



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

# DEPREM ARAŞTIRMA BÜLTENİ

48



## Deprem Araştırma Bülteni (DAB)

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



Ocak [January] / 1985  
Cilt [Volume]: 12

# Sayı [Issue]: 48

## İÇİNDEKİLER [INDEX]

Sayfa [Page]

---

### ARAŞTIRMA [RESEARCH]

Killerin Tekrarlı Gerilmeler Altında Davranışı [Behavior of Clays Under Repetitive Stress]

Atilla M. ANSAL, Ayfer ERKEN ..... 5-81

### ARAŞTIRMA [RESEARCH]

1983 Erzurum-Kars Depremi Kuvvetli Yer Hareketi İvme Kayıtlarının Mühendislik Sismolojisi Yönünden Analizi [1983 Erzurum-Kars Earthquake Strong Ground Motion Acceleration Records Analysis in Terms of Engineering Seismology]

Rüçhan YILMAZ ..... 82-99

**DEPREM  
ARAŞTIRMA  
BÜLTENİ**

**48**

**DEPREM  
ARAŞTIRMA  
BÜLTENİ**

**48**

DEPREM ARASTIRMA  
BÖLTENİ



Üç Ayda Bir Yayınlanır  
Bilim ve Meslek Dergisi



Sahibi  
Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Adına  
Oktay Ergünay  
Teknik Araştırma ve Uygulama Genel Müdürlüğü  
Deprem Araştırma Dairesi Başkanı



Yazı İşleri Müdürü  
Erol Aytac  
(Jeomorfolog)  
Teknik Araştırma ve Uygulama Genel Müdürlüğü  
Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı



Yazışma Adresi  
Teknik Araştırma ve Uygulama Genel Müdürlüğü  
Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı  
İrtibat Bürosu Yüksel Cad. No. 7/F



Yenişehir - ANKARA



Telefon : 17 69 55 - 23 72 65



Teknik Araştırma ve Uygulama  
Genel Müdürlüğü Matbaası

DEPREM ARAŞTIRMA BÜLTENİ

YIL : 12

SAYI : 48

OCAK 1985

BU SAYIDA

Killerin Tekrarlı Gerilmeler  
Altında Davranışı .....

Atilla M.ANSAL  
Ayfer ERKEN

1983 Erzurum - Kars Depremi  
Kuvvetli Yer Hareketi İvme  
Kayıtlarının Mühendislik  
Sismolojisi Yönünden Analizi .....

Rüçhan YILMAZ

# KİLLERİN TEKRARLI GERİLMELER ALTINDA DAVRANIŞI

Doç.Dr.Atilla M.Ansal ve Yk.Müh.Ayfer Erken

I.T.Ü. İnşaat Fakültesi

## Ö Z E T

Depremler sırasında zemin tabakaları farklı genlik ve frekanslardaki tekrarlı gerilmelerin etkisi altında kalarak şekil değiştirmelere uğrarlar. Bu şekil değiştirmeler zemin tabakaları üzerinde yer alan yapıyı da etkileyerek yapıda hasar oluşmasına yol açabilir. Diğer yandan toprak dolgu barajlar, dayanma yapıları ve yamaçlarda depremler sırasında meydana gelebilecek kayma mukavemeti değişiklikleri ve şekil değiştirmeler bu yapılarda duraylılığı önemli oranlarda etkileyebilir. Bu nedenlerden dolayı depremler sırasında zemin tabakalarının ve zemin yapılarının davranışlarını tahmin edebilmek için zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin incelenmesi gerekir.

Bu çalışmada killerin tekrarlı gerilmeler altında davranışları ve bu davranışa etki eden faktörler bugüne kadar bu alanda yapılmış araştırmalardan da yararlanarak anlatılmıştır. Bu bilgilerin ışığı altında laboratuarda iki farklı şekilde hazırlanmış kaolin numuneler üzerinde dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak tekrarlı kayma gerilmesi-birim kayma genliği-boşluk suyu basıncı davranışları incelenmiştir. Burada amaç killerin dinamik davranışlarına etki eden başlıca faktörlerden kayma gerilmesi genliği, çevrim sayısı, frekans ve numune dane yapısında örselenmeden dolayı meydana gelebilecek değişikliklerin etkisini incelemektir.



## BEHAVIOR OF CLAYS UNDER CYCLIC STRESSES

## SUMMARY

During earthquakes soil layers subjected to cyclic stresses of different amplitude and frequency would undergo deformations. These deformations are going to affect the structures located on these soil layers and may cause damage. On the other hand in earth dams, retaining structures and slopes the change in shear strength and stress-strain properties during earthquakes would have a significant influence on the stability of these structures. Therefore it appears necessary to investigate the behavior and shear strength properties of soils under cyclic stresses in order to predict and analyze the response of soil layers and earth structures during earthquakes.

In this study cyclic behavior of clays and factors influencing this behavior are summarized based on the accumulated knowledge obtained from various investigations conducted upto the present. In the light of this information cyclic shear stress-shear strain-pore pressure behavior of kaolinite specimens prepared using two different methods are investigated utilizing a dynamic simple shear testing system. The main purpose in this section was to determine the effect of shear stress amplitude, number of cycles, frequency, and the change in soil structure due to remolding on the cyclic behavior of clays.

## 1. GİRİŞ

Tekrarlı yüklerin önem kazandığı inşaat mühendisliği problemlerinde ve de özellikle depremlerde yerel zemin koşullarının oluşan hasara etkisinin önemli olduğu uzun zamandır bilinmektedir. Bu nedenle zemin yapılarının ve zemin tabakalarının davranışlarının ve bu tabakalar üzerinde bulunan yapıların etkilerinin incelenmesinde zeminlerin mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin sadece statik yükler altındaki durumlar için bilinmesi yeterli olmayıp tekrarlı yükler altındaki durumlar içinde belirlenmesi gerekir.

Depremler sırasında ana kaya içinde yayılan deprem dalgalarının, ana kaya üzerinde bulunan zemin tabakalarının içinden kayma dalgaları şeklinde geçerek yüzeye ulaştıkları varsayılabilir. Değişik genlik ve frekanslardaki bu titreşimlerin etkisi altında kalan zemin tabakalarında geniş sınırlar içinde oluşan şekil değiştirmeler, bu tabakalarda oturmalara ve göçmelere yol açabilir.

Zemin yapılarında ve zemin tabakalarının davranışlarından dolayı üst yapıda meydana gelebilecek hasarın azaltılabilmesi ve ortadan kaldırılabilmesi için zeminlerin tekrarlı yükler altında davranış özelliklerinin arazi ve laboratuvar deneyleri ile önceden belirlenmesine çalışılmalıdır. Laboratuvar deneylerinde arazideki gerilme ve şekil değiştirme koşulları yaklaşık olarak sağlanabilmesine rağmen arazideki

yerinden alınan numunede az da olsa bir örselenme meydana geldiğinden zemin numunesinin davranış biçimi etkilenmektedir. Buna karşın arazi deneylerinde zemin tabakalarının bazı malzeme ve dinamik özellikleri gerçeğe daha yakın olarak bulunabilmektedir. Fakat arazi deneylerinden bulunabilen özelliklerde sınırlı olduğundan zemin tabakalarının davranışlarını incelerken hem arazi hem laboratuvar deneylerinden yararlanmak en tercih edilen yaklaşım yöntemidir.

Bu çalışmada kohezyonlu zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışları incelenirken laboratuvar deneyleri ve bu deneylerden gözlenmiş özellikler ele alınmıştır.

## 2. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Zemin numunelerinin laboratuvarda deprem yükleri gibi tekrarlı yükler altında davranışları incelenirken seçilmiş bir depreme ait düzensiz kayma gerilmelerinin uygulanması karmaşık ve pahalı sistemleri gerektirmektedir. Ayrıca böyle bir deney sonucunda tek bir deprem kaydına bağlı davranışlar elde edildiğinden bu bulgular başka deprem kayıtları altındaki davranışları incelemek için kullanılamamaktadır. Bu nedenle seçilmiş deprem kayıtlarından bulunmuş düzensiz kayma gerilmeleri sabit genlikli uniform eşdeğer kayma gerilmesine dönüştürülerek zemin numunesine uygulanması tercih edilir. Temsil ettiği zemin tabakasının çok ufak bir parçası olan zemin numunesinin bu şekilde laboratuvar deneyleri ile bulunan malzeme ve dinamik özelliklerinden, geliştirilmiş amprik bağıntılar veya numerik modeller ile zeminlerin arazideki davranış biçimi, tabaka ve sınır şartlarına göre yaklaşık olarak bulunabilir. Böylece dinamik yükler altında zemin tabakalarının veya zemin yapılarının nasıl davranacağıının önceden tahmini ile olabilecek depremlere karşı koruyucu önlemler alınabilir.

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını diğer bir deyişle dinamik özelliklerini tanımlarken, bunları gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özellikleri diye iki gruba ayırabiliriz. Gerilme-şekil değiştirme özellikleri olarak genellikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri-

nin ve bunların birim şekil değiştirmeğe göre değişimlerinin bulunması anlaşılır. Mkavemet zellikleri olarak da gçmeğe veya büyük şekil değiştirmelere yol açan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları kullanılır. Bu iki grup özelliklerin bulunması için çoğunlukla aynı tür laboratuvar deney sistemlerinden yararlanılır, yalnız bazı durumlarda deney yöntemlerinde farklılıklar bulunur.

Deprem gibi tekrarlı yükler altında zemin tabakaları geniş sınırlar içerisinde değişen genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında kalırlar. Bu durumda zemin boşluklarındaki suyun yer değiştirmesi için yeterli zaman olmadığından zemin tabakalarında boşluk suyu basıncı artması ve şekil değiştirmeler meydana gelir. Tekrarlı yükler altında zemin tabakalarında meydana gelen bu davranış biçimini laboratuvarda zemin numuneleri üzerinde inceleyebilmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler içinden arazideki gerilme-şekil değiştirme sınır koşullarını yaklaşık olarak model edebilen dinamik basit kesme, dinamik üç eksenli, dinamik burulma, sarsma tablası ve rezonant kolon deney yöntemleri en yaygın olarak kullanılanları olmaktadır. Bu yazı içinde bu deney yöntemlerinden çoğunlukla dinamik özellikleri belirlemek için en çok kullanılan dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemleri kısaca anlatılacaktır.

## 2.1. DİNAMİK BASİT KESME DENEYİ

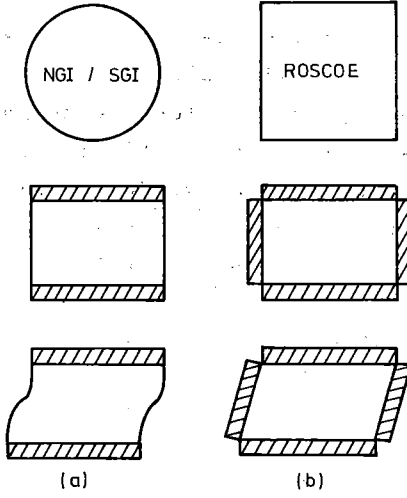
İlk dinamik basit kesme deneyleri 1960'lı yıllarda Kaliforniya niversitesinde Peacock ve Seed tarafından Roscoe tipi kare kesitli basit kesme deney aleti kullanılarak gerçekleştirilmişti. Bu deneylerde numunenin kare kesitli olarak hazırlanması sırasında karşılaşılan zorluklar uniform bir numune elde edilmesini engelleyebiliyordu. Aynı zamanda gerilme ve şekil değiştirme yayılışı bakımından da uniform olmayan

bir dağılışı bulunmaktaydı. Seed ve Peacock (1971) ve Finn, et al. (1971) tarafından yapılan araştırmalar sonucunda ortaya çıkan bu sakıncaların kısmen giderilebileceği görülmüştür. Bu sırada Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) tarafından geliştirilen basit kesme deney aletinde daire kesitli silindirik numuneler üzerinde deneyler yapılmaya başlanmıştı. Şekil 1'de gösterildiği gibi Roscoe tipi deney aletinde numunenin yan yüzleri rijit olan bir kutu içine yerleştirilmesine karşın NGI tipi deney aletinde numune yatay yönde genişlemeye imkan vermeyen donatılı bir membran içinde bulunmaktadır. İşveç Geoteknik Enstitüsü (SGI) tarafından geliştirilmiş diğer bir yöntemde ise silindirik numune üst üste konmuş ve ortalarında numune kesitine eşit dairesel delikler bulunan ince kaygan plaklar arasında yer almaktadır.

