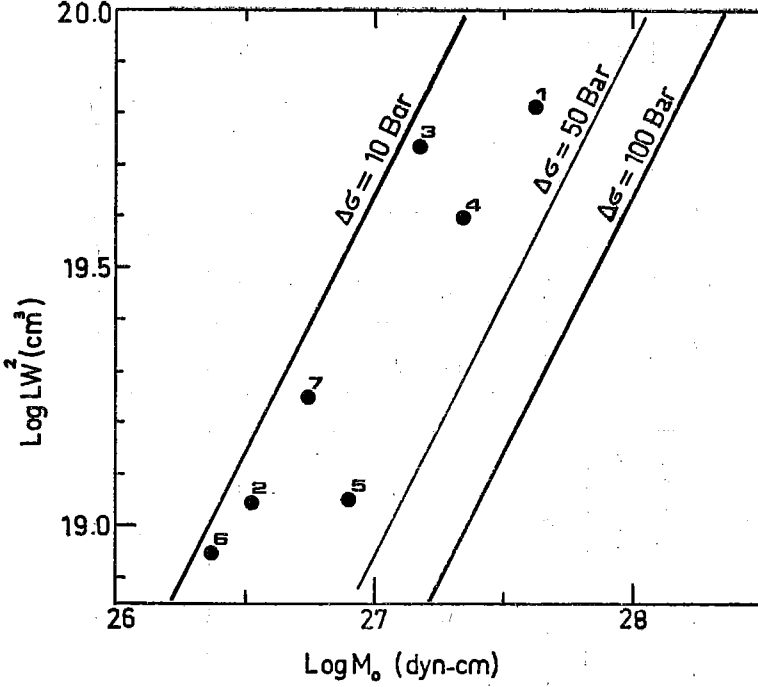
bağıntısında C katsayısı $C = 0.45$ alınarak ve gerilme-düşümü ($\Delta\sigma$) ne 10,50 ve 100 Bar gibi sabit değerler verilerek, LW^2 nin M_o in fonksiyonu olarak çizilmesinden bulunmuştur. Herhangi bir bağıntı yardımıyla gerilme-düşümü hesaplamadan önce Şekil 2 den şu söylenebilir ki; Gerilme-düşümü değerleri Kuzey Anadolu Fayında 10 ila 50 Bar arasındadır. Kuzey Anadolu Fayında doğrultu atımlı faylanmalar için bulduğumuz $C = 0.45$ değerine ise, Scholz (1982) tarafından dünyadaki tüm doğrultu atımlı faylanma gösteren depremler için bulunmuş $C = 0.3$ değerine yakındır.

Kuzey Anadolu Fayı depremleri için bulunan $C = 0.45$ değerini kullanarak (1) bağıntısı yardımıyla bu kez gerilme-düşümü ($\Delta\sigma$) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler izelge 1 de sütun 11 de verilmiştir. Çizelge 1 den izleneceği gibi gerilme-düşümü

ÇİZELGE 1 :

No	Tarih	M_s	U_{max} (cm)	U_v (cm)	L (km)	W (km)	$M_0 \cdot 10^{27}$ (dyn-cm)	\log LW^2	\log L^2W	$\Delta\sigma$ (Bar)	$\Delta\sigma^*$ (Bar)
1	26.12.1939	8.0	370	200	300	15	4.07	19.82	21.13	24.4	38
2	20.12.1942	7.0	175	50	50	15	0.32	19.05	19.57	13.0	18
3	26.11.1943	7.3	150	100	280	15	1.50	19.79	21.07	11.0	16
4	1. 2.1944	7.3	350	100	180	15	2.29	19.60	20.68	26.0	37
5	18. 3.1953	7.5	430	0	50	15	0.79	19.05	19.57	32.0	45
6	26. 5.1957	7.0	160	40	40	15	0.23	18.95	19.38	12.0	17
7	22. 7.1967	6.9	190	125	80	15	0.56	19.25	19.98	14.0	20

M_s : Yüzey dalgası magnitudü; U_{max} : Maksimum yanıl yerdeğiştirme (cm);
 U_v : Maksimum düşey yerdeğiştirme (cm); L : Fay uzunluğu; W : Fay düzlemi derinliği; M_0 : Sismik moment ve $\Delta\sigma$ gerilme-düşümü değerlerini göstermektedir. M_s , U_{max} , U_v ve L değerleri Dewey (1976) dan alınmıştır. $\Delta\sigma^*$ değerleri Ezen (81) den alınmıştır.



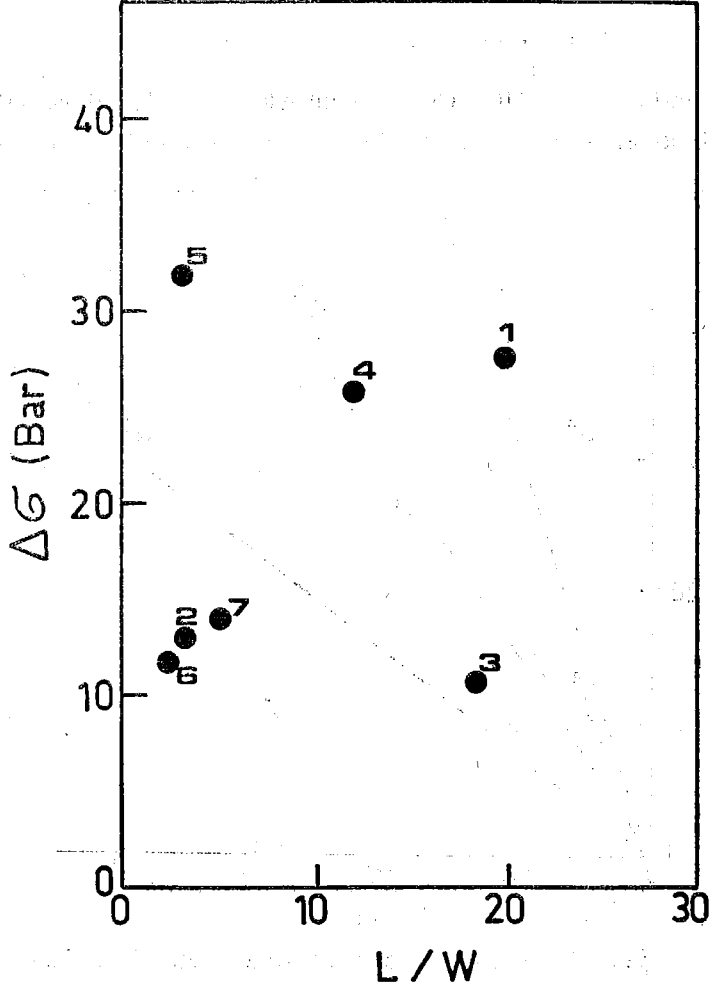
Şekil 2. Kuzey Anadolu Fayında log LW ile log M_0 ilişkisi. Numaralar, Çizelge 1 deki depremlerin sıra No. sudur.

değerleri 10-30 Bar arasında değişmektedir. Bu değerler aynı çizelgede son sütunda verilen Ezen (81) den alınan gerilme-düşümü değerleri ilede yakınlık içindedir.

Kuzey Anadolu Fayı kaynak parametrelerinin W faylanma dinamiği modeli açısından yorumlanmasında ikinci adım hesaplanan gerilme-düşümü değerlerinin L/W oranı arasındaki (5) bağıntısını ne düzeyde sağladığını irdelemek olmuştur. Bu amaçla Çizelge 1 de 11. sütunda verilen gerilme-düşümü değerleri L/W oranını fonksiyonu olarak Şekil 3 te görüldüğü gibi işaretlenmiştir.

Şekil 3 ten görüleceği gibi 3 nolu ve 5 nolu depremlerin dışında diğer depremlerin gerilme-düşümü değerleri L/W oranı ile doğrusal bir artış içinde gözükmektedir. Bu doğrusal dağılım dışında kalan 3 nolu 26.11.1943 Kastamonu depreminde sağ yönlü 150 cm yanıl atım 100 cm lik düşey atım ölçülmüştür (bak çizelge. 1). Dolayısıyla bu deprem diğerlerine oranla tipik doğrultu-atımlı hareket yerine bir oblik hareketi yansıtmaktadır. Öte yandan dağılıma

uygun düşmeyen 5 nolu 18.3.1953 Yenice-Gönen depremi tipik bir doğrultu-atımlı hareket göstermekle beraber, Kuzey Anadolu Fayının en batı ucunda yeralan ve EGE tektonik rejimi içinde kalan bir depremdir. Ayrıca bu deprem için arazide, bugüne kadar hiçbir depremde ölçülemeyen 430 cm gibi en büyük yerdeğiştirme (gerilme-düşümünü doğru orantılı olarak etkiliyor) miktarı ölçülmüştür.



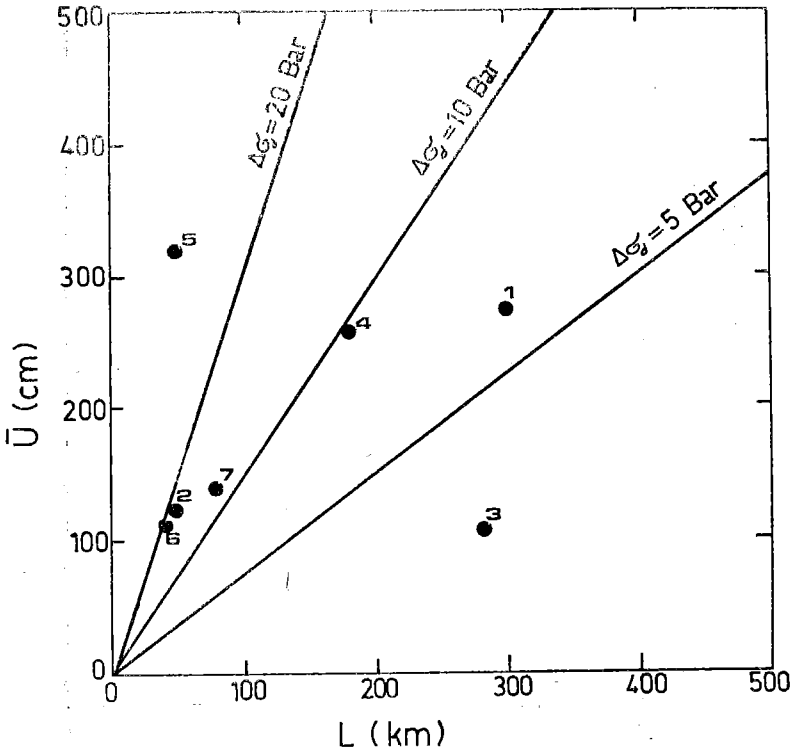
Şekil 3. Kuzey Anadolu Fayında ($\Delta\sigma$) ile L/W oranı ilişkisi. Numaralar, çizelge 1 deki depremlerin sıra No. sudur.

Böylece bu iki deprem sadece ($\Delta\sigma$) ile L/W oranı ilişkisi yönünden diğer deprem verilerine uyumluluk göstermemiş olabilirler.

Öte yandan Kuzey Anadolu Fayındaki kaynak parametreleri L modeli açısından yorumlanmaya çalışılırken (6) ve (8) nolu bağıntılardan hareket edilmiştir. İlk adımda (6) bağıntısı uyarınca $\bar{U}=0.75*U_{max}$ alınarak ortalama yerdeğiştirmeler, L fay boyunun fonksiyonu olarak incelenmiştir Şekil 4 te bu inceleme görülmektedir. Şekildeki $\Delta\sigma_d = 5, 10$ ve 20 Barlık sabit, dinamik gerilme-düşümü eğrileri (6)

$$\bar{U} = \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta\sigma_d}{\mu} \right) L$$

bağıntısında $\mu = 3.3*10^{11}$ CGS ve sırayla $\Delta\sigma_d = 5, 10$ ve 20 Barlık sabit değerler verilerek, \bar{U} , L nin fonksiyonu olarak çizilmiştir.



Şekil 4. L modeline göre Kuzey Anadolu Fayında ortalama yerdeğiştirme (\bar{U}) ile L fay boyu ilişkisi. Numaralar çizelge 1 deki depremlerin sıra No.sudur.

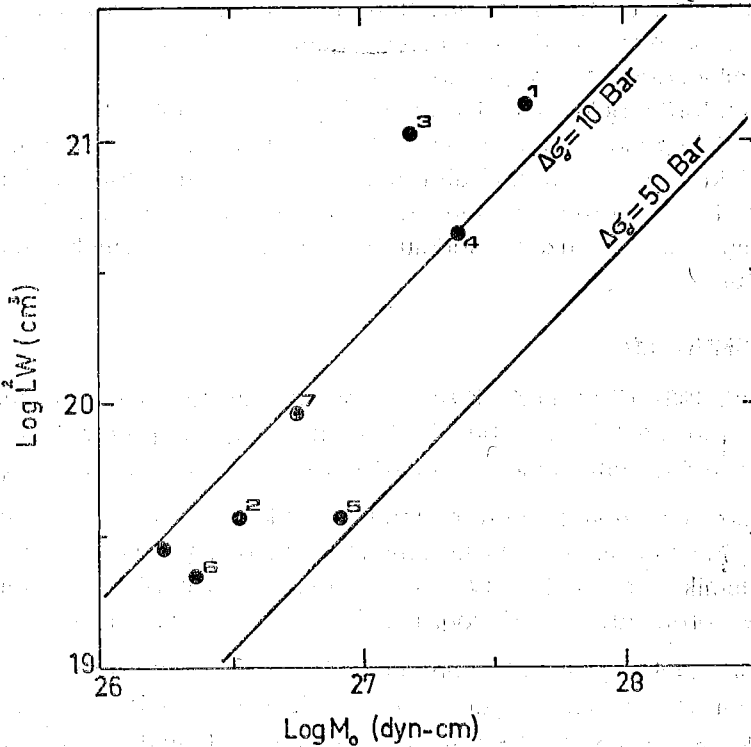
Şekil 4 ten açıkça görülmektedir ki, Çizelge 1 de sunulan (1) bağıntısıyla hesapladığımız ve Ezen (81) tarafından verilen gerilme-düşümü değerleri ile, sabit gerilme-düşümü eğrileri arasında belirgin bir

uyumsuzluk vardır. Zira 1 ve 4 nolu depremler ortalama 30 Barlık gerilme-düşümü değerleri gösterirken (bak çizelge 1) Şekil 4 te 5-10 Barlık alan içinde kalmışlardır. Keza, Çizelge.1 de yaklaşık 10 Barlık bir gerilme-düşümü değerine sahip 3 nolu depremde, şekil. 4 te 5 Barlık gerilme-düşümü eğrisinin hayli altında kalmıştır.

L modeli açısından kaynak parametrelerini irdelerken son adımda (8) nolu bağıntıdan yararlanılmıştır. Bu nedenle önce (2) bağıntısıyla hesaplanmış Çizelge. 1 deki sismik moment (M_0) değerleri bu kez L^2W teriminin fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 5 te M_0 değerlerinin L^2W terimine göre dağılımı görülmektedir. Şekil 5 teki 10 ve 50 Barlık sabit, dinamik gerilme-düşümü eğrileri ise (8)

$$M_0 = \frac{1}{2} \Delta\sigma_d L^2W$$

bağıntısında $\Delta\sigma_d$ ye 10 ve 50 Barlık sabit değerler verilerek M_0 'ın L^2W nin fonksiyonu olarak çiziminden elde edilmiştir.



Şekil 5. L modeline göre Kuzey Anadolu Fayında log L^2W ile log M_0 ilişkisi. Numaralar, çizelge 1 deki depremlerin sıra No. sudur.

Şekil. 5 te de, Şekil. 4 te izlenen uyumsuzluğa benzer bir uyumsuzluk vardır. Zira yine 1 ve 4 nolu depremler Çizelge 1 de 30 Barlık gerilme-düşümü değeri göstermelerine rağmen yine 10 Barlık sabit gerilme-düşümü eğrisinin altında kalmışlardır. Gerçi (6) ve (8) bağlantılarındaki $\Delta\sigma_a$ dinamik gerilme-düşümünü, Çizelge.1 de verilen $\Delta\sigma$ ler ise statik gerilme-düşümünü simgelemektedir. Ancak heriki türden bulunacak gerilme-düşümü değerlerinin birbirlerinden pek farklı olamayacakları (Scholz, 1982) göz önüne alınırsa Şekil 4 ve Şekil 5 teki uyumsuzluk azımsanamıyacak ölçüdedir.

Halbuki Şekil 2 de bu tür bir uyumsuzluk görülmemektedir. Zira Çizelge 1 de verilen gerilme-düşümü değerleri ile, şekildeki sabit gerilme-düşümü eğrileri arasında kalan verilerin karşığı geldiği gerilme-düşümü değerleri arasında tam bir korelasyon vardır. Şekil 4 ve Şekil 5 te birebir bu tür bir korelasyonu kurmak hayli güçtür.

Sadece Şekil 2 ile Şekil 4 ün mukayesesinden; Kuzey Anadolu Fayı boyunca oluşmuş ve doğrultu-atımlı faylanma gösteren depremlerin özündeki etkin faylanma dinamiğinin W modeli ile rahatlıkla açıklanabileceği söylenebilir. Kaldı ki bu öneriyi destekliyecek diğer faktörde Şekil 3 teki gerilme-düşümü değerlerinin L/W oranı ile olan doğrusal artımıdır. Zira Scholz (1982) tarafından da, yer yüzündeki çok sayıda doğrultu-atımlı depremlerin verileri kullanılarak $\Delta\sigma$ ile L/W oranı arasında doğrusal bir artış gözlenmiştir. Aynı davranış biçimini Kuzey Anadolu Fayı boyuncada görmek mümkün olmuştur.

SONUÇLAR

1939-1967 döneminde Kuzey Anadolu Fay zonunda oluşmuş ve arazide gözlenebilmiş 7 büyük depremin, kaynak parametreleri W ve L türü faylanma dinamiği modeline göre incelenmiştir.

İncelenen kaynak parametreleri sismik moment (M_0) ve gerilme-düşümü $\Delta\sigma$ dir. Her iki parametre W modeli yönünden irdelenirken, sismik moment ile LW^2 terimi arasında ve gerilme-düşümü $\Delta\sigma$ ile L/W oranı arasındaki doğrusal ilişki gözden geçirilmiştir.

Kuramsal olarak beklenen bu doğrusal ilişkiler gözlemsel verilere uyarlanarak sınanmıştır. Aynı şekilde L modeli için sismik moment M_0 ile bu kez L^2W terimi ve ortalama yerdeğiştirme \bar{U} ile L fay boyu arasındaki doğrusal ilişki gözden geçirilmiştir.

W ve L türü faylanma dinamiği açısından kaynak parametrelerinin sınanması sonucu, Kuzey Anadolu Fay zonunda gelişmiş

$6 < M_s \leq 8$ magnitudlü büyük depremlerin etkin faylanma dinamiğinin W türü modele çok daha yatkın olduğu saptanmıştır.

Fay bloklarının tavandan (yüzeyden) tabana doğru yarılmasını ve yerdeğiştirmenin yüzeyde maksimum gelişeceğini vurgulayan W türü faylanma dinamiğinin Kuzey Anadolu Fayında etkin bir faylanma modeli olarak saptanması sismo-tektonik yönden de tatmin edicidir.

Özellikle arazide gözlenebilen depremlerin oluşturdukları fayların yüzeyde sergiledikleri uzun boylu, yırtılmalar ve yerdeğiştirme miktarları hatırlandığında W türü faylanma dinamiği modelinin tatminkarlığı daha da kuvvet kazanmaktadır.

Ancak şunu belirtmekte yarar vardır ki Kuzey Anadolu Fayındaki etkin faylanma dinamiği modelinin saptanmasında oldukça sınırlı bir veriden yararlanılmıştır. Arazide gözlenebilen depremlerin sayısı arttırılabildiği takdirde belli daha genel ölçekte ve kalıcı nitelikte bir modeli vurgulamak mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aki, K. (1966), Generation and propagation of G waves from Niigata earthquake of June 16, 1964. A statistical analysis (I). Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo Univ., 44, 73-88.
- Aki, K. (1972), Earthquake Mechanism, Tectonophysics 13, 423-446.
- Archuleta, R.J. (1976), Experimental and numerical three-dimensional simulations of strike-slip earthquakes. Ph. D. Thesis, University of California, San Diego.
- Archuleta, R.S. and S.M. Day (1980), Dynamic rupture in a layered medium, the 1966 Parkfield earthquake. Bull. Seism. Soc. Ame., 20, 671-689.
- Brune, J.N. and Allen, C.R. (1967), A low stress drop, low magnitude earthquakes with surface faulting. Bull. Seism. Soc. Ame., 57, 501-514.
- Das, S. (1980), A numerical method for determination of source time functions for general three-dimensional rupture propagation. Geophy. J. Roy. Ast Soc., 62, 591-604.

- Das, S. (1981), Three-dimensional spontaneous rupture propagation and implications for the earthquake source mechanism. *Geophys. J. Roy. Ast. Soc.* (in press).
- Day, S. (1979), Three dimensional finite difference simulation of fault dynamics. Final Report, 5SS-R-80-4295, 71pp., systems, Science and Software, La Jolla, California.
- Dewey, J.W. (1976), Seismicity of Northern Anatolia. *Bull. Seism. Soc. Ame.*, 66, 843-868.
- Ezen, Ü. (1981), Kuzey Anadolu Fay zonunda deprem kaynak parametrelerinin magnitüde ilişkisi. *Deprem Araş. Enst. Bülteni*, Vol. 32, S. 53-77.
- Hanks, T.C. (1977), Earthquake stress drops, ambient tectonic stress and stresses that drive plate motions. *Pure. Appl. Geophysics*, 115, 441-458.
- Madariaga, R. (1976), Dynamics of expanding circular fault. *Bull. Seism. Soc. Ame.*, 66, 639-666.
- Scholz, C.H. (1982), Scaling laws for large earthquakes consequences for physical models. *Bull. Seism. Soc. Ame.*, Vol. 72, 1-15.
- Sykes, L.R. and R.C., Quittmeyer, (1981), Repeat times of great earthquakes along simple plate boundaries. 3th. Maurice Ewing Symposium on Earthquake Predictions, 4, Ed. D.W. Simpson and P.G. Richards, AGU, Washington D.C.
- Thatcher, W. and T. Hanks (1973), Source parameters of southern California earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 78, 8547-8576.

KUMLU ZEMİN TABAKALARINDA SIVILAŞMA

Doç. Dr. Atilla M. Ansal*

SUMMARY

In this paper first the theoretical background of soil liquefaction is explained. It is followed by liquefaction case histories observed in the past earthquakes. Then laboratory and field tests of liquefaction under controlled conditions are given. Finally various methods of estimating liquefaction potential and probability of occurrence of liquefaction is introduced.

ÖZET

Makalede önce zemin sıvılaşması olayının teorik olarak açıklaması yapılmaktadır. Bunu geçmişte depremlerde olan sıvılaşma olaylarının tanıtılması izlemektedir. Daha sonra laboratuvar ve arazide kontrollü koşullar altında yapılan sıvılaşma deneyleri verilmektedir. Son olarak da zeminlerin sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşmanın oluşması ihtimalinin tahmin edilmesi için çeşitli yöntemler anlatılmaktadır.

GİRİŞ

Deprem olasılığının bulunduğu bölgelerde yapılacak ve yapılmış olan yapıların deprem yükleri altında nasıl davranacağına önceden hesaplanmasında, en başta yapıya dayanak sağlayan temel sisteminin ve bu sistemin bir parçası olan temel zemininin deprem yükleri altında nasıl davranacağına bilinmesi gerekir. Bu da bu tip yüklemeler altında ilk önce zemin malzeme özelliklerinin bulunma-

(*) İ.T.Ü. Maçka İnşaat Fakültesi

sına ve daha sonrada arazideki duruma, tabakalaşmaya, sınır şartlarına göre bu özelliklerin yorumlanmasına bağlıdır.

Zeminleri genel olarak ele alındığı zaman danesel bir nitelik göstermelerine rağmen yapısal davranışlarındaki büyük farklılıklardan ötürü, ince daneli kohezyonlu ve kaba daneli kohezyonsuz zeminler diye iki grupta incelemek alışıla gelmiştir. Sıvılaşma olayı bu iki tip zemin arasındaki farklı davranış biçimine bir örnek teşkil eder ve yalnız suya doygun daneli kohezyonsuz zeminlerde gözlenebilir.

Sıvılaşmanın tarihte çok önceden beri bilinmesine karşın öne-minin kabul edilmesi ve bu konuda yoğun araştırmaların başlaması yirmi yıl önceye kadar gitmektedir. İnşaat mühendislerinin bu konuya önem vermelerinin başlıca iki nedeni olduğu ve bu nedenlerin ne olduğu bu konuyla uğraşan mühendislerin genel olarak anlaştıkları ender konulardan biridir. Bu nedenlerden ilki dünya nüfusunun sürekli artmasıyla ortaya çıkan yerleşim yeri ve enerji gereksinimleri karşısında eskiden yerleşime uygun bulunmayan deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde yerleşme ve enerji üretim yapılarının yapılması zorunludur. Böyle bölgelerde yapılması plânlanan yapıların bir deprem esnasında davranışlarının önceden bilinmesi ve bu tahminlere görede gerekli koruyucu önlemlerin alınması gerekir. Sıvılaşma konusunda çalışmaların artmasına ikinci neden olarak da o tarihlerde (1960-1965) meydana gelen iki büyük depremde sıvılaşmanın ve bu olayın meydana getirdiği büyük zararların gerçekte gözlenmiş olmasıdır. Bu olaylardan ilki Japonya'da olan bir depremde (1964) Niigata kentinde, ikincisinde Amerika Birleşik Devletleri Alaska eyaletinde olan bir depremde (1964) ve diğer birçok yerde gözlenmiş ve büyük maddi ve manevi zararlara neden olmuş «Sıvılaşma» olaylarıdır.

1. SIVILAŞMA

Depremierde suya doygun kumlu zemin tabakalarında sıvılaşmanın oluşmasına yol açan ana neden yer titreşimlerinden dolayı meydana gelen tekrarlı kayma gerilmeleri sonucunda boşluk suyu basıncının çevre basıncına eşit bir değere gelecek şekilde artabilmesidir. Kohezyonsuz zeminler, özellikle sıvılaşma olasılığı açısından kumlu zeminler, tekrarlı yükler altında, bulduklarından daha sıkı bir konuma geçmek isterler. Kuru kumlar üzerinde birçok araştırıcı tarafından yapılmış değişik dinamik deneylerde bu hacim azalması ve sıkılığın artması her seferinde gözlenmiştir. Suya doygun zeminlerde, ise tekrarlı yükler altında kuru zeminlerde gözlenen hacimsal sıkışmaya daneler arasını dolduran boşluk suyu engel olmak-

tadır. Suyun sıkışabilirliğinin zemin dane yapısına karşın çok küçük olması boşluk suyu basıncının artmasına yol açar. Kumlarda hidrolik iletkenlik (permeabilite) yüksek olmasına rağmen genellikle süre açısından bir deprem sırasında drenaj yolu uzunluğunda düşünülürse, bu nedenden dolayı boşluk suyu basıncında olabilecek sönüm miktarının ihmal edilebilir olduğu çoğunlukla varsayılmıştır.

Tekrarlı yükler altında boşluk suyunun artmasının açıklamasında, başlıca iki görüş hakimdir. Bunlardan ilki A.B.D. Kaliforniya Üniversitesi Profesörlerinden H. Bolton Seed (1976) tarafından öne sürülen ve zemin mekaniğinin klasik varsayımlarından biri olan drenajsız deneylerde hacim değişmesi olmadığı yani boşluk suyunun sıkışamaz olması varsayımına dayanır. Bu açıklamaya göre danelerin daha yoğun bir duruma geçmek istemeleri neticesinde normal gerilmelerin bir kısmının boşluk suyu tarafından alınmasına ve daneler arasında gerilmenin azalmasına yol açar. Buda, başlangıçtaki hacim sabit kalacağı varsayımından hareketle, başlangıçtaki hacme eşit bir hacime ulaşmak için gerekli olan bir kabarma gerektirir. Bu açıklama yardımıyla boşluk suyu basıncındaki artış, zeminin kuru halde tekrarlı yükler altında gerilme şekil değiştirme özelliklerinin yani hacim değiştirme özelliklerinin ve normal gerilmelerdeki azalma neticesinde oluşan kabarma özelliklerinin bilinmesi ile mümkün olur.

Boşluk suyu basıncının artmasının ikinci açıklama şekli A.B.D. Michigan Üniversitesi Profesörlerinden F.E. Richart ve arkadaşları (1976) ile Northwestern Üniversitesi Profesörlerinden Z.P. Bazant, R.J. Krizek (1975) ve arkadaşları tarafından ileri sürülen ve boşluk suyunun sıkışabilir olduğunu ve suya doymuş zeminlerin iki fazlı bir ortam oluşturduğu varsayımlarına dayanır. Burada da zemin danelerinin tekrarlı yükler altında daha yoğun konuma geçme istekleri neticesinde dane yapısının, boşlukların su ile dolmasına rağmen çok az da olsa bir hacim küçülmesine yol açtığı fakat suyun sıkışma modülünün çok büyük olması nedeniyle bu ölçülemeyen küçük hacim değişmelerinin bile boşluk suyu basınçlarında gözlenen artışları verebilecek nitelikte olduğu kabul edilir. Ayrıca iki fazlı ortam yaklaşımına uygun olarak boşluk suyu basıncı ve daneler arasındaki efektif basıncın birbirleri ile bağımlı olduğu ve aynı anda değerlendirilmeleri gereğinden hareket eder.

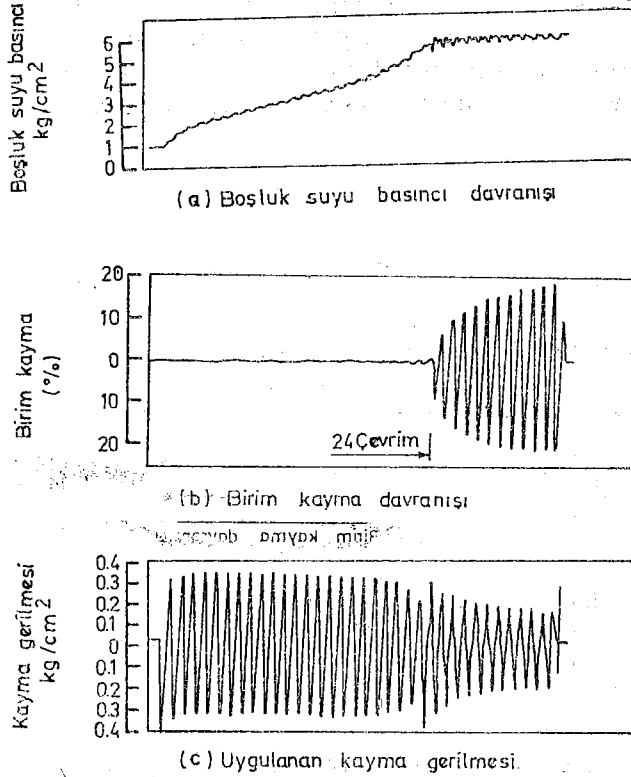
İkinci yaklaşım daha gerçekçi olmasına rağmen, hacim değişmelerinin çok küçük olması ve bu değişimin hesaplanış şeklinin yarı amprik olması her iki açıklama arasında uygulamadaki netice bakımından önemli bir fark göstermemektedir.