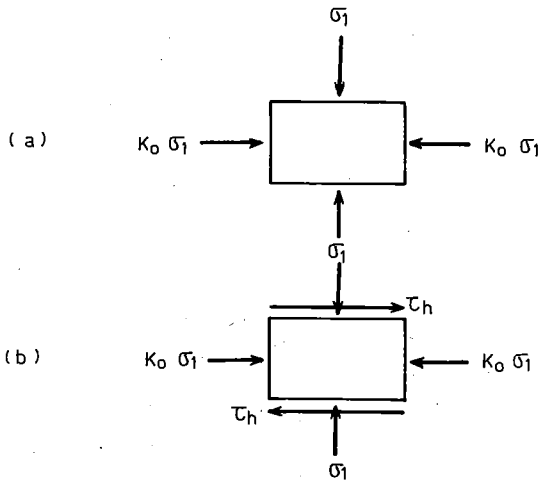
Basit kesme deneylerinde deney numunesine önceden seçilmiş bir  $\sigma_1$  düşey gerilmesi uygulanarak numunenin bu gerilme altında konsolidasyonu gerçekteştirilir. Bu durumda numunenin yatay doğrultuda Şekil değiştirmesine izin verilmemiş olması yatay düzlem içinde orta ve en küçük asal gerilmelerin birbirine eşit olmasına yol açar.

$$\sigma_2 = \sigma_3 = K_0 \sigma_1 \quad (1)$$

Burada  $K_0$  sukunette yatay toprak basıncı katsayısıdır. Normal konsolide zeminlerde numunenin alınmış olduğu derinlik göz önüne alınarak numuneye uygulanacak düşey gerilme arazide etkisinde kaldığı efektif düşey gerilmeye eşit olacak Şekilde hesaplanır. Aşırı konsolide zeminlerde ise numune önce odometre deneylerinden bulunmuş ön konsolidasyon basıncına eşit bir düşey gerilme altında konsolidasyona bırakılır. Daha sonra tabiatta numunenin alınmış olduğu derinlikte etkisinde kaldığı düşey basınç hesaplanılarak numune üzerindeki düşey gerilme bu değere düşürülür. Burada amaç tekrarlı kayma gerilmeleri uygulamadan önce numuneyi arazide etkisinde bulun-



Şekil: 1. BASİT KESME DENEY SİSTEMLERİ,



Şekil: 2. BASİT KESME DENEYLERİNDE GERİLME DURUMU,

duğu gerilme durumuna eşit bir duruma getirmek ve tabiatta meydana gelebilecek bir olayı laboratuvarında aynen model edebilmektedir.

Dinamik basit kesme deneyleri genellikle drenaja izin verilmeden gerilme veya deformasyon kontrollu olarak yapılır. Deney sırasında numune üst başlığına yatay kuvvetin etkisiyle numunede kayma gerilmeleri ve bunun sonucunda da kayma şekil değiştirmeleri oluşur. Şekil 1a'da gösterildiği gibi NGI tipi basit kesme deney sisteminde numunenin içinde bulunduğu membranın esnek olmasından dolayı düzlem şekil değiştirme koşulu tam sağlanamamaktadır. Buna karşın Roscoe tipi aletle kenarların rijid olması düzlem şekil değiştirme koşulunun oluşmasına yol açmaktadır.

Zemin numunesinin üst başlığına yatay bir kuvvet uygulanması numunenin gerilme durumunda Şekil 2b'de gösterildiği gibi bir değişiklik meydana getirmektedir. Buradan da anlaşıldığı gibi yatay kuvvetten dolayı numune alt ve üst yüzeylerinde kayma gerilmeleri oluşmakta fakat kenar yüzlere tamamlayıcı kayma gerilmeleri uygulanamamaktadır. Bu da numuneye etkiyen gerilme ve numunede oluşan şekil değiştirme dağılımlarının uniform olmamasına yol açmaktadır. Numune boyunca birim kayma değişimlerinin uniform olmaması büyük birim kayma değerlerinde, şekil değiştirmelerin en zayıf olan kesitte yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Diğer yandan numune kesitinde kayma gerilmesi yayılımının uniform olması gerilmenin numuneye aktarılmasında kullanılan alt ve üst başlıkların özelliklerine bağlı olmakta ve kesin olarak sağlanamamaktadır.

Dinamik basit kesme deney sisteminde zemin kesitindeki bir elemanda depremler sırasında meydana gelen gerilme durumu çok yaklaşık olarak model edilebilmesine rağmen yukarıda özetlenen nedenlerden dolayı gerilme ve şekil değiştirme yayılışlarının uniform olmaması zemin numunesinde mukavemet



kaybının ve kırılmanın daha çabuk olmasına yol açmaktadır. Gene aynı nedenlerden ötürü dinamik basit kesme deneyleri ile bulunan kayma modülü değerleri arazi deneyleri ile bulunan değerlerden küçük kalmaktadır.

## 2.2. DİNAMİK ÜÇ EKSENLİ DENEYİ

Dinamik üç eksenli deney sistemi ile zeminlerin dinamik özelliklerinin araştırılmasına 1960'lı yıllarda başlanmıştır. Deney yönteminin görece basit olması yaygınlaşmasına yol açmış ve zeminlerin deprem yükleri altında davranışlarının incelenmesinde en çok başvurulan deneysel yol olmuştur. Bu deney düzeninde ince elastik bir membran içine yerleştirilen silindirik zemin numunesi çoğunlukla izotropik bir çevre basıncı altında konsolidasyona bırakılmaktadır. Numuneye tekrarlı yükler düşey (eksenel) doğrultuda uygulanmakta ve bu sürede çevre basıncı sabit tutulmaktadır. Genellikle suya doygun zemin numuneleri üzerinde drenaja izin verilmeden yapılan bu deneylerde tekrarlı gerilmeler altında oluşan eksenel boy değişimleri ve boşluk suyu basıncı değişimleri bulunur.

Dinamik üç eksenli deneyleri de gerilme veya deformasyon kontrollü olarak yapılabilmektedir. Bu deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde aşağıda belirtilen deney sisteminin özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

A. Arazide tekrarlı kayma gerilmeleri altında en büyük asal gerilme düşey doğrultudan her iki yönde en fazla  $40^\circ$  lik dönme yaparken dinamik üç eksenli deneylerde en büyük asal gerilmenin yönü her yükleme çevrimi içinde  $90^\circ$  lik bir dönme göstermektedir.

B. Arazide orta asal gerilmenin değeri düzlemsel şekil

değiştirme sınır şartları altında belirlenen değerine eşit olmasına karşı dinamik üç eksenli deneyde yükleme çevriminin basınçta kalan kısmında en küçük asal gerilmenin değerine ve çekmede kalan kısmında ise en büyük asal gerilmenin değerine eşit olmaktadır.

- C. Önlem alınmaz ise alt ve üst başlık ile numune arasında meydana gelen sürtünme nedeni ile buralarda gerilme yığılmaları oluşmakta ve bu da numunede mukavemet kaybının daha çabuk olmasına yol açmaktadır.
- D. Yükleme çevriminin aksenal gerilmenin azaltıldığı kısmında numune kesitinde bir inceltme ve akma noktası oluşması mukavemet kaybını çabuklaştıracağı gibi bu durumda gerilmelerin hesabı da zorlaşmaktadır.
- E. Zemin numunesi yükleme çevriminin aksenal basınç ve çekme bölümlerinde simetrik olmayan bir davranış gösterir.
- F. Numunenin yüzey alanının büyük olması nedeni ile membranın dane aralarına girmesinin deney sonuçlarına (boşluk suyu basıncı oluşumlarına) etkisi büyük olabilmektedir.

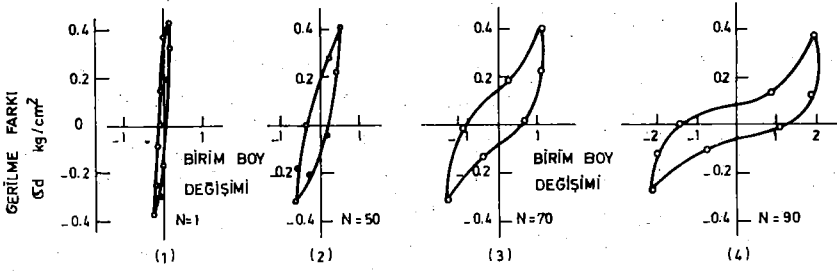
Belirtilen bu etkenlerden ilk dördü arazideki duruma kıyasla üç eksenli deney numunesinde daha hızlı mukavemet kaybına yol açarken, bu deneylerde  $K_0=1$  olması, diğer bir deyişle konsolidasyon aşamasında  $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$  olması mukavemet değerini yükseltmektedir.

### 3. DİNAMİK GERİLME-ŞEKİL DEĞİŞTİRME ÖZELLİKLERİ

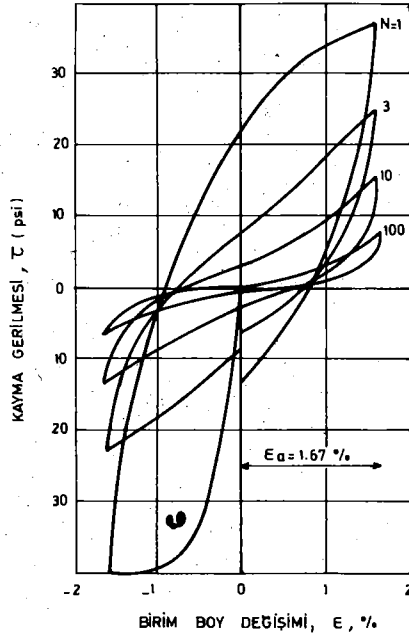
Deprem, titreşimli makine ve patlayıcı maddelerin kullanılması durumlarında oluşan tekrarlı yüklemeler sırasında zeminlerde elastik ve plastik (kalıcı) şekil değiştirmeler meydana gelir. Burada kayma gerilmesi genliklerinin büyümesi zemin danelerinin temas yüzeylerinde oluşan kaymaları arttıracığı için plastik şekil değiştirmelerde de bir artmaya yol açar.

Tekrarlı yüklemelerde bir yükleme çevrimi sırasında zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 3a ve 3b de gösterildiği gibi histerisis ilmikleri şeklinde olmaktadır. Gerilme kontrollü deneylerde belirli bir gerilme seviyesinin üzerine çıkıldığında Şekil 3a'da gösterildiği gibi meydana gelen şekil değiştirmeler artmakta bu da histerisis ilmiklerinin büyümesine ve yatıklaşmasına yol açmaktadır. Aynı durum deformasyon kontrollü deneylerde belirli bir şekil değiştirme seviyesinin üzerine çıkıldığında her çevrimde gerilme genliklerinin azalması ve de histerisis ilmiklerinin yatıklaşması biçiminde Şekil 3b'de gösterildiği gibi ortaya çıkmaktadır. Her iki tür deneyde de her çevrimde boşluk suyu basıncı değerlerinin artması numunede yumuşamayı arttırıcı yönde etki etmekte ve histerisis ilmiklerinin büyümesi ve yatıklaşmasını hızlandırmaktadır.

Zeminlerin tekrarlı yükler altında gerilme-şekil de-



Şekil: 3a. GERİLME KONTROLLU DENEYLERDE HİSTERİSİS İLMİĞİNİN DEĞİŞİMİ,



Şekil: 3 b. DEFORMASYON KONTROLLU DENEYLERDE HİSTERİSİS İLMİĞİNİN DEĞİŞİMİ,

ğiştirme özelliklerini incelemenin bir yolu da histerisis il-  
miklerinden yararlanarak kayma modülü ve sönüm oranları de-  
ğerlerini her çevrim için bulmaktır. Böylece çevrim sayısına  
bağlı olarak elde olunan kayma modülü ve sönüm oranlarının  
değişimi zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını  
model edebilmek için kullanılabilir.

### 3.1. DİNAMİK KAYMA MODÜLÜ

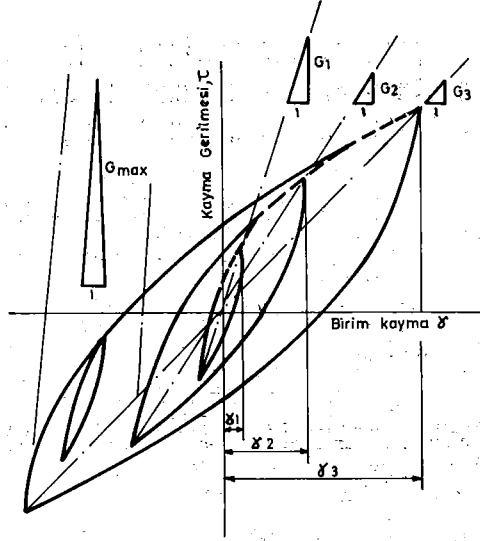
Zeminlerin tekrarlı yükler altında gerilme-şekil de-  
ğiştirme davranışlarını incelerken kullanılan parametrelerden  
birisi dinamik kayma modülü olmaktadır. Simetrik tekrarlı ge-  
rilmeler sırasında, Şekil 4'te gösterildiği gibi, elde olunan  
histerisis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi  
kayma modülü olarak tanımlanır. Gene aynı gösterildiği  
gibi böylece bulunan kayma modülü şekil değiştirme mertebesine  
bağlı değişen değerler alır.

Birçok araştırmacı tarafından incelenmiş dinamik kayma  
modülü-birim şekil değiştirme davranışı Şekil 5'te verilene  
benzer doğrusal olmayan bir davranış gösterir. Buradan da an-  
laşılacağı üzere birim şekil değiştirmenin artmasıyla kayma  
modülü değerinde bir azalma meydana gelmektedir. Bu doğrusal  
olmayan azalış amprik bazı bağıntılar kullanılarak model edi-  
lebilir. Bu modellerden bir tanesi Hardin ve Drnevich (1970)  
tarafından önerilmiş olan hiperbolik eğri modelidir.

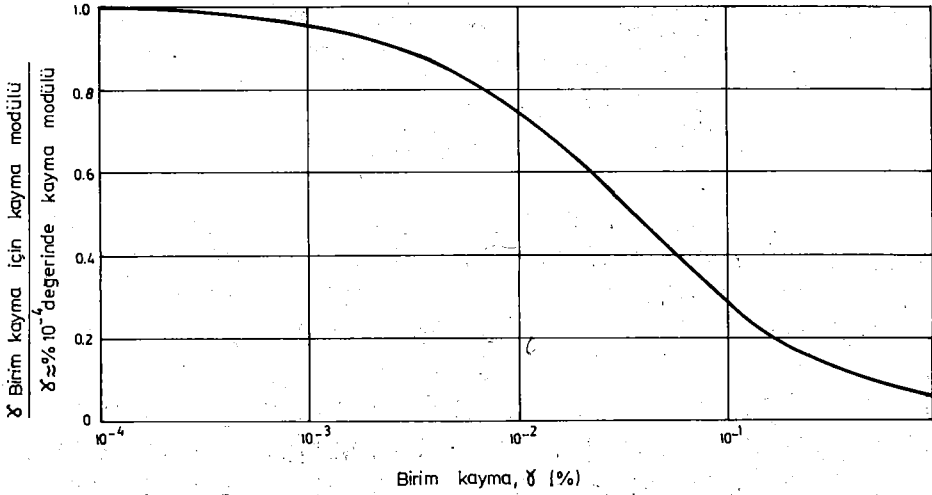
Bu modelde genellikle çok küçük şekil değiştirme gen-  
liklerinde ölçülebilen, en büyük eşdeğer kayma modülü

$$G_{\max} = 326 \left[ \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \right] (AKO)^a (\sigma'_m)^{1/2} \quad (2)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Burada e boşluk oranını, AKO  
aşırı konsolidasyon oranını,  $\sigma'_m$  ortalama efektif çevre geril-



Şekil: 4. TEKRARLI KAYMA GERİLMELERİ ALTINDA OLUŞAN BİR HİSTERİSİS İLMIĞİ,



Şekil: 5. DİNAMİK KAYMA MODÜLÜNÜN BİRİM KAYMAYA GÖRE DEĞİŞİMİ,

mesini ( $\text{kg/cm}^2$ ), a katsayısında zeminin plastisitesine bağlı bir parametreyi göstermekte olup sonuçta bulunan en büyük kayma modülü,  $G_{\max}$ , ( $\text{kg/cm}^2$ ) cinsinden elde olunur.

Tekrarlı yüklemeler etkisi altında meydana gelen birim kayma genliklerine göre kayma modülünün göstereceği değişim ise

$$G = G_{\max} / (1 + \gamma / \gamma_r) \quad (3)$$

bağıntısından hesaplanabilmektedir. Burada  $\gamma$  birim kaymayı göstermekte olup  $\gamma_r$  ise

$$\gamma_r = \tau_{\max} / G_{\max} \quad (4)$$

ve

$$\tau_{\max} = \left[ (0.5(1+K_o)\sigma'_v \sin\phi' + c' \cos\phi')^2 - (0.5(1+K_o)\sigma'_v)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

eşitlikleri ile tanımlanmıştır. Bu eşitliklerdeki  $K_o$  sukunet-  
teki yatay gerilme katsayısını,  $\sigma'_v$  efektif düşey gerilmeyi,  
 $c'$  ile  $\phi'$  efektif kayma mukavemeti parametreleri olan kohez-  
yon ve kayma mukavemeti açısını göstermektedir.

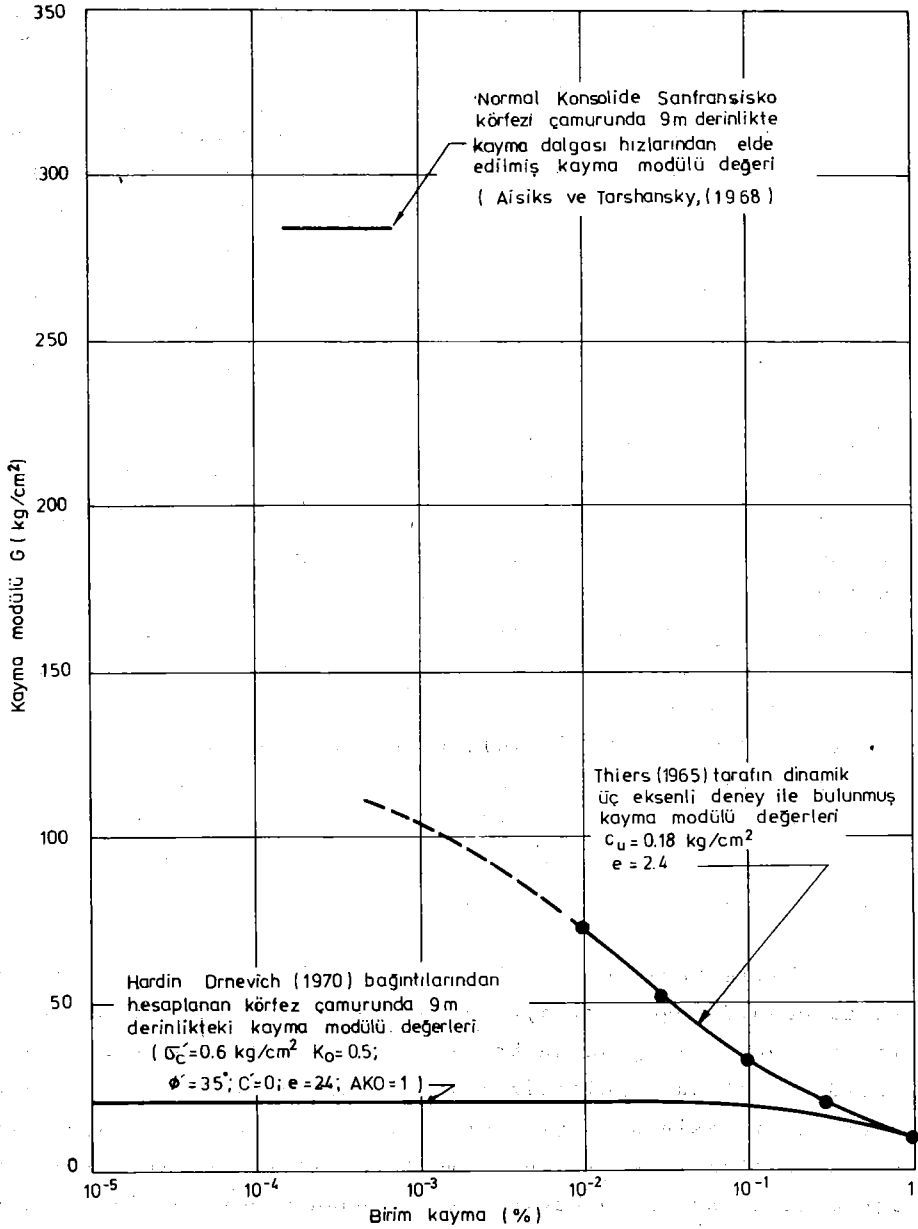
Suya doygun killerde şekil değiştirme genlik değerinin ve örselenme derecesinin kayma modülü üzerine etkilerinin fazla olması modülün kesin olarak bulunmasını zorlaştırır. Arazi deneyleri ile yapılan ölçümlerde örselenmenin etkisinden kurtulmak mümkün olmasına karşın bu seferde ancak çok küçük birim kayma genliklerinde kayma modülü değerleri bulunabildiği için elde olunan değerlerin depremlerle ilgili davranışların incelenmesinde kullanılabilirliği sınırlıdır. Bunun yanında laboratuvarında yapılan dinamik deneylerde geniş bir birim kayma genliği değişimi içinde deneyler yapılabilmesine

karşın numunelerde az da olsa bir örselenme meydana gelmektedir.

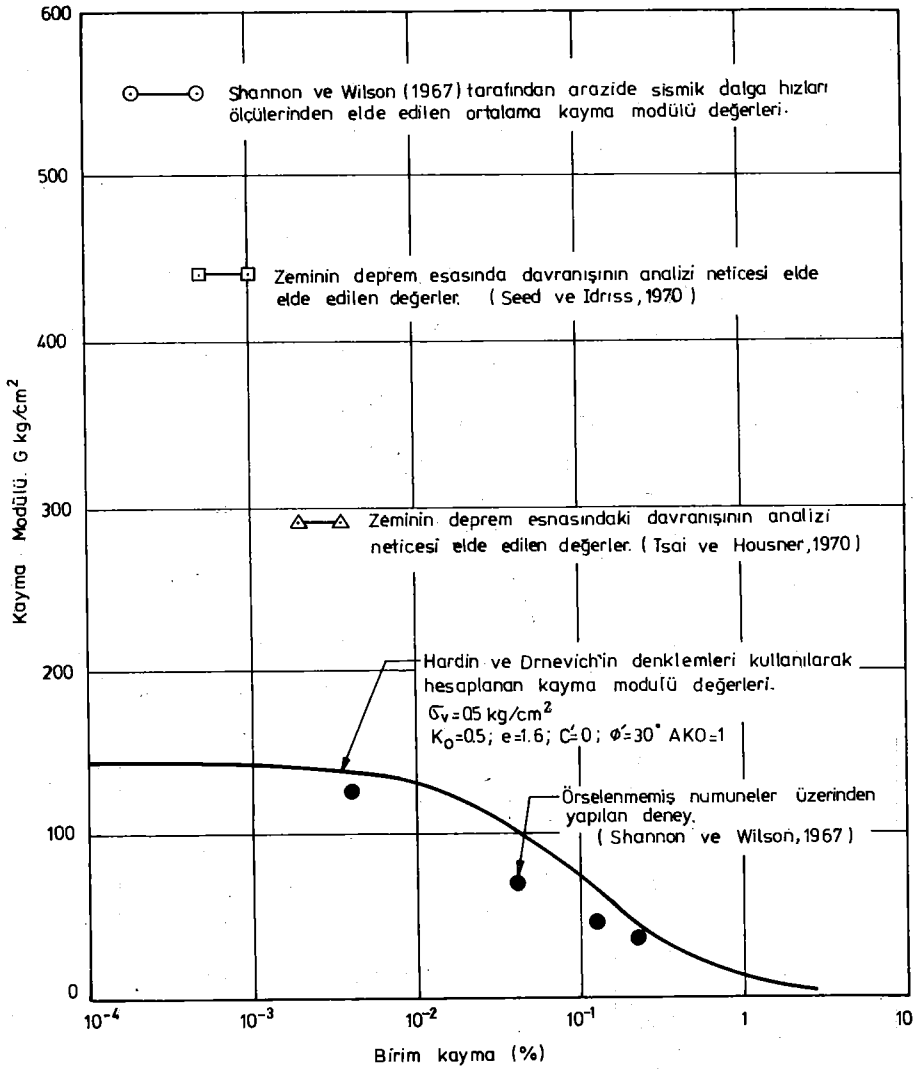
Şekil 6'da San Fransisko körfez çamurundan alınmış numuneler üzerinde Thiers (1965) tarafından yapılmış dinamik basit kesme deneylerinden bulunmuş kayma modülü ve arazide yaklaşık 7.5~8.0 m derinlikte kayma dalgası hızı ölçümlerinden bulunmuş kayma modülü değerleri gösterilmiştir. Burada laboratuvarında bulunmuş kayma modülü-birim kayma değişiminin daha küçük birim kayma değerlerinde kesikli çizgi ile gösterildiği gibi olduğu varsayılırsa elde olunan kayma modülü arazide yerinde yapılan ölçümlerden bulunan değerlerin % 40 civarında kalmaktadır. Benzer sonuçlar Union körfezi kili üzerinde yapılmış deneylerde de gözlenmiştir. Şekil 7'de gösterildiği gibi arazide yerinde yapılan kayma dalgası hızı ölçümlerinden ve depremler sırasında gözlenmiş davranışların sonradan yapılan analizlerinden bulunmuş kayma modülü değerleri aynı birim kayma genliklerinde laboratuvarında rezonant kolon deneyinden elde olunmuş değerlerin iki üç katı olmaktadır (Seed ve Idriss, 1970). Bu bulgular Ladd (1964) tarafından gözlenmiş ve örselenmenin etkisinin önemli olduğuna ait sonuçlarla da uyusmaktadır. Diğer yandan her iki örnekte de kayma modülünün birim kayma genliğine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği açıkça ortadadır.