Boşluk suyu basıncı artarak çevre basıncına eş bir değere yaklaşırken kumlarda şekil değiştirmeler gözlenmeye başlar. Eğer kum gevşek ise, boşluk suyu basıncı ani bir artış göstererek çevre basıncına eş bir değer alır ve kumda büyük şekil değiştirmeler, % 20 yi geçen birim kayma oranları oluşur. Bu durumda eğer kum bir dayanım oluşturmadan büyük şekil değiştirme oranları meydana geliyorsa sıvılaşma olmuş kabul edilir. Diğer yanda eğer kum sıkı bir konumda ise yükleme çevriminin bir anında boşluk suyu basıncı çevre basıncına eş bir değere ulaşabilir (ön sıvılaşma durumu) fakat bu noktadan sonra şekil değiştirmelerden ötürü kum bir genişleme gösterir buda boşluk suyu basıncında bir azalmaya ve kumda tatbik edilen yüklemeye karşı bir direnç doğmasına yol açar. Böyle bu direncin doğabilmesi için kumun bir miktar şekil değiştirmesi gerekmektedir ve tekrarlı yüklemeler devam ederken duraylı bir duruma gelmek için gereken bu şekil değiştirme miktarı artabilir. Sonuçta her tekrarlı yükleme durumu için belirli tekrarlı bir şekil değiştirme oranı oluşurki bundan sonra zemin tekrarlı yükler altında daha fazla bir şekil değiştirme göstermez. Bu tip sınırlı bir şekil değiştirmeye neden olan ön sıvılaşma olayına sınırlı ön sıvılaşma denilmektedir. Bazı durumlarda deprem süresinde alt tabakalarda oluşan bu artıkboşluk suyu basıncı hızla sönmülenebilir. Diğer durumlarda tekrarlı yüklemenin durmasını izleyen sürede oluşmuş boşluk suyu basıncı nedeniyle zemin yüzeyine, yukarı doğru bir su akımı oluşur. Gerçekte alt tabakalarda ön sıvılaşmanın olmasından yukarı doğru başlayan su sızması üst tabakalarda kaynamadan dolayı bir sıvılaşmaya ve bu tabakalara oturan yapılarda göçmelere ve de büyük oturmalara yol açabilir.

Sıvılaşma olayının karmaşık bir olay olması ve kumun sıkılığına bağlı olarak farklı özellikler göstermesi nedeniyle olayın daha iyi anlaşılabilmesi ve açıklanabilmesi için deneysel çalışmalara dayanarak bazı ana tanımların yapılmasını gerekmektedir.

1.1. Sıvılaşmanın Tanımı

Gevşek sıklıkta ve suya doygun kohezyonsuz zeminlerde, özellikle kumlarda, drenaja izin verilmeden yapılan deneylerde tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncında Şekil 1 deki gibi ani artışlar olduğu gözlenmiştir. Bu artışın nedeni bu tip zeminlerin kayma gerilmeleri altında bir hacim daralması yapmak istemeleri, bunada daneler arasını dolduran boşluk suyunun karşı koymasıdır. Boşluk suyu basıncının ani ve sürekli olarak artması zemin daneleri arasında bulunduğu düşünülen efektif çevre gerilmesinin azalmasına hat-

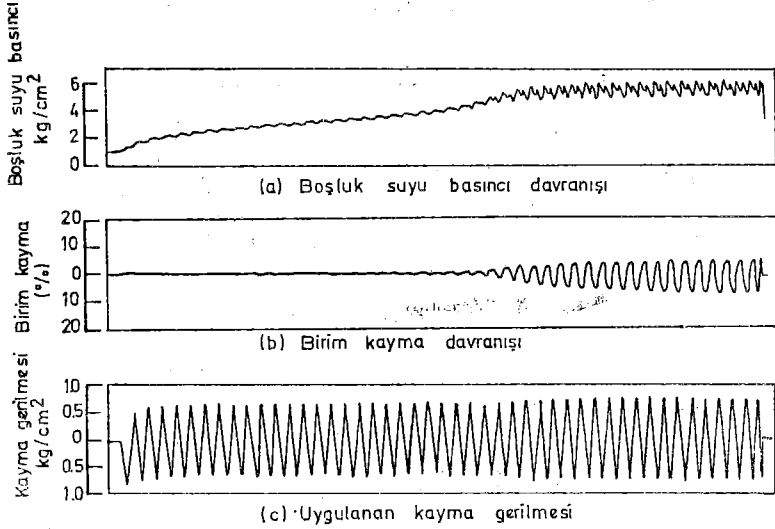


Şekil 1 — Gevşek Monterey Kumunda Sıvılaşma (Peacock ve Seed, 1968).

ta «sıfır» olmasına yol açar. Daneseli bir malzeme olan kumlarda efektif çevre gerilmesinin sıfır olması kayma mukavemetini yok eder, zemin elemanı artık bir sıvı gibi davranır ve büyük şekil değiştirmeleri gösterir.

Doğada ve laboratuvar deneylerinde orta ve sıkı kumlarda da tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının sürekli olarak arttığı fakat bu artışın Şekil 2 de gösterildiği gibi daha yavaş bir biçimde olduğu görülmüştür. Bu tip kumlarda boşluk suyu basıncı tekrarlı yükleme çevriminin bir bölümünde toplam çevre gerilmesine eşit olabilir. Bu durumda kayma mukavemetinin bir süre için sıfır olması bir sıvılaşmaya ve neticesinde şekil değiştirmelere yol açar. Fakat orta ve çok sıkılıktaki kumlarda şekil değiştirmelerin bir hacim kabarmasına yol açmaları boşluk suyu basıncının azalmasına ve zemin elemanının tekrar bir dayanım kazanmasına neden olur. Burada olan sıvılaşma aslında gevşek kumlarda gözlenen sıvılaşma

olayından farklı olup şekil değiştirmeleri kumun sıkılığına bağlı olarak sınırlı kalırlar. Bu olaya sınırlı ön sıvılaşma (initial liquefaction with limited strain potential; Seed, Arango ve Chan 1975) veya çevrimsel oynaklı oluşması (cyclic mobility; Castro, 1975) denilmektedir.



Şekil 2 — Sıkı Monterey Kumunda Sıvılaşma (Peacock ve Seed, 1968).

Bu anlatılanların ışığı altında sıvılaşma olayı ile ilgili şu tanımlar yapılabilir :

1. **Ön Sıvılaşma** : Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının bir yükleme çevrimi sonunda toplam çevre gerilmesine eşit olmasına ön sıvılaşma denir. Ön sıvılaşmanın meydana gelmesi, zemin elemanında oluşabilecek şekil değiştirmelerin boyutları ile ilgili bir bilgi vermez. Böyle bir tanım yapmakta amaç zemin elemanının tekrarlı yükler altında davranışlarının adlandırılması ve ön sıvılaşmadan sonraki davranışın değerlendirilmesinde bir açıklık getirilmesidir.

2. **Sıvılaşma** : Boşluk suyu basıncının tekrarlı veya statik yükler altında sürekli olarak artması ve bir noktadan sonra sabitleşmesi efektif çevre gerilmesinin sıfır veya çok küçük bir değere düşmesine yol açar. Bu durumda artık kayma dayanımının sıfır veya çok küçük bir değere düşmesine ve zemin elemanında sürekli olarak

artan şekil değiştirmelerine neden olur. Bu olaya zemin mekaniğinde «gerçek sıvılaşma» denir.

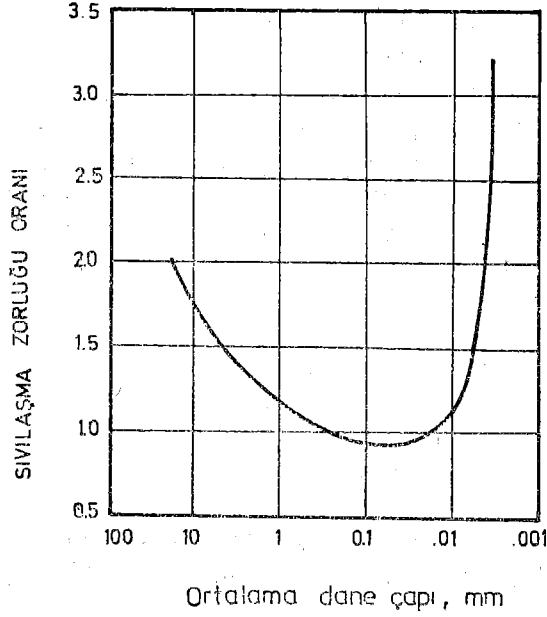
3. Sınırlı Ön Sıvılaşma : Tekrarlı yükler altında bir yükleme çevrimi sonunda bir ön sıvılaşmanın oluşması ve bunu izleyen yükleme çevrimlerinde zemin elemanında bir artık dayanım bulunmasından veya hacim kabarması neticesinde tekrar bir kayma direnci oluşmasından ötürü şekil değiştirmelerin sınırlı kalması ve zemin elemanının tekrarlı yükler altında duraylı bir konuma gelmesine sınırlı ön sıvılaşma denir.

1.2. Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında sıvılaşması konusunda yapılan araştırmalar artıp elde edilen bilgiler çoğaldıkça sıvılaşmaya görelilik dışında, dane özellikleri, dane yapısı, zemin tabakalarının sismik geçmişi, yatay toprak basıncı gibi diğer faktörlerinde önemli oranlarda etkilediği görülmüştür. Bu bilgiler ışığında sıvılaşmaya tesir eden başlıca faktörler şöyle sıralanabilir (Seed, 1976).

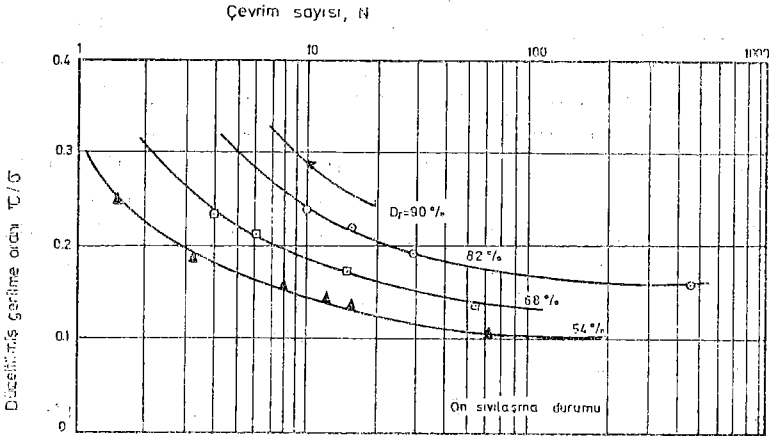
1. Dane Özellikleri : Değişik kumlar kullanılarak yapılan deneylerde numuneler aynı görelilikte ve aynı şekilde hazırlanmış olmalarına rağmen belirli bir yükleme sayısı sonucunda ön sıvılaşmayı meydana getirecek kayma gerilmelerinde farklılıklar olacağı görülmüştür. Annakai (1975) dört değişik kum üzerinde yaptığı deneylerde ön sıvılaşma meydana getirebilecek gerilme oranları arasında % 20 ye varan farklar gözlemiştir. Bu farklılığın nedeninin dane özelliklerine bağlı olduğu açıktır. Dane özellikleri olarak da dane boyutları, dane şekli ve dane dağılımı diye üç öge düşünülebilir. Bunlardan dane boyutlarının sıvılaşmaya tesiri Lee ve Fitton (1969) tarafından incelenmiş ve Şekil 3 de gösterildiği gibi olduğu bulunmuştur. Burada ortalama dane çapına göre sıvılaşma zorluğu diye tanımlanan oranın değiştiği ve bu oranın en küçük dolayısıyla en kolay sıvılaşabilen kumların ortalama dane çapının 0.05-0.06 mm civarında olduğu söylenebilir. Diğer iki ögenin tesirinin ne yönde olacağı ve neye dayandırılarak ifade edileceği henüz kesinlik kazanmamış olup bu konudaki genel anlayış daha köşeli daneli ve daha iyi bir dane dağılımına sahip kumların sıvılaşmaya karşı daha dayanıklı olacağı yönündedir.

2. Relatif Sıklık : Kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını, statik yükleme durumunda da olduğu gibi, belirleyen en önemli etken zeminin sıklık oranıdır. Bu oranın sayısal bir şekilde tanımlanması göreceli sıklığın bilinmesi ile mümkün olduğundan



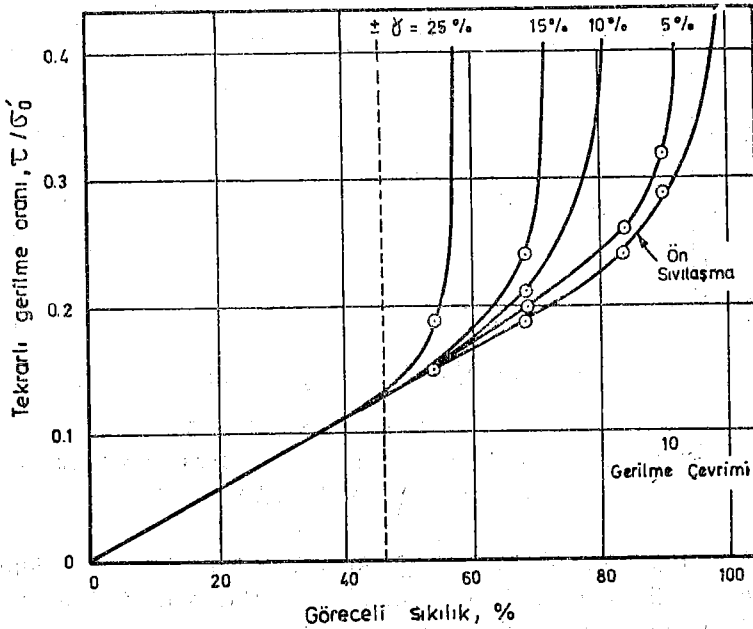
Şekil 3 — Dane Çapının Sıvılaşmaya Etkisi (Lee ve Fitton, 1969).

kohezyonsuz zeminlerin yapısal davranışlarını göreceli sıklığa bağlı olarak açıklamak alışlagelmiş bir uygulamadır. Sıvılaşma konusunda yapılan deneysel çalışmalar da Şekil 4 de gösterildiği sıvılaşma olasılığının büyük ölçüde relatif sıklığa bağlı olduğunu göstermiştir. Şekil 4 den de anlaşılacağı gibi sıklık değerinin artmasıyla



Şekil 4 — Relatif Sıklığın Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1976).

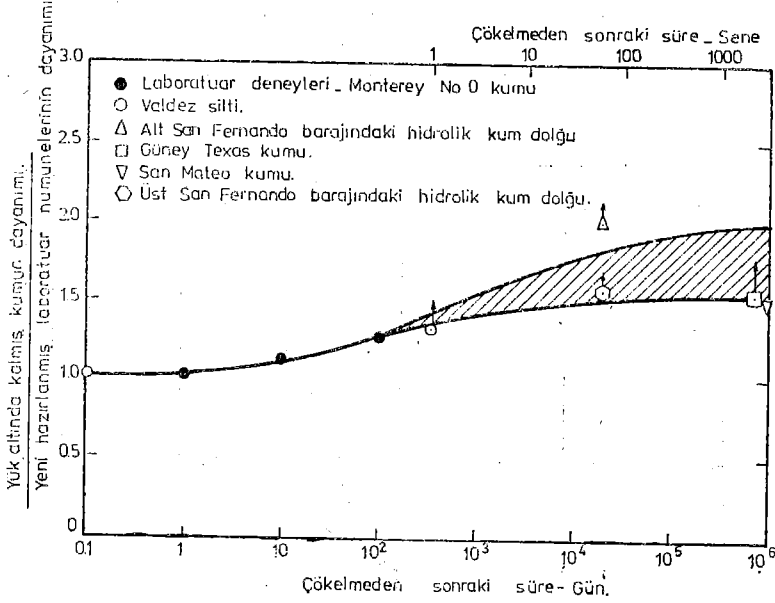
ön sıvılaşmaya ulaşmak için gereken tekrar sayısı veya uygulanan kayma gerilmesinin artırılması gerekmektedir. Bundan başka ön sıvılaşmadan sonra meydana gelebilecek şekil değiştirme oranının- da Şekil 5 de gösterildiği gibi sıklığa bağlı olarak değiştiği yapılan deneylerde gözlenmiştir. Belirli bir tip kum üzerinde yapılan deneylerde relatif sıklığın yaklaşık olarak % 47 den küçük olması durumunda gerçek sıvılaşmanın olduğu ve şekil değişme oranının çok büyük bir değere eriştiği görülmüştür. Buna karşı sıklığın % 47 den büyük olması durumunda uygulanan kayma gerilmesinden bağımsız olarak elde edilebilecek şekil değiştirme oranlarının sınırlı kaldığı ve sınırında relatif sıklığa bağlı olarak değiştiği Şekil 5 den de anlaşılmaktadır.



Şekil 5 — Relatif Sıklığın Sıvılaşmaya ve Oluşacak Birim Kaymalara Etkisi (Seed, 1976).

3. Gerilme Altında Kalma Süresi : Sıvılaşmaya tesir eden faktörlerden biri de zemin tabakalarının jeolojik yük altında kaldıkları süredir. Bu süre tesirinin ölçülebilmesi için eşbir şekilde hazırlanmış numuneler 0.1 den 100 güne kadar değişen zaman dilimleri için belirli bir basınç altında bırakılmış ve sonrada sıvılaşma deneyine tabii tutulmuştur. Şekil 6 dan da görüldüğü gibi ön sıvılaşmaya yol açabilecek gerilme oranları arasında % 25 e varan farklar bulun-

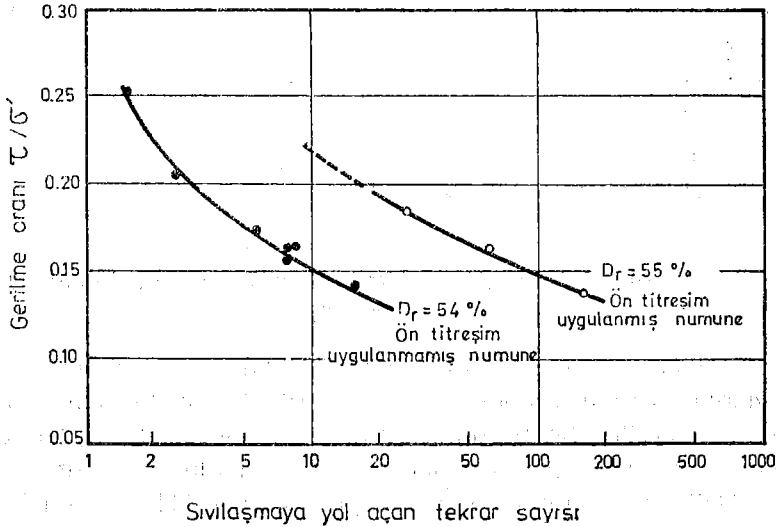
muştur. Daha uzun zaman dilimlerinin tesirini anlamak için araziden alınan örselenmemiş numunelerin davranışı ile aynı tip kum kullanılarak laboratuvarda yeni hazırlanmış numunelerin sıvılaşmaya karşı davranışlarının karşılaştırılması gerekmektedir. Şekil 6 dan da görüldüğü gibi böyle bir durumda sıvılaşmaya karşı dayanım % 75 oranında artabilmektedir. Buna neden olarak da uzun süre yük altında kalmanın bir neticesi olarak daneler arasında bir kaynamanın ve çimentolaşmanın meydana gelmesi gösterilebilir.



Şekil 6 — Gerilme Altında Kalma Süresinin Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1976).

4. Şekil Değiştirme Oranı veya Sismik Geçmiş : Bir kum elemanının sıvılaşabilirliğinin, o kum elemanının daha önce tekrarlı yükler tesirinde kalmış olmasından etkilendiği birçok araştırmacı tarafından gözlenmiştir. (Finn, Bransby ve Pickering, 1970; Bjerrum, 1973; Lee ve Focht, 1975). Bu etkenin ne yönde olacağını ve önemini daha iyi kavramak için örnek olarak aynı şekilde aynı sıklıkta hazırlanmış numunelerden bir kısmı çok ufak titreşimlere tabi tutulmuştur. Bütün numuneler üzerinde yapılan sıvılaşma deneylerinde titreşim altında kalmış numunelerle ön sıvılaşma için gerekli gerilme oranlarının hiç titreşim altında kalmamış numunelere göre % 50 daha büyük olduğu, Şekil 7 de görüldüğü gibi bulunmuştur. Buradan da anlaşılacağı gibi geçmişte deprem tesirleri altında kalmış kum tabakalarının sıvılaşmaya karşı dirençleri artmaktadır. Tabiatta ise

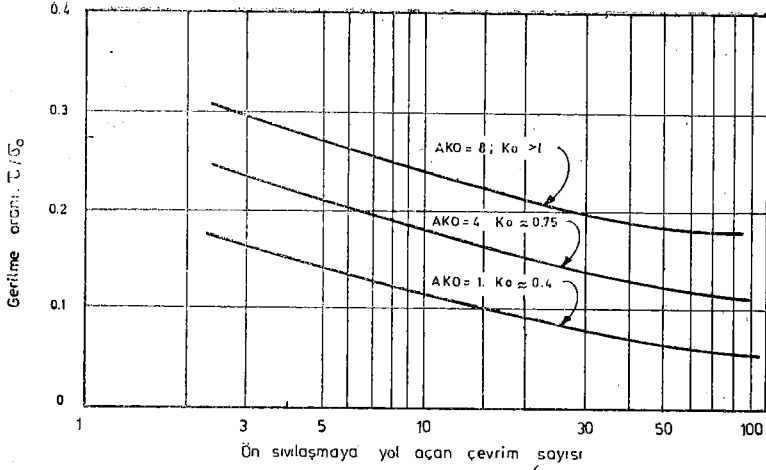
zemin tabakalarının yukarıda sözü edilen deneylerde numunelere tatbik edilmiş olan titreşimlerden çok daha kuvvetli titreşimlerin tesiri altında kaldıkları düşünülürse bu tabakaların sıvılaşmaya karşı dirençlerinin daha da artmış olacağı düşünülebilir. Yalnız burada numunede oluşmuş şekil değiştirme mertebelerinin büyük ve sıvılaşmanın meydana gelmiş olmasının sıvılaşmaya karşı direnci azalttığı görülmüştür. (Finn, et. al, 1970, Ansal ve Ögünc, 1981)



Şekil 7 — Sismik Geçmişin Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1976).

5. Yatay Toprak Basıncı veya Aşırı Yüklenmişlik : Sıvılaşmaya tesir diğer önemli bir etkeninde yatay toprak basıncı olduğu yapılan araştırmalarda görülmüştür (Seed ve Peacock, 1971). Bu etkenin tesirini yatay toprak basıncı katsayısı, K_0 ile belirtmek alışlagelmiş olup Şekil 8 de görüldüğü K_0 in artmasıyla ön sıvılaşmaya yol açacak gerilme oranlarında büyük artışların olacağı bulunmuştur. Yatay toprak basıncı katsayısı, K_0 nın aşırı yüklenmişlik ile doğrudan ilişkili olduğu hatırlanacak olursa bu etkenin tabiatta gerçek kum tabakalarının sıvılaşmasına tesir eden önemli faktörlerden biri olduğu ortaya çıkar.

6. Dane Yapısı : Suyu doygun kumların sıvılaşma özelliklerini belirleyen etkenlerden birinin dane yapısı, dane yerleşimi olduğu son yıllarda numune hazırlama yöntemleri üzerine yapılmış araştırmalar sonucunda ortaya çıkmıştır (Mullilis, 1975; Ladd, 1977; Mahmood, Mitchell and Lindblom, 1976). Farklı numune hazırlama yöntemleri kullanarak aynı relatif sıklıkta hazırlanmış numuneler üze-



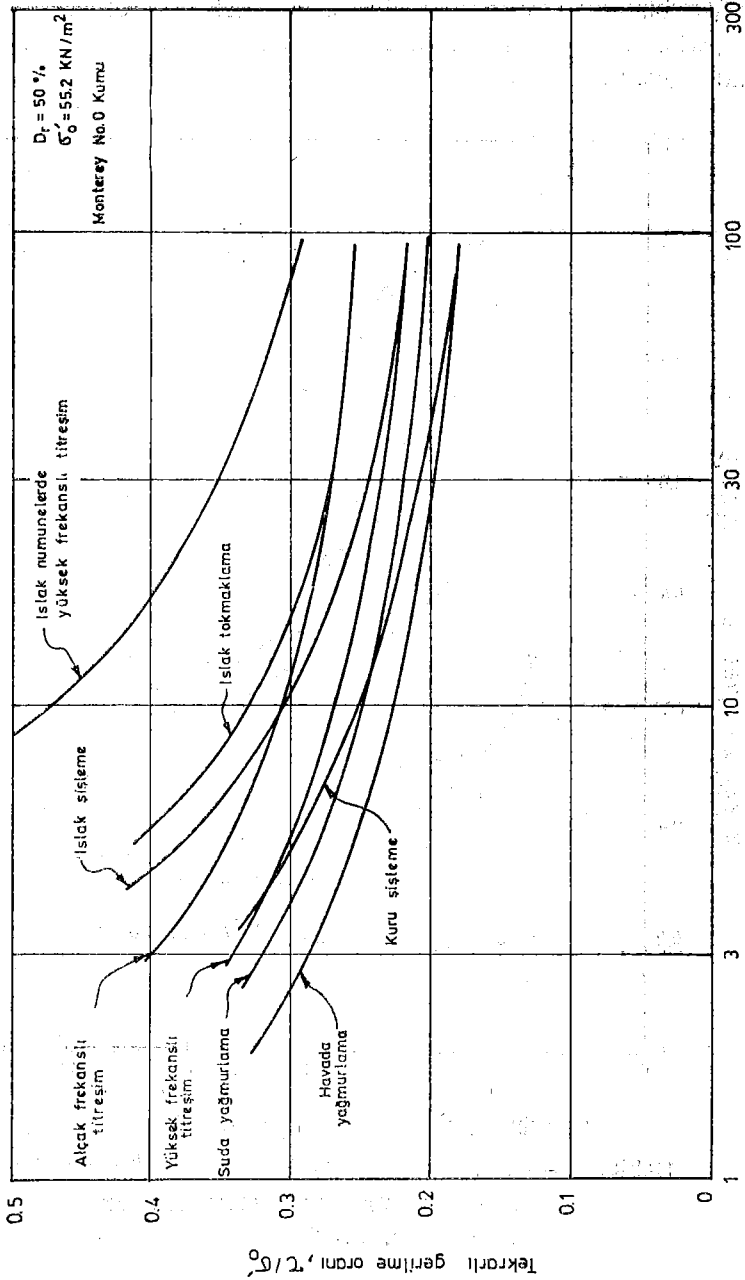
Şekil 8 — Yatay Toprak Basıncının Sıvılaşmaya Etkisi (Seed, 1976).

rinde aynı efektif çevre gerilmesi altında yapılmış sarsma tablası deneylerinde (Mulilis, Chan ve Seed, 1975) bulunmuş sonuçlar Şekil 9 da gösterilmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi belirli bir tekrar sayısında ön sıvılaşma meydana getirecek gerilme oranları arasında % 200'e varan farklar olabilmektedir. Bu farklılık ayrıca kumun cinsinin relatif sıkılığına ve efektif çevre gerilmesine bağlı olarakta değişebileceği Castro ve Poulos (1976) tarafından Şekil 10 da belirtildiği gibi gösterilmiştir. Burada L, R ve P harfleriyle tanımlanan üç farklı kum için farklı relatif sıklıktaki durumlarda efektif çevre gerilmesinin etkisi verilmektedir.

Bu bölümde doğada kum tabakalarının deprem yükleri altında davranışlarını belirlediği tahmin edilen önemli altı etkenden söz edilmiş ve bunların tesirlerinin ne yönde ve ne mertebede olacağı açıklanmıştır. Arazide kum tabakalarının sıvılaşma özelliklerine bu etkenlerden birinin veya birkaçının beraber etki edeceği düşünülürse Şekil 4 ve 5 de verilen, yeni oluşmuş, normal yüklenmiş, hiç sismik geçmişi olmayan ve en zayıf dane yapısına sahip olan kum numuneleri üzerindeki bağıntıların, gerçekte sıvılaşma olasılığı bakımından bir alt sınır meydana getirdikleri düşünülebilir.

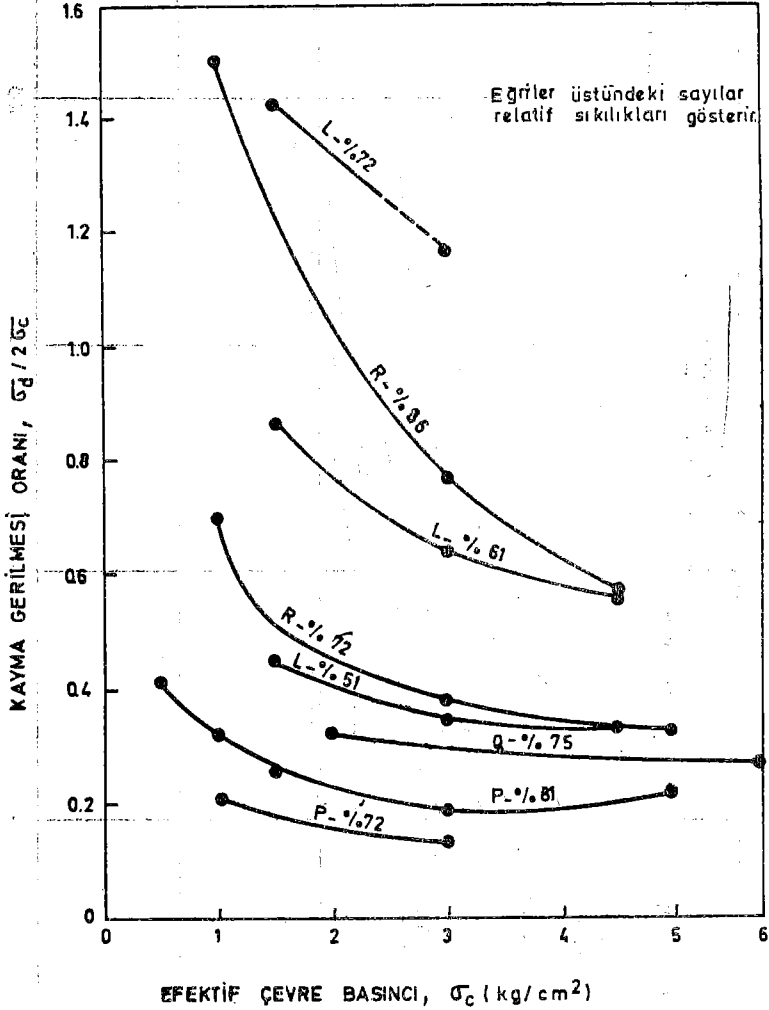
2. GEÇMİŞTEKİ SIVILAŞMA OLAYLARI

Doğada arazinin topoğrafyasına ve tabakalaşmaya bağlı olarak bir deprem sırasında kum tabakalarında oluşan sıvılaşmanın genellikle iki tip olaya yol açtığı söylenebilir. Bunlardan ilki eğimli böl-



Şekil 9 — Numune Hazırlama Yöntemlerinin Sivilaşmaya Etkisi (Mullis, et. al, 1975)

gelerde, toprak dolgu barajlarda ve istinad yapılarında sivilaşma nedeniyle bir şey kaymasının oluşması ikincisi ise arazinin düz olduğu yerlerde sivilaşmadan ötürü yapılarda temellerin göçme ve oturma olayıdır.