Birim kayma ve örselenmenin etkileri dışında killerde kayma modülü değerleri ayrıca incelenen kilin mukavemet özellikleri ve katılığına da bağlı olacaktır. Hardin ve Drnevich (1970) tarafından geliştirilmiş (2) no.lu bağıntının ortalama çevre gerilmesinin, boşluk oranının, aşırı konsolidasyon oranının ve efektif kayma mukavemeti parametrelerinin etkilerini içermesine karşın bu bağıntıdan bulunan kayma modülü değerlerinin her zaman gerçeğe yakın değerler olmadığı da görülmüştür (Seed ve Idriss, 1970).

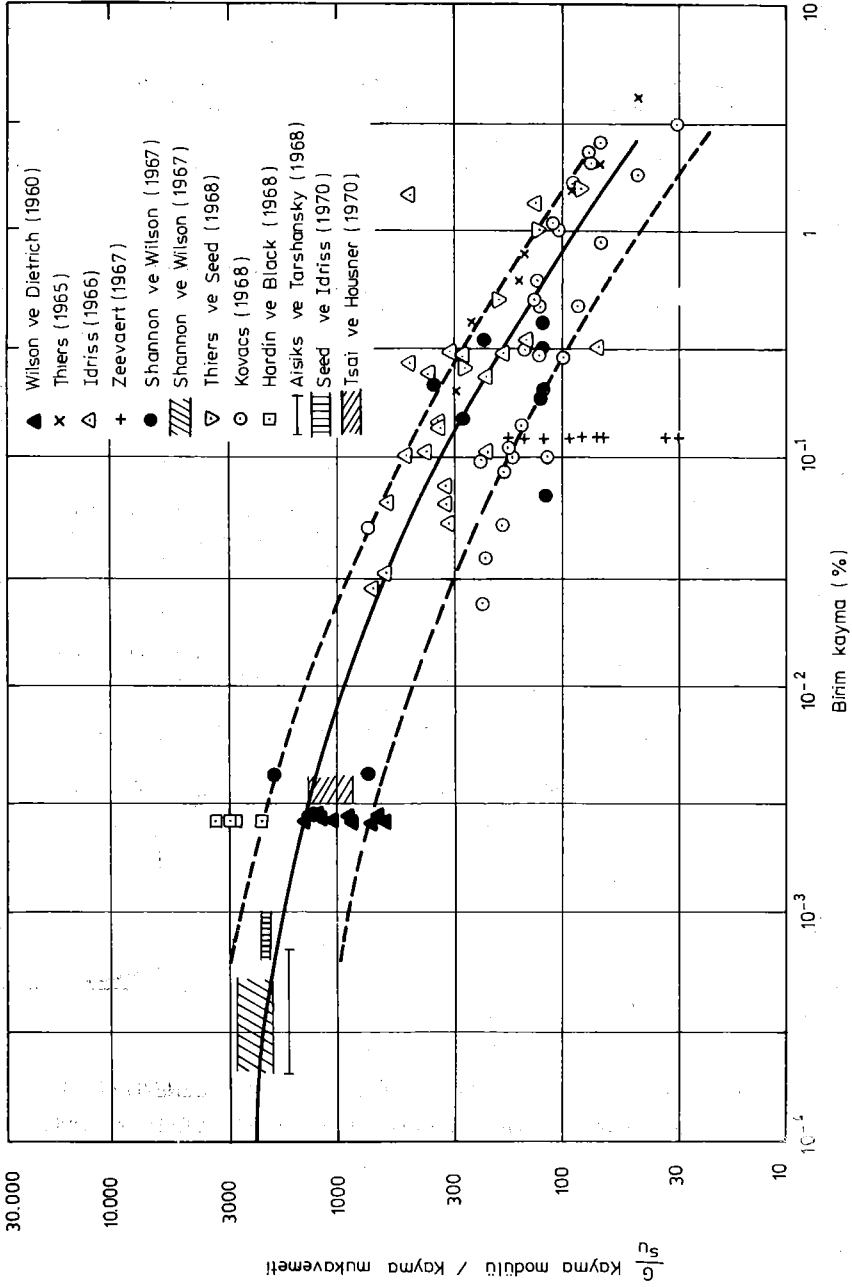




ŞEKİL 6 \_ SAN FRANCISCO KÖRFEZİ KİLİNDE BULUNMUŞ KAYMA MODÜLÜ DEĞİŞİMİ (SEED ve IDRİSS , 1971)



ŞEKİL 7 - UNION KÖRFEZİ KİLİ ÜZERİNDE YAPILMIŞ DENEYLERDEN DERLENMİŞ KAYMA MODÜLÜ DEĞERLERİ (SEED ve IDRİSS, 1971)



SEKIL 8 - FARKLI ZEMINLERDE FARKLI YÖNTEMLER KULLANILARAK BULUNMUŞ KAYMA MODÜLÜ - BİRİM KAYMA DEĞİŞİMLERİ ( SEED ve IDRİSS, 1970 )

Killi zeminlerde katılığın kayma mukavemeti ile birlikte arttığı, monotonik yükleme durumlarında değişik suya doygun killerde Young elastisite modülü (E) ve drenajsız deneylerden bulunan kayma mukavemeti ( $s_u$ ) oranlarında ( $E/s_u$ ) büyük farklılıklar bulunmadığı görülmüştür. Benzer bir şekilde kayma modülü ile drenajsız kayma mukavemeti arasında da doğrusal bir ilişkinin olduğu Wilson ve Dietrich (1960) tarafından ileri sürülmüştür. Bu görüşe dayanarak kayma modülünü drenajsız kayma mukavemetine oranlayarak tanımlamak farklı killerin özelliklerinin yaklaşık olarak tahmin edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Birçok araştırmacı tarafından bulunmuş kayma modülü değerleri yukarıda belirtilen biçimde kayma mukavemetine oranlanarak ele alındığında birim kayma genliğine göre değişimleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi derlenmiş sonuçlar arasında önemli sayılabilecek farklılıklar bulunmaktadır. Buna rağmen göz önüne alınmış değerlerin büyük bir kısmı ortalama değişime göre % 50 sapmayı gösteren kesikli çizgiler ile verilmiş eğrilerin arasında kalmaktadır.

Kayma modülünün birim kaymaya göre değişiminin belirlenmesinde diğer bir yaklaşımda Şekil 5'de gösterildiği gibi kayma modülü değerlerini belirli bir birim kayma genliğinde (örneğin  $\gamma=10^{-4}$ ) bulunmuş, kayma modülünün oranı olarak tanımlamaktır. Böyle bir yaklaşım benimsendiğinde arazide kayma dalgası hızlarının ölçülmesiyle elde olunmuş kayma modülü kullanılarak istenen birim kayma genliklerinde kayma modülü değerleri hesaplanabilir.

### 3.2. SÖNÜM ORANI

Şekil değiştirmelerin oluşması sırasında zemin elemanları içinde çeşitli nedenlerden dolayı enerji kayıpları meydana gelmektedir. Sönüm oranı olarak tanımlanan bu enerji

kaybının değeri dinamik deneyler ile bulunabilir. Sönüm oranı Şekil 9'da gösterildiği gibi histerisis ilmiği alanının, histerisis ilmiğinin uç noktalarını birleştiren doğrunun altında kalan üçgenin alanına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Sönüm oranında dinamik kayma modülü gibi tekrarlı gerilmeler altında oluşan şekil değiştirme genliklerine bağlı olarak doğrusal olmayan bir davranış gösterir. Kayma modülünün davranışından farklı olarak sönüm oranının değeri Şekil 10'da verildiği gibi artan birim şekil değiştirme genliği ile bir artış gösterir. Sönüm oranının bu doğrusal olmayan davranışını yaklaşık olarak model ederken kayma modülü için önerilmiş bağıntıya benzer bir yaklaşım kullanılabilir. Burada sönüm oranı,  $\lambda$ 'nın, birim kaymaya göre değişimi

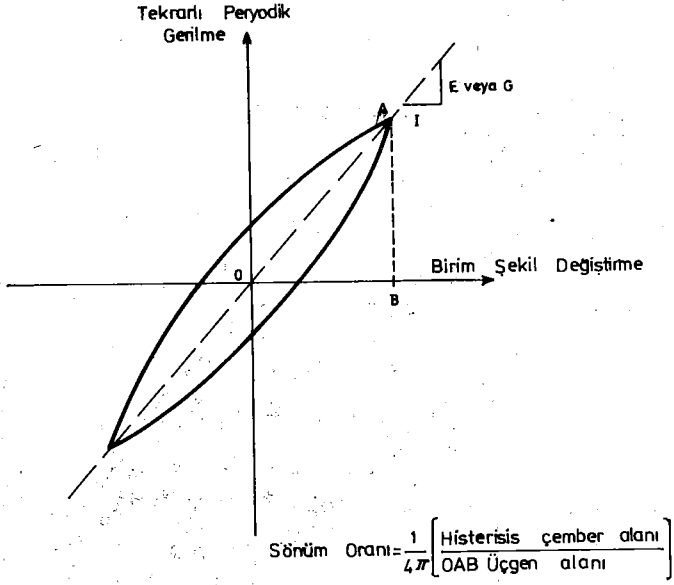
$$\lambda = \lambda_{\max} (\gamma/\gamma_r) / (1 + \gamma/\gamma_r) \quad (6)$$

eşitliği ile bulunabilir. Bu denklemdeki  $\gamma$  birim kayma genliğini göstermekte,  $\gamma_r$  ise (4) ve (5) numaralı denklemler yardımıyla elde edilmektedir. Büyük şekil değiştirme genliklerinde olduğu varsayılan en büyük sönüm oranı,  $\lambda_{\max}$ , ise suya doymun kohezyonlu zeminlerde

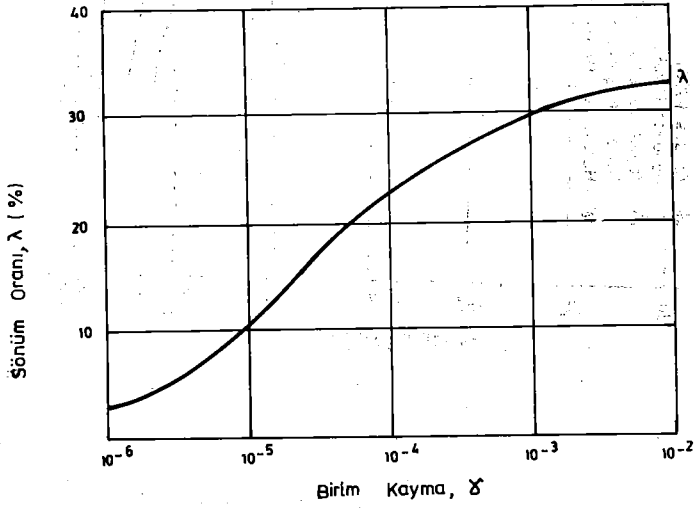
$$\lambda_{\max} = 31 - (3 + 0.3f)(\sigma'_m)^{0.5} + 1.5f^{0.5} - 1.51 \log N \quad (7)$$

eşitliğinden hesap edilebilir. Burada  $f$  uygulanan tekrarlı yükün çevrim/saniye cinsinden frekansını  $N$  ise çevrim sayısını göstermektedir.