Şekil 10 — Farklı Kumlarda Relatif Sıklığın ve Çevre Basıncının Sivilaşmaya Etkileri (Castro ve Poulos, 1976)

2.1. Yamaçlarda Sivilaşma

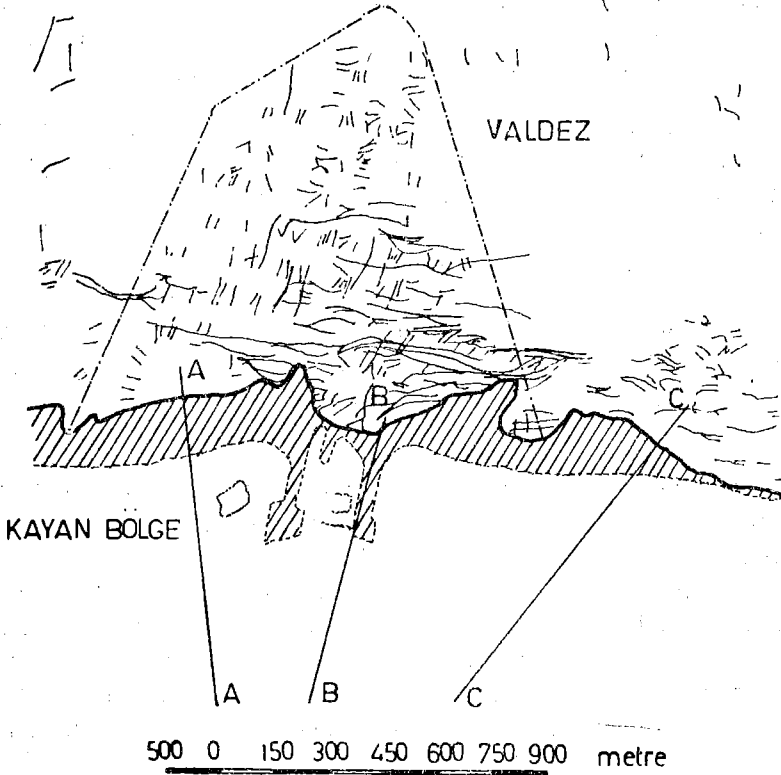
Sivilaşma sonucunda meydana gelmiş şev kaymalarına ait örnekler çok eskilere kadar gitmektedir. Bunlardan belkide ilki Mari-

natos (1960) tarafından anlatılan M.Ö. 352 yılında Yunanistan'da olan bir depremde meydana gelen şev kaymaları sonucu Halice kentinin tamamen ortadan kalkması olayıdır. (Seed, 1968)

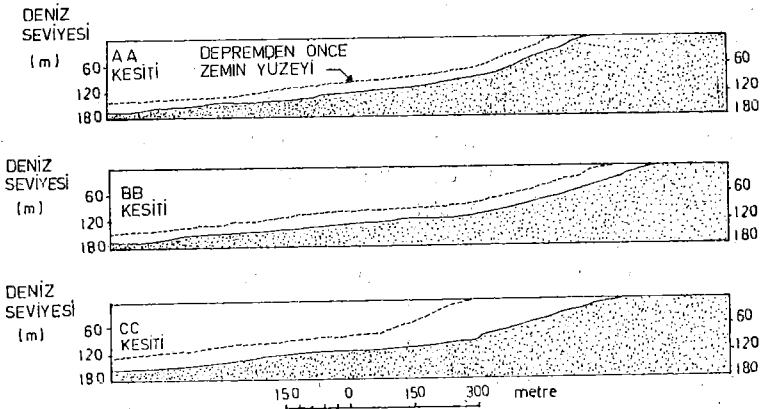
Tarihte sivilaşmadan dolayı meydana gelen şev kaymalarından bir çok yerde söz edilmesine karşın bu konuda (Seed, 1968) ilk olarak ayrıntılı bilgi toplanması 16 Aralık 1811 günü olan New Madrid depremiyle başlar. (Lyell, 1822; Flint, 1826; Fuller, 1912) Bu depremde Mississippi nehri kenarındaki tepelerde büyük kaymalar ve ötelenmeler olduğu, nehrin yatağının bazı bölgelerde tamamen değiştiği, nehrin üzerinde bulunan kum adacıklarının yok olduğu gözlenmiş ve bütün bunlara deprem sırasında suya doymun kum tabakalarında meydana gelmiş sivilaşmanın neden olduğu ileri sürülmüştür.

Sivilaşmanın yol açtığı şev kaymalarının meydana getirdiği hasarın büyüklüğü açısından 1920 Kansu depreminde ders alınması gereken bir örnek oluşturur. 16 Aralık 1920 Kansu depreminde şev kaymaları 480 km'e 160 km olan bir alanı etkilemiş ve bu alan içinde kalan 10 şehir ve yüzlerce köyün tamamen ortadan kalkmasına yol açmıştır. Genellikle lös tabakaları ile kaplı olan bu bölgede hiç kaymayacak zannedilen şevler kaymış bölgenin topoğrafik durumunda büyük değişiklikler meydana gelmiş ve 200.000'e varan can kaybı olmuştur. Burada deprem öncesi havaların yağışlı gitmesi lös tabakalarının suya doymun hale gelmesine ve bu da kaymanın asıl nedeninin sivilaşma olduğunu gösterir bir yanittir.

Yakın tarihlerden giriş kısmında da konu edilen diğer bir örnekte 1964 Alaska depreminde Valdez kentinde meydana gelmiş büyük şev kaymalarıdır. Valdez kenti genellikle silt, ince kum ve çakıldan oluşmuş bir nehir deltası üzerinde kurulmuş olup bu kum çakıl dolgu içinde silt ve ince kumun tabakalar halinde bulunduğu gözlenmiştir. Zemin tabakalarında yapılan deneylerde SPT (Standard Penetrasyon) darbe sayısının 7 ilâ 25 arasında olduğu bulunmuştu. 8.3 manyütünde olan depremde episentere 64 km uzaklıkta bulunan Valdez kentinin üzerinde kurulmuş olduğu kum tabakalarında oluşan sivilaşma 98 milyon metre küp hacime sahip bir kitlenin kaymasına ve sahil şeridinde kurulmuş bulunan her türlü liman ve rıhtım tesislerinin tamamen göçmesine ve ortadan kaybolmasına neden olmuştur. Şekil 11 da kayan bölgenin plânı Şekil 12 de de zemin kesitleri gösterilmiştir. Buradan da görüleceği gibi kayan zemin tabakasının kalınlığı bazı yerlerde 60 metreyi genişliği ise 150 metreyi bulmaktadır. Meydana gelen kaymadan dolayı yaklaşık 1



Şekil 11 — Valdez Kentinde Alaska 1964 Depreminde Kayan Bölge ve Geride Oluşan Çatlaklar (Seed, 1968)



Şekil 12 — Valdez Kentinde Kayan Bölgede Zemin Kesitleri (Seed, 1968).

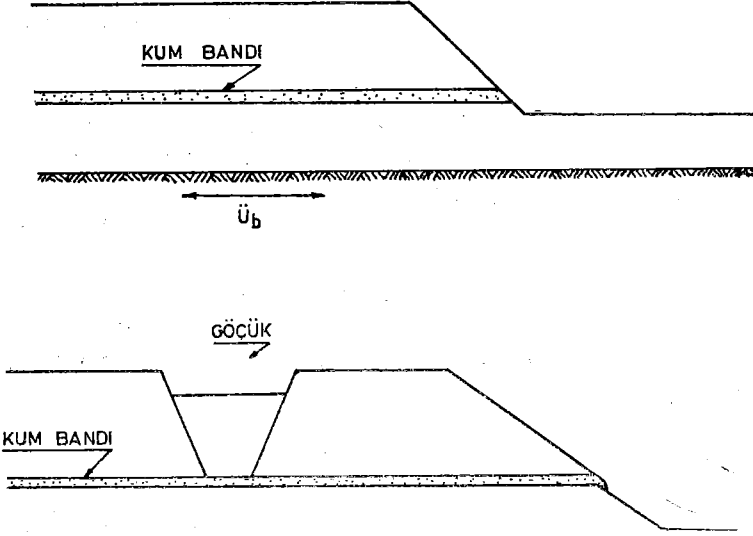
km. geriye giden alan içinde yatay yönde bir zemin ötelenmesi olduğunda bu alan içinde çok sayıda çatlaklar ve büyük oturmalar meydana gelmiştir. Çatlaklardan içinde ince kum ve silt bulunan suların fışkırdığının gözlenmiş olması bu alan içinde sıvılaşma olduğunun diğer bir kanıtıdır.

Aynı tip şev kaymaları aynı deprem sırasında Seward kentinde de gözlenmişti. Seward'da Valdez gibi gevşek ve orta sıkılıkta kum çakıl tabakalarından oluşan bir delta üzerine kurulmuş olup, kıyı bölgesinde eğim körfeze doğru 15° - 20° civarındaydı. Bir görgü ta- niğine göre (Seed, 1968) kayma bu bölgede kademeli ana sürekli bir biçimde oluşmuş her kademede bir miktar daha zeminin kaydığı görülmüştür. Burada kaymanın sürekli ve kademeli durumu olayın mekaniğini açıklayabilmek açısından yararlı bir örnek oluşturur. Kumlarda sıvılaşmaya yol açacak kayma gerilmesinin efektif çevre gerilmesi artımı ile arttığı hatırlanırsa ilk adımla sıvılaşma ancak belirli bir derinliğe kadar inebilir ve belirli bir kısmın kaymasına yol açar. Kaymadan dolayı çevre gerilmesinde bir azalma olacağından daha derindeki tabakalarda sıvılaşmanın meydana gelmesine imkân yaratır bu da ikinci bir kısmın daha kaymasıyla neticelenir. Tabakalaşmaya bağlı olarak kaymalar deprem süreci içinde tekrarlanarak devam eder.

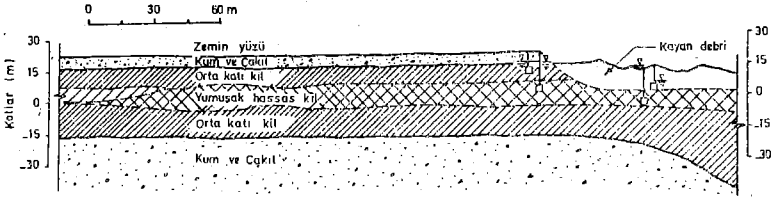
Buraya kadar verilen örneklerde zeminin genellikle gevşek ve orta sıkılıkta suya doymun kum veya yağmurlardan suya doymun hale gelmiş lös tabakalarından oluştuğu durumlara aitti. Depremlerde bu tip kesitten farklı iki tip kesitlerde sıvılaşmadan ötürü şev kaymaları olabileceği gözlenmiştir. Bunlardan ilki, kesiti meydana getiren zemin tabakaları arasında Şekil 13 a da gösterildiği gibi kum bandlarının veya ince bir kum tabakasının bulunmasıdır. Bir deprem sırasında bu tabakanın sıvılaşması şevin kaymasına ve şevin gerisinde Şekil 13 b de gösterildiği gibi graben denen göçükler olmasına yol açabilir.

Bu tip bir kaymaya örnek olarak gene 1964 Alaska depreminde Anchorage kentinde meydana gelen ve L caddesi kayması diye bilinen olay (Seed, 1968) gösterilebilir. L caddesi kaymasında, 1500 m. uzunluğunda 400 m. genişliğinde bir zemin tabakası yatay olarak yaklaşık 4,5 m. ötelenmiş ve şev gerisinde 3 m. derinliğinde 30 m. genişliğinde bir göçük oluşmasına yol açmıştır. Şekil 14 de verilen zemin kesiti incelendiğinde kaymanın 13,5 m. kotunda bulunan kum tabakasının sıvılaşması sonucunda oluştuğu düşünülebilir. Bu durumda kayma düzlemi bu kum tabakası içinden geçerek şev yüzü-

ne katı kil tabakasını keserek ulaşır. Bu tip kesitlerde kaymanın kum tabakasının sıvılaşmasından oluştuğuna gözlenen kayma yüzeyinin aynı kottan geçmesinden başka bir yanıtta şev kaymasının yer sarsıntılarının kesilmesi ile derhal durmasıdır. Eğer kayma yumuşak hassas kil tabakası içinde oluşsa idi mukavemet kaybindan meydana gelen büyük ötelenmeler yer sarsıntısı kesilmesine rağmen devam ederdi. Halbuki sıvılaşmış kum tabakasında depremin bitmesiyle meydana gelmiş olan artık boşluk suyu basıncı derhal söner ve kum tabakası tekrar duraylık kazanır.



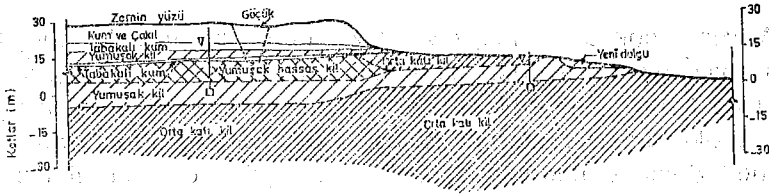
Şekil 13 — Şev Kesitinde İnce Kum Bandları Bulunması Durumu.



Şekil 14 — Anchorage Kenti L caddesi Bölgesinde Zemin Kesiti (Seed, 1968)

Depremlerde sıvılaşmadan ötürü şev kaymalarına yol açabilecek ikinci bir kesit tipide zemin tabakaları içinde kum merceklelerinin bulunması durumudur. Buna örnek olarak da gene.1964 Alaska depreminde Anchorage kenti civarında bulunan Turnagain Heights

diye bilinen sahil şeridinde oluşmuş büyük şev kaymaları gösterilebilir. Bu bölgede sahil yüksekliği 21 m. ye varan tepeliklerle (yarlar ile) belirlenmiş olup arazi genel olarak 1/1.5 eğimle denize doğru alçalmakta idi. Kayma 2.5 km. ye varan bir sahil şeridi boyunca oluşmuş ve sahilden yaklaşık 360 m. kadar içeriden başlamıştır. Kayan bölgenin alanı 130 dönüm kadardır. Bu alan içinde deprem öncesi zemin yüzeyi tamamen alt üst olmuş ve zemin seviyesi ortalama 10 m. kadar düşmüş ve sahil şeridi yaklaşık 600 m denize doğru ötelenmiştir. Kayan bölgenin doğu kısmında zemin tabakalaşması Şekil 15 de gösterildiği gibi olup genel olarak bu bölgede doğu tarafta 4.5 - 6.0 m. batı tarafta 1.5 - 3.0 m. kalınlıkta bir kum çakıl örtü tabakası ve onunda altında da kalınlığı 30-45 m arasında değişen



Şekil 15 — Anchorage Kenti Turnagain Heights Bölgesinde Zemin Kesiti (Seed, 1970)

Bootlegger-Cove kili denen denizde çökelmiş hassas bir siltli kil tabakası bulunmaktadır. Bu tabakada kayma mukavemetinin, yüzeyde (yaklaşık 15 m. kotunda) 1 kg/cm² civarında, derine inildikçe azalarak 0 kotunda, yaklaşık olarak 0.45 kg/cm²'ye düştüğü, bu derinlikten sonra artarak 10 m. kotunda 0.6 kg/cm²'ye çıktığı ve hassaslık derecesinin 5 ilâ 30 arasında değiştiği bilinmektedir. Ayrıca bu tabaka içinde çok sayıda ince kum ve silt mercceklerine de rastlanmıştır. Seed (1968) tarafından yapılan araştırmada deprem sırasında zemin kesitinde meydana gelecek gerilme ve şekil değiştirme dağılışının kil tabakası içinde bulunan ince kum ve silt mercceklerinde bir sıvılaşmaya sebep olacağı yapılan laboratuvar deneylerine dayanarak bulunmuştur. Bu bilgilere dayanarak Turnagain bölgesinde şev kaymasının bu nedenle meydana gelmiş olmasının büyük bir olasılık içinde olduğu Seed (1968) tarafından ileri sürülmüştür.

Bu kaymaya kum mercceklerinde oluşan sıvılaşmanın yol açtığı görüşü :

1. Kayan bölgede deprem sonrası alınan numunelerin bazılarında birbirine karışmış olarak bulunan kil ve kumun, bu duruma gelebilmeleri ancak kumun geçmişte sıvı özellikleri göstermiş olmasıyla açıklanabilir olmasından,

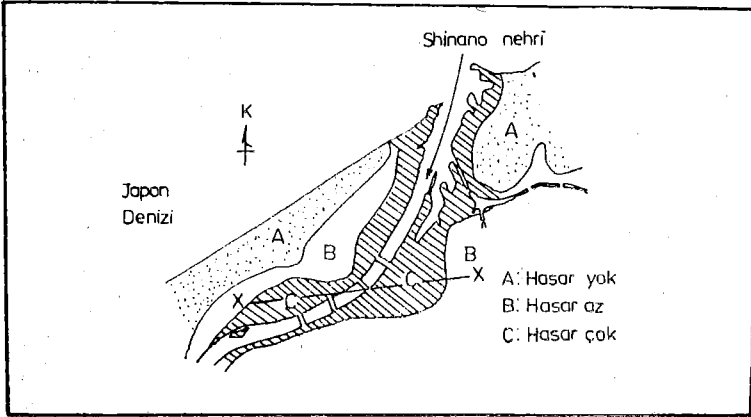
2. Deprem sırasında kayan alanda yükseklikleri 9-60 cm. çapları 2-3 m. ye varan kum tepeciklerinin meydana gelmesinden,

3. Görgü tanıklarının anlattıkları yerden kum fıskırması olayından,

4. Kayma sahasında meydana gelen çatlaklar, göçmeler ötelenmeler bu saha altında deprem sırasında mukavemeti çok azalmış bir zemin tabakasının bulunmasını gerektirdiği halde deprem sonrası yapılan sondajlarda mukavemeti azalmış bir kil tabakasına rastlanılmamış olmasından kaynaklanmaktadır.

2.2. Düz Bölgelerde Sıvılaşma

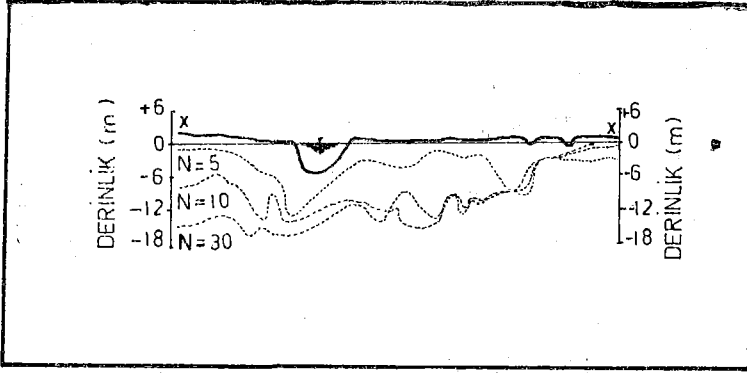
Arazinin çok az eğimli veya düz olduğu durumlarda meydana gelen sıvılaşma ve tesirleri hakkında belkide en iyi örnek giriş kısmında da konu edilmiş olan 1964 Niigata depreminde gözlenmiş sıvılaşma olaylarıdır. (Seed ve Idriss, 1967) Niigata Japonya'nın batı sahilinde Shinano nehrinin denize döküldüğü vadide kurulmuş eski bir kenttir. Vadi oldukça kalın bir alüvyon kum tabakası ile örtülü olup sahil şeridi boyunca bu tabakanın üstünde ikinci bir kum tabakası yer almakta idi. Şehir Şekil 16 da gösterildiği gibi nehrin



Şekil 16 — Hasar Bölgelerini Gösterir Niigata Kenti Planı (Seed ve Idriss, 1967)

etrafında eski kısımları daha yüksek kotta bulunan ikinci bir taşıma kum tabakası, üzerine kurulmuştu. Genel olarak kentin bulunduğu alanın altında kum dolgusu Şekil 17 de verilen kesitteki SPT darbe sayısı konturlarında da anlaşılacağı gibi yüzeye yakın yerler-

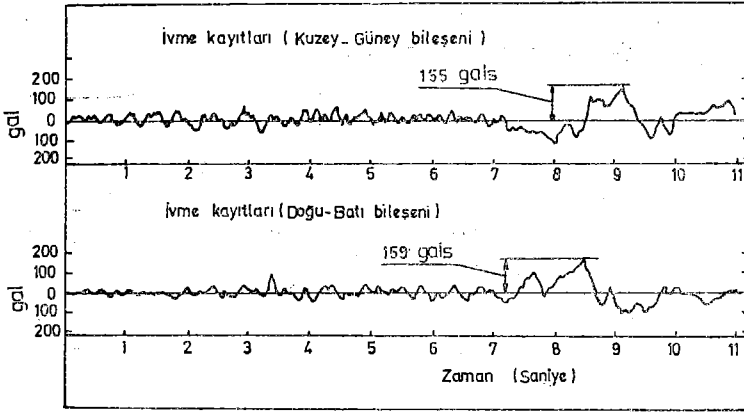
de gevşek fakat derine inildikçe sıkılaştan bir durumda bulunmakta ve kalınlığı yüzeyden yaklaşık 30 m derinliğe kadar devam etmekteydi. Kentin altındaki ana kaya tabakasından devamlı gaz alınmasından ötürü son yıllarda meydana gelen oturmalardan dolayı nehrin civarında zemin seviyesi oldukça düz ve alçak olup yeraltı su seviyesi yüzeyden 1 m. mesafede idi.



Şekil 17 — Niigata Kentinde Bir Zemin Kesitinin SPT Darbe Sayıları Değişimleri (Seed ve Idriss, 1967),

16 Haziran 1964 günü olan depremin epicenteri Niigata kentine 56 km. uzaklıkta ve depremin şiddeti ise Gutenberg Richter ölçeğine göre 7.3 mertebesindedir. Kent içindeki bir apartman binasının bodrum katında bulunan kuvvetli yer hareketi sismografı kayıtlarından Niigata'da en büyük yer ivmesinin 0.16 g mertebesinde olduğu tahmin edilmektedir. Depremde binanın oturduğu kısımda sıvılaşma olduğu bilinmektedir. Şekil 18 de verilen deprem kayıtları incelenirse yaklaşık olarak depremin başlamasında 8 saniye sonra kayıtlarda belirgin bir değişikliğin olduğu, titreşim periyodların aniden arttığı gözlenebilmektedir. Büyük bir olasılıkla bu ayırım sıvılaşmanın başladığı anı göstermektedir. Niigata kenti ve civarında sıvılaşma büyük hasara ve birçok binada, köprülerde, yollarda, demir yollarında, liman tesislerinde ve rafineri de göçmelere oturmalarına yol açmıştır. Sıvılaşma olayından başka deprem zemin tabakalarında genel olarak bir oturmaya sebep olmuş ve kentin nehrin civarındaki kısımları su altında kalmış depremden yarım saat sonra sahile vuran yaklaşık 2 m yüksekliğindeki deprem dalgalarında ek hasara yol açmıştır. Ayrıca yer sarsıntıları bölgedeki üç rafineride yangınların çıkmasına sebep olmuş ve bu yangınların biri ancak 24 saat yandıktan sonra kontrol altına alınabilmişti. Toplam olarak

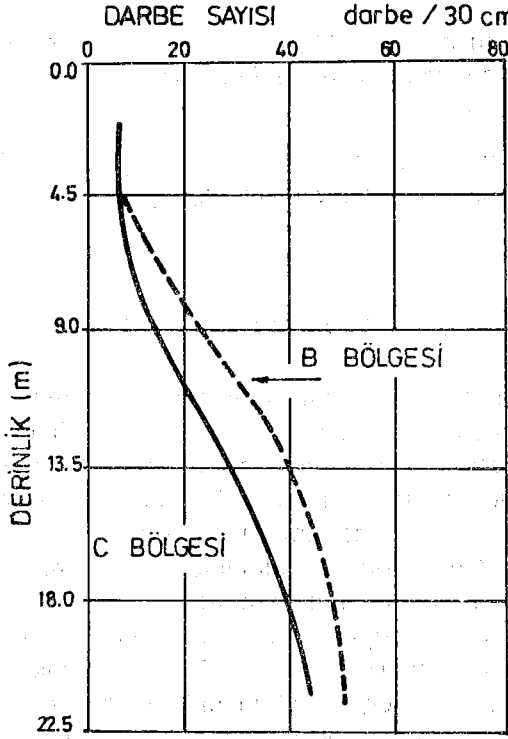
deprem sırasında 2130 yapı tamamen yıkılmış, 6200 yapı çok 31200 yapı az miktarda hasar görmüş, 369 yapı yanmış, 15300 yapıda deprem dalgaları neticesinde sular altında kalmıştı.



Şekil 18 — Niigata Depreminde Sıvılaşma Olan Bölgede İvme Kayıtları (Ishihara, 1978).

Depremi takip eden günlerde detaylı hasar tespit çalışmaları yapılmış (Seed ve İdriss, 1967) ve bu çalışmalar Şekil 16 da A ile gösterilen sahil şeridindeki kum tepecikleri üzerinde bulunan binalarda depremin hiçbir hasara neden olmadığı buna karşın C ile gösterilen nehre en yakın bölgede sıvılaşma nedeniyle hasarın en fazla olduğu bu bölgenin dışında B ile gösterilen kısımlarda ise hasarın nispeten daha az olduğunu ortaya çıkarmıştı. Bütün bölgelerdeki yapı tipleri birbirlerinden farklı olmadığı için farklı hasar bölgelerinin gözlenmesinin nedeni zemin şartlarındaki farklılaşma olduğu açıktır. Yapılan incelemelerde A bölgesi altındaki kum dolgunun daha sıkı bir konumda bulunduğu buna ilâveten yeraltı su seviyesinin zemin yüzünden diğer bölgelere oranla daha derinde yaklaşık 4 m bulunduğu gözlenmiştir. B ve C bölgelerinde zemin yüzü topografyası ve yeraltı su seviyesinin aynı olması farklılaşmanın kum tabakalarının özelliklerinden olduğunu düşündürmüştü bu konuda en iyi kıyaslama olarak iki bölgede yapılan SPT (Standart çakma deneyleri) darbe sayıları karşılaştırılmış neticelerde oldukça dağınıklık olmasına karşın Şekil 19 da gösterilen ortalama değerler elde edilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi üst 4.5 metrede iki bölge arasında bir farklılık görülmektedir. Bu seviyenin altında B bölgesinde kum tabakaları daha sıkı bir konumda bulunmaktadır. Yaklaşık 4 m nin altında her iki bölgede de kum sıkı bir konumdadır. Buradan da

görülyorki 4.5 ile 14 m arasındaki bu az görünen fark C bölgesinde sıvılaşmaya yol açmış ve hasarın çok fazla olmasına sebep ol-



Şekil 19 — Niigata Kentinde Farklı Hasar Bölgelerinde Ortalama SPT Darbe Sayılarının Derinlikle Değişimi.

muştur. Bu karşılaştırmadan başka C bölgesinde sığ temellere ve kazıklara oturan değişik oranda zarar görmüş binalar ve bunların temelleri altında bulunmuş olan SPT darbe sayılarında karşılaştırılmıştır. Sığ temellere oturan binalarda temel altında darbe sayıları 15 den az ($N < 15$) olduğu zaman hasarın çok fazla darbe sayısı 20-25 arasında, olduğu zaman ise hasarın az olduğu gözlenmiştir. Kazıklara oturan yapılarda kazık ucunda SPT darbe sayısının 15 den az olması halinde yapı kazık sisteminde hasarın fazla olduğu fakat darbe sayısı 25 üzerinde olduğu durumlarda hasarın çok azaldığı görülmüştür.

Özet olarak Niigata kentinde Şekil 16 da gösterilen C bölgesinde değişik tipte değişik derinliklere oturan binaların depremde gördükleri hasar ve SPT darbe sayıları kıyaslanınca temel derinliği

1. 6 ilâ 4.5 m arasında $N = 14$ darbe sayısı
2. 4.5 m ile 7.5 m ler arasında $N = 14 \sim 28$ ve
3. 7.5 m ile 15 m arasında $N = 28$ darbe sayısı temel bina sisteminin oturmalara ve dönmelere karşı yeterli bir güvenlikte olacağını göstermiştir.

Depremler neticesinde kumlarda sıvılaşmanın oluşması yukarıda verilen örneklerden de anlaşılacağı gibi büyük hasarlara yol açmaktadır.

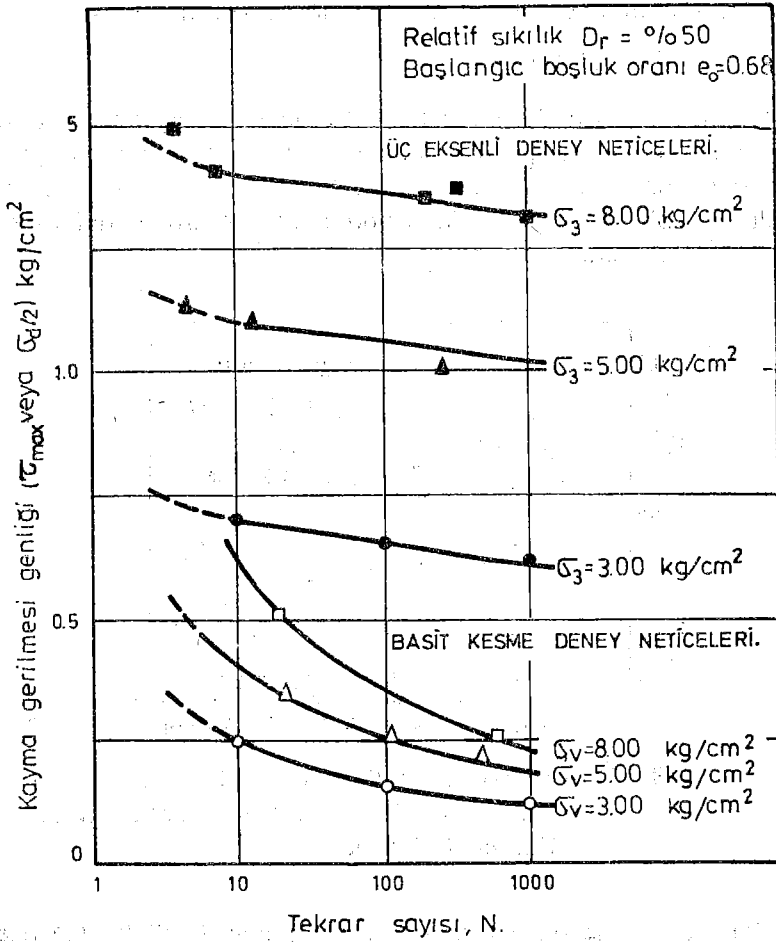
3. LABAROTUVAR VE ARAZİ DENEYLERİ

Kumlu zeminlerde sıvılaşma olayının incelenmesi ve mühendislik uygulamasında bir bölgenin sıvılaşma olasılığı değerlendirilmesi isteniyor ise pratikte sözü edilen bütün laboratuvar dinamik deney metodları bu maksat için kullanılabilir. Bu deneylerin dışında sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi için bazı arazi deneylerindende yararlanılabilir. Bu arada unutulmaması gereken, laboratuvar ve arazi deneyleri arasındaki kullanım farkıdır. Çoğunlukla laboratuvar da üzerinde deney yapılan zemin numunesine zemin tabakasını temsil eden sonsuz küçük bir zemin elemanı olarak bakılır. Bu durumda yapılacak deneyler, mümkün olduğu düzeyde arazideki sınır şartlarına eşdeğer sınır şartları altında ve arazide oluşacağı tahmin edilen yükleme şekline eşdeğer bir yükleme altında olmalıdır. Gerçekte bu şartların bir laboratuvar deneyinde sağlanmasına imkân olmayıp, yapıla gelen birçok deneyin amacı incelenen konu ile ilgili bir takım sınırların ve kullanılmaya alışılmış birtakım kontrol katsayıların bulunmasından başka birşey değildir. Mühendislik açısından elde edilen bu bilgilerin önemli bir faydaları olmasına karşın incelenen olayın yapısal esaslarını daha iyi anlamamıza katkıları sınırlı olmaktadır.