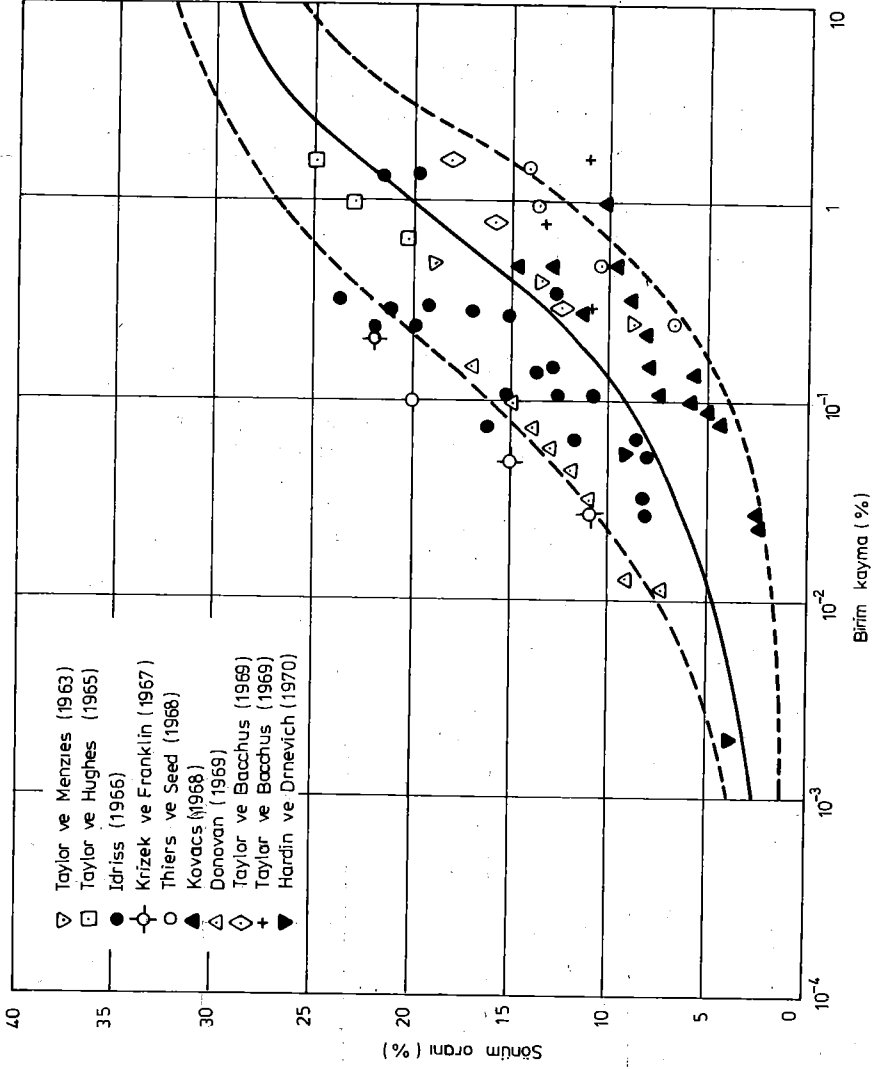
Suya doymun killerde sönüm oranlarıyla ilgili çalışmalarda değişik araştırmacılar tarafından bulunmuş değerlerin birim kaymaya göre değişimi Şekil 11'de gösterilmiştir. Burada verilmiş sönüm oranları arasında bazı durumlarda önemli sayılabilecek farklılıklar bulunmaktadır. Diğer yandan bu şekilde gösterilmiş sönüm oranlarının farklı zemin numuneleri



Şekil:9. SÖNÜM ORANININ TANIMI,



Şekil:10 SÖNÜM ORANININ BİRİM KAYMAYA GÖRE DEĞİŞİMİ,



ŞEKİL 11 - SUYA DOYGUN KILLERDE SÖNÜM ORANI - BİRİM KAYMA DEĞİŞİMİ (SEED ve IDRİSS 1971)

üzerinde farklı deney yöntemleri kullanılarak elde olunduğu düşünülürse farklılaşmanın o kadar da büyük olmadığı ortaya çıkar. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında Şekil 11'de dolu çizgi ile verilmiş sönüm oranı birim kayma ortalama değişim eğrisi yapılacak nümerik analizlerde kullanılabilir.

### 3.3. DİNAMİK DAVRANIŞLARI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Zeminlerin tekrarlı yükler altında davranışlarını incelemek ve farklı tekrarlı yükler altındaki davranışları model edebilmek için önerilmiş dinamik kayma modülü ve sönüm oranları zeminlerin dinamik özellikleri olarak düşünülebilir. Birçok araştırmacı tarafından yapılmış çalışmaların ışığı altında bu dinamik özelliklere dolayısıyla da zeminlerin dinamik davranışlarına etki eden faktörler etki derecelerine göre iki grupta ele alınabilir:

İlk grupta birinci dereceden önemli faktörler olarak;

- birim kayma genliği,  $\gamma$
- ortalama efektif çevre gerilmesi,  $\sigma'_m$
- boşluk oranı,  $e$
- çevrim sayısı,  $N$
- doygunluk derecesi,  $S$
- aşırı konsolidasyon oranı,  $AKO$
- frekans

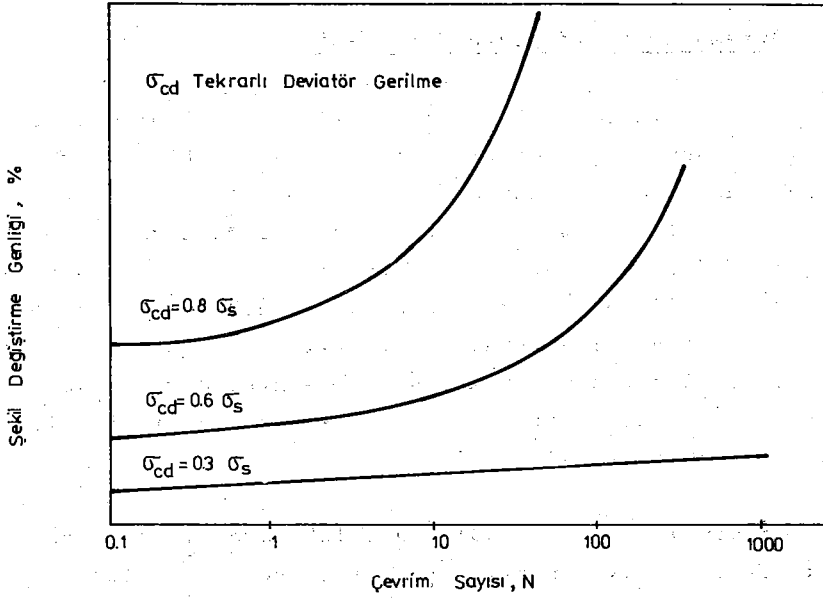
sayılabilir. İkinci grup faktörler arasında ise kullanılan deneysel yöntemler, yükleme biçimi ve doğrultusu zeminlerin dinamik davranışına etki eden faktörler olarak düşünülmelidir.



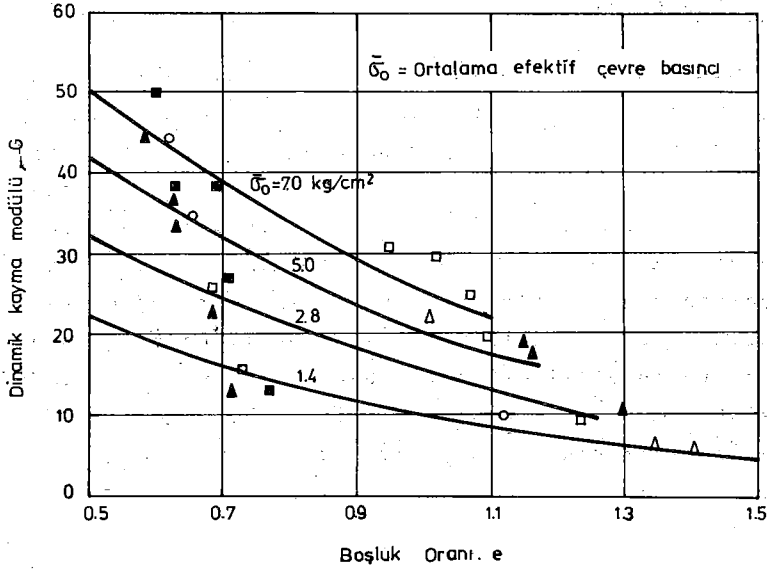
### 3.3.1. Birim Kayma Genliği

Tekrarlı yüklemeler sırasında zeminde birim Şekil değiştirmelerin artarak birikmesi denge durumundaki boşluk suyu basıncında da artışlara yol açar. Uygulanan gerilme genliklerinin belirli bir değerden küçük kalması durumunda zemin numunesi elastik bir davranış göstermekte ve boşluk suyu basıncında bir artış olmamaktadır. Kritik gerilme seviyesi olarak tanımlanabilen bu gerilme genliğinin üzerine çıkıldığında zemin elemanında kalıcı Şekil değiştirmeler oluşmakta ve çevrim sayısı arttıka Şekil değiştirme genlikleri büyümetedir. Buna bağlı olarak da boşluk suyu basınçlarında çevrim sayısıyla bir artış gözlenir.

Tekrarlı gerilmelerin etkisiyle çevrim sayısı ile artan Şekil değiştirmeler dane yapısında bir gevsemeye boşluk suyu basıncı artışları da efektif gerilmelerde bir azalmaya yol açar. Bu iki nedenden ötürü zemin elemanında giderek artan bir mukavemet kaybı meydana gelir. Wilson ve Greenwood (1974) yaptıkları çalışmada tekrarlı gerilme genliği değerinin zemin numunesinde oluşan Şekil değiştirme ve boşluk suyu basıncı artışlarının çevrim sayısına göre değişim hızlarını etkilediği gözlemişlerdir. Şekil 12'de gösterildiği gibi uygulanan gerilme genliğinin artması Şekil değiştirme genliğinin ve boşluk suyu basıncı artışlarının çevrim sayısına göre değişimlerini hızlandırmaktadır. Lashine (1973) ve Matsui, et al. (1980) yaptıkları incelemelerde gerilme genliğinin belirli bir kritik değerin altında kalması halinde oluşan Şekil değiştirmelerin sınırlı kaldığını ve çevrim sayısına göre bir artış göstermediklerini gözlemişlerdir. Türkiye'de kohezyonlu zeminlerin dinamik özelliklerini incelemek için yapılan araştırmalarda da (Toğrol, Özudoğru ve Güler, 1977; Ansal ve Erken, 1982) tekrarlı gerilme değerinin meydana gelen Şekil değiştirmeler üzerinde etkileri yapılmış deneysel çalışmalarda görülmüştür.



Şekil:12. GERİLME GENLİĞİNİN ETKİSİ,



Şekil:19. DİNAMİK KAYMA MODÜLÜ DEĞERİNİN BOŞLUK ORANI VE ORTALAMA EFEKTİF ÇEVRE BASINCI İLE DEĞİŞİMİ,

Hardin ve Black (1968)

### 3.3.2. Ortama Effektif Çevre Gerilmesi

Zemin numuneleri üzerinde yapılan statik deneylerde elde olunan sonuçlara benzer olarak tekrarlı yükler altında yapılan deneylerde de numuneye uygulanan efektif çevre gerilmesinin mertebesi meydana gelen şekil değiştirmelerin değerini doğrudan etkilemektedir. Effektif çevre gerilmesindeki artışlar zemin daneleri arasındaki değme noktalarındaki basınçları ve temas alanlarını arttırdığı için zemin numunesinin kayma modülü değerinin büyümesine yol açmaktadır. Bu da aynı tekrarlı gerilmeler altında daha küçük şekil değiştirmeler oluşmasına yol açmaktadır.

Hardin ve Black (1968) yaptıkları araştırmada aynı boşluk oranında fakat farklı efektif çevre gerilmeleri altında bulunan kaolin ve Boston kilinden hazırlanmış numunelerde kayma modülünün Şekil 13'de gösterildiği gibi artan efektif çevre gerilmesi ile arttığını gözlemişlerdir.

### 3.3.3. Boşluk Oranı

Zeminlerin hem statik hem de tekrarlı yükler altında davranışlarını etkileyen en önemli faktörlerden biri boşluk oranı olmaktadır. Danesel bir yapıya sahip olan zeminlerin mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme özellikleri daneler arasındaki ve birbirleri ile temas ettikleri noktalardaki sürtünme ve kohezyona bağlı olmaktadır. Boşluk oranının artması veya azalması danelerin birbirleri ile temas noktalarını ve ara açıklıklarını arttıracak veya eksilteceği için davranışları doğrudan etkilemektedir. Şekil 13'den de görüldüğü gibi boşluk oranlarında artma zeminlerde bir yumuşamaya ve mukavemetin azalmasına yol açmaktadır.

#### 3.3.4. Çevrim Sayısı

Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışlarını incelerken önem kazanan bir faktör de çevrim sayısıdır. Şekil 12'den de görüldüğü gibi çevrim sayısının artması zeminlerde bir yumuşamaya yol açmaktadır. Yalnız böyle bir yumuşamanın olabilmesi için belirli bir tekrarlı kayma gerilmesi veya birim kayma genliğinin aşılması gerekir. Bu durumda danelerin birbirlerine göre hareket etmeleri aralarındaki bağları zayıflatmakta ve mukavemeti azaltmaktadır.

#### 3.3.5. Doygunluk Derecesi

Tekrarlı gerilmeler altında zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışları incelenirken bu süre içinde zemin boşluklarındaki suyun drene olabilmesi için gerekli zamanın olmayacağı açıktır. Bu nedenden ötürü tekrarlı gerilmeler altında drenajsız şartlarda deneyler yapılması alışılmamıştır. Diğer yandan zemin tabakalarının tekrarlı gerilmeler altında davranışları incelenirken de bu varsayım kullanılır. Bu durumda zemin daneleri arasındaki boşluklarda meydana gelebilecek boşluk suyu basınçları efektif gerilmeleri diğer bir deyişle daneler arasındaki gerilmeleri etkileyeceği için çok önemlidir. Yalnız oluşabilecek boşluk suyu basınçları doygunluk derecesinin bir fonksiyonu olacaktır. Eğer zemin elemanı % 100 suya doygun değilse boşluklarda bulunan havanın kolay sıkışabilir olmasından ötürü boşluk suyu basınçları meydana gelmeyeceği açıktır. Bu nedenle tekrarlı gerilmeler altında davranışlar incelenirken doygunluk derecesinin bilinmesi gerekir.

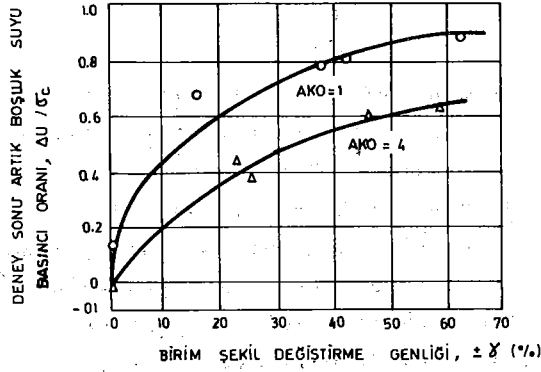
#### 3.3.6. Aşırı Konsolidasyon Oranı

Tekrarlı yükler altında kohezyonlu zeminler aşırı konsolidasyon oranına (AKO) bağlı olarak farklı davranış biçimleri göstermektedirler. Bu farklılaşmaya yol açan en önemli

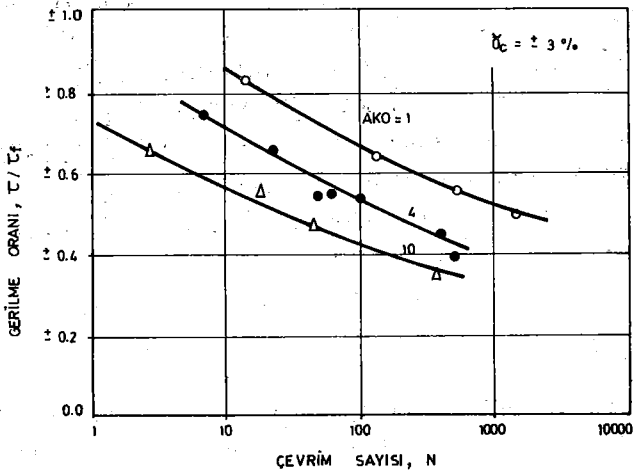
etken çevrim sayısına göre meydana gelen farklı boşluk suyu basıncı değişimleri olmaktadır.

Brown, Lashine ve Hyde (1975) yaptıkları araştırmada aşırı konsolidasyon oranı 2 ile 20 arasında değişen zemin numuneleri üzerinde yaptıkları tek yönlü dinamik üç eksenli deneylerde boşluk suyu basıncı değişimlerini incelemişlerdir. Aşırı konsolidasyon oranı büyük olan numunelerde negatif boşluk suyu basıncı oluştuğunu buna karşı aşırı konsolidasyon oranı azaldıkça meydana gelen negatif boşluk suyu basıncı değerlerinin küçüldüğünü ve AKO'nun küçük değerlerinde Şekil 14 de gösterildiği gibi pozitif olduğunu gözlemişlerdir.

Andersen et al. (1980) Drammen kili için yapmış oldukları bir araştırmada da benzer boşluk suyu basıncı davranışları elde etmişlerdir. Diğer yandan AKO değeri 1 ile 10 arasında değişen numuneler üzerinde yapılan dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneylerinde Şekil 15'de gösterildiği gibi aynı ön konsolidasyon basıncı etkisinde kalmış numunelerde aynı tekrarlı gerilmeler altında aşırı konsolidasyon oranı arttıkça meydana gelen şekil değiştirmelerde bir artış görülmüştür. Yalnız bu davranışlar tekrarlı gerilme genliği deney başı konsolidasyon basıncı oranına göre incelendiğinde AKO değerinin büyümesinin tekrarlı gerilmeler altındaki mukavemeti arttırdığı ortaya çıkmaktadır. Diğer yandan önceden tekrarlı gerilmelerin etkisinde kalmanın aşırı konsolide numunelerde bir mukavemet kaybına yol açtığı ve ikinci bir tekrarlı yüklemeye karşı direncin azaldığı görülmüştür. Ön tekrarlı yüklemeye sonra yapılan statik deneylerden efektif mukavemet parametreleri kayma mukavemeti açısı,  $\phi'$  ve kohezyon,  $C'$  değerlerinde bir değişim olmamasına rağmen drenajsız kayma mukavemeti değerlerinde bir azalma gözlenmiştir.



Şekil:14. AŞIRI KONSOLIDASYON ORANININ TEKRARLI YÜK ALTINDA BOŞLUK SUYU BASINCINA ETKİSİ, Brown, et al. (1978)



Şekil:15 DİNAMİK BASİT KESME DENEYLERİNDE AŞIRI KONSOLIDASYONUN ETKİSİ, ANDERSEN, ETAL, (1982)

### 3.3.7. Frekans

Kohezyonlu zemin numunelerinin tekrarlı gerilmeler altında davranışlarına etki eden faktörlerden biri de bu tekrarlı yüklemenin frekansıdır. Matsui, Ohara ve Ito (1980) tarafından normal konsolide killeri üzerinde yapılan dinamik deneylerde frekansın etkisi incelenmiştir. Elde olunmuş sonuçlar aynı bir çevrim sayısında frekans değerlerinin küçülmesinin meydana gelen artık boşluk suyu basıncı ve birim şekil değiştirme genliklerinin büyümesine yol açtığı görülmüştür. Diğer yandan tekrarlı gerilmeler altında kohezyonlu zeminler üzerinde yapılan deneylerde artık boşluk suyu basıncı değerlerinin güvenilir bir biçimde ölçülebilmesi için uygulanan frekans değerlerinin 0.1 Hz civarında olması bir çok araştırmacı tarafından öngörülmektedir. Bunun başlıca nedeni daha yüksek frekanslarda oluşabilecek boşluk suyu basınçlarının ölçülebilmesi için gereken zamanın olmamasıdır. Genellikle alt veya üst başlığa yerleştirilmiş bir basınç ölçer (transducer) ile yapılan boşluk suyu basıncı ölçümlerinin bütün numunede meydana gelen boşluk suyu basıncını gösterebilmesi için bir dengelenme süresi gerekmektedir. Bu sürenin çok kısa olması durumunda oluşan basınçların ancak belirli bir kısmı ölçülebilmektedir. Sürenin çok fazla olması durumunda ise meydana gelen boşluk suyu basınçları zemin dâne yapısında zamana bağlı akma olayından etkilenmektedir.

### 3.3.8. Yükleme Şekli

Dinamik deneylerde tekrarlı gerilmelerin uygulanma biçim ve şekilleri de davranışa etki eden faktörler arasında ele alınmalıdır. Bugüne kadar yapılmış çalışmalarda bir ölçüde deney sisteminin özelliklerine de bağlı olarak sinüsoidal, üçgen, dikdörtgen ve trapez yükleme şekilleri kullanılmıştır. Dikdörtgen yükleme şeklinin uygulanması durumunda en büyük gerilme değerinin numune üzerinde diğer yükleme şekillerine

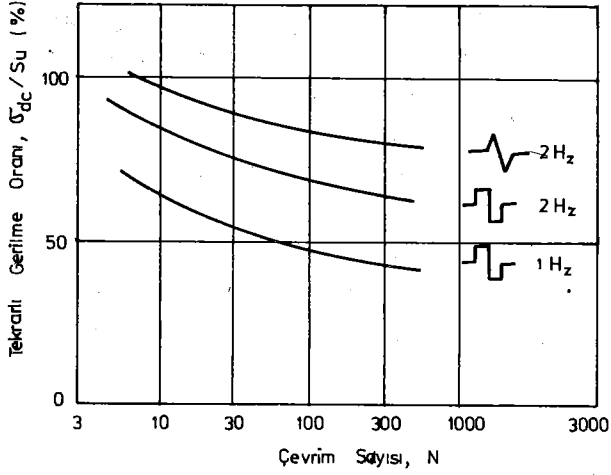
göre daha uzun bir süre etkili olması nedeniyle daha büyük şekil değiştirmelere ve de dolayısıyla daha büyük artık boşluk suyu basınçlarına yol açtığı görülmüştür.

Yükleme şeklinin etkisini incelemek için Thiers ve Seed (1968) tarafından yapılmış bir çalışmadan elde olunmuş sonuçlardan bir örnek Şekil 16'da verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi dikdörtgen yükleme şekli daha büyük şekil değiştirmelere dolayısıyla da daha küçük değerlerde bir mukavemet eğrisine yol açmaktadır. Bu sonuçlardan ortaya çıkan diğer bir özellikte frekansın etkisidir. Uygulanan tekrarlı gerilme frekansının 2 Hz'den 1 Hz'e düşmesinin etkisi çok bariz bir biçimde görülebilmektedir.

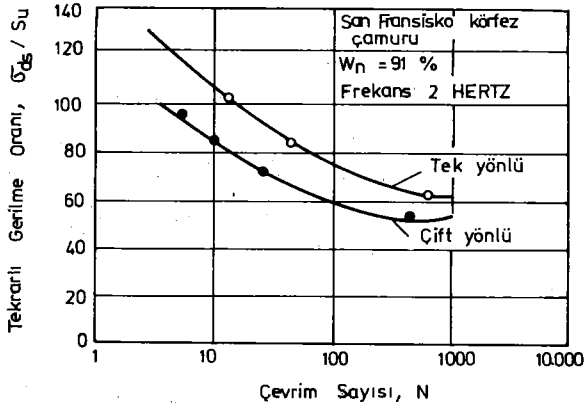
Yükleme şeklinin etkisi incelenirken göz önüne alınması gereken diğer bir özellik de yüklemenin tek veya çift yönlü etkilemesidir. Şekil 17'de de gösterildiği gibi yüklemenin tek yönlü olması demek uygulanan tekrarlı gerilme genliğinin hep aynı işaretli bölgede kalması anlamına gelmektedir. Örneğin dinamik üç eksenli deneylerde uygulanan tekrarlı düşey gerilmelerin hep basınç bölgesinde kalması tek yönlü bir yüklemeye şeklidir. Seed ve Chan (1966) tarafından yapılan bir çalışmadan elde olunan ve Şekil 17'de verilen mukavemet eğrilerinden de anlaşılacağı gibi çift yönlü tekrarlı gerilme uygulanması daha büyük şekil değiştirmelere ve daha küçük mukavemet değerlerine neden olmaktadır. Bir deprem sırasında meydana gelecek tekrarlı gerilmelerin çift yönlü olduğu düşünülürse laboratuvarda yapılan deneylerde de çift yönlü yüklemeye şeklinin kullanılmasının daha gerçeğe uygun olacağı açıktır.

Zemin tabakalarının deprem yükleri altında davranışlarının incelenmesi istenen çalışmalarda laboratuvar deneylerinde çoğunlukla eşdeğer tekrarlı gerilme genliği ve eşdeğer çevrim sayısı bulunarak sinüsoidal bir yüklemeye şekli uygulanır. Halbuki tabiatla bir zemin tabakasına bir depremde gelecek tekrarlı gerilme uniform sinüsoidal bir şekil göstermez-





Şekil:16. YÜKLEME ŞEKLİ ve FREKANSIN MUKAVEMET EĞRİLERİNE ETKİSİ,  
(Thiers ve Seed 1969)



Şekil:17. SAN FRANSİSKO KÖRFEZ ÇAMURUNUN "TEK ve ÇİFT" YÖNLÜ YÜKLEMELER  
ALTINDA DİNAMİK MUKAVEMETLERİN KARŞILAŞTIRILMASI,  
(Seed Chan, 1968)

ler. Annaki ve Lee (1977) yaptıkları bir araştırmada bu iki yükleme şeklinin zeminlerin dinamik mukavemeti üzerine etkisini incelemişlerdir. Elde olunan deney sonuçları iki yükleme şekli arasında önemli bir fark olmadığını göstermektedir. Burada bu farkın az olması eşdeğer tekrarlı gerilme genliğinin ve eşdeğer çevrim sayısının hesaplanma yöntemine bağlı olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Bu açıdan laboratuvar deneylerinde uygulanacak uniform sinüsoidal gerilme genliği ve çevrim sayılarının hesaplanmasında yukarıda sözü edilen çalışmadakine benzer olarak davranış farklarının az olmasına yol açacak yöntemin seçilmesi tercih olunmalıdır.