Buna karşın arazi deneylerinde amaç arazideki özel şartlar altında zemin tabakalarının o andaki belirli birtakım özelliklerini bulmaktır. Genellikle arazide bulunan değerler arazi şartlarını ve tabiattaki zemin şartlarını yansıtmaları bakımından daha gerçeğe yakın olacağı normaldir. Zeminlerin belirli yüklemeler altında nasıl davranacağı hakkında bilgiler çoğunlukla laboratuvar deneyleri gerektirir ve nadiren arazi deneylerinden bulunabilir. Diğer yönden, incelenen olayın esaslarını açıklamak bakımından arazi deneylerinin faydaları, arazideki etkenlerin çokluğu bakımından sınırlıdır.

3.1. Laboratuvar Deneyleri

Uygulamada en çok kullanılan sıvılaştırma deneylerinden biri dinamik üç eksenli basınç deneyi olduğuna göre bu deneyden elde edilen neticelerin diğer deneylerden elde edilen neticelerle karşılaştırmakta yarar vardır. Genel olarak üzerinde çok çalışılmış bir diğer deney metodu olan dinamik basit kesme ile dinamik üç eksenli deney neticeleri Şekil 20 deki gibi kıyaslandığı takdirde ön sıvılaştırma ya yol açacak kayma gerilmesinin dinamik üç eksenlide daha fazla olduğu görülmüştür. Bu farklılığın bir nedeninin dinamik basit kesme deneyinde homojen olmayan gerilme dağılışı ve üst tablanın sallanması olduğu düşünülebilir. Fakat bunun yanında eğer gerilme



Şekil 20 — Ön Sıvılaştırma Durumu İçin Dinamik Üç Eksenli ve Basit Kesme Deney Sonuçları.

oranı maksimum kayma gerilmesinin ortalama efektif gerilmeye oranı olarak tanımlanırsa iki deney arasındaki farkın çok azaldığını Finn et al (1971), Silver et al (1975), Ishihara ve Li (1972) tarafından gösterilmiştir.

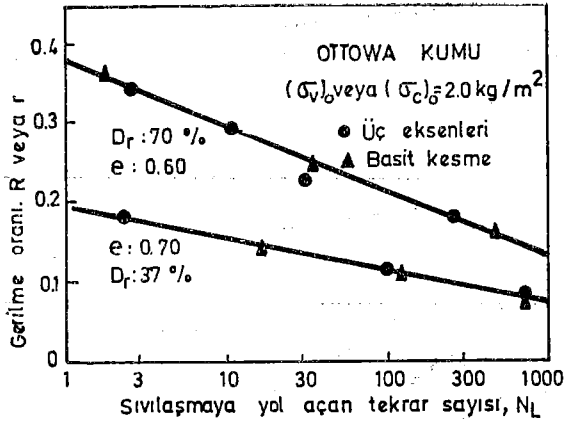
Basit kesme deneyinde düşey efektif gerilmenin, σ_v' , gerçek çevre basıncının göstermediği düşünülerek bu deneyde yatay gerilmelerinde ($K_o \sigma_v'$) hesaba katılması gerektiği ileri sürülmüştür. Bu durumda basit kesmede kayma gerilmesi genliği τ_{xy} olur ise gerilme

$$\text{oranı} \quad r = 2 \tau_{xy} / (\sigma_v' + K_o \sigma_v') \quad (1)$$

ve üç eksenli basınç deneyinde aksenal tekrarlı gerilme genliği σ_d ve efektif çevre basıncı σ_c' ise gerilme oranı,

$$R = \sigma_d / 2 \sigma_c' \quad (2)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda Şekil 21 de iki değişik boşluk oranı için gösterilen karşılaştırma elde edilir. Burada belirli bir gerilme oranında ön sıvılaşmaya yol açacak tekrar sayıları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bu tip bir yaklaşımda deneyler arasındaki fark ortadan kalkmaktadır.



Şekil 21 — Sıvılaşmaya Yol Açan Dinamik Üç Eksenli ve Basit Kesme Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması.

Diğer bir görüşe göre (Seed, 1976), dinamik basit kesme deneyinin gerçeğe daha yakın neticeler verdiği bu yüzden dolayı da dinamik üç eksenli deney neticelerinin belirli bir düzeltme katsayısı

yardımıyla dinamik basit kesme deneylerinde bulunan neticelere eş-değer hale getirilmesi önerilmektedir. Bu durumda

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma'_v} = c_r \frac{\sigma_a}{2\sigma'_c} \quad (3)$$

olarak düşünülmekte ve buradaki c_r düzeltme katsayısının değerinin 0.60-0.70 arasında değiştiği belirtilmektedir. Burada arazi şartları düşünüldüğü zaman akla ilk gelen bir konuda arazide zemin elemanının deprem sırasında bir çok yönden gelen kayma dalgaları tesirinde kalacağı ve değişik yönlerde titreşeceği, Pyke, et al (1974); Seed, Pyke, ve Martin (1975) sarsma tablası kullanarak yaptıkları araştırmalarda ön sivilaşmaya yol açan gerilme oranının çok yönlü titreşim uygulanması halinde tek yönlü titreşim uygulanan hale göre % 10 daha küçük değerler aldığı görülmüştür. Bu halde arazide oluşacak gerilme oranının basit kesme deneyindeki bulunan değerlerin % 10 küçültülmesiyle elde edilebileceği ve

$$\tau_{xy}/\sigma'_v = 0.9 \tau_{xy}/\sigma'_v \quad (4)$$

şeklinde alınabileceği ileri sürülmüştür (Seed, 1976).

Sivilaşma araştırmalarında kullanılan laboratuvar deneylerinden söz ederken unutulmaması gereken önemli bir konuda kohezyonsuz zeminlerden örselenmemiş numune almanın zorlukları ve alınan numunelerde meydana gelen örselenmenin sivilaşma özelliklerine tesiridir. Gevşek orta sıklıktaki kumlarda numune alınışı sırasında olabilecek örselenmenin sıklığının artması yönünde olacağı fakat bu artışında diğer etkenlerin ortadan kalkmasından dolayı olacak azalmayı karşıladığı düşünülür. Bunun yanında sıkı kumlarda meydana gelen bir kabarma bu tip zeminlerin sivilaşmaya karşı mukavemeti çok azaltır.

Burada mühendise düşen görev sivilaşma olasılığı incelenecek olan zemin tabakalarından iyi örselenmemiş numuneler alınmasını sağlamak daha sonrada arazideki gerilme ve sınır şartlarına en uygun, eldeki dinamik deney metodlarından yararlanarak sivilaşma olasılığını değerlendirmektir. Burada önemli ve zor olan, tecrübe ve bilgi gerektiren asıl işlem eldeki deneylerden, ki bu deneylerde az da olsa örselenmiş numuneler kullanılmıştır, arazideki şartların tahmin edilmesidir. Burada kullanılan deney metodunu duyarlığından çok numunelerdeki örselenme etkisinin yorumlanması önem kazanmaktadır. Bu noktada bir yorum yaparken, tabiattaki zemin tabakalarının özelliklerini daha gerçekçi olarak yansıtmaları bakımından arazi deneylerinden faydalanmakta yarar vardır.

3.2. Arazi Deneyleri

Zemin tabakalarının deprem yükleri altında davranışlarının ve sıvılaşma olasılığının incelenmesinde arazi deneylerinden faydalanılması alışıl gelmiş bir yöntem olup genellikle bu maksatla kullanılan arazi deneylerinde başlıca amaç zemin tabakalarının dinamik analizlerde kullanılan bazı özelliklerinin tanımlanmasından ibarettir. Burada kısa bir şekilde; kohezyonsuz zeminlerin dolaylı yoldan relatif sıkılığını bulmak için kullanılan standart penetrasyon deneyi ile zemin tabakalarında kayma dalgası hızını bulmak için kullanılan sismik deney metodlarından söz edilecektir.

Standart Penetrasyon Deneyi : Doğada zemin tabakalaşmasını ve tabakaların zemin özelliklerini incelemek için yapılan geoteknik etüdülerde çoğunlukla sondajlar esnasında standart penetrasyon deneyleride yapılır. Bu deneyler; standart olarak boyutları belli bir numune alıcının 63.5 kg. lık bir ağırlığın 75 cm. lik bir mesafeden bırakılmasıyla zemine 30 cm girmesi için gereken darbe sayısının bulunması şeklindedir. Zemin profili boyunca bulunan bu darbe sayıları özellikle kohezyonsuz zeminlerde görelî sıkılık hakkında yaklaşık bir bilgi vermeleri bakımından pratikte standart penetrasyon deneyleri çok kullanılır. Bu deneylerden bulunan darbe sayılarının efektif düşey basınca göre ayarlanması gerekir. Bu da Gibbs ve Holts (1957) tarafından önerilen aşağıdaki bağıntı ile yapılabilir.

$$N_1 = C_N \cdot N \quad (5)$$

burada,

$$C_N = 1 - 1.25 \log \sigma'_v \quad (6)$$

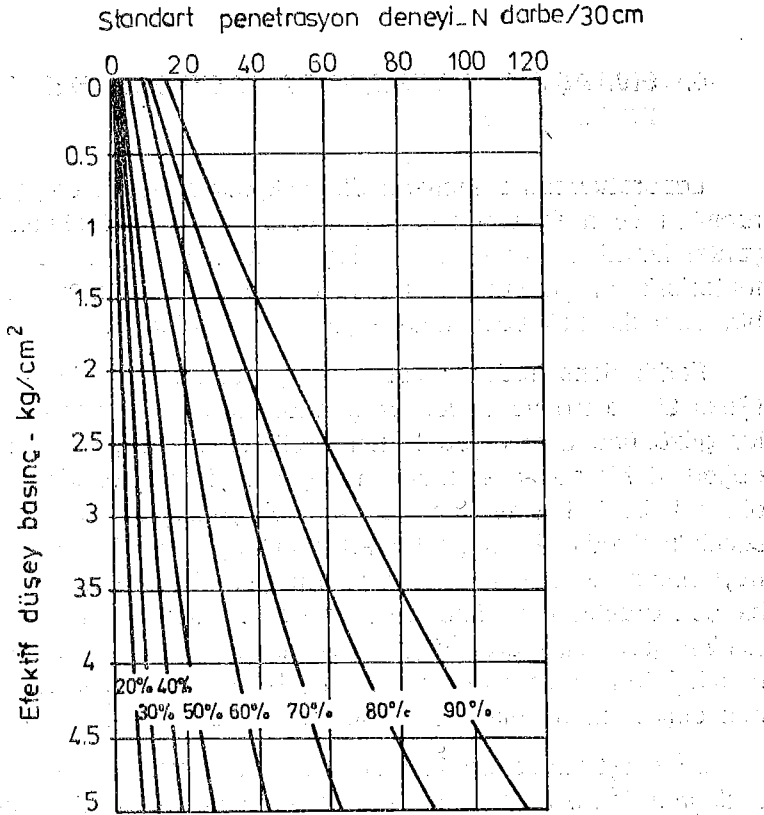
ilişkisi ile verilmiş olup σ'_v kg/cm² arazide efektif düşey basıncı gösterir.

Böylece bulunan N_1 darbe sayısı ile relatif sıkılık arasındaki bağıntı Şekil 22 de gösterilmiştir. Bu N_1 darbe sayılarının sıvılaşma analizlerinde nasıl kullanılacağı daha sonraki kısımda anlatılacaktır. Burada hatırlanması gereken bir konuda standart penetrasyon deneyinden bulunan darbe sayılarının yaklaşık olduğu ve bu sayıların sondaj aletine, deneyi yapan kimseye ve diğer birtakım dış şartlara bağılı olarak değişebildikleridir.

Sismik Deney Metodları : Arazide zemin tabakalarında kayma dalgası hızının ve dolayısıyla zeminlerin elastik kayma modülü, G' 'nin, doğrudan bulunması için uygulanabilecek sismik deneyler başlıca üç şekilde yapılabilir. (a) Yüzeysel dalga (Rayleigh dalgası me-

todu) (b) Sondaj Kuyusu metodu (c) Karşit kuyu metodu. Bu üç metotta esas kayma dalgasının ara mesafesi belli iki nokta arasındaki hızının bulunmasıdır.

Bu deneylerden karşit kuyu metodu zemin tabakaları hakkında daha doğru bir bilgi edinilmesi ve diğer deneylere nazaran daha büyük birim kayma değerleri için yapılabileceğinden tercih edilir.



Şekil 22 — SPT Darbe Sayısının Düşey Basınca ve Relatif Sıklığa Göre Değişimi.

Bu metotta iki sondaj kuyusu arasında belirli bir derinlikte kayma dalgası hızı doğrudan bulunabilir.

Bulunan kayma dalga hızından,

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (7)$$

elastik kayma modülü ve bu modülün tabakalara göre değişimi bu-

lanabilir. Bu değerlerde daha sonra anlatılacak analitik inceleme yöntemleri içinde kullanılır.

Bu kısımda sivilaşmanın laboratuvar ve arazide incelenmesinde kullanılan deney metodlarının sonucunda elde edilmiş katsayı ve değerlerin yaklaşık değerler olduğu gerçekte yapılan sivilaşma analizlerinde ağırlığın hala analizi yapan kimsenin bilgi ve tecrübesine göre verdiği karara dayanacağı akıldan çıkarılmamalıdır.

4. SIVILAŞMANIN DİNAMİK BASİT KESME DENEYLERİ İLE İNCELENMESİ

Laboratuvarda zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme davranışları ve mukavemet özelliklerini bulmak için kullanılan deney yöntemlerinden kumlarda sivilaşmanın incelenmesi ve etki eden faktörlerin araştırılması amacıyla en çok uygulanmış olanlardan biri olan dinamik basit kesme yöntemi olmaktadır.

Farklı deneylerden elde edilmiş sonuçların karşılaştırılması (Şekil 20 ve 21) ve birçok araştırmacı tarafından verilen açıklamalar gözönüne alındığında bütün eksik ve kısıtlı yanlarına rağmen doğadaki bir zemin elemanının deprem yükleri altında davranışları dinamik basit kesme deneyleri ile çok yaklaşık bir şekilde model edilebilmektedir. Özen göstererek yapılmış dinamik basit kesme deneylerinden elde edilmiş sonuçların gerçeklere çok yakın olacağı bir çok araştırmacı tarafından da öne sürülmüştür. Ayrıca deney yönteminin göreceli olarak diğer bazı dinamik deney yöntemlerine (dinamik burulma ve sarsma tablası gibi) göre daha basit ve ekonomik olması mühendislik uygulamasında kullanımını arttırmaktadır.

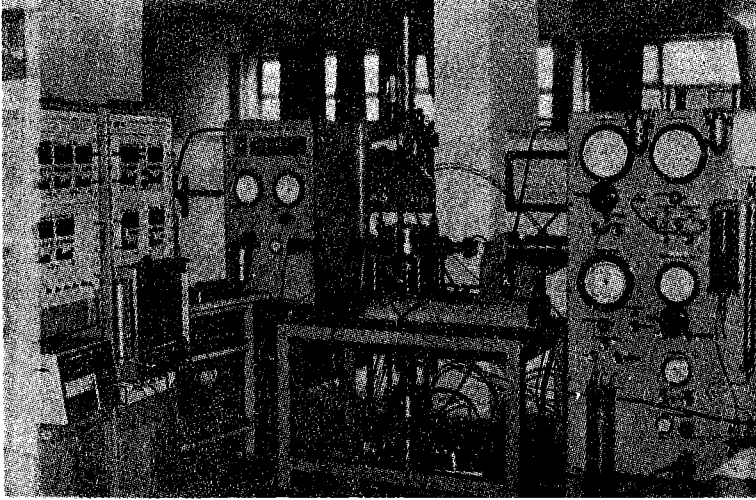
Bu araştırmada da kumların tekrarlı kayma gerilmeleri altında sivilaşma özelliklerinin incelenmesinde dinamik basit kesme deney yöntemi uygulanmıştır. Bu alt bölümün ilk yarısında bu araştırmada kullanılmış olan deney sistemi anlatılacak, bölümün ikinci yarısında iki ayrı cins kum kullanılarak yapılmış sivilaşma deneylerinden bulunmuş sonuçlar daha önce aynı kumlar kullanılarak başka araştırmacılar tarafından benzer deney yöntemleri ile elde edilmiş sonuçlar ile karşılaştırılarak açıklanacaktır.

4.1. Dinamik Basit Kesme Deney Düzeni

Bu araştırmada kullanılan dinamik basit kesme deney sistemi Japon Seiken Inc, şirketi tarafından yapılmış olup Norveç Geotek-

nik Enstitüsü (NGI) basit kesme deney aletinin K. Ishihara ve M. Silver tarafından geliştirilmiş bir tipidir. Şekil 23 de önden çekilmiş fotoğrafı gösterilen deney sistemi hava basıncı ile çalışan ve başlıca dört bölümden oluşan bir sistemdir. Bu bölümler işlevlerine göre ayrılmış olup;

1. Deney Hücresi
 2. Basınç Tablosu
 3. Tekrarlı Kayma Kuvveti Uygulama Birimi
 4. Ölçüm ve Kayıt Birimi
- diye adlandırılabilirler.

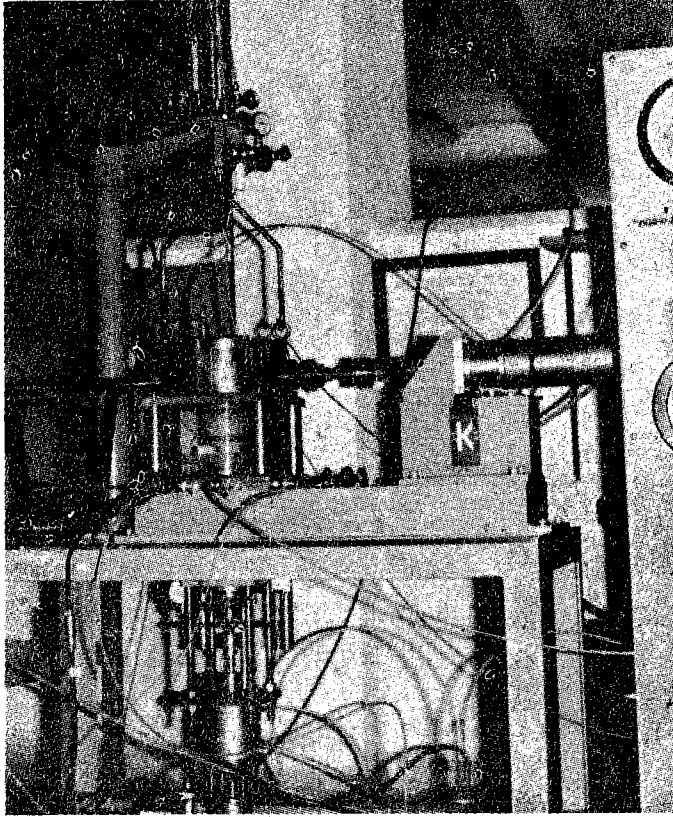


Şekil 23. Dinamik Basit Kesme Deney Düzeninin Önden Görünüşü

Deney Hücresi : Şekil 24 de yakından çekilmiş fotoğrafı ve Şekil 25 de şematik çizimi verilmiş deney hücresinden çapı 70 mm ve yüksekliği 25-35 mm olan silindirik zemin numuneleri üzerinde deney yapılabilmektedir. Numune NGI tipi donatılı yatay düzlemde genişlemeyi engelleyen bir membran içine veya ortasında numune çapında delikler bulunan ve üst üste numune boyunca konabilen ince plakçıklar içine (İsveç Geoteknik Enstitüsü Basit Kesme Deney Sistemi gibi) veya sadece normal esnek bir membran içine konabilmektedir. Sıvılaştırma araştırmalarında çok kullanılmış basit kesme deney hücrelerinden farklı olarak bu sistemde Şekil 25 de gös-

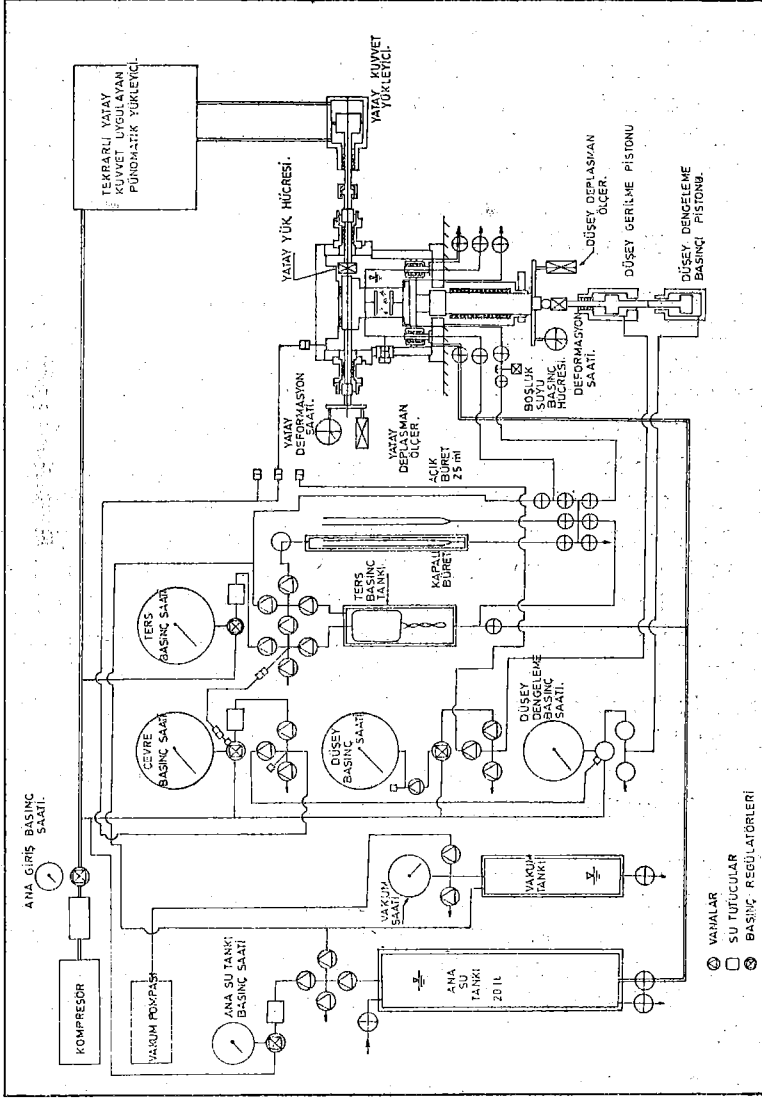
terildiği gibi deney hücresine bir basınç verilebilmekte ve numuneye istenilen yanal basınçlar uygulanabilmektedir.

Numune alt başlığı yatay düzlem içinde sabit olup düşey olarak hareket edebilen bir şaft üzerine yerleştirilmiştir. Bu şaftta numune hücresinin altına yerleştirilmiş iki piston (Şekil 25) yardımıyla bir düşey kuvvet uygulamak mümkündür. Bu pistonlardan birinin görevi üzerinde zemin numunesi bulunan şaftın kendi ağırlığını dengelemek ve numune üst başlığının hücre üst başlığına bağlanabilmesi için numuneyi bir miktar yukarı kaldırmaktır. Bunun dışında istenen durumlarda numuneye izotropik çevre gerilmesi uygulan-



Şekil 24. Dinamik Basit Kesme Deney Sisteminde Deney Hücresinin Görünümü

bilmesi için hücre basıncıyla olan bir ara bağlantının açılmasıyla bu silindir numuneyi taşıyan düşey şaftta ağırlık dengeleme kuvvetine ek olarak numune üst ve alt yüzeylerinde hücre (yanal) basın-



Şekil 25 — Dinamik Basit Kesme Deney Sistemi Şematik Çizimi

ca eşit bir basınç verecek kuvveti aktarabilmektedir. Bu pistonlardan ikincisinin görevi numuneye farklı düşey ve yanal basınçlar uygulanması istenen durumlarda öngörülen düşey gerilmenin numuneye uygulanabilmesini sağlamaktır.

Numune alt başlığı metal üst başlığı hafif bir malzeme olan pleksiglasdan yapılmış olup her iki başlıkta da poröz taşlar başlık içindeki yuvalara yerleştirilir. Her iki başlıktan ters basınç uygulamasına ve drenaja olanak sağlamak amacıyla ikişer tane ince tüp çıkışı vardır. Bu çıkışlar hücre dışına yerleştirilmiş dört adet vana ile kontrol edilirler. Bu çıkışlardan alt başlığa bağlı olanların birinde boşluk suyu basınçlarını ölçmek için bir basınç ölçer (pressure transducer) yerleştirilmiştir.

Numuneye yatay doğrultuda bir kayma kuvveti uygulayabilmek için Şekil 25 de gösterildiği gibi hücre üst başlığına bir yatay şaft bağlanmıştır. Hücre üst başlığı iki parçadan oluşur ve bu iki parçadan biri hücreye sabit bir şekilde bağlı olup diğeri bir silindirik rulman sistemiyle bu sabit parçaya yatay doğrultuda hareket edebilecek bir biçimde diğer yandan yatay hareket şaftı ile numune üst başlığında sabit bir şekilde bağlanmıştır. Sistemin orijinal yapısında yatay kayma kuvveti hareketli üst hücre başlığı ile yatay hareket şaftı arasında ve deney hücresi içine yerleştirilmiş bir yük hücresi (load cell) yardımıyla ölçülmektedir. Böylece yatay hareket şaftının basınç hücresine giriş ve çıkış yataklarında oluşacak sürtünme kuvvetleri kayma kuvveti okumaları içine girmemektedir. Bu araştırmada bu yük hücresi arızalanmış olduğu için kayma kuvvetleri deney hücresi dışından ölçülmüştür. Bulunan değer membran içine numune yerine su konarak yapılmış deneyden elde edilmiş sürtünme kuvvetlerine göre düzeltilmiştir.

Yatay şaftın deney hücresinin sol tarafından çıkan kolunun yatay doğrultuda yaptığı yer değiştirmeler, ki bunlar deney numunesinde yatay doğrultuda oluşan yer değiştirmeleri gösterir, bir elektronik deplasman ölçer ile okunur. Bu değerlerden numunenin yüksekligi de bilindiğine göre numunede oluşan birim kaymalar hesap edilebilir.

Aynı tipten bir deplasman ölçer yardımıyla numunede deney sırasında meydana gelen düşey yer değiştirmelerde düşey hareket şaftından ölçülebilmektedir.

Basınç Tablosu : Şekil 23 de fotoğrafı ve Şekil 25 de şematik çizimi verilmiş basınç tablosunun işlevleri deney numunesine uygu-

lanacak çevre, düşey ve ters basınçların düzenlenmesi ve istenilen durumlarda numunede meydana gelebilecek hacim değişikliklerinin ölçülmesidir. Bu işlevleri yerine getirebilmek için Şekil 25 de görüldüğü gibi tabloda altı adet basınç regülatörü ve basınç saati (ana giriş, çevre, düşey dengeleme, düşey ve ters basınçlar ve ana su tankı için), bir adet vakum regülatörü ve vakum saati, iki adet küçük su tankı (ters basınç ve vakum uygulamaları için), bir adet büyük su tankı (sistemin su ihtiyacını sağlamak için), iki adet dereceli buret (biri havaya açık biri ters basınç uygulanabilmesi için kapalı) ve çok sayıda kontrol vanaları, bağlantı tüpleri ve su filtreleri bulunur.

Bu tabloda regülatörler arasında bir kısmı yapımçı şirket tarafından bir kısımda tarafımızdan yapılan bağlantılar yardımıyla deney numunesine uygulanacak basınçlar aşamalı ve her seferinde bir tek regülatörden ayarlanabilecek şekildedir. Öngörölmüş basınçların uygulamasına ilk önce düşey dengeleme basıncı regülatörünün ayarlanmasıyla başlanır; ikinci aşamada çevre basıncı regülatörü istenen basınç değerine getirilir, bu işlem yapılırken ara bağlantının açılmasıyla aynı değerde bir basınç numunesinin alt başlığınada etki eder. Eğer düşey ve yanal gerilmelerin farklı olması isteniyorsa üçüncü aşamada düşey basınç regülatörü yardımıyla istenen düşey gerilmeler numuneye uygulanabilir. Son aşamada ise ara bağlantıların açık olması şartıyla ters basınç regülatörü istenen ters basınç değerine ayarlanırken aynı değerde bir basınç artışı çevre ve düşey dengeleme basınçlarına eklenir ve numuneye uygulanmış efektif düşey ve yanal gerilmelerin uygulanmış efektif düşey ve yanal gerilmelerin sabit kalması sağlanır. Böyle bir basınç uygulama sisteminin diğer bir özelliğide, deney numunesine basınçların uygulanması sırasında, çevre düşey ve ters basınçların ayrı ayrı ayarlanması sürecinde numunede olabilecek bozulmaların ortadan kaldırılmış olmasıdır.

Bu sistemde numuneye ters basınç, sistem hava basıncı ile çalıştığı için, Şekil 25 de gösterilmiş içi havası alınmış damıtık su dolu ters basınç tankının içine yerleştirilmiş bir lastik balona hava basıncı vererek uygulanır. Bu sistemin avantajı su yüzeyi üzerinde doğrudan hava basıncı bulunmaması ve böylelikle boşluk suyunun içine hava girmesinin engellenmiş olmasıdır. Sistemin orijinal durumunda deney numunesinin içinden ve alt başlıktan üst başlığa doğru su geçirmek ancak çok küçük ters basınç değerlerinde mümkün olmaktadır. Yapımçı firma tarafından bu önlemler alınmış olmasına rağmen kumlarda suya doygun numuneler elde etmekte güç-

füklerle karşılaşmıştır. Bunun üzerine basınç tablosuna ikinci bir ters basınç su tankı eklenmiş ve bu tank numune üst başlığına bağlanmıştır. Bu durumda bir ara bağlantı ile iki ters basınç tankında da daha yüksek basınç değerlerine çıkılabilmekte ve bu ikinci tankın birinciye göre daha alt bir yüksekliğe yerleştirilmesi ile aradaki su yükseklikleri farkından dolayı numunenin içinden yüksek ters basınç değerlerinde de su geçmesi temin edilmektedir.

Tekrarlı Yatay Kuvvet Uygulama Birimi : Şekil 23 de verilen fotoğrafta sol ve Şekil 25 deney hücresinin sağ tarafına yerleştirilmiş olan birim, hava basıncı ile çalışan ve deney numunesine tekrarlı yatay kayma kuvvetleri uygulayabilen birimdir. Bu yükleme birimi yardımıyla üç tip tekrarlı yükleme biçimi (sinoidal, üçgen ve kare kesitli) değişik titreşim frekanslarında (0.0001-3 çevrim/saniye) uygulanabilmektedir. Gerilme kontrollü olan bu yükleme biriminde istenildiği takdirde numuneye bir ilk statik kayma gerilmesi uygulanabileceği gibi değişik kesme hızlarında gerilme kontrollü monotonik kesme deneyleri ve belirli kayma gerilmeleri altında akma deneyleride yapılabilir.

Ölçüm ve Kayıt Birimi : Şekil 23 de verilen deney sisteminin genel fotoğrafında en solda yer alan ölçüm ve kayıt birimleri yatay kuvvetin ölçüldüğü yük hücresinden, yatay ve düşey yer değiştirmelerin ölçüldüğü deplasman ölçerlerden ve boşluk suyu basıncının ölçüldüğü basınç hücresinden gelen elektrik sinyallerinin ayarlanmasını, istenen ölçeklerde büyütülmesini ve göstergelerden okunabilmesini sağlar. Ayrıca ölçülen bu değerler gene istenen ölçeklerde elektronik iki çizici yardımıyla sürekli bir şekilde kayıt edilebilir. Bu çizicilerden birinde deneyler sırasında ölçülen dört değişkenin değerleri zamana göre diğer çizicide ise çoğunlukla yatay yer değiştirmeler yatay eksen ve yatay gerilmeler ile boşluk suyu basıncı oluşumları düşey eksen ve gösterilerek bunların değişimleri ikili eksen takımları üzerine çizdirilebilmektedir.

Bu ana birimlerden oluşan sistemi çalıştırmak için bir hava kompresörü ve bir vakum pompasında sisteme bağlanmıştır.

4.2. Sıvılaştırma Deneyleri

Bu çalışmanın çerçevesi içinde bir önceki bölümde anlatılan deney sistemi kullanılarak iki ayrı kum için sıvılaştırma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde başlıca amaç İ.T.Ü. Maçka İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına yeni gelmiş dinamik basit kesme deney sisteminden elde edilen sonuçların güvenilirliğini kontrol et-

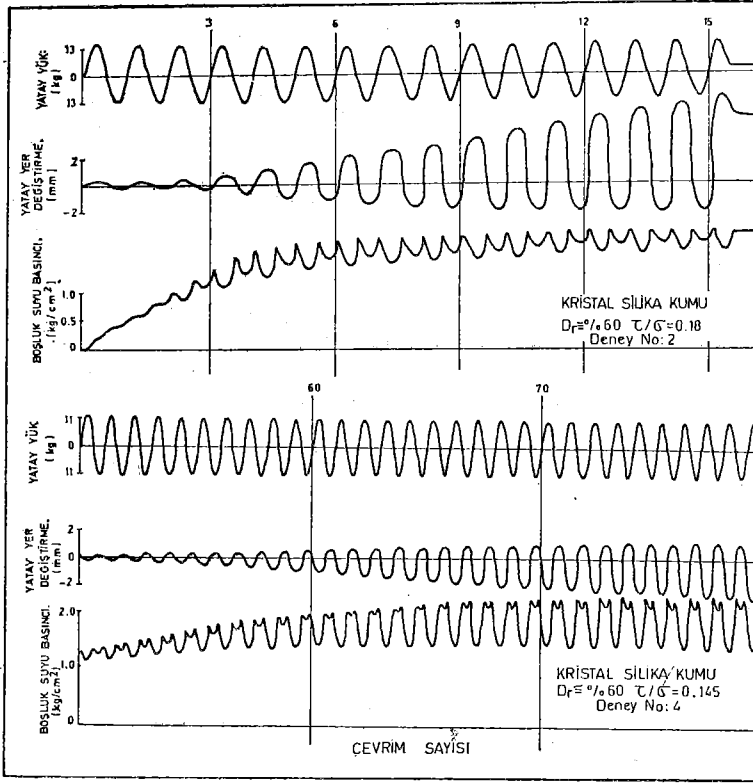
mek ve gerekli düzeltmeleri yapmaktır. Bu amaca yönelik olarak deney numunesi için seçilmiş iki cins kum daha önce başka araştırmacılar tarafından sıvılaşma deneylerinde kullanılmış kumlardır. İlk deney gurubu davranışlarını incelerken (Ansal, 1982) kullanılmış Kristal Silika kumu ikinci gurup deneyler sıvılaşma çalışmalarında (Ansal ve Ögünç 1982) kullanılmış Monterey 0 kumu ile yapılmıştır. Deney numunelerinin hazırlanmasında sıvılaşma deneylerinde öngörülmuş suya doygunluk derecelerinin elde edilebilmesi için gerekli bütün özen gösterilmiştir. Deney için seçilmiş relatif sıklık değerine göre numune hacmine giren kuru kum miktarı içinde damıtık su bulunan bir şişe içine konarak kaynatılmış sonrada bu şişeye vakum uygulanarak kum daneleri arasındaki ve suyun içindeki havanın tamamen alınmasına çaba sarf edilmiştir. Bu şekilde hazırlanan kum numune alt başlığı üzerine takılmış ve içi belirli bir yüksekliğe kadar havası alınmış damıtık su dolu olan donatılı membranin içine su altında ve havayla hiç temas etmesine imkân verilmeden yerleştirilmiştir. İstenen sıklıkta numune elde edilemek için gerektiğinde numune alt başlığına ufak darbeler vurularak kumun istenen hacme gelmesi sağlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan numunelerde bile zaman zaman gerekli doygunluk derecesinin elde edilemediği görülmüş ve arzu edilen doygunluk derecesine erişebilmek için numuneye yüksek ters basınçlar uygulayarak ve numunenin içinden alt başlıktan üst başlığa doğru su geçirerek doygunluğun artırılması belirli bir ölçüde sağlanabilmiştir. Bütün deneyler, numunede B kontrolünde $B > \% 96$ değerleri elde edildikten sonra yapılmıştır.

Bu araştırma çerçevesinde yapılmış deneyler ve deneylerle ilgili bilgiler Tablo 1 de gösterilmiştir.

Tablo 1 Sıvılaşma Deneyleri

Kum Cinsi	Kristal Silika				Monterey 0				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Deney No									
Relatif Sıklık (%)	60	60	60	60	65	65	65	65	64
Kayma Gerilmesi Oranı τ/σ_0	0.3	0.18	0.16	0.145	0.166	0.144	0.167	0.144	0.22
Ön Sıvılaşma N_s Çevrim Sayısı	3	6	18	77	24	6	2	4	5

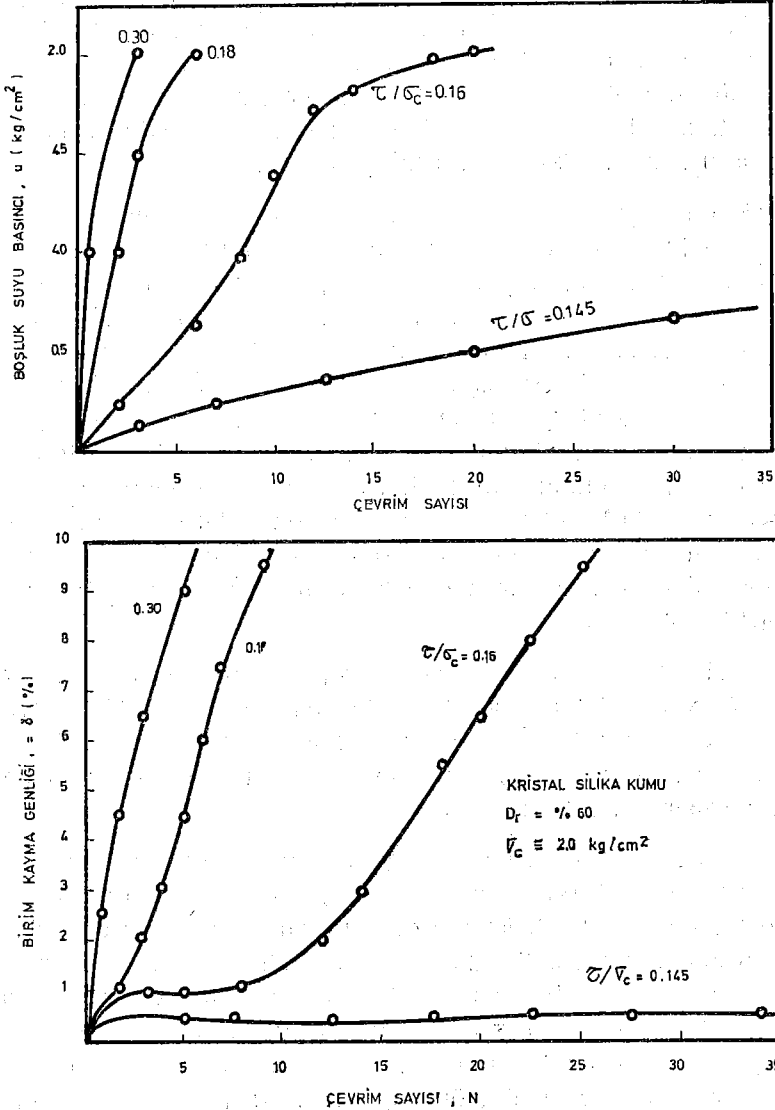
Kristal Silika kumu üzerinde yapılan deneylerde deney numunesi yaklaşık % 60 relatif sıklıkta hazırlanmış ve numunelerde efektif çevre basıncı $\sigma_e' = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ olacak şekilde yanal ve düşey basınçlar 6.0 kg/cm^2 ve ters basınç 4.0 kg/cm^2 eşit olacak şekilde uygulanmıştır. Biri büyük (Deney No. 2) biri den en küçük (Deney No. 4) kayma gerilmesi genlikleri uygulanarak yapılmış deneylerde bulunmuş kayma gerilmesi, birim kayma ve boşluk suyu basınç oluşumlarının zamana göre değişimleri Şekil 26 da gösterilmiştir. Buradan görüleceği gibi iki davranış biçiminden söz edilebilir. Büyük kayma gerilmesi uygulanan deneylerde boşluk suyu basıncı olu-



Şekil 26. Dinamik Basit Kesme Deney Kayıtları

şumları ilk bir kaç çevrim içinde oluşmakta ve bunun sonucunda birim kayma genliklerinde hızlı artışlar gözlenmektedir. Diğer yandan küçük kayma gerilmesi genlikleri uygulanan numunelerde boşluk suyu basınçlarının oluşumu daha yavaş olmakta ve numunede efektif çevre gerilmeleri açısından büyük bir azalma olmayacağı için bir süre birim kayma genlikleri küçük mertebelerde kalmakta-

dir. Kristal Silika kumu üzerinde yapılmış deneylerde her çevrim içinde gözlenmiş en büyük boşluk suyu basıncı ve birim kayma genlikleri değişimlerinin çevrim sayılarına göre gösterildiği Şekil 27 de de aynı olayı izlemek mümkündür.



Şekil 27 — Dinamik Basit Kesme Deneyinde Birim Kayma Genliğinin ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısına Göre Değişimi

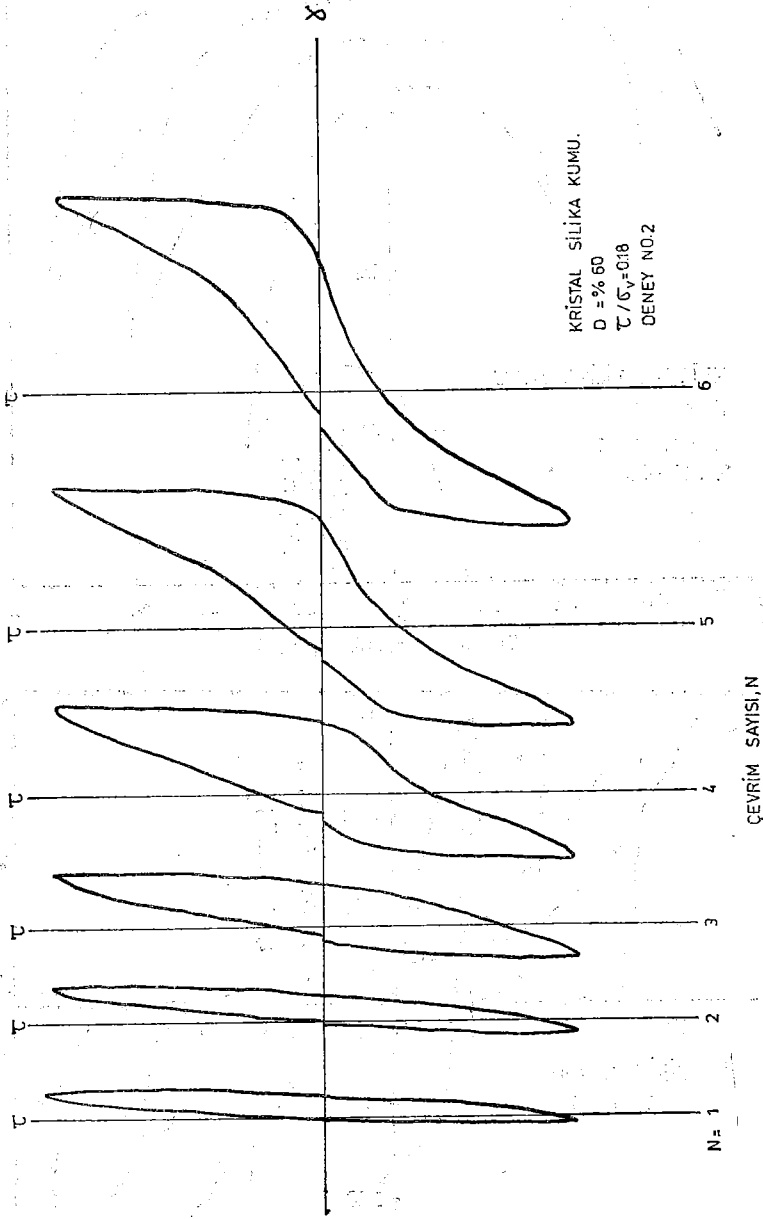
Deney sırasında artan boşluk suyu basınçları sonucunda azalan efektif çevre gerilmeleri kayma mukavemetinin azalmasına yol açmaktadır. Bu da histerisis ilmiğinin Şekil 28 da 2 numaralı deney sırasında elde edilmiş iki eksenli çizimlerden her çevrim için bulunmuş histerisis ilmiğinin ayrı çizilmiş olarak gösterilmesiyle daha açıkça görülebilir. Tekrarlı kayma gerilmeleri altında davranışı eşdeğer kayma modülü ve sönüm oranı cinsinden tanımlamak istersek bu şekilden (Şekil 28) artan çevrim sayısı ile eşdeğer kayma modülünün önemli ölçüde azaldığını diğer yandan sönüm özelliklerinin histerisis ilmiği içinde kalan alanla orantılı olduğu hatırlanacak olursa sönüm miktarında hızla arttığını gözlemek mümkündür.

Tekrarlı kayma gerilmeleri altında histerisis ilmiğinin değişimi ve efektif gerilmelerinin azalmasıyla ilmiğinin şeklinin bozulması Şekil 29 de verilmiş 1 nolu deneyden elde edilmiş iki eksenli çizimlerden de görülmektedir. Bu şekilde ek olarak yükleme çevrimlerinde sürekli olarak alınan kayıtlardan boşluk suyu basıncının değişim biçimide gösterilmiştir. Buradan görülebildiği gibi bir çevrim içinde en büyük boşluk suyu basıncı değerine birim kaymanın yaklaşık olarak sıfır olduğu bölgede ulaşılmaktadır. Artan birim kayma değeri ile numunede boşluk suyu basınçlarında bir azalma görülmektedir, bu azalma numunede artan şekil değiştirmenin etkisi ile kum daneciklerinin birbirleri üzerlerinden yuvarlanmaları ve bununda geçici olarak bir hacim kabarmasına yol açmak istemesi biçiminde açıklanabilir.

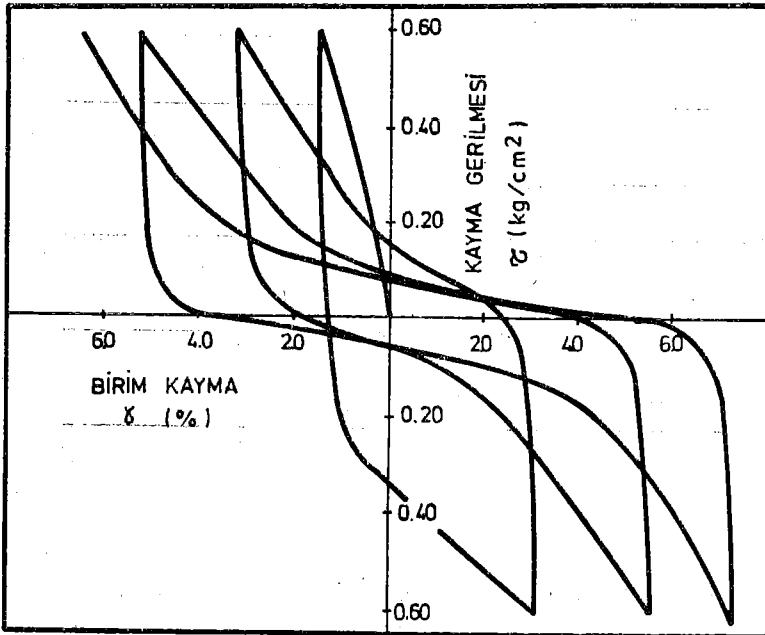
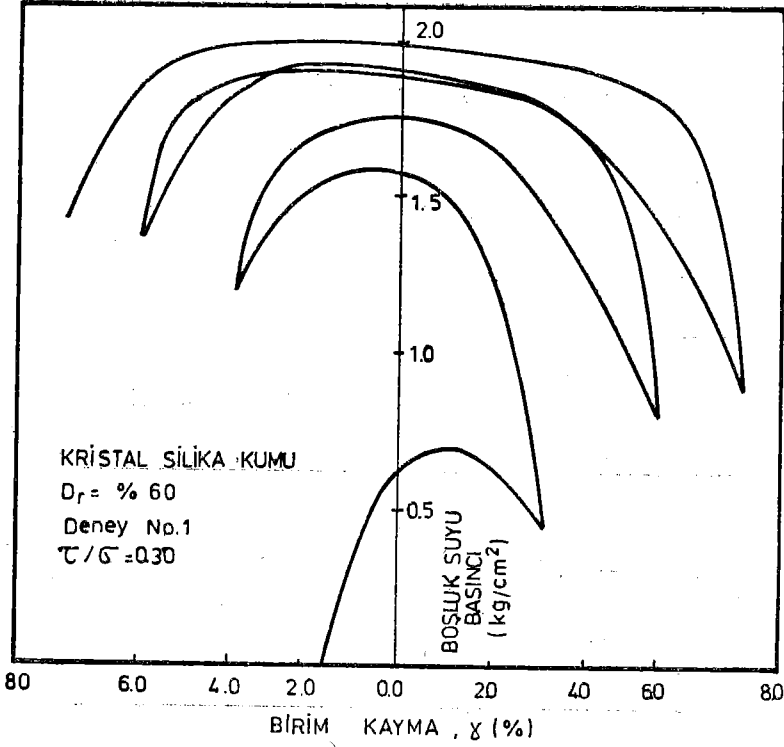
Kristal Silika kumu kullanılarak yapılmış dört sıvılaşma deneyi sonuçları aynı kum kullanılarak Martin, Finn ve Seed (1975) tarafından elde edilmiş deney sonuçları ile karşılaştırılarak Şekil 30 kayma gerilmesi oranı ön sıvılaşmanın meydana geldiği çevrim sayısı ilişkileri cinsinden gösterilmiştir.

Burada Martin, Finn ve Seed (1975) tarafından yapılmış deneylerde numune % 45 relatif sıklıkta ve $\sigma_v = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ düşey basınç altında Roscoe tipi basit kesme deney aleti ile yapılmış olup iki deney arasındaki fark relatif sıklıklardaki farklılıktan ve de bu araştırmada izotropik çevre basıncı altında deney yapılmış olmasına karşın Roscoe tipi aletle gerilmeleri izotropik olmadığı ve K_0 şartı gözönüne alındığında yatay doğrultularda gerilmelerin yaklaşık 1 kg/cm^2 mertebesinde olduğu düşünülürse Şekil 30 da gösterilmiş farkın bulunması açıklanabilir.

İkinci grup sıvılaşma deneyleri birçok araştırmacı tarafından sıvılaşma incelemelerinde kullanılmış bir kum olup dane şekli yarı

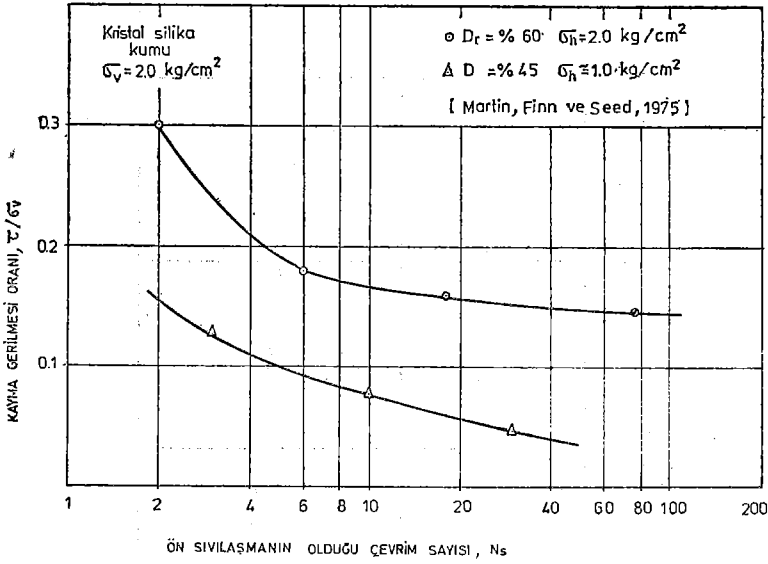


Şekil 28 — Dinamik Basit Kesme Deneyinde Histerisis İlmiklerinin Çevrim Sayısına Göre Değişimi



Şekil 29 — Dinamik Basit Kesme Deneyinde Kayma Gerilmesi ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Kaymalara göre Değişimi

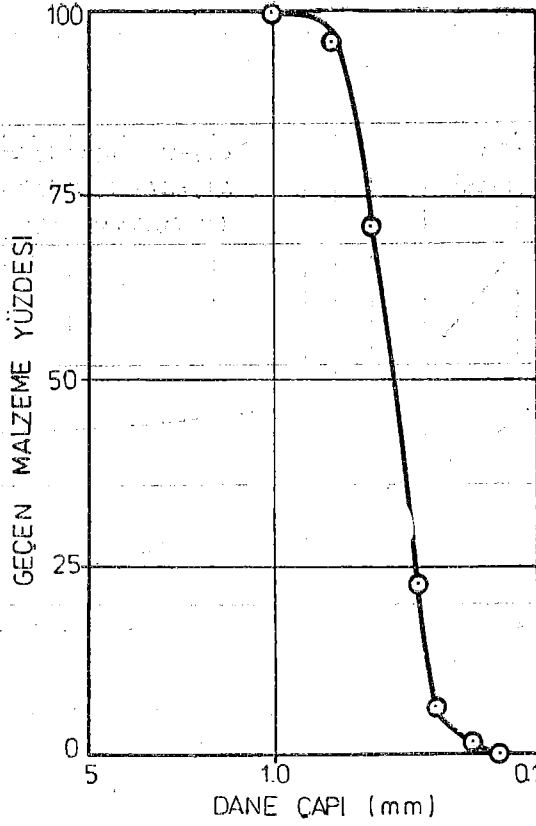
yuvarlak ve orta köşeli olarak nitelenen bir kumdur (Silver, 1977; Mulis, et al, 1977; De Alba, et. al., 1975).



Şekil 30 — Dinamik Basit Kesme Deneylerinde Ön Sivilaşma İçin Gerekli Çevrim Sayısı-Kayma Gerilmesi Oranı Değişimleri.

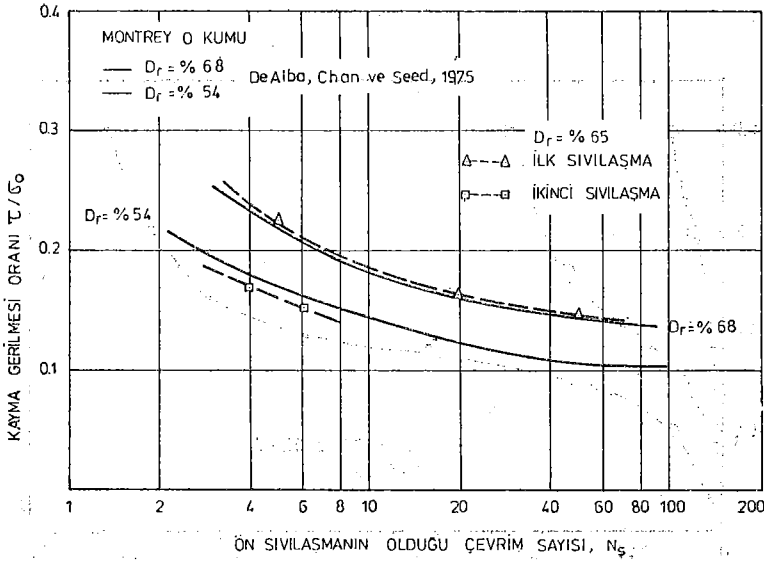
Şekil 31 de dane dağılım eğrisi gösterilmiş Monterey 0 kumunun dane birim hacim ağırlığı $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$, en büyük kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_k \text{ min} = 1.69 \text{ t/m}^3$ en küçük boşluk oranı $e_{\text{min}} = 0.56$ ve en küçük kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_k \text{ min} = 1.43 \text{ t/m}^3$ en büyük boşluk oranı $e_{\text{max}} = 6.85$ olarak bulunmuştur (Silver, 1977), Tablo 1 de belirtildiği gibi Monterey 0 kumu kullanılarak beş adet deney numunesi benzer şekilde hazırlanmış ve gene deneyler $\sigma_c = 2.00 \text{ kg/cm}^2$ efektif çevre basıncı altında yapılmıştır. Deneylerin üç tanesi (Deney No 5, 6 ve 9) yaklaşık % 65 relatif sıklıkta hazırlanmış numuneler üzerinde üç farklı gerilme oranı kullanılarak yapılmıştır. Bulunan sonuçlar gerilme oranı ön sivilaşma için gerekli çevrim sayılarına göre Şekil 32 de gösterilmiştir.

Bu şekilde ayrıca De Alba, et. al (1975) tarafından büyük ebatlı dinamik basit kesme denet aleti kullanılarak aynı kumda yapılmış deneylerden elde edilmiş kayma gerilmesi oranı değişimleri iki relatif sıklık değerleri için $D_r = \% 54$ ve $\% 68$ gösterilmiştir. Deney sonuçları arasında mühendislik açısından yeterli sayılabilecek bir



Şekil 31 — Monterey Kumu Dane Dağılımı Eğrisi.

uyum görülmektedir. Bu araştırma çerçevesinde elde edilmiş sonuçlarda ön sıvılaşmaya yol açan kayma gerilmesi oranı değerlerinin biraz daha büyük olmaları iki deney numunesinin boyutları arasındaki farka dayanarak açıklanabilir. Bu araştırma da kullanılan deney sisteminde numune çapının sadece 7 cm olmasına karşın De Alba, et. al (1975) tarafından kullanılmış deney numunesinin dikdörtgen kesitli ve yaklaşık 230 cm uzunluğunda 107 cm genişliğinde ve 10 cm yüksekliğinde olduğu gözönünde tutulursa numuneyi çevreleyen membran, alt ve üst başlıklardan oluşan rijiditenin bu araştırmada kullanılmış standart basit kesme aletinde daha önemli bir yer tutacağı açıktır. Buda sıvılaşmaya yol açan kayma gerilmelerinde bir artışa neden olacaktır. Monterey 0 kumu kullanılarak yapılmış üç deneyde gözlenmiş olan boşluk suyu basıncı ve birim kayma genliği artışları Şekil 33 de gösterilmiştir. Bu şekilde de da önce Kristal Silika kumu kullanarak yapılmış deneylerden elde

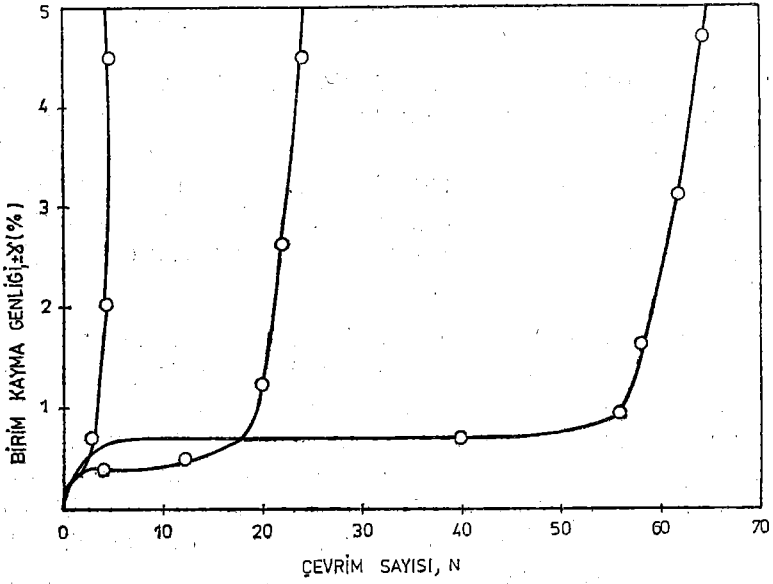
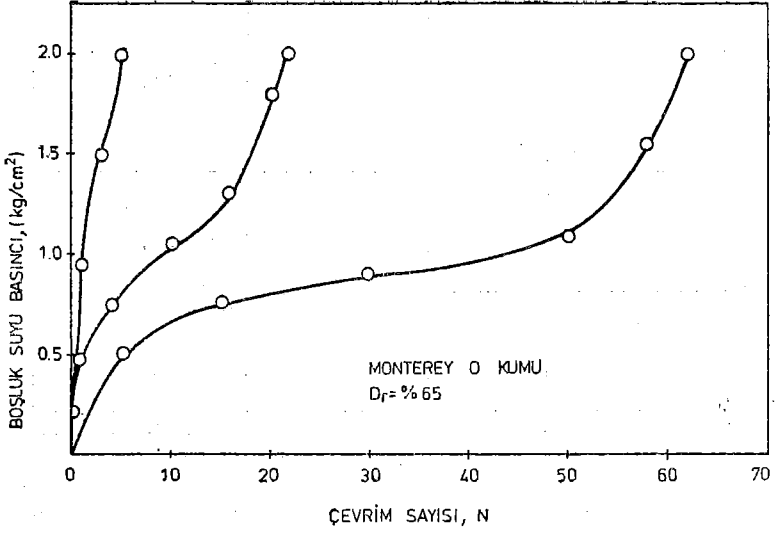


Şekil 32 — Dinamik Basit K esme Deneylerinde Kayma Gerilmesi Oranı-Ön Sıvılaşma İçin Gerekli Çevrim Sayısı Değişimi.

edilmiş sonuçlara benzer sonuçlar gözlenmektedir. Burada da birim kayma genliklerinde ilk başlarda fazla bir artış gözlenmemekte fakat belirli bir noktadan sonra hızlı artışlar olmaktadır. Bu noktayı bir mukavemet eşiği olarak düşünmek ve artan boşluk suyu basınçları ve azalan efektif çevre gerilmesi sonucunda mukavemet değerinin bu eşiğin altına düşmesinin birim kaymalarda ani artışlar olmasına yol açtığı düşünülebilir.

İlk grup deneylerden farklı olarak, Monterey 0 kumu kullanılarak yapılmış ve ön sıvılaşma gözlenmiş iki deneyde (Deney No : 5 ve 6) deney bitiminde drenaj vanaları açılmış ve boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi beklenmiştir. Yaklaşık 2-3 saatlik bir bekleme süresinden sonra numunelere tekrar aynı kayma gerilmesi genlikleri uygulanmıştır. Şekil 34 de karşılaştırılabilecek bir biçimde gösterilmiş ilk ve ikinci sıvılaşma deneylerinde sürekli olarak alınmış kayma kuvveti, yatay yer değiştirme ve boşluk suyu basıncı kayıtlarından görüleceği gibi ikinci sıvılaşma deneyinde boşluk suyu basıncı ani bir şekilde artmakta ve ilk bir iki çevrim içinde çevre basıncına eşit bir değere ulaşmakta yani sıvılaşma olmaktadır.