#### 4. KILLERİN DİNAMİK MUKAVEMET ÖZELLİKLERİ

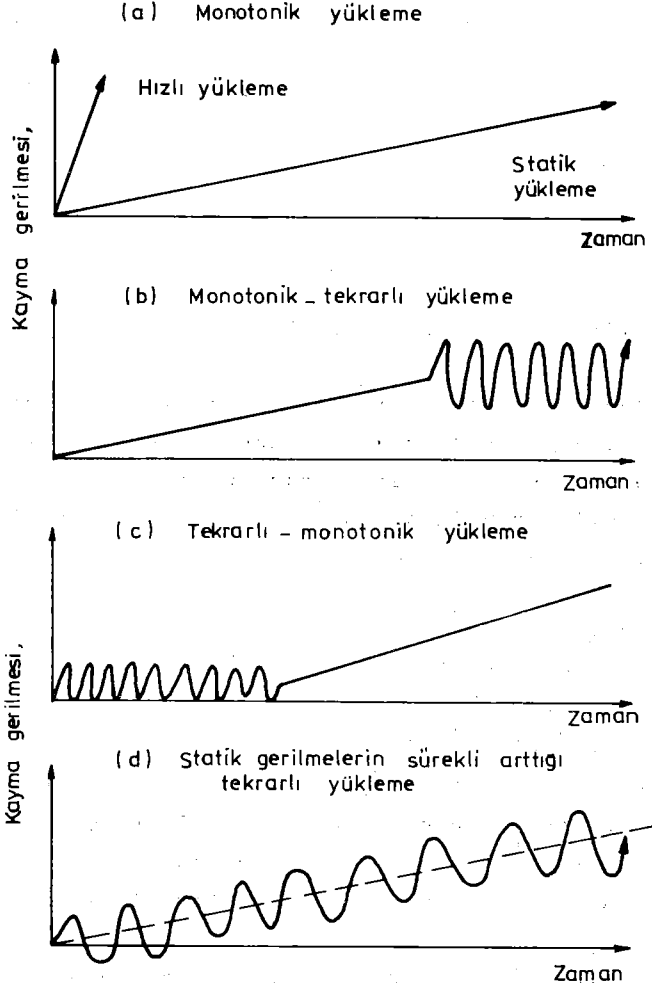
Bir zemin numunesinde uygulanan tekrarlı kayma gerilmesinin değerine bağlı olarak elastik ve kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelir. Zeminlerin danesel yapıları göz önüne alınırsa bu biçimde oluşan şekil değiştirmeler dane yapısında bir takım değişiklikler olmasına ve de dolayısıyla zemin numunesinin mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin tekrarlı gerilmelerin uygulanması süreci içinde değişmesine yol açabilir. Böyle bir değişmeyi kontrol eden ana faktörlerden birinin zemin elemanında tekrarlı gerilmelerin etkisiyle oluşan şekil değiştirme genlikleri olacağı açıktır. Bu konuda yapılan araştırmalarda, genel olarak, zemin elemanında birim şekil değiştirmelerin  $10^{-5}$  değerinden küçük kalması halinde kalıcı şekil değiştirmelerin oluşmadığı ve davranışın elastik bölge içinde kaldığı gözlenmiştir. Buradan da böyle bir durumda zemin dane yapısında belirgin bir değişimin olmayacağı ve de zemin elemanının başlangıçta sahip olduğu mukavemet ve gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yaklaşık olarak aynı kalacağı söylenebilir. Değişik zemin numuneleri üzerinde drenajsız şartlarda yapılan dinamik deneylerde, birim şekil değiştirme genliklerinin belirli bir değerden küçük kalması halinde numunede artık boşluk suyu basınçları oluşmadığı görülmüştür. Diğer yandan birim şekil değiştirme genliklerinin bu sınır değerden büyük olması durumunda çevrim sayısına bağlı olarak boşluk suyu basınçlarında bir artma ve histerisis ilmiklerinde de bir yatıklaşma meydana gelmektedir.

Tekrarlı gerilmeler altında zeminlerin mukavemet ve yapısal davranış biçimlerini etkileyen diğer bir faktörde daha önce de belirtildiği gibi yükleme hızıdır. Statik deneylerde yükleme hızının artmasıyla mukavemetin arttığı gözlenmiştir. Bununla beraber küçük birim şekil değiştirme sınırları içinde değişik hızlarda yapılmış statik deneylerde gerilme-şekil değiştirme davranışları arasında bir farklılaşma olmamaktadır. Dinamik deneylerde de yükleme hızının (frekansın) etkisi birim şekil değiştirme genliklerinin  $10^{-3}$  değerinden büyük olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Gene statik deneylere benzer olarak yükleme hızının artması dinamik kayma mukavemeti değerlerini de büyötmektedir.

#### 4.1. STATİK VE TEKRARLI GERİLMELER

Zemin tabakalarının etkisinde kalabilecekleri farklı gerilmeler altında davranış ve mukavemet özelliklerini belirleyebilmek için incelenen olaydakine benzer gerilme koşullarında deneyler yapılmasının daha güvenilir sonuçlar vereceği açıktır. Tabiaata bir zemin tabakası içinde yer alan bir zemin elemanına gelebilecek statik ve tekrarlı gerilmeler Şekil 18'de gösterildiği gibi dört biçimde ele alınabilir. Burada ilk yükleme biçimi sürekli olarak artan (monotonik) statik bir yükleme olmaktadır. Bu tür bir gerilme artışı uygulanması durumunda zemin elemanında kayma mukavemetinin yükleme hızının bir fonksiyonu olduğu birçok araştırmada gözlenmiştir. Dolayısıyla gerçeğe uyan sonuçlar elde edilebilmesi için yapılan deneylerde incelenen olaydakine yaklaşık olarak eşit olacak bir yükleme hızının kullanılması doğru olacaktır.

Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranış ve mukavemet özelliklerinin incelenmesinde genellikle Şekil 18'de (b), (c) ve (d) ile gösterilmiş yükleme biçimleri kullanılır. Bunlardan **iki belirli bir statik kayma gerilmesi altında**



Şekil:18 ZEMİN DENEYLERİNDE KULLANILAN  
YÜKLEME MODELLERİ,

olan bir zemin elemanının, tekrarlı gerilmelerin etkisinde kalması durumunda göstereceği davranış ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi için uygulanabilir. Tabiiata böyle bir yükleme biçimi depremler sırasında yamaç ve şevlerde yer alan zemin tabakalarında meydana gelebilir (Ishihara, 1980).

Diğer bir yükleme biçimi de Şekil 18(c) de gösterildiği gibi tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisinde kalmış bir zemin elemanında, statik kayma mukavemeti ve davranış özelliklerinin belirlenmesi için sürekli olarak artan kayma gerilmeleri uygulanmasıdır. Böyle bir deneyde amaç, depremlerde olduğu gibi tekrarlı gerilmeler etkisinde kalmış bir zemin tabakasında meydana gelmiş mukavemet kayıplarını ve davranış özelliklerindeki değişimleri incelemek olabilir.

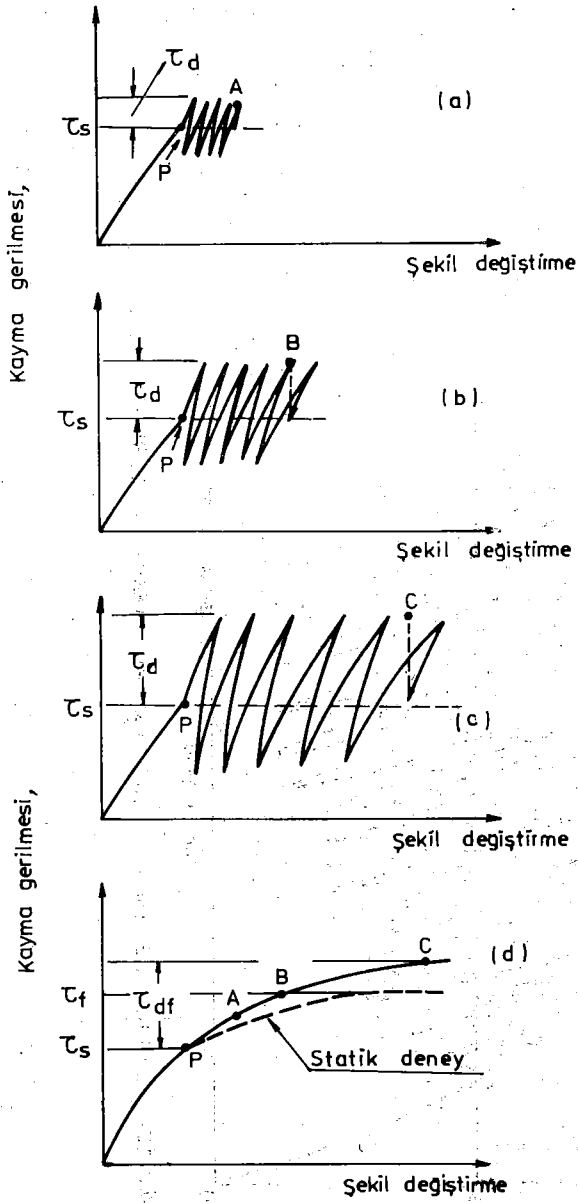
Son bir yükleme biçimi olarak da Şekil 18(d) ile gösterilen yükleme modeli düşünülebilir. Burada tekrarlı kayma gerilmeleri ile eşanlı olarak statik kayma gerilmelerinin artırılması ve bu koşullar altında mukavemet ve davranış özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Tabiiatta böyle bir gerilme durumu titreşimli makina temelleri altında kalan zemin tabakalarında veya kazık çakma işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. İncelenen olayda meydana gelen tekrarlı gerilmeler altında zeminin davranış ve mukavemet özelliklerinde oluşabilecek değişimlerin belirlenmesine çalışılır.

#### 4.2. TEKRARLI GERİLMELER ALTINDA KAYMA MUKAVEMETİ

Bir önceki bölümde kısaca özetlenen yükleme modelleri arasından kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında kayma mukavemetinin incelenmesi için en çok kullanılanı Şekil 18(b) ile gösterilmiş olan yükleme biçimidir. Böyle bir yaklaşımın genel olarak benimsenmesine yol açan ana neden bugüne kadar yapılmış çalışmalardan da görüldüğü gibi tekrarlı geril-