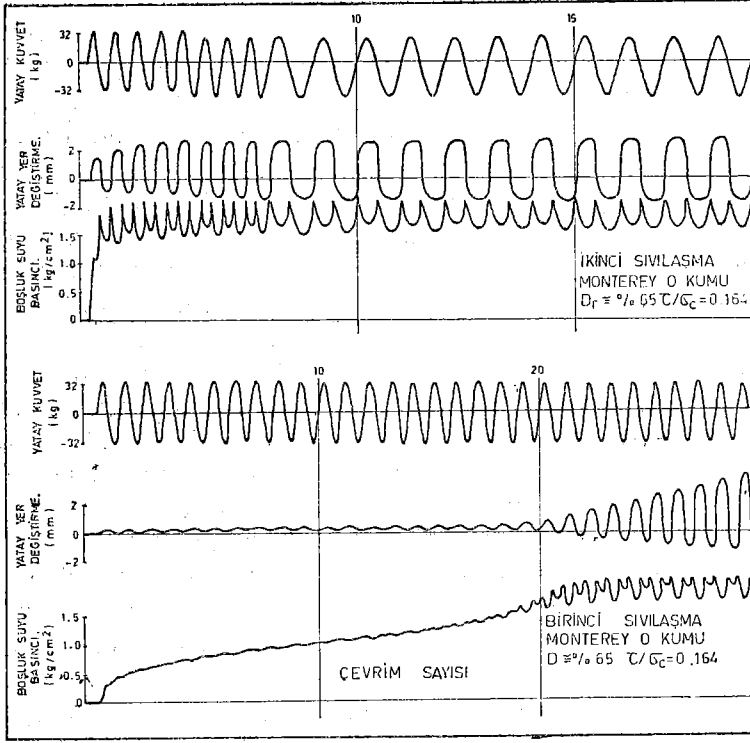
İkinci sıvılaşma veya yeniden sıvılaşma deneyinde birim kayma yatay eksenine göre alınmış iki eksenli kayma gerilmesi ve boşluk



Şekil 33 — Dinamik Basit Kesme Deneyinde Birim Kayma Genliğinin ve Boşluk Suyu Basıncının Çevrim Sayısıyla Değişimi.

suyu basıncı değişimlerinin gösterildiği Şekil 35. de de boşluk suyu basıncındaki ani artışı görmek mümkündür. Burada diğer bir farkta; Şekil 29 da Kristal Silika kamu üzerinde yapılmış ilk sıvılaşma deneyinden elde edilmiş benzer histerisis ilmiklerinde ilk yüklenme çevrimindeki davranış biçimlerinde ortaya çıkmaktadır. İlk sıvılaşma deneyinde ilk çevrimde ilk kayma gerilmesi uygulanması ve boşaltılması kısmı yaklaşık elastik bir davranış gösterirken (bu özellik bütün ilk sıvılaşma deneylerinde gözlenmiştir). İkinci sıvılaşma deneyinde bu ilk kayma gerilmesi uygulanması aşamasında kum numune tam plastik bir malzeme davranışı göstermektedir. Bu sonuçlara benzer sonuçlar Finn Bransby ve Pickering (1970) tarafından Roscoe tipi basit kesme deney sistemi ile yapılmış deneylerde ve Ansal ve Ögünç (1981) tarafından üç eksenli deney sistemi kullanılarak yapılmış deneylerde de ortaya çıkmıştır. Bu tip bir davranışa diğer bir değişle daha önce olmuş bir sıvılaşmanın ve numunenin etkisinde kalmış olduğu büyük birim kaymaların sonucunda, numunenin relatif sıklılığında azda olsa bir artış olmasına rağmen, sıvılaşmaya karşı direncin azalmış olması ancak zemin dane yapısında olmuş değişiklikler yardımıyla açıklanabilir. Sıvılaşmanın dane yapısını daha kolay göçebilir bir düzene getirmiş olması ve danelerin sıvılaşmadan sonra tekrar birbirleri ile değme noktalarında daha zayıf bağlar olduğu düşünülebilir. Kumların sıvılaşmadan sonra yavaş bir biçimde çökelmeleri süresinde herhangi bir mekanik sıkıştırma olayı olmadığından danelerin birbirlerine ilk değdikleri yüzey uç noktaları daneler arasındaki değme noktalarını meydana getirmektedir. İlk sıvılaşma deneylerinde azda olsa bir takım titreşimler ve basınçlar uygulandığı için daneler arasındaki değme noktalarında her türlü harekete göre direncin daha fazla olduğu ve bununla arada sıvılaşmaya karşı direnç açısından Şekil 34 de de gösterildiği gibi bir azalmaya yol açmadığı gözlenmektedir.

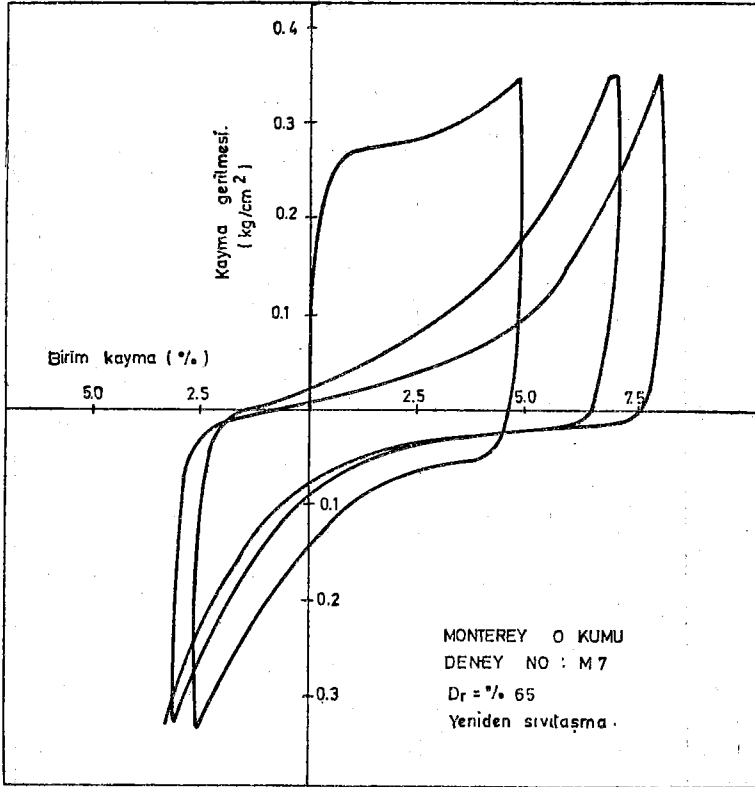
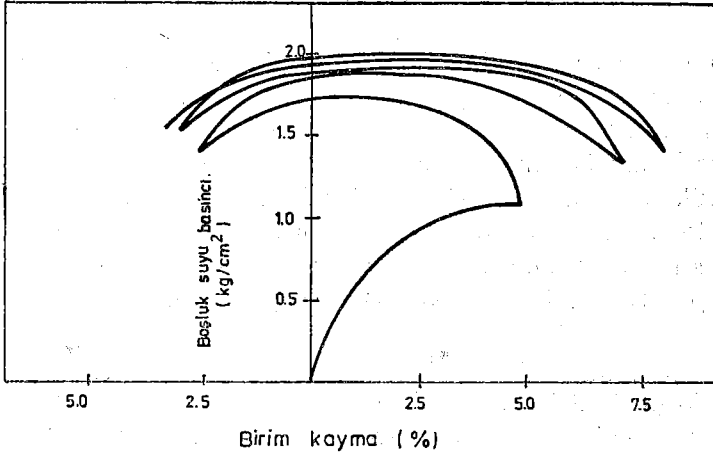
Bu araştırma çerçevesi içinde iki cins kum kullanarak yapılmış sıvılaşma deneylerinden elde edilmiş sonuçların ışığında deneylerin yapılmış olduğu dinamik kesme deney sisteminin dünyadaki diğer benzerlerinden elde edilmiş sonuçlarla uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Yapılmış deneyler kullanılarak suya doğgun kumların kayma gerilmesi-birim kayma-boşluk suyu basıncı davranış biçimleri sıvılaşma olayına yönelik olarak incelenmiş ve açıklanmaya çalışılmıştır. Yapılan araştırmanın son aşamasında belirli bir deney programı içinde yeniden sıvılaşma olayı incelenmiştir. Böyle ilk sıvılaşmanın etkisinin incelenmesinde en büyük güçlük bu ilk sıvılaşma sırasında numunenin bozulması olmaktadır. Bu nedenle deney sayısı sınırlı kalmaktadır.



Şekil 34 — Dinamik Basit Kesme Deney Kayıtları

5. SIVILAŞMA ANALİZLERİ

Uygulamada sivilaşma araştırmalarının son aşaması inceleme-ye esas olan bölgede olması beklenen bir depremde sivilaşma olasılığının değerlendirilmesidir. Bundan önceki kısımlarda sivilaşmanın hangi şartlar altında meydana geldiği ve sivilaşmaya tesir eden etkenlerden söz edilmişti. Bu son kısmında bu anlatılanların ışığı altında verilen bir bölgede sivilaşma olasılığının nasıl değerlendirilmesi gerektiği hakkında bilgiler verilecek ve uygulama alanında kullanılan analiz yöntemleri açıklanacaktır. Günümüzde birçok araştırmacı tarafından üzerinde çalışılan bir konu olması nedeniyle değişik önerilere sık sık rastlanmakla beraber bunların birçoğu teorik bir düzeyde kalmakta ve uygulamada kullanılmamaktadır. Burada amaç önerilen bütün metodları anlatmaktan çok, mühendislerce benimsenmiş ve uygulamada kullanılan yöntemler ile sivilaşma araştırmalarında önemli bir yerleri olduğu düşünülen yeni bir iki analiz yönteminden söz etmektir.



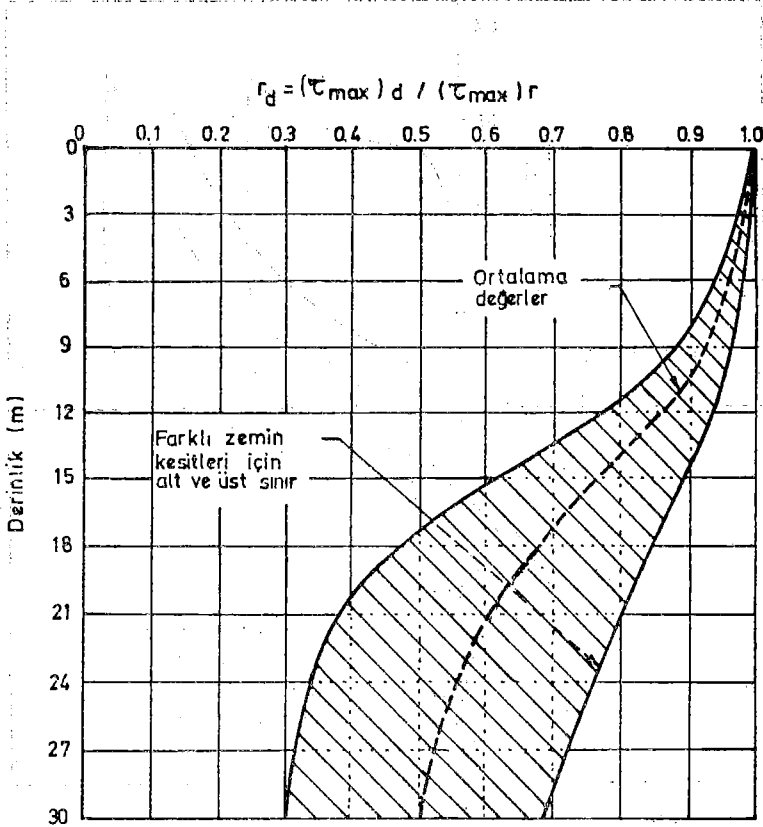
Şekil 35 — Dinamik Basit Kesme Deneyinde Kayma Gerilmesi ve Boşluk Suyu Basıncının Birim Kaymaya Göre Değişimi.

5.1. Basitleştirilmiş Yöntem

Bir deprem sırasında zemin kesitinde meydana gelecek kayma gerilmelerinin basit bir şekilde hesaplanmasının amaçlandığı bu yöntem Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilmişti. Burada ele alınan bir zemin kolonunda oluşacak en büyük kayma gerilmelerinin en büyük deprem ivmesiyle (a_{max}) doğru orantılı olacağı fakat zemin kolonunun gerçekte şekil değiştiren bir kolon olduğundan en büyük kayma gerilmelerinin derinliğe bağlı olarak değişeceği varsayılmıştır. Bu halde en büyük kayma gerilmesi,

$$\tau_{max} = r_d \gamma z a_{max}/g \quad (8)$$

ifadesiyle gösterilebilir. Burada γ zeminin birim hacim ağırlığı, z yüzeyden derinliği, g yer çekimi ivmesi ve r_d ise Şekil 36 de gösterildiği gibi derinliğe bağlı olarak değişen gerilme azaltma katsayısıdır.



Şekil 36 — Gerilme Azaltma Katsayısının Derinlikle Değişimi (Seed, 1976)

Zemin tabakalarının deprem sırasında davranışlarını belirleyen esas gerilmelerin en büyük kayma gerilmeleri olmayıp ortalama kayma gerilmelere olduğu düşünülerek zemin kesitinde meydana gelecek ortalama kayma gerilmesi,

$$\tau_{ort} = 0.65 r_d \gamma z a_{max}/g \quad (9)$$

şeklinde belirtilir. Bu ortalama kayma gerilmesinin sivilaşma analizine esas olacak tekrar sayısı seçilmiş olan depremin süresine bağlı olacağından deprem şiddetine göre Tablo 2 de gösterildiği gibi seçilmesi önerilmektedir. (Seed ve Idriss, 1971).

Tablo 2 — Deprem Şiddetine Bağlı Ortalama Kayma Gerilmesi Tekrar Sayısı

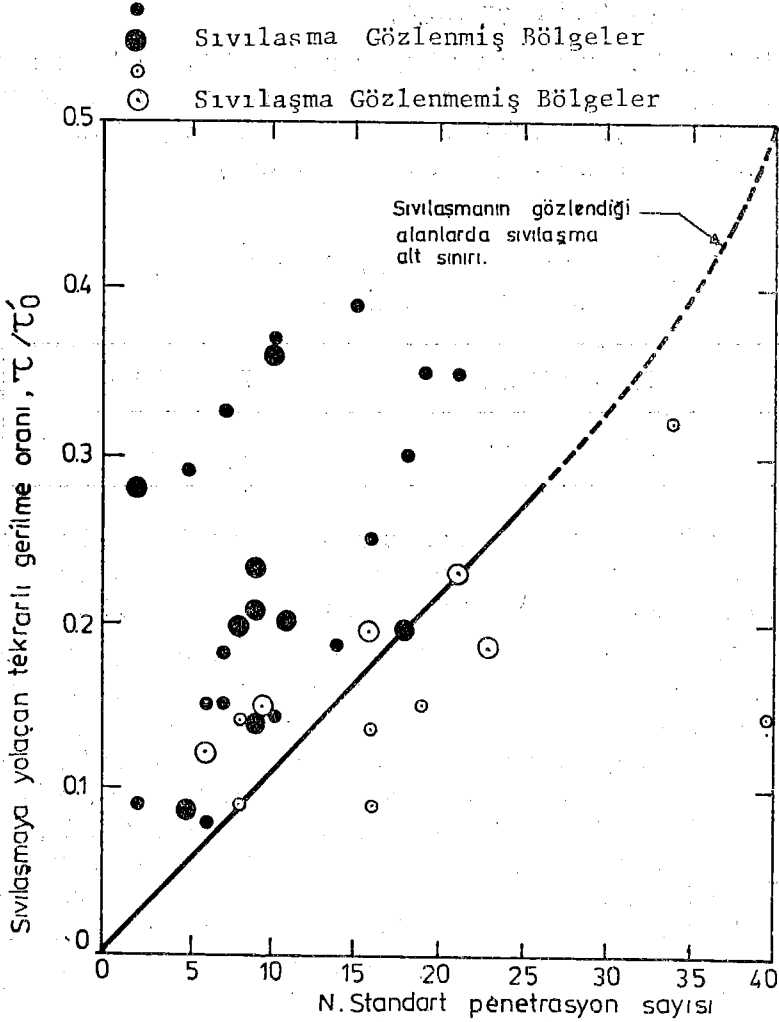
Deprem Şiddeti	7	7.5	8
Tekrar Sayısı	10	20	30

Böylece en büyük deprem ivmesine ve deprem şiddetine bağlı olarak bulunan ortalama kayma gerilmesinin ve tekrar sayısının sivilaşmaya yol açıp açmayacağı iki şekilde değerlendirilebilir.

(1) Geçmişte olmuş depremlerde kum tabakalarının davranışlarına dayanarak geliştirilmiş Şekil 37 de gösterilen amprik bağıntı yardımıyla incelenen bölgede düzeltilmiş SPT darbe sayılarına, N_1 , bağlı olarak sivilaşmanın olasılığı tahmin edilebilir. Böyle bir yaklaşımın (a) kullanılan amprik bağıntısının sivilaşmaya etki eden birçok etkeni, örnek olarak deprem süresi gibi, içine almadığı (b) çakma kuvvetinin yani darbe sayısının sivilaşma olasılığını değerlendirmek için yeterli bir gösterge olmadığı ve (c) standart penetrasyon deneyinde bulunan darbe sayılarının her zaman güvenilir olmadığı son-
daj şartlarına göre önemli değişiklikler gösterdiği düşünülürse, bu yaklaşımın yaklaşık bir hesap yolu olduğu ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen bu tip bir irdeleme SPT darbe sayıları dışında ilâve bir bilgi ve deney gerektirmediği için çoğunlukla her sivilaşma incelemesinde ilk aşamada uygulanır.

(2) Değişik zemin numuneleri üzerinde geçmişte yapılmış dinamik deneylerden bulunmuş olan sivilaşma özelliklerine göre Seed ve Idriss (1971) tarafından hazırlanmış zemin özelliklerine bağlı eğriler yardımıyla sivilaşma olasılığı değerlendirilebilir.

Burada değişik araştırmacılar tarafından değişik kumlar kullanılarak relatif sıklığın % 50 olduğu hallerde yapılmış dinamik üç eksenli basınç deneylerinden bulunmuş, sıvılaşmaya yol açağan geril-

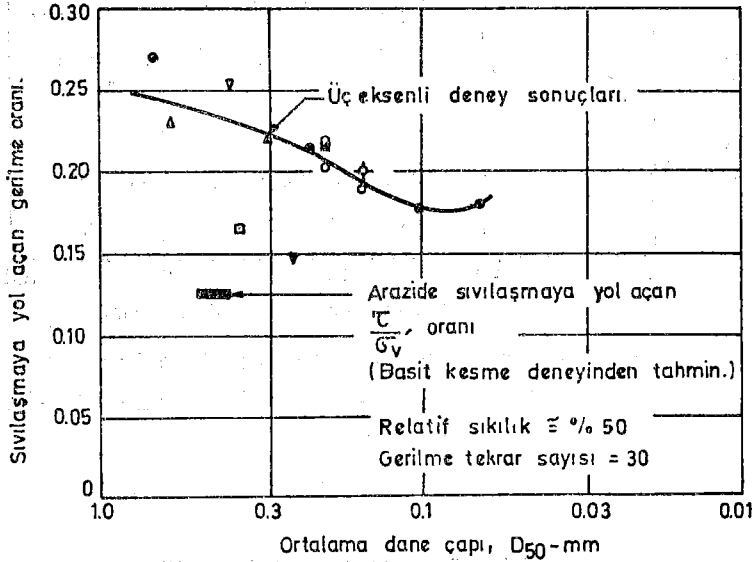


şekil 37 — Geçmiş Depremlerde Kum Tabakalarında Doğada Gözlenmiş Sıvılaşma Olayları (Seed, 1976).

me farkının çevre gerilmesine oranı ($\sigma_a / 2\sigma_c$) şekil 38 ve 39 da ortalama dane çapına göre gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde aynı zamanda sıvılaşmaya yol acağacak dinamik basit kesme deneyinden:

bulunmuş olan kayma gerilmesinin normal efektif gerilmeye oranında (τ/σ'_v) gösterilmiştir. Burada sivilaşmaya yol açan τ/σ'_v oranının $\sigma_d/2\sigma_c$ gerilme oranına göre az olduğu görülmekle birlikte daha önceki bölümde de gösterildiği gibi iki sonuç arasında şöyle bir ilişki kurulabilir.

$$\tau/\sigma'_v = C_r (\sigma_d/2\sigma_c) \quad (10)$$



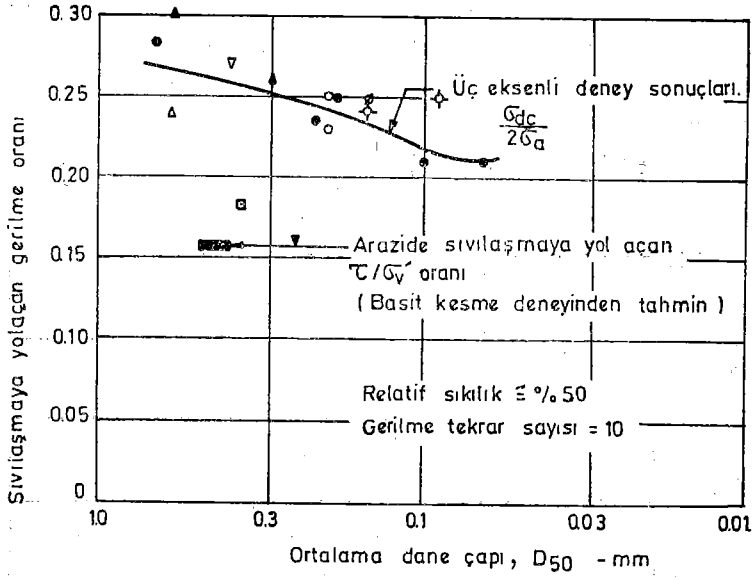
Şekil 38 — Ortalama Dane Çapına Göre 30 Çevrimde Sivilaşmaya Yol Açan Gerilme Oranları (Seed, 1976)

Burada C_r katsayısı Şekil 40 de gösterildiği gibi relatif sıklığa bağlı olarak değişen ve dinamik üç eksenli deney neticelerinden arazide oluşacağı düşünülen gerilme oranını elde etmek için kullanılan gerilme düzeltme katsayısıdır.

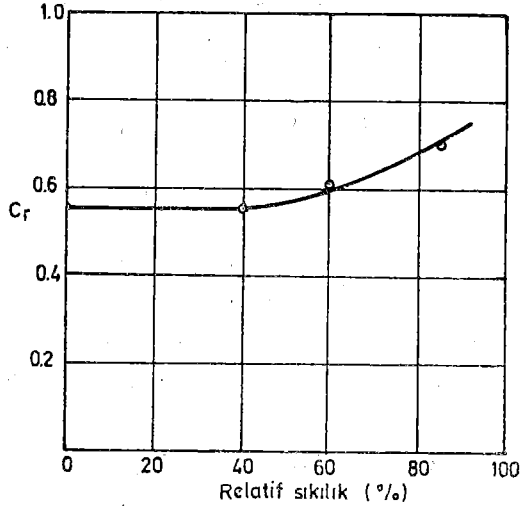
Sivilaşma olasılığının relatif sıklık ile doğrudan bağlantılı olduğu görülerek sivilaşmaya yol açacak gerilme oranını Seed ve Idriss (1971) tarafından,

$$(\tau/\sigma'_v)_{Dr} = (\sigma_d/2\sigma_c)_{DR50} C_r (D_r/50) \quad (11)$$

şeklinde verilmiştir. Burada $(\sigma_d/2\sigma_c)_{DR50}$ relatif sıklığın % 50 olduğu halde sivilaşmaya yolaçan gerilme oranı olup D_r 'de yüzde cinsinden relatif sıklığı göstermektedir.



Şekil 39 — Ortalama Dane Çapına Göre 10 Çevrimde Sıvılaşmaya Yol Açan Gerilme Oranları (Seed, 1976)



Şekil 40 — C_r Düzeltme Katsayısının Relatif Sıklığa Göre Değişimi.

Çoğunlukla ön geoteknik incelemelerde dinamik deneyler yapmadan Şekil 38 ve 39 dan yararlanarak seçilen tasarım depremine göre sıvılaşma olasılığı kolayca hesaplanabilir. Seçilen tasarım depremine göre (9) no'lu bağıntı ile zemin kesitinde bulunan kayma gerilmesinin bir sıvılaşmaya sebep olup olmayacağı (11) no'lu bağıntı ile bulunan sıvılaşma gerilmesiyle kıyaslanması sonucunda bulunur.

Örnek olarak ortalama dane boyutu $D_{50} = 0.2$ mm olan ve yeraltı su seviyesinin 1.5 m derinlikte bulunduğu bir kum dolguda 7 manyitüdünde bir depremde sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi istenmiş olsun.

Böyle bir durumda sıvılaşma olasılığının kum tabakasının derinliği boyunca incelenmesi ve değişik derinliklerde bulunması gerekmektedir. Burada bu yola gidilmemiş olup yeraltı su seviyesinin 0-3 m arasında olduğu zaman sıvılaşma açısından kritik derinliğin 6 m civarında olacağı varsayımından hareket ederek sadece bu seviyedeki sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi yapılmıştır.

İlk olarak 6 m derinlikte meydana gelecek ortalama kayma gerilmeleri büyük deprem ivmesi cinsinden 9) no.lu bağıntıyı kullanarak,

$$\tau_{av} = 0.65 \times 0.95 \times \gamma h a_{max}/g \quad (12)$$

şeklinde belirtilebilir. Burada $r_d = 0.95$ değeri 6 m derinlik için Şekil 36 kullanılarak bulunmuştur.

Sıvılaşma olasılığı 7 manyitüdünde bir deprem için incelendiğinden Tablo 2 den tekrar sayısı 10 olarak ve kumun ortalama dane çapı $D_{50} = 0.2$ mm verildiğine göre Şekil 38 den yararlanarak dinamik üç eksenli deneylere göre sıvılaşmaya yol açacak gerilme oranı içinde $(\sigma_d/2\sigma_c)_{DR50} = 24$ değeri bulunur. Buradan (11) no.lu bağıntı yardımıyla arazide sıvılaşmaya yol açacak kayma gerilmeleri,

$$\tau_{N10} = 0.24 \sigma'_v (D_r/50) C_r \quad (13)$$

ifadesiyle yazılabilir. Sıvılaşmanın olması için $\tau_{N10} = \tau_{av}$ olması gerektiğinden (12 ve 13) no.lu bağıntıları birbirine eşitlersek,

$$0.65 \times 0.95 \times \gamma h a_{max}/g = 0.24 \sigma'_v (D_r/50) C_r \quad (14)$$

veya

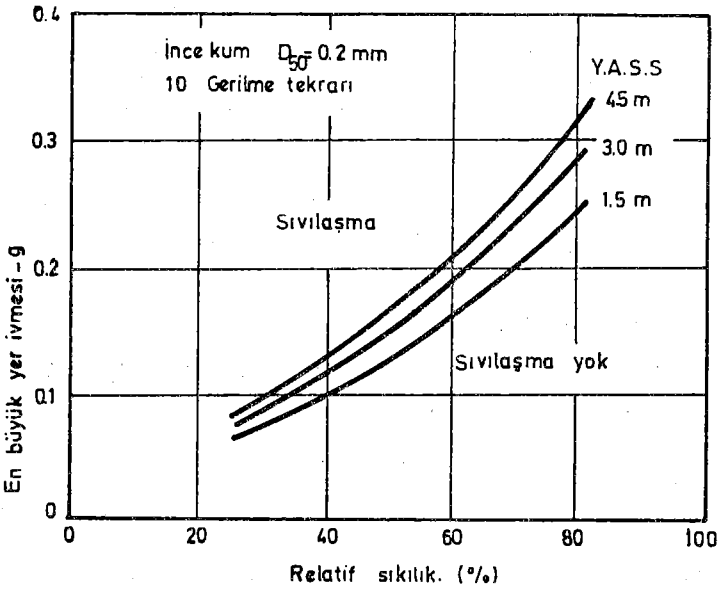
$$(a_{max}/g) = 0.0078 \sigma'_v C_r D_r/h \quad (15)$$

elde edilir. Su seviyesi 1.5 m derinlikte olduğuna göre,

$\gamma \cdot h = 1.80 \times 6 = 10.8 \text{ t/m}^3$; $\sigma'_v = 1.5 \times 1.8 + 4.5 \times 0.80 = 6.3 \text{ t/m}^2$ (16)
buradan da

$$a_{\max}/g = 0.0046 C_r D_r \quad (17)$$

bağıntısı elde edilir. C_r katsayısının Şekil 40 alınmasıyla en büyük deprem ivmesi ile relatif sıklık arasında Şekil 41 de gösterildiği gibi bir ilişki bulunur. Eğrinin üstünde kalan bölgede sıvılaşma olasılığı yüksek, altında ise az olmaktadır. Burada kum tabakasının göreceli sıklık alt ve üst sınırları için bir değerlendirmeye gitmek en büyük deprem ivmesi için alt ve üst sınırlar bulmak ve bu ivmelerinin olasılığını değerlendirmek gerekir.



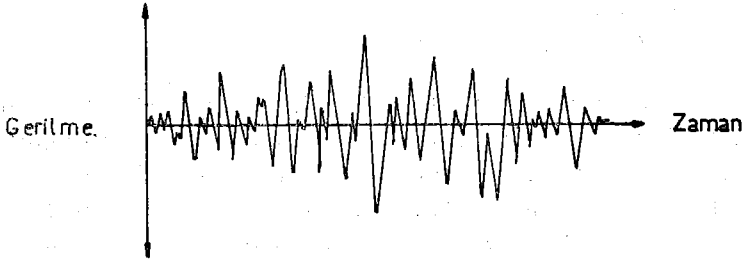
Şekil 41 — Sıvılaşmaya Yol Açabilecek Deprem İvmesi Değerleri.

5.2. Dinamik Analiz Yöntemi

Bu yöntem basitleştirilmiş yöntemle benzer olup zemin kesitinde meydana gelecek ortalama kayma gerilmelerinin ve tekrar sayısının daha kuramsal ve gerçeğe yakın bir metodla ve sıvılaşmaya aynı tekrar sayısında yol açacak kayma gerilmelerinde laboratuvar deneyleri yoluyla bulunması esasına dayanır. Esas olarak Seed ve Idriss (1967) tarafından önerilen bu yöntem birçok araştırmacı tara-

findan farklı biçimlerde uygulanmıştır. Bu analiz yöntemi ve bu yöntem için yapılan farklı önerileri üç kısımda incelenebilir.

(a) Analizin ilk adımı olarak seçilmiş olan bir tasarım depreminin etkisi altında zemin kesitinde meydana gelecek kayma gerilmeleri kayıtlarının kesitte değişik derinlikler için Şekil 42 da gösterildiği gibi bulunmasıdır. Kayma gerilmelerinin zamana göre hesaplanması için tek boyutlu kayma dalgası analiz yöntemi (Seed ve Idriss 1971) ile ana kayadan yukarı doğru ve dekonvalusyon meyodu ile (Roesset ve Whitman, 1969) Schnabel, et al (1972) yüzeyden aşağıya doğru hesap yolları uygulanabilir.



Şekil 42 — Bir Deprem Sırasında Kayma Gerilmesi Değişimleri,

(b) İkinci adım olarak hesaplanmış olan bu kayma gerilme değişimlerinden, ortalama kayma gerilmesinin ve eşdeğer tekrar sayısının bulunmasıdır. Bunu yapmaktaki amaç laboratuvar ortamında örselenmemiş numuneler üzerinde yapılacak sivilaşma deneylerinde esas olacak kayma gerilmeleri ve tekrar sayısını bulmaktır. Ortalama kayma gerilmesini ve eşdeğer tekrar sayısının bulunması içinde genel olarak üç yaklaşımdan söz edilebilir.

(1) İlk adımda bulunmuş kayma gerilmeleri dağılımlarına bakarak ortalama kayma gerilmesinin ve tekrar sayısının tahmin edilmesidir. Deneyim isteyen bu tip bir yaklaşımda bu değerler yaklaşık olarak bulunabilmektedir.

(2) Ortalama kayma gerilmesi ve eşdeğer çevrim sayısının bulunması için kullanılan ikinci yol Seed ve diğerleri (1969 ve Annokai ve Lee (1977) tarafından önerilen gerilme çevrimlerine göre ağırlıklı değerlendirme yöntemidir. Bu yöntem gör ilk adımda S_1 tekrarlı (cyclic) gerilme oranında sivilaşmaya yol açan çevrim sayısının N_s olduğu bulunmuş olsun. Buradan düzgün yayılı olmayan bir çevrimsel yükleme durumunda N_i çevrim sayısı için görece hasar miktarı,

$$D_i = N_i/N_s \quad (17)$$

şeklinde verilir. Gerilme oranı-çevrim sayısı ilişkisinin doğrusal orantılı olduğu varsayılırsa toplam hasar,

$$D = \sum_i (N_i/N_s) \quad (18)$$

eşitliğinden bulunabilir. Burada i sırayla bütün gerilme oranlarını göstermektedir. $D \geq 1.0$ olması hali sivilaşmanın veya göçmenin olacağını gösterir. Bu esaslara dayanarak eşdeğer tekrar sayısını bulmak için ilk önce bir ortalama gerilme oranını belirlemek gerekmektedir. Çoğunlukla ortalama gerilme oranı ilk adımda elde edilmiş kayma gerilmesi-zaman değişiminden bulunan en büyük gerilme oranı cinsinden ve

$$S_{ort} = R S_{max} \quad (19)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Buradaki R değeri 0.65-0.85 arasında olacak şekilde seçilen amprik boyutsuz bir sayıdır. Ortalama gerilme oranı S_o böylece belirlendikten sonra sıra eşdeğer çevrim sayısının bulunmasına gelmektedir. Yalnız bundan önce S_o düzgün çevrimsel gerilme oranında sivilaşmaya yol açacak N_e çevrim sayısının tanımlanması gerekmektedir. Bunun için S - N deneysel ilişkisinden yararlanılması gerekmektedir. Bulunan N_e sayısına bağlı olarak ve çevrim sayısının hasar miktarı ile doğrudan orantılı olduğu varsayımı kullanılarak eşdeğer çevrim sayısı

$$N_{eç} = N_e \sum_i (N_i/N_s) \quad (20)$$

bağıntısından kolayca bulunabilir. Burada önemli olan nokta seçime bağlı olan S_o ve R değerine karşı birtek eşdeğer çevrim sayısının N_{es} bulunabilmesidir. Farklı S_o ve R değerleri deneyerek en uygun N_{es} değerinin seçilmesi birkaç denemeyi gerektirmektedir.

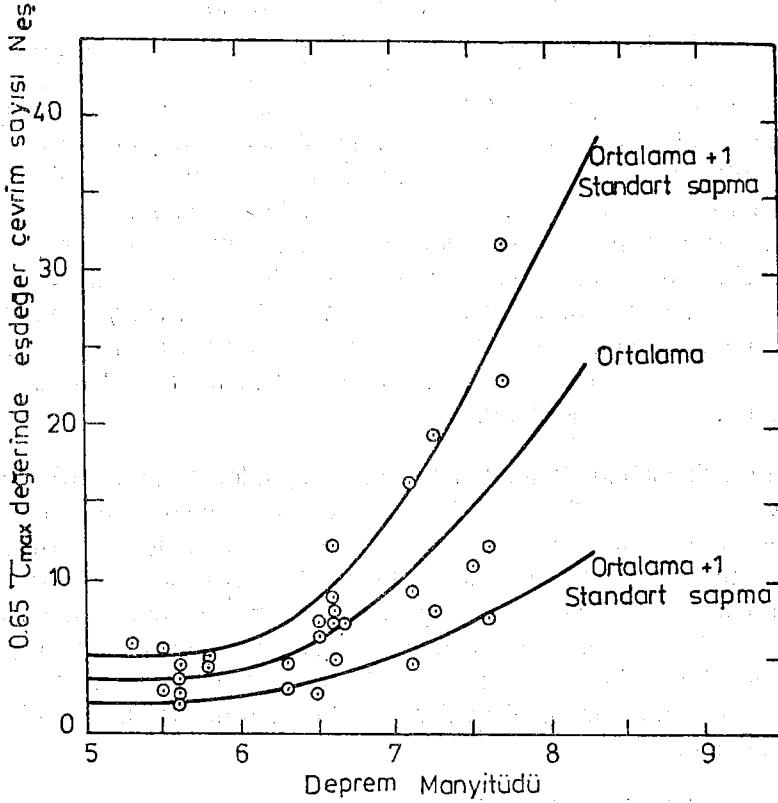
Bu yöntemle Seed, et. al. (1975) tarafından çok sayıda deprem kaydı kullanılarak bulunmuş olan eşdeğer çevrim sayıları Şekil 43 da gösterilmiştir. Bu şekilden yararlanarak değişik manyitütdlerdeki depremler için eşdeğer çevrim sayısı kolayca bulunabilmektedir.

(3) Ortalama kayma gerilmesi veya kayma oranı ve eşdeğer çevrim sayısının bulunması için üçüncü bir yolda Donovan (1971) tarafından «Miner» kuramına göre geliştirilmiş toplam hasar yöntemidir. Bu yaklaşımda diğer yaklaşımlarda farklı olarak deprem süresi ve dolgu tabakasının tabii periyodu gibi etkenlerde gözönüne alınmaktadır.

Dinamik analiz yönteminin son aşamasında ikinci adımda bulunmuş ortalama kayma gerilmesi ve eşdeğer çevrim sayısında in-

celenen bölgeden alınmış örselenmemiş numunelerde sivilaşmanın olup olmadığının araştırılmasıdır. Burada yapılan laboratuvar deneylerine dayanarak iki farklı güvenlik sayısı tanımlamak olasıdır. İlk tanım çevrimsel gerilme oranları cinsinden

$$G.S_g = S_o/S_e \quad (21)$$



Şekil 43 — Deprem Manyitüdü Eşdeğer Çevrem Sayısı Bağintısı.

şeklinde ikinci tanım ise çevrim sayıları cinsinden,

$$G.S_n = N_e/N_{es} \quad (22)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada S_e ve N_e laboratuvar deneylerinden bulunan sivilaşmaya yol açan gerilme oranı ve çevrim sayısını, S_o seçilmiş olan tasarım depreminden bulunan ortalama gerilme oranını, N_{es} ise aynı deprem kaydı için bulunmuş eşdeğer çevrim sayısını göstermektedir.

5.3 Efektif Gerilme Analizi

Suya doygun kum tabakalarının deprem yükleri altında davranışları ve sivilaşma olasılığının değerlendirilmesinde olayın karmaşıklığı nedeniyle bundan önce anlatılan yöntemlerde bazı basitleştirici varsayımlar yapılmış; sivilaşmaya yol açan ve zemin kesitinde bir depremde meydana gelen tekrarlı kayma gerilmelerinin dağılımı ile sivilaşmanın oluşması süreci birbirinden ayrılarak bir inceleme ve yorum yapılması yoluna gidilmiştir. Bu yaklaşımların uygulama alanında sağladıkları kolaylıkların azımsanamamasına rağmen esas itibariyle yaklaşık oldukları ve önemli ölçüde deneyim gerektirdikleri unutulmamalıdır. Daha doğru, daha gerçekçi bir yaklaşımın matematiksel bakımdan birçok güçlükleri içermesine rağmen bu iki olayın beraber incelenmesi olacağı açıktır. Bu konuda ilk yapılan çalışmalardan ve önerilen yöntemlerden biri efektif gerilme analizi (Finn, Lee ve Martin, 1976) diye bilinen yöntemdir. Bu yöntem suya doygun kum tabakalarının tekrarlı yükler altındaki davranış özelliklerini ve boşluk suyu basıncının değişmesini model eden yapısal denklemlere dayanmaktadır.

Bu yaklaşımda kullanılan yapısal bağıntılar esas olarak Finn, Lee ve Martin (1976) tarafından kuru ve suya doygun kumların basit kesme durumunda davranışlarını model etmek için önermiş oldukları bağıntılardır. Daha sonra bu yöntem arazide bir deprem sırasında kum tabakalarında artış boşluk suyu basıncında kısmi drenajdan ötürü olacak sönümlenmeyide hesaba alacak şekilde geliştirilmiştir (Finn, Lee ve Martin, 1976). Efektif gerilme analiz yönteminde kumların çevrimsel yükler altında davranışları iki adımda ele alınmaktadır.

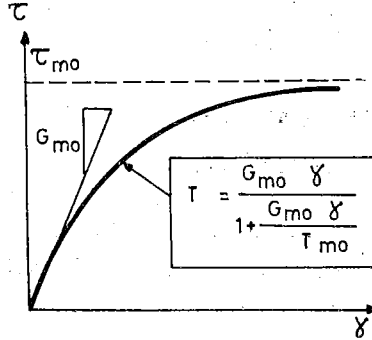
1. **İlk Yükleme Süreci** : İlk adımda kumların ilk yükleme sürecinde davranışlarının arazideki ön zemin özelliklerine bağlı olacağı bundan dolayı da bu davranışların başlangıç en büyük kayma modülünün, G_{m0} bir fonksiyonu olarak belirlenebileceği varsayılmıştır. Burada ilk yükleme sürecinde kumların davranışlarını model etmek için hiperbolik gerilme birim şekil değiştirme bağıntıları önerilmektedir. Buna göre kayma gerilmesi-birim kayma bağıntısı,

$$\tau = G_{m0} \gamma / (1 + G_{m0} \gamma / \tau_{m0}) \quad (23)$$

şeklinde verilmektedir. Burada τ kayma gerilmesini, γ birim kaymayı, G_{m0} başlangıç teğetsel kayma modülünü ve τ_{m0} ise ilk yükleme sürecinde kırılmaya yol açmadan uygulanabilecek en büyük kayma

kayma gerilmesini göstermektedir. (Şekil 44). G_{mo} başlangıç kayma modülünün değeri örselenmiş numuneler üzerinde laboratuvarında yapılan deneylerle veya arazide yerinde yapılan jeofizik deneyler ile bulunabilir. Bu noktada diğer bir seçenekte örnek olarak Hardin ve Drnevich (1972 b) tarafından önerilen matematiksel bağıntılar yardımıyla G_{mo} ve τ_{mo} hesaplanabilir. Bu durumda,

$$G_{mo} = 7.38 [(2.973-e)^2/(1+e)] [(1+2 K_o)/3]^{0.5} (\sigma'_v)^{0.5} \quad (24)$$



Şekil 44 — İlk Yükleme Aşamasında Gerilme - Şekil Değiştirme Bağıntısı.

$$\tau_{mo} = [(1 + K_o) \sin \emptyset/2]^2 - [(1 - K_o)/2]^2]^{0.5} \sigma'_v \quad (25)$$

eşitlikleri kullanılarak G_{mo} ve τ_{mo} (kg/cm^2) cinsinden olmak üzere bulunur. Burada e boşluk oranını, K_o sükunette yatay gerilme katsayısını, \emptyset' efektif kayma mukavemeti açısını, σ'_v ise (kg/cm^2) cinsinden efektif düşey gerilmeyi göstermektedir.

2. Boşalma ve yeniden yükleme süreci : İlk yükleme sürecinde kayma gerilmesi-birim kayma eğrisi 23) no.lu bağıntı ile verilmiş olup bu bağıntı kısaca

$$\tau = f(\gamma) \quad (26)$$

şeklinde yazılabilir. Yükleme dönüm noktasının (γ_r , τ_r) olduğu kabul edilirse, boşaltma veya yeniden yükleme sürecinde (γ_r , τ_r) noktasının bir önceki dönüm noktasını göstermesi koşuluyla, kayma gerilmesi-birim kayma bağıntısı

$$(\tau - \tau_r)/2 = f[(\gamma - \gamma_r)/2] \quad (27)$$

eşitliği ile verilmektedir. Bu bağıntılara ek olarak kuru kumlar üze-

rinde yapılmış olan basit kesme deneylerinde gözlenmiş olan hacim küçülmesi olayına dayanarak Martin, Finn ve Seed (1979) tarafından önerilmiş, pekleşmenin etkisindedir.

$$\tau_{hv} = \gamma \sigma'_v / a + b \gamma \quad (28)$$

eşitliği boşaltma sürecindeki kayma gerilmesi-birim kayma bağıntısı olarak benimsenmiştir. Burada σ'_v o andaki efektif normal gerilmeyi a ve b ise her çevrim için o ana kadar oluşmuş kalıcı toplam hacimsel birim sıkışmaya, ϵ_{vd} , bağlı olarak her çevrim için değeri değişen birer katsayı olmaktadır. Bu katsayılar

$$a = A_1 - \epsilon_{vd} / (A_2 + A_3 \epsilon_{vd}) \quad (29)$$

$$b = B_1 - \epsilon_{vd} / (B_2 + B_3 \epsilon_{vd}) \quad (30)$$

şeklinde verilmiş olup burada A_i ve B_i ($i = 1, 2, 3$) kumun özelliklerine bağlı sabitlerdir. Herhangi bir yükleme çevriminde en büyük kayma modülü $\gamma = 0$ noktasında

$$G_{mn} = (d \tau_{hv} / d\gamma) \quad (31)$$

eşitliği ile gösterilebildiğine göre herhangi bir yükleme çevriminde (28) ve (31) no.lu ilişkilerden pekleşmenin etkisindedir içine alacak bir biçimde kuru kumlarda, en büyük kayma modülü, G_{mn} ve en büyük kayma gerilmesi, τ_{mn} ,

$$G_{mn} = G_{mo} [1 + \epsilon_{vd} / (H_1 + H_2 \epsilon_{vd})] \quad (32)$$

$$\tau_{mn} = \tau_{mo} [1 + \epsilon_{vd} / (H_3 + H_4 \epsilon_{vd})] \quad (33)$$

eşitliklerinden elde edilebilir. Burada ϵ_{vd} o ana kadar oluşmuş toplam birim hacimsel sıkışmayı göstermektedir. H_1, H_2, H_3, H_4 birer sabit katsayı olup değerleri birim kayma kontrollü basit kesme deney neticelerine (32) ve (33) no.lu bağıntıların matematiksel olarak aydınlatılması ile bulunur.

Artık Boşluk Suyu Basıncının Oluşması

Daha önce de söz edildiği gibi kuru kumlar veya suya doygun olupta drenaja izin verilen koşullarda basit kesme şartları altında bir yükleme çevriminde kum numunesi bir hacimsel sıkışma, $\Delta \epsilon_{vd}$, gösterir. Drenaja izin verilmediği ve sınır şartları altında bu hacimsel sıkışma olamayacağı için boşluk suyu basıncında bir artış meydana gelecektir. Bu artış efektif gerilmelerde bir azalmaya yol açar.

cağı için bir hacim kabarmasına yol açacaktır. Drenaja izin verilmemiş olmasından ötürü suya doymun kumlarda bir hacim değişmesi olmayacağından efektif gerilmedeki azalmadan dolayı meydana gelecek olan birim hacimsal kabarma, drenaja izin verildiği zaman oluşan birim hacimsal sıkışmaya eşit olacaktır. Bu durumda ele alınan suya doymun kum elemanında porozitenin n olduğu ve suyun hacimsal sıkışma modülünün K_s olduğu düşünülürse, artık boşluk suyu basıncından dolayı zemin boşluklarını dolduran suyun sıkışmasında hesaba katılacak olursa bir yükleme çevriminde meydana gelecek artık boşluk suyu basıncı,

$$\Delta u = \Delta \epsilon_{vd} / (1/E_r + n/K_s) \quad (34)$$

eşitliği ile verilebilir. Burada E_r bir boyutlu durumda hacimsal kabarma modülünü göstermektedir. Suyu doymun kumlarda suyun sıkışma modülü, K_s 'nin kumun sıkışma modülü E_r 'den çok büyük olduğundan (34) no.lu eşitlik daha basit bir biçimde,

$$\Delta u = E_r \Delta \epsilon_{vd} \quad (35)$$

bağıntısı ile verilebilir.

Martin, Finn ve Seed (1975) tarafından yapılmış dinamik basit kesme deneylerinden herhangi bir yükleme çevriminde meydana gelen birim hacimsal sıkışma adımının toplam birim hacimsal sıkışma, ϵ_{vd} ve birim kayma genliğinin bir fonksiyonu olduğu gözlenmiş ve

$$\Delta \epsilon_{vd} = C_1 (\gamma - C_2 \epsilon_{vd}) + C_3^2 \epsilon_{vd} / (\gamma + C_4 \epsilon_{vd}) \quad (36)$$

bağıntısı ile hesaplanabileceği gösterilmiştir. Burada C_1 , C_2 , C_3 ve C_4 kumun cinsine ve görelî sıklığına bağlı birer sabittirler. Gene aynı araştırmacılar hacimsal kabarma modülü, E_r 'nin matematiksel olarak hesaplanabilmesi için,

$$E_r = (\sigma_v')^{1-m} (m K_2 (\sigma'_{vo})^{n-m}) \quad (37)$$

bağıntısını önermişlerdir. Burada σ_{vo} kum elemanında ilk düşey efektif gerilmeyi, m , n ve K_2 de kumun özellikleri ile ilgili birer sabiti göstermektedirler.

Bu durumda herhangi bir yükleme çevriminde meydana gelecek artık boşluk suyu basıncı o çevrimdeki en büyük birim kaymaya bağlı olarak (35) no.lu bağıntı yardımıyla hesaplanabilir. Hesaplanmış olan bu artık boşluk suyu basıncı adımı yükleme çevriminde

boşaltmanın olduğu kısımlara eşit olarak dağılmış olduğu varsayılararak her zaman, Δt , için en büyük kayma modülü, G_{mn} ve en büyük kayma gerilmesi τ_{mn} 'nin yeni efektif gerilme durumuna göre düzeltilmesi gerekmektedir.

Bu da ilk efektif düşey gerilmeye bağlı olarak :

$$G_{mn} = G_{mo} [+ \epsilon_{vd}/H_1 + H_2 \epsilon_{vd}] (\sigma'_v/\sigma'_{vo}) \quad (38)$$

$$\tau_{mn} = \tau_{mo} [1 + \epsilon_{vd}/(H_3 + H_4 \epsilon_{vd})] (\sigma'_v/\sigma'_{vo}) \quad (39)$$

eşitlikleri ile yapılabilir. Burada σ'_{vo} ilk düşey efektif gerilmeyi σ'_v ise o andaki düşey efektif gerilmeyi gösterir.

Böylece hem pekleşmenin, hem de boşluk suyu basıncının artmasının, kayma modülüne ve en büyük kayma gerilmesine etkisi gözönüne alınmış olur. Genel durum için tekrarlı basit kesme şartlarında boşaltma ve yeniden yükleme sürecinde kayma gerilmesi-birim kayma bağıntısı (23) ve (27) no.lu bağıntılardan yararlanarak;

$$\tau - \tau_r)/2 = G_{mn} (\gamma - \gamma_r)/2 [G_{mn} [(\gamma - \gamma_r)] / 2 \tau_{mn}] \quad (40)$$

şeklinde verilmesiyle matematiksel model tamamlanmış olur.

Deprem yükleri altında arazide kum tabakalarında boşluk suyu basıncı bir taraftan artarken sınır şartlarından ötürü bir miktar boşluk suyu basıncı drenaja izin verilmeyen şartlarda oluşacak boşluk suyu basıncından az olacaktır. Bu durumda bir t anında boşluk suyu basıncının dağılışı,

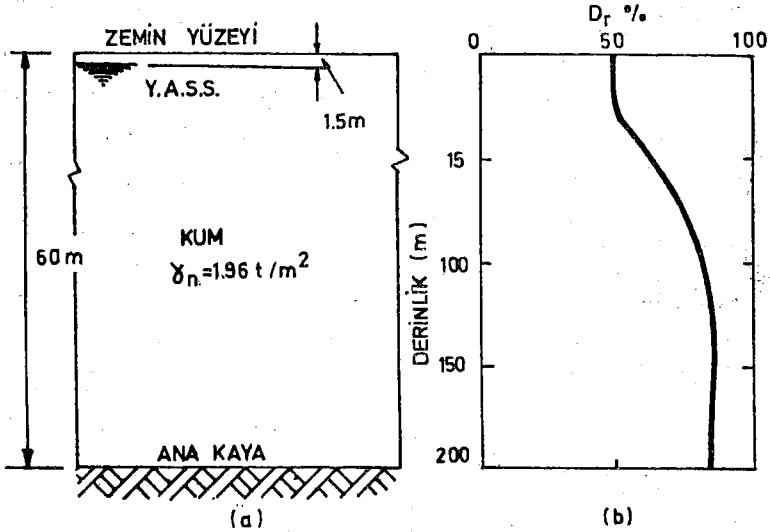
$$\partial u / \partial t = E_r \partial [k / \gamma_w] (\partial u / \partial z) / \partial z + E_r \partial \epsilon_{vd} / \partial t \quad (41)$$

eşitliği ile verilir. Burada k, hidrolik iletkenliği, γ_w suyun birim hacim ağırlığını göstermektedir. (41) no.lu bağıntı kum tabakasının dış sınırlarında bir drenaj olmaması durumunda da geçerlidir ve kum tabakası içinde değişik noktalarda oluşmuş değişik boşluk suyu basınçlarının birbirine eşitlenmesi sürecinde ele alınan noktadaki boşluk suyu basıncının değişiminide gösterir. Ve bu bağıntının hareket denklemiyle birlikte yaklaşık olarak her zaman adımı için çözümlenmesiyle kum tabakalarının verilen deprem yükleri altında davranışları hesaplanabilir. Böylece kısaca anlatılmış efektif gerilme analiz yönteminin kullanılmasında örnek olarak Şekil 45 de gösterilen zemin kesiti için uygulanmış Şekil 46 de verilen deprem kaydı altında yüzeydeki ivmeler boşluk suyu basıncının hesaba katıldığı haller için verilmiştir. Boşluk suyu basıncının meydana gelecek ivme

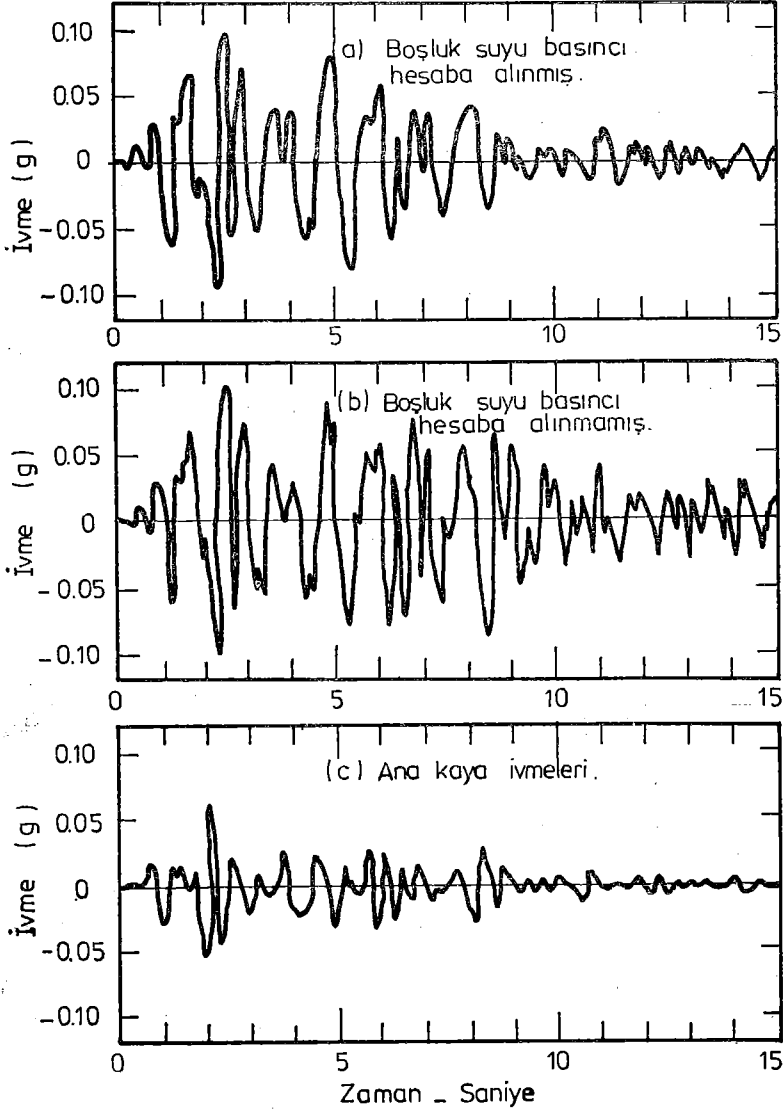
kaydını önemli ölçüde etkilediği Şekil 46 a ve b nin kıyaslanmasıyla hemen anlaşılabilir. Buradan da bir kere daha deprem yükleri altında zemin tabakalarının davranışlarının incelenmesinde boşluk suyu basınçlarının oluşmasının hesaba katıldığı yapısal denklemlerin kullanılmasının bir bakıma gerekli olduğu görülmektedir.

5.4. Sayısal Model Yöntemi

Amerika Birleşik Devletleri Michigan Üniversitesinde matematiksel sivilaşma modelleri üzerine yapılan araştırmalar sonucunda geliştirilmiş olan bu yöntem (Liou, Streeter ve Richart; 1976) bundan önce anlatılmış olan yöntemlerden bazı önemli farklılıklar gösterir. Burada amaç diğerlerinden farklı olup, kabul olunan bir deprem kaydı altında zemin kesitinde oluşacak gerilme, birim şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı dağılımlarının sürekli ve beraber olarak hesaplanması ve sivilaşmanın olup olmayacağına doğrudan bulunmasıdır. Bu yöntemde boşluk suyu basıncının meydana gelişi iki fazlı ortam teorisi kullanılarak gerilmeler ile aynı anda hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım boşluk suyu basıncının bulunması açısından daha gerçekçi olup bir takım ampirik ve deneysel tablolar ve eğriler gerektirmemektedir. Bundan başka deprem sırasında düşey yönde oluşan deprem ivmelerinin yatay yönde oluşan deprem ivmeleri ile birlikte hesaba alınması zemin tabakalarına gelen deprem yüklerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine yol açmaktadır.



Şekil 45 — Örnek İçin Seçilmiş Zemin Kesiti ve Relatif Sıklığın Derinlikle Değişimi.



Şekil 46 — Ana Kayada ve Zemin Yüzeyine İvme Değişimleri.

Bu yöntemde zemin kesiti değişik özelliklere sahip farklı zemin tabakalarından oluşabilen tek boyutlu bir ortam olarak ele alınmakta, düşey yönde meydana gelen sıkışma veya genişlemenin yatay yönde bir daralma ve genişlemeye imkân vermeyen sınır şartları altında oluştuğu varsayılmakta ve bir depremde oluşan yer hareketlerinin zemin yüzüne paralel, yatay bileşeni bir kayma dalgası alt modeli ile, zemin yüzüne dik, düşey bileşeni ise bir basınç dalgası alt modeli ile ele alınmaktadır. Zemin özellikleri birim kayma genliğine ve efektif gerilmeye bağlı olarak tanımlanarak bu iki alt modelin birbiri ile bağımlı olması sağlanmaktadır. Sayısal sivilaşma modelinde bu birbiri ile bağımlı kayma ve basınç dalgası hareketlerinin belirlenmesinden ibaret olmaktadır.

Kayma Dalgası Alt Modeli

Burada düzlemsel kayma dalgalarının ilerlemesi karakteristikler çözüm yöntemi ile model edilmiş ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri geliştirilmiş Ramberg Osgood bağıntıları ile tanımlanmıştır. Buna göre, gerilme şekil değiştirme bağıntıları ilk yükleme durumu için,

$$\gamma = [\gamma/G_0(\sigma'_v)] [1 + \alpha|\tau/C_1 \tau_m(\sigma'_v)|^{R-1}] \quad (42)$$

şeklinde, boşaltma ve tekrar yükleme durumu için

$$\gamma - \gamma_r = [(\tau - \tau_r)/G_0(\sigma'_v)] [1 + \alpha|(\tau - \tau_r)/2 C_1 \tau_m(\sigma'_v)|^{R-1}] \quad (43)$$

şeklinde olup, burada,

$$G_0(\sigma'_v) = A [(2.97 - e)^2/(1+e)] [1 + 2 K_0 \sigma'_v/3]^{0.5} \quad (44)$$

$$\tau_m = [((1 - K_0) \sigma'_v \sin \emptyset/2) - ((1 - K_0) \sigma'_v/2)^2] \quad (45)$$

eşitlikleri ile verilmekte, τ kayma gerilmesini, γ birim kaymayı, τ_r ve σ_r kayma gerilmesi birim kayma diagramında en son dönüş noktasının koordinatlarını σ'_v düşey efektif gerilmeyi, e boşluk oranını, K_0 yatay toprak basıncı katsayısını, G_0 kayma modülünü, \emptyset kayma açısını, τ_m kayma mukavemetini göstermektedir. Ayrıca kullanılan C_1 , R ve α Ramberg-Osgood modeline ait katsayılar olup bu parametreler yardımıyla nonlinear kayma gerilmesi birim kayma davranışları ve zeminin sönüm özellikleri model edilebilmektedir. (44) denkleminde kullanılan A katsayısı G_0 ve σ'_v kg/cm^2 cinsinden verildiği zaman 326.4 değerine eşit olur.

Basınç Dalgası Alt Modeli

Bir zemin tabakası içinde belli bir derinlikteki bir zemin elemanında zemin dane yapısının ve boşluk suyunun düşey (z eksen) doğrultusunda yer değiştirmeleri w ve w ile gösterilirse boşluk suyu basıncı, u ,

$$u = [(1 - n)/n C_w] [\partial (w - w_0)/\partial z] + (1/c_w) \partial (w - \bar{w}_0)/\partial z \quad (46)$$

bağıntısı ile tanımlanabilir. Burada C_w boşluk suyunun kompresibilitesini, n zeminin porozitesini, w_0 ve \bar{w}_0 ise yer değiştirmelerin başlangıç değerlerini göstermektedir.

Diğer yandan zemin dane yapısı için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı;

$$\sigma'_v = (1/C_c) \partial w/\partial z \quad (47)$$

eşitliği ile verilmekte olup burada σ'_v düşey efektif gerilmeyi C_c ise dane yapısının tek eksenli sıkışma modülünü göstermektedir. Bu durumda zemin elemanındaki toplam düşey efektif gerilme ile boşluk suyu basıncının toplamı olarak hesaplanabilir.

İki fazlı ortam olarak varsayılan zeminlerde tek eksenli sıkışma modülünü, C_c , hacimsel sıkışma modülü, C_b ve kayma modülü G cinsinden

$$1/C_c = 4 G/3 + 1/C_b \quad (48)$$

tanımlamak mümkündür. Burada kayma gerilmeleri altında C_b nin değişmeyeceği C_c de olacak değişmelerin sadece kayma modülü G de olacak değişmelere bağlı olacağı varsayılmıştır.

Bu analiz yönteminin uygulanmasında yeraltı su seviyesinin altında kalan kısım eşit aralıklı elemanlara bölünmekte ve bu elemanlara kayma ve basınç dalgası alt modelleri aynı anda uygulanmaktadır. Yalnız suya doymun zeminlerde basınç dalgası hızı kayma dalgası hızından çok fazla oldukları için her kayma dalgası alt modeli adımına N sayıda basınç dalgası alt modeli adımı karşı gelmektedir. Burada ilk adımda ana kayada meydana gelen depremden ötürü kayma dalgası alt modelinden yararlanarak kayma gerilmeleri, birim kaymalar ve kayma modülündeki değişim hesaplanmaktadır. Buna dayanarak tek boyutlu sıkışma katsayısının zamana

göre değişimi $\partial C_c/\partial t$, kayma modülünün zamana göre değişimine $\partial C/\partial t$ bağlı olarak bulunmakta buradan da basınç dalgası dağılımı basınç dalgası alt modeli kullanılarak hesaplanır. Tek boyutlu sıkışma katsayısı, C_c , birim kayma nedeniyle artacağı için hacimsel bir sıkışma oturma eğilimi ortaya çıkacaktır. Fakat boşluklardaki suyun drene olamamasından ötürü boşluk suyu basıncında bir artma olacak bu da efektif gerilmeyi düşürecektir. Bu noktada yeni efektif gerilmelere göre yeni G_0 ve τ_m değerleri hesaplanır. Böylece bir hesap çevriminde tamamlanmış olur. Bu adımı izleyen adım gene değişmiş şartlara göre kayma özelliklerinin hesabı ile başlar.

5.5. Endokronik Yapısal Denklemler Yöntemi

Sıvılaşma davranışlarının model edilmesi ve doğada sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi için önerilmiş yöntemler arasında bir anlamda en araştırmaya yönelik ve en kuramsal olanlardan birine endokronik ya pısal yöntemdir (Bazant ve Krizek 1976 : Ansal, et. al, 1978, -980). Endokronik yaklaşımdaki ana kavram içsel zaman değişkeni kavramı olup bu değişken yardımıyla malzemenin elastik olmayan davranışlarına yol açan enerji sönümlenmesi model edilmektedir. İçsel zaman değişkenininin, z, kalıcı şekil değiştirmelerin sürekli bir biçimde meydana geldiği varsayımına dayanarak,

$$(dz)^2 = (d\zeta/z_1)^2 + (dt/\tau_1)^2 \quad (49)$$

bağıntısı ile tanımlanması uygun olmaktadır. B urada t gerçek zamanı, z_1 ve τ_1 sabit malzeme katsayılarını ζ ise zemin yapısındaki kalıcı şekil değiştirmelerin etkisini göstermekte ve

$$d\zeta = F(\epsilon, \sigma, \zeta) d\xi, d\xi = [de_{ij} de_{ij}/2]^{0.5} \quad (50)$$

eşitlikleri ile verilmektedir. Buurada F şekil değiştirme pekleşmesi ve yumuşaması fonksiyonunu, ξ şekil bozulma birimini, $(e_{ij} = \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij})$ birim şekil değiştirme δ_{ij} deviatorik birim şekil değiştirmeyi tansörü, $\epsilon = \epsilon_{kk}/3$ birim hacim değişmesini δ_{ij} Kronecker delta) göstermektedir. Zeminlerde kalıcı şekil değiştirmeler olmasının başlıca nedeni zemin danelerinin değişen gerilme dağılımlarından etkilenecek yerlerinden oynamaları, yeni konumlara geçmeleri olduğu varsayılırsa bu konum değişmelerinin birikiminin yukarıdaki denklemlerde kullanılan ve adına değişim birimi denen ζ gibi bir değişkenle ifade edilmesi uygun olmaktadır. Şekil bozulma değişkeni, ξ , zemin-

lerde kalıcı şekil değiştirmelerin yalnız deviatorik şekil değiştirmelerinden dolayı olduğu varsayımına göre formüle edilmiştir. Konum değişim birimi zeminlerde görülen şekil değiştirme pekleşmesi ve yumuşamasını ve bunlara etkiyen faktörleri daha iyi model edebilmek açısından daha elverişli bir biçimde,

$$d\zeta = d\eta / f(\eta) \quad \eta d = F_1(\epsilon, \sigma) d\xi \quad (51)$$

olarak yazılabilir. Burada yardımcı bir değişken olarak η kullanılmakta ve F_1 yumuşamayı, f pekişmeyi göstermektedir. Zeminlerde gerilme-deformasyon davranışlarına etki eden belli başlı faktörlere göre içsel bağıntıları geliştirirken, F_1 fonksiyonu

$$F_1(\epsilon, \sigma) = F_{11}(I_1\epsilon) F_{12}(I_1\sigma) F_{13}(J_2\epsilon) \quad (52)$$

şeklinde alt fonksiyonlara ayırarak tanımlamak uygun olmaktadır. Burada F_{11} birim hacim değişmesinin etkisini birinci şekil değiştirme tansörü invariantı, $I_1\epsilon$ yardımıyla F_{12} efektif gerilme durumunun etkisini birinci gerilme tansörü invariantı, $I_1\sigma$ ile F_{13} birim kayma gerilmesinin etkisini ikinci deviatorik şekil değiştirme tansörü invariantı $J_2\epsilon$ ile gösterebilmek mümkün olmaktadır.

Zeminlerin diğer önemli bir özelliğide kesme veya deviatorik gerilmeler altında kalıcı hacim değişmesi göstermesidir. Buradaki varsayım tam olarak doğru olmamakla beraber kalıcı hacim değişmelerin tamamen deviatorik gerilmelerden olduğu ve hidrostatik gerilmeler altında kalıcı hacim değişmeleri olmadığıdır. Kohezyonsuz zeminlerde hidrostatik basınç altında hacim değişikliklerin görece olarak küçük olması kohezyonlu zeminlerde ise belirli bir konsolidasyon zamanının gerekliliği bu varsayımın kullanılabilirliğini artırmaktadır. Zeminlerin bu özelliği adına yoğunlaşma-genişleme birimi, λ , denilen yeni bir ortam değişkeni yardımıyla

$$d\lambda = L(\epsilon, \sigma, \lambda) d\xi \quad (53)$$

model edilebilir. L fonksiyonunda aynen F fonksiyonu gibi alt fonksiyonlar cinsinden,

$$L(\epsilon, \sigma, \lambda) = L_1(I_1\epsilon) L_2(I_1\sigma) L_3(J_2\epsilon) L_4(\lambda) \quad (54)$$

yazılabilir. Burada L_4 hacim değişmesinin etkisi kalıcı birim hacim değişmesi, λ , cinsinden gösterir.

Gerilme-Şekil Değişirme Bağlılıkları :

Zeminler için yapısal denklemleri çıkarırken istatistiksel olarak homojen ve adimsal olarak izotrop bir malzeme oldukları varsayılmıştır. Özellikle zeminlerin izotrop bir malzeme oldukları varsayımı genel olarak geçerli bir varsayım olmamasına rağmen gerilme-şekil değişirme denklemlerin basit bir şekilde formüle edilmesine imkân verdiği için tercih edilmiştir. Bu durumda adimsal gerilme-şekil değişirme denklemleri hacımsal ve deviatorik bileşenlerin cinsinden

$$de_{ij} = ds_{ij} + s_{ij} dz/2G, \quad d\varepsilon = d\sigma'/2k + d\lambda \quad (55)$$

şeklinde verilebilir. Bu denklemlerdeki e_{ij} deviatorik, ε , hacımsal şekil değişmelerini; $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma$ deviatorik kayma gerilmesini (σ_{ij} gerilme tansörü, σ hacımsal gerilme); G ve K elastisite modüllerini göstermektedir. Denklemden verilmiş gerilme-şekil değişirme bağıntılarıyla izotropik olmayan zeminler için daha genel olarak düzlemsel izotropik veya orthotropik olarak yazmak mümkündür.

Bu bağıntılarda şekil değişirme elastik ve kalıcı şekil değişirmelerin toplamı olarak düşünülmekte, elastik bileşenin zemin cinsine, gerilme durumuna ve şekil değişirme durumlarına bağımlılığı elastisite modülü olarak, kalıcı bileşen için ise bu bağımlılık içsel zaman ve gene elastisite modülü yoluyla sağlanmaktadır. Elastisite modülü kayma modülü olarak ele alınmakta ve değerinin değişimi ilk andaki kayma modülü, efektif gerilme durumu ve toplam kalıcı şekil değişirmenin bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Suya doymuş zeminlerin drenajsız koşullar altında davranışlarını incelerken zemin elemanını iki fazlı ortam olarak düşünmek ve bu bağlamda suyun sıkışabilirliğinin zemin danelerinin sıkışabilirliğine göre çok daha büyük olması dolayısıyla boşluk suyu basıncının oluşumunu zemin elemanının hacim değişikliğinin fonksiyonu olarak formüle etmek gerçekçi bir yaklaşım yolu olmaktadır. Bu durumda bir yükleme adımında boşluk suyu basıncı artışı

$$du = K_s K (d\sigma/3K + 3d\lambda)/(K_s + nK) \quad (56)$$

eşitliği ile verilebilir. Burada K_s suyun hacımsal sıkışma modülü, n , zemin elemanının porozitesini göstermektedir.

Boşluk suyu basıncının oluşumlarının diğer bir şekilde

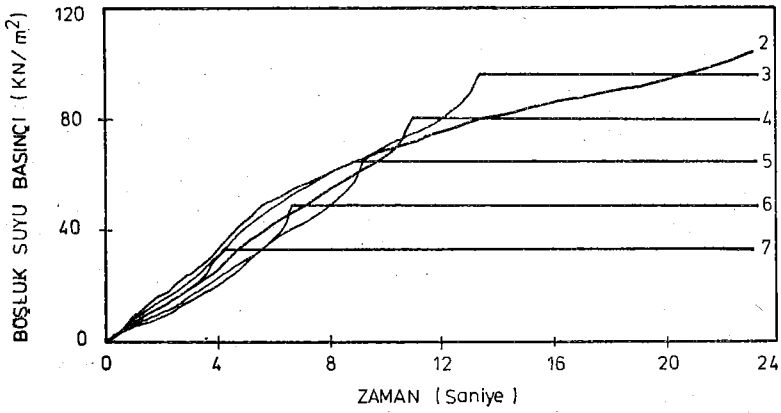
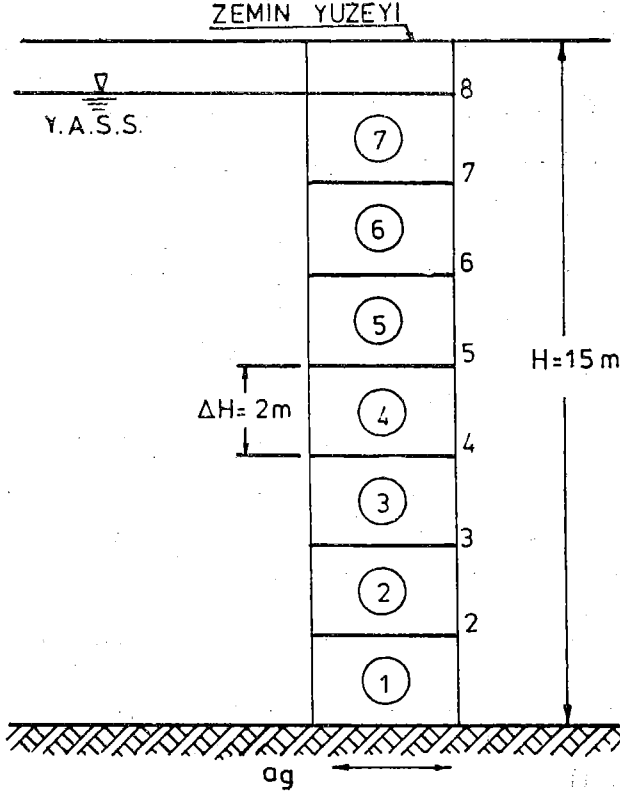
$$du = d\lambda/C_a \quad (57)$$

bağıntısı ilede bulmak mümkün olur. Burada C_a yarı amprik bir yöntemle bulunan sıkışabilirlik katsayısını göstermektedir.

İki fazlı ortam yaklaşımı suya doygun zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarını incelerken zeminlerin iki fazlı bir ortam olarak ele alınmaları Biot (1955, 1956) tarafından önerilmiştir. Bu önerisinde Biot elastisite ve termodinamik bilimlerinden yararlanarak ilk statik yükler altındaki davranışlar ve daha sonrada suya doygun boşluklu bir ortamda gerilme dalgaları dağılımı için bir takım bağıntılar vermiştir. Bu bağıntılar esas olarak (a) zeminlerin izotropik, (b) gerilme-şekil değiştirme davranışlarının lineer elastik, (c) boşluk suyunun sıkışabilir, (d) Darcy kanununun geçerli ve (e) şekil değişmelerin küçük olduğu varsayımlarına dayanır. Burada zeminlerin lineer elastik olduklarına ait varsayım gerçekte geçerli olmadığı açıktır. Fakat genede boşluk suyunun sıkışabilir olduğu kabul etmek ve bağıntıları çıkarırken bunu gözönüne almak özellikle boşluk suyu basıncı oluşumlarını analiz edebilme açısından büyük bir açıklık ve esneklik getirmektedir. Zeminlerin izotrop olduğunu varsaymak, ilk aşamada, gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının hacımsal ve deviatorik bileşenler cinsinden matematiksel olarak daha az karmaşık bir şekilde belirtilebilmesine olanak sağladığı için yararlıdır. Yapılmış varsayımlardan yararlanarak elastik fakat lineer olmayan iki fazlı ortamlar için gerilme-şekil değiştirme bağıntılarında Biot ve Willis (1957) tarafından geliştirilmiş ve adımsal olarak verilmiştir.

Zeminlerin elastik kayma modülünün, G , değiştiği gözönüne alınarak bu değişmeye yol açan başlıca faktörlere (efektif çevre gerilmesi, boşluk oranı, gerilme ve deformasyon geçmişi) dayanan bağıntılar geliştirilmiştir. Burada kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için bu faktörlerin etkileri farklı olacağından her iki zemin için farklı eşitlikler çıkarılmış ve kullanılmıştır. Bu tip bir yaklaşımla zemin yapısının elastik özellikleri daha gerçekçi bir şekilde belirlenebilmekte ve diğer araştırmacılar tarafından önerilmiş dinamik kayma modülü, yükleme ve boşaltma modülleri gibi yarı amprik tanımlara gerek kalmamaktadır.

Bir zemin elemanı için iki fazlı ortamın modülleri tanımlandıktan sonra o elemanın davranışı bulmak için iki fazlı ortam denklemlerini zaman içinde sınır şartları ve hareket denklemlerine göre çözmek yeterlidir. Yalnız daha öncede belirtildiği gibi zeminler lineer elastik bir malzeme değildir. Bu yüzden denklemlerin kalıcı şekil değiştirmeleride içerecek şekilde belirtmek gerekir. Bunu yap-



Şekil 47 — Bir Zemin Tabakasında Endokronik Sıvılaştırma Modeli Sonuçları

manın bir yoluda iki fazlı ortam bağıntılarını elastik şekil değiştirmeleri toplam ve kalıcı şekil değiştirmelerin farkı olarak belirterek,

$$d\sigma_s = P (d\varepsilon_s - d\varepsilon_s'') + Q (d\varepsilon_f - d\varepsilon_f'') \quad (58)$$

$$d\sigma_f = Q d\varepsilon_s - d\varepsilon_s'' + R (d\varepsilon_f - d\varepsilon_f'') \quad (59)$$

$$d\tau_s = G (d\gamma_s - d\gamma_s'') \quad (60)$$

eşitlikleri ile tanımlamaktır. Burada ε_f , ε_s ve γ_f toplam hacımsal ve kayma şekil değiştirmelerini, ε_f'' , ε_s'' ve γ_f'' kalıcı hacımsal ve kayma şekil değiştirmelerini göstermektedir. Boşluk suyu için verilmiş ε_s'' kalıcı hacımsal şekil değiştirme aslında boşluk suyu lineer elastik kabul edildiğinden kalıcı şekil değiştirmeyi değil ele alınan zemin elemanından dışarı çıkan suyu göstermektedir.

Bu yaklaşım kullanılarak Şekil 47 a da gösterilen kesit için endokronik yapısal denklemler ve iki fazlı ortam yaklaşımı kullanılarak yapılmış bir çalışmada elemanlarda oluşan boşluk suyu basıncı artışları ve ön sıvılaşmanın meydana gelmesi Şekil 47 b de gösterilmiştir. Buradan da bu tip bir yaklaşım benimsenmesi durumunda doğadaki sıvılaşma olayının belirli bir yaklaşıklık içinde genel olarak da gerçekçi bir şekilde model edilebildiği görülmektedir.

6. SONUÇ

Bu bölümde suya doymuş kumların mukavemet özellikleri diğer bir deyişle sıvılaşma özellikleri incelenmiştir. Bugüne kadar bu konuda yapılmış birçok araştırmadan elde edilmiş sonuçlara dayanarak ilk yarısında sıvılaşma olayı, malzeme özelliklerine göre sıvılaşma oluşumlarındaki farklılıklar ve bu farklılıkları belirtmek için benimsenmiş sıvılaşma tanımları verilmiştir. Bu tanımlardan sonra sıvılaşmaya etki eden faktörler (dane özellikleri, relatif sıklık, sismik geçmiş, aşırı konsolidasyon oranı, gerilme altında kalma süresi ve dane yapısı) ayrı ayrı ele alınarak etki dereceleri başka araştırmacılar tarafından bulunmuş sonuçlara dayanarak açıklanmıştır. Sıvılaşma olayı mühendisleri uygulama açısından ilgilendiren bir problem olduğu düşünülerek bu konuda bugüne kadar doğada meydana gelmiş önemli sıvılaşma olaylarından örnekler verilmiş ve bu örneklerle dayanarak doğada sıvılaşmaya yol açan durumlar, tabakalaşma sınır şartları, kısaca anlatılmıştır.

Bölümün ikinci yarısında sıvılaşma incelemelerinde kullanılan laboratuvar ve arazi deneylerinden söz edilmiş ve bu deneylerin yo-

rumlanmasında gözönüne alınması gereken özellikler anlatılmıştır. Bu kısımda ayrıca bu araştırma çerçevesinde İ.T.Ü. Maçka İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği laboratuvarına yeni gelmiş bulunan dinamik basit kesme deney sistemi detaylı bir şekilde anlatılmış ve bu deney sistemi kullanılarak farklı iki kum üzerinde yapılan sıvılaşma deneyleri özetlenmiştir. Deneylerden elde edilmiş sonuçlar başka araştırmacılar tarafından aynı cins kumlar ve benzer deney sistemleri kullanılarak bulunmuş deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve bu araştırmada bulunmuş sonuçların diğer araştırmacılar tarafından bulunmuş sonuçlarla uyuştukları gözlenmiştir. Bu karşılaştırmalara ek olarak yeniden sıvılaşma olayı incelenmiş ve önceden sıvılaşmış numuneler üzerinde tekrardan yapılan deneylerde önceden sıvılaşmış numunelerde sıvılaşmaya karşı direncin çok azaldığı gözlenmiştir.

Bölümün son kısmında uygulamada doğada sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi için önerilmiş ve geliştirilmiş uygulama ve araştırma açısından önemli oldukları düşünülen numerik yöntemler ve yaklaşımlar anlatılmıştır.

KAYNAKLAR

- Annakai, M. (1975), «Liquefaction of Sand in Triaxial Tests Using Uniform and Irregular Cyclic Loading», Ph. D. Dissertation, University of California, Los Angeles.
- Annaki, M. ve Lee, K.L. (1977), «Equivalent Uniform Cycle Concepts of Soil Dynamics», ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 103, No. GT 6, s. 549-564
- Ansal, A.M. (1982), «Kumların Tekrarlı Yükler Altında Gerilme-Şekil Değişirme Davranışları» Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Türk Milli Komitesi Bülteni, Zemin, Cilt 3, Sayı 1, sahife 7-18
- Ansal, A.M. ve Öğünç, G. (1981) «Dinamik Üç Eksenli Sıvılaşma Deneyleri ve Tekrar Sıvılaşma» Deprem Araştırma Bülteni, Yıl 8, Sayı 35, Sahife 61-82
- Ansal, A.M. (1981) «Zeminlerin Davranışlarının Endokronik Yapısal Denklemlerle Modellenmesi» Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 1. Ulusal Kongresi, Sahife 81-92, Ankara
- Ansal, A.M. (1981) «Toprak Dolgu Barajların Deprem Analizinde Yeni Tip Yapısal Denklemler» Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, Yıl 8, sayı 33, Sahife 27-50
- Ansal, A.M. Bazant, Z.P. ve Krizek, R.J. (1980) «Prediction of Soil Behavior by Endochronic Theory» Proceedings of the Workshop on Limit Equilibrium, Plasticity and Generalized Stress-Strain in Geotechnical Engineering, Sahife 286-327, Montreal
- Ansal, A.M., Elzaroughi, A.A., Krizek, R.J. ve Bazant, Z.P. (1980), «A Finite Difference Model For Liquefaction Analysis», Proceedings of 7 th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul Turkey, Vol. 3, Sahife 9-16

Ansal, A.M., Bazant, Z.P. ve Krizek, R.J. (1979) «Viscoplasticity of Normally Consolidated Clays» ASCE journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 105, No. GT4, Sahife 519-537

Ansal, A.M., Krizek, R.J., and Bazant (1978) «Endochronic Constitutive Law for Soils» Proceeding of 6 th European Conference of Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia Volume 4, Sahife 9-14

Bazant, Z.P. ve Krizek, R.J. (1976), «Endochronic Constitutive Law For Liquefaction of Sands», ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division Volume 102, Number EM2, Sahife 225-238

Bazant, Z.P. ve Krizek, R.J. (1975) «Saturated Sand as an Inelastic Two-Phase Medium» ASCE, Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 101, No. EM 4, Sahife 317-332

Bjerrum, (1973) «Geotechnical Problems Involved in Foundation of Structures in the North Sea», Geotechnique, Vol. 23, No. 3, Sahife 319-358

Biot, M.A. and Willis, D.G. (1957), «The Alastic Coefficients of the Theory of Consolidation», Journal of Applied Mechanics, American Society of Mechanical Engineers, Volume 24, Sahife 594-601

Biot, M.A. (1956), «Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid-Saturated Porous Solid, I. Low Frequency Range. II. High Frequency Range», Journal of the Acoustical Society of America, Volume 28, Number 2, Sahife 168-191

Biot, M.A. (1955), «Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid», Journal of Applied Physics, Volume 26, Number 2, Sahife 182-185

Castro, G. ve Poulos, S.J. (1976) «Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility», Paper prepared for Symposium on Soil Liquefaction, ASCE National Convention, Philadelphia, October 2, 1976

- Castro, G. (1975) «Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands» ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division Vol. 101, No. GT 6
- DeAlbe, P., Chan, C.K. ve Seed, H.B., (1975) «Determination of Soil Liquefaction Characteristics by Large Scale Laboratory Tests», Report No. EERCE 75-14. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif.
- Donovan, M.C. (1971) «A Stochastic Approach to the Seismic Liquefaction Problems» Prodeceedings of the First International Conference on Applications of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering, Sahife 514-535, Hong Kong
- Erguvanlı, A. (1980) «Depremler Sırasında Sıvılaşma ve Nedenleri Hakkında Düşünceler» Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, Yıl 7, Sayı 28, Sahife 15-79
- Erguvanlı, A. (1980), «Sıvılaşmayı Oluşturan Boşluk Suyu Basıncı Artışları», Doçentlik Tezi, İ.T.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi
- Finn, W.D.L., Lee, K.W. ve Martin, G.R. (1976) «An Effective Stress Model for Liquefaction» ASCE. Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, Sahife 169-198
- Finn, W.D. Liam, Bransby, P.L. and Pickering D.J. (1970) «Effect of Strain History on Liquefaction of Sands», Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol., 96, No. SM 6, Sahife 1917-1934
- Finn, W.D. Liam, Pickering, D.J. and Bransby, P.L. (1971) «Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Tests», Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM 4, sahife 639-659
- Flint, T. (1826) «Recollections of the Last Ten Years in the Valley of the Mississippi» Boston, Sahife 222-228

- Fuller, M.C. (1912) «The New Madrid Earthquake» Bulletin 454 US. Geological Survey Department of the Interior, Washington D.C. ABD
- Gibbs, H.J. ve Holtz, W.G. (1957) «Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing», Proceedings of Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London
- Hardin, B.O., and Drnevich, V.P. (1972 a), «Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects», ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Volume 98, Number SM 6, sahife 603-624.
- Hardin, B.O. ve Drnevich, V.P. (1972 b) «Shear Modulus and Damping in Soils : Desing Equations and Curves» ASCE, Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 98, No. SM7, Sahife 667-691
- Ishihara, K. (1978) «Pore Water Pressure Response and Liquefaction of Sand Deposits During Earthquakes», Proceedings of Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics Sahife 161-193, Karlsruhe.
- Ishihara, K. ve Li, S. (1972) «Liquefaction of Saturated in Triaxial Torsion Shear Test», Soils and Foundations, I.C.S.M. F.E., Vol. 1
- Ladd, R.S., (1977) «Specimen Preparation and Cyclic Stability of Sands» Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT 6, June, Sahife 535-547
- Lee, K.L. ve Focht, J.A. (1975) «Liquefaction Potential at the Ekofisk Tank in the North Sea» ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 101, No. GT1, Sahife 1-18
- Lee, K.L. ve Fitton, J.A. (1969) «Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil», Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations, ASTM, STP 450

- Liou, C.P., Streeter ve Richart, F. (1976) «A Numerical Model For Liquefaction» ASCE, Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, Sahife 313-342.
- Lyell, C. (1822) «Principles of Geology» Vol. 2 London
- Mahmood, A., Mitchell, J.K. ve Lindblom, U. (1976) «Effect of Specimen Preparation Method on Grain Arrangement and Compressibility in Sand», Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing, ASTM, Special Technical Publication No. 599
- Marinatos, S.M. (1960) Helice Submerged Town of Classical Greece» Archaeology Vol. 13. No. 3
- Martin, G.R., Finn, W.D.L., ve Seed, H. Bolton (1975) «Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading», ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 101, No. GT5, May, Sahife 423-483
- Mullis, J.P. (1975) «The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sands», Ph. D. Dissertation, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley
- Mullis, J.P., Chan, Clarence K. ve Seed, H. Bolton (1975) «The Effects of Method of Sample Preparation on the Cyclic Stress-Strain Behavior of Sands», Report No. EERC 75-18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, July
- Mullis, J.P., Seed, H.B., Chan, C.K. Mitchell, J.K., and Arulanandan, K. (1977), «Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction» ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 103, No. GT3, Sahife 91-108
- Özaydın, K., (1982) «Zemin Dinamiği» İstanbul Teknik Üniversitesi Makıa İnşaat Fakültesi, Deprem Mühendisliği Milli Komitesi Yayınları No. 1
- Peacock, William H. ve Seed, H. Bolton (1968) «Sand Liquefaction under Cyclic Loading Simple Shear Conditions» ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations, Vol. 94. No. SM3, Sahife 689-708

- Pyke, R.M., Chan, C.K. and Seed, H. Bolton (1974) «Settlement and Liquefaction of Sands under Multi-directional Shaking», Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERCE 74-2, University of California, Berkeley
- Roesset, J.M. ve Whitman, R.V. (1969) «Theoretical Background for Amplification Studies» Research Report R-69-15 Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
- Schnabel, P.B. Lysmer, J. ve Seed H.B. (1972) «Shake : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally layered Sites» Report No EERC 72-12, University of California, Berkeley
- Seed, H.B. (1976) «Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes» ASCE, Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering Sahife 1-105
- Seed, H. Bolton, (1968) «The Fourth Terzaghi Lecture : Landslides During Earthquakes Due to Liquefaction», Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. SM5
- Seed, H. Bolton, Arango, I. ve Chan, Clarence K. (1975) «Evaluation of Soil Liquefaction Potential During Earthquakes», Report No. EERCE 75-28, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley
- Seed, H. Bolton ve Idriss, I.M. (1967) «Analysis of Soil Liquefaction : Niigata Earthquake», Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, No. SM3
- Seed, H. Bolton ve Idriss, I.M. (1971) «Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential», Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM9
- Seed, H. Bolton ve Lee, K.L., (1966) «Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading», Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, No. SM6

- Seed, H. Bolton ve Peacock, W.H. (1971) «Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics», ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 97, No. SM8, Proc. Paper 8330,
- Seed, H. Bolton, Pyke, R. ve Martin, G.R. (1975) «Analysis of the Effect of Multi-directional Shaking on the Liquefaction Characteristics of Sands» Report No. EERCE 75-41, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, december
- Silver, M.L. ve Park, T.K. (1975), «Testing Procedure Effects on Dynamic Soil Behavior», Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 101, No. GT. 10, October, sahife 1061-1083
- Silver, M.L. (1977) «Laboratory Triaxial Testing Procedures to Determine the Cyclic Strength of Soils» Geotechnical Engineering Report Prepared for us Nuclear Regulatory Commission.

DEPREM ARAŞTIRMA BÜLTENİ YAYIN KOŐULLARI

1. Bültene gönderilecek telif ve tercüme yazıların :
 - a) Depremle doğrudan doğruya, ya da dolaylı yoldan ilgili olması
 - b) Bilimsel ve teknik bir değer taşıması
 - c) Yurt içinde daha önce başka bir yerde yayınlanmamış olması
 - d) Daktilo ile ve kâğıdın yalnız bir yüzüne en az iki nüsha olarak yazılmış bulunması
 - e) Şekillerin aydıngeçer kâğıdına çini mürekkebi ile çizilmiş olması
 - f) Fotoğrafların net ve klişe alınmasına müsait bulunması gerekmektedir.
2. Telif araştırma yazılarının baş tarafına araştırmanın genel çerçevesini belirten en az 200 kelimelik İngilizce, Fransızca ya da Almanca bir özet konulmalıdır.
3. İmar ve İskân Bakanlığı mensubu elemanlar tarafından hazırlanan ve telif ya da tercüme ücreti ödenerek yayınlanacak olan yazıların, mesai saatleri dışında hazırlanmış olduğu yazan, derleyen, ya da çevirenin bağlı bulunduğu birim amiri tarafından (genel müdürlüklerde daire başkanı, müstakil birimlerde birim amiri) verilecek bir belge ile belgelendirilmesi zorunludur. Bu belge ile birlikte verilmeyen yazılar için ücret ödenmez.
4. Telif ve tercüme ücretleri ancak yazı bültende yayınlandıktan sonra tahakkuka bağlanır.
5. Bültende yayınlanacak yazıların 300 kelimelik beher standart sayfası için teliflerde 250 TL. tercümeelerde 200 TL. ücret ödenir.

6. Yazılarda bulunan şekiller için, gerekli olan asgari alan içinde bulunabilecek kelime sayısına göre ücret takdir edilir.
7. Yazıların bültende yayınlanması Deprem Araştırma Dairesi bünyesinde teşekkül eden Uzmanlar Kurulu'nun kararı ile olur.
8. Seçmeyi yapacak Uzmanlar Kurulu 5. maddede sözü edilen asgari alanları hesaplamaya, yazı sahiplerine gereksiz uzatmaların kısaltılmasını teklif etmeye, verilecek ücrete esas teşkil edecek kelime sayısını tesbit etmeye ve yazıların yayın sırasını tayine yetkilidir.
9. Kurulca incelenen yazıların bültende yayınlanıp yayınlanmayacağı yazı sahiplerine yazı ile duyurulur.
10. Yayınlanmayacak yazılar bu duyurmadan sonra en geç bir ay içinde sahipleri tarafından geri alınabilir. Bu süre içinde alınmayan yazıların korunmasından Dairemiz sorumlu değildir.
11. Yayınlanan yazılardaki fikir, görüş ve öneriler yazarlarına ait olup, Deprem Araştırma Dairesini bağlamaz.
12. Diğer kuruluşlar ve Bakanlık mensupları tarafından bilgi, haber tanıtma vb. gibi nedenlerle gönderilecek not ve açıklamalar, ya da bu nitelikteki yazılar için ücret ödenmez.
13. Dairemiz mensupları Başkanlıkça kendilerine verilen görevlere ait çalışmalardan ötürü her hangi bir telif ya da tercüme ücreti talep edemezler.