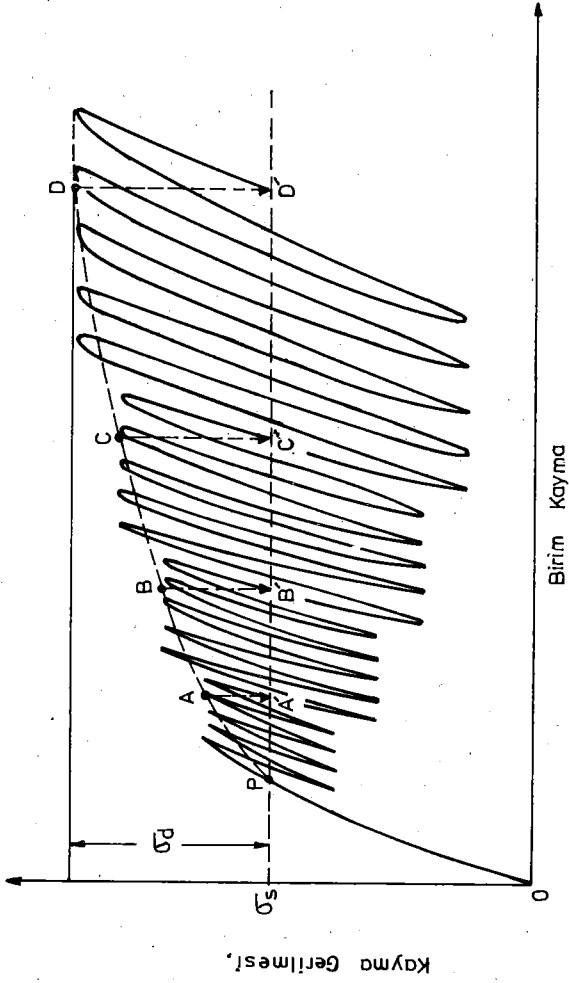
melerin etkisinde kalan kohezyonlu zemin tabakalarında, örneğin depremlerde, en sık karşılaşılan olay meydana gelen şey kaymalarıdır. Bu yüzden deprem riski yüksek olan bölgelerde yapılacak toprak dolgu barajlarda, konut ve sanayi tesislerinin yapılmış veya yapılacak olduğu yamaçlarda bulunan kohezyonlu zemin tabakalarında mukavemet ve davranış özelliklerinin incelenmesinde, Şekil 18(b) dekine benzer bir yükleme modeli kullanarak deneyler yapılması istenir. Böyle bir çalışmada elde yeterli sayıda aynı özelliklere sahip zemin numunesi bulunması halinde, deneyler Şekil 19'da gösterildiği gibi, bu numunelere farklı tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri uygulanarak yapılabilir. Bu deneylerde zemin numuneleri ilk aşamada izotropik bir çevre gerilmesi altında konsolidasyona bırakılır. Daha sonra Şekil 19'da P noktasıyla gösterilen ve incelenen zemin tabakasında tabiaatta bulunduğu varsayılan statik kayma gerilmesine eşit bir  $\tau_s$  kayma gerilmesi zemin numunelerine uygulanır. Suyu doymuş numunelerde, uzun süreli deprem öncesi gerilme koşullarının model edilmesi amaçlandığından bu kayma gerilmesine drenajlı şartlarda ulaşılması doğru olacaktır. Kısmen suya doymuş zemin numunelerinde artık boşluk suyu basınçları oluşmayacağı için bu aşama drenajsız şartlar altında da olabilir. Bu şekilde istenilen gerilme şartlarına gelmiş numunelere ani göçmelere yol açmayacak farklı tekrarlı kayma gerilmeleri,  $\tau_d$  uygulanır ve belirli bir çevrim sayısı sonunda oluşan şekil değiştirmeler bulunur. Böylece Şekil 19'da da gösterildiği gibi belirlenen A, B ve C noktaları kullanılarak tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki davranış ve mukavemet özelliklerini gösteren gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde olunabilir.

İncelemede kullanılmak üzere yeterli zemin numunesi olmadığı zaman tekrarlı kayma gerilmeleri altında davranışın belirlenmesi için bir numune üzerinde Şekil 20'de gösterilen türde bir deney yapılabilir. Burada ilk önce izotropik ve daha sonra statik bir kayma gerilmesi uygulanarak istenilen ge-

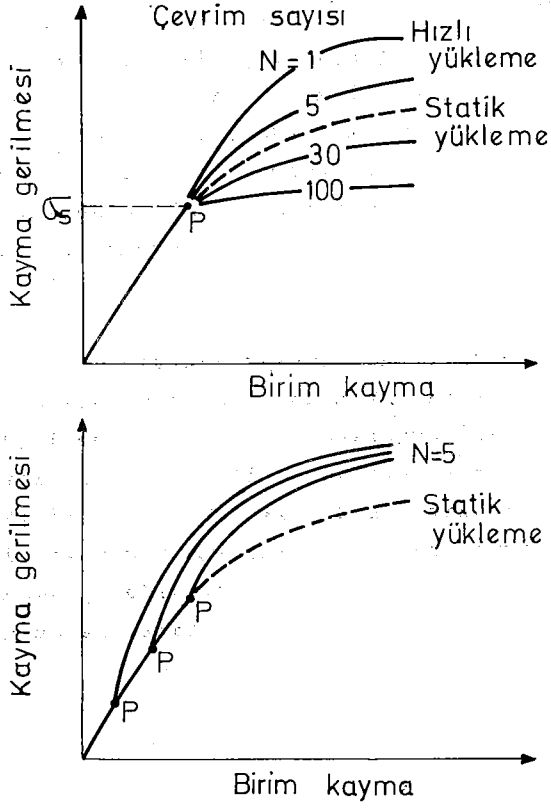


Şekil:19. ÇOK NUMUNE İLE YAPILAN TEKRARLI GERİLME DENEYLERİ,





Şekil:20. TEK NUMUNE İLE YAPILAN ÇOK AŞAMALI TEKRARLI GERİLME DENEYİ,



Şekil:21 ÇEVİRİM SAYISININ ve ÖN KAYMA GERİLMESİNİN DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ

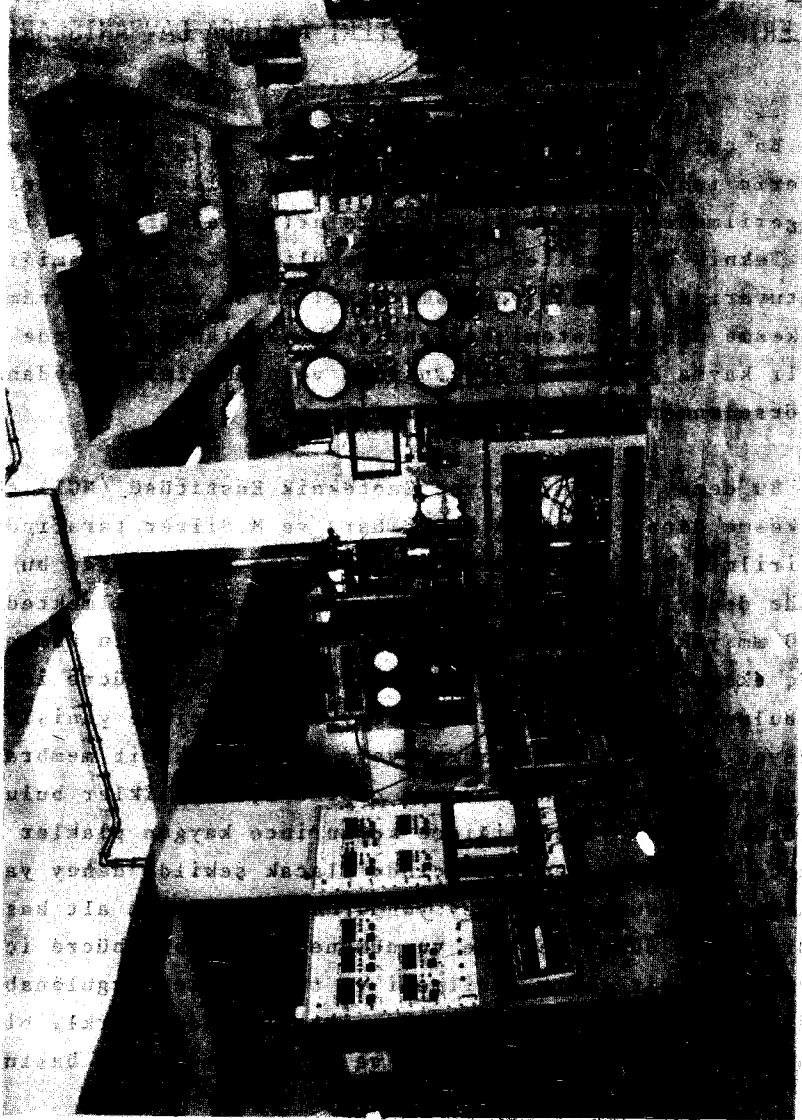
rilme koşulları elde olunmuş numuneye küçük bir değerden başlayarak giderek artan tekrarlı kayma gerilmeleri her aşamada çevrim sayıları aynı kalacak şekilde uygulanır. Böyle bir deneyde tekrarlı kayma gerilmeleri artan genlikler ile aynı numuneye etkilediği için bir tekrarlı yükleme serisinde numunenin göstereceği davranış özellikleri bir önceki daha kk genlikli yükleme serisinden etkilenecektir. Numunede gittikçe artan bir yumuşama meydana geldiğinden bu şekilde yapılan deneylerde daha büyük şekil değiştirmeleri bulunabilir. Pratikte bu gerilme geçmişinden kaynaklanan yumuşamanın etkisi çoğunlukla ihmal edilebilir.

Zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranış özelliklerini belirlemek için ilk aşamada statik daha sonra tekrarlı kayma gerilmeleri uygulanarak yapılan deneylerde elde olunan sonuçlar tekrarlı gerilme serileri için seçilmiş çevrim sayısına bağlı olmaktadır. şekil 21(a) da gösterildiği gibi uygulanan çevrim sayısı kayma gerilmesi-birim kayma değişimlerini önemli bir oranda etkilemektedir. Diğer yandan şekil 21(b) den de görüldüğü üzere başlangıç statik kayma gerilmesinin etkisi oldukça sınırlı kalmaktadır.

## 5. KİLLERİN TEKRARLI KAYMA GERİLMELERİ ALTINDA DAVRANIŞLARI

Bu çalışmada daha önceki bölümlerde kısaca özetlenmiş bilgilerin ışığı altında normal konsolide killerin tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki davranışları incelenmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında bulunan ve resmi Şekil 22'de verilen dinamik basit kesme deney sistemi kullanılarak yapılan deneylerde tekrarlı kayma gerilmesi frekansının ve numunelerde meydana gelen örselenmenin etkisi araştırılmıştır.

Bu deney sistemi Norveç Geoteknik Enstitüsü (NGI) tipi basit kesme deney aletinin K.Ishihara ve M.Silver tarafından geliştirilmiş bir modelidir. Basıncılı hava ile çalışan bu sistemde deneyler gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir. Çapı 70 mm yüksekliği 25-35 mm olan silindirik zemin numuneleri üç eksenli deney aletlerindeki benzer bir hücre içerisinde bulunmaktadır. Numuneler yatay düzlem içinde genişlemeyi önleyen donatılı bir membran veya önce esnek bir membran bunun dışında ortalarında numune çapına eşit delikler bulunan ve üstüste numune yüksekliğince konan ince kaygan plaklar veya sadece esnek bir membran içinde olacak şekilde deney yapılabilmektedir. Numuneye düşey yönde hareketli olan alt başlık yardımıyla bir düşey gerilme ve numune kapalı bir hücre içinde bulunduğundan bir çevre gerilmesi ve ters basınç uygulanabilmektedir. Diğer basit kesme deney sistemlerinden farklı olarak numuneye bir çevre gerilmesi ve dolayısıyla ters basınç



SEKİL 22- Dinamik Basıt Keşme Deneý Sisteminin Önden Görüşü

uygulanabilmesi numunede suya doygunluğun sağlanabilmesine ve böylece tekrarlı kayma gerilmeleri altında güvenilir boşluk suyu basıncı ölçümleri yapılmasına imkan vermektedir. Kayma gerilmeleri numuneye yatay yönde hareket edebilen bir shafta bağlı üst başlıktan aktarılmaktadır. Deneyler sırasında kayma kuvveti bu shaft üzerine ve hücre içine yerleştirilmiş bir yük ölçer (load cell), boşluk suyu basıncı bir basınç ölçer (pressure transducer), yatay ve düşey yönde şekil değiştirmelerde birer deplasman ölçer (displacement transducer) ile ve genellikle iki grafik kayıt edici yardımıyla sürekli olarak izlenebilmektedir.

Yapılan çalışma parametrik bir inceleme olması nedeniyle eş özelliklere sahip numuneler üzerinde deneyler yapılması gerekmektedir. Bu nedenle deneylerde kullanılan numuneler likit limit değeri  $\omega_L = \% 65$ , plastik limit değeri  $\omega_p = \% 25$  ve dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s = 2.65 \text{ t/m}^3$  olan kaolin kilinden laboratuvarda iki şekilde hazırlanmıştır. Bir grup numune yaklaşık  $\% 53$  su muhtevasında hazırlanıp belirli bir süre yoğrulmuş vaziyette nem oranı yüksek bir ortamda saklanmıştır. Daha sonra büyük çaplı odometrelerde kademeli olarak  $1 \text{ kg/cm}^2$  düşey gerilmeye çıkılarak konsolide ettirilen numuneler bu gerilme seviyesinde belirli bir süre bekletilmiştir. Bu şekilde hazırlanan kil numuneler basit kesme aletine yerleştirilmiş ve  $1 \text{ kg/cm}^2$ 'lik bir çevre basıncı altında tekrar konsolidasyona bırakılmıştır. Böyle bir numune hazırlama metodunun seçilmesinde amaç çok yaklaşık olarak da olsa, tabiiatta kil tabakaları meydana gelirken geçirdikleri aşamaları laboratuvarda tekrarlamaktır. Bu şekilde elde edilen numunelerin tabiiatta normal konsolide killerde görülene benzer düzlemsel izotropik bir yapıya sahip olabilecekleri beklenebilir.

İkinci grup numune ise yaklaşık  $\% 45$  su muhtevasında yoğrularak hazırlanmış ve belirli bir süre nem oranı yüksek bir ortamda saklanmışlardır. Daha sonra basit kesme aletine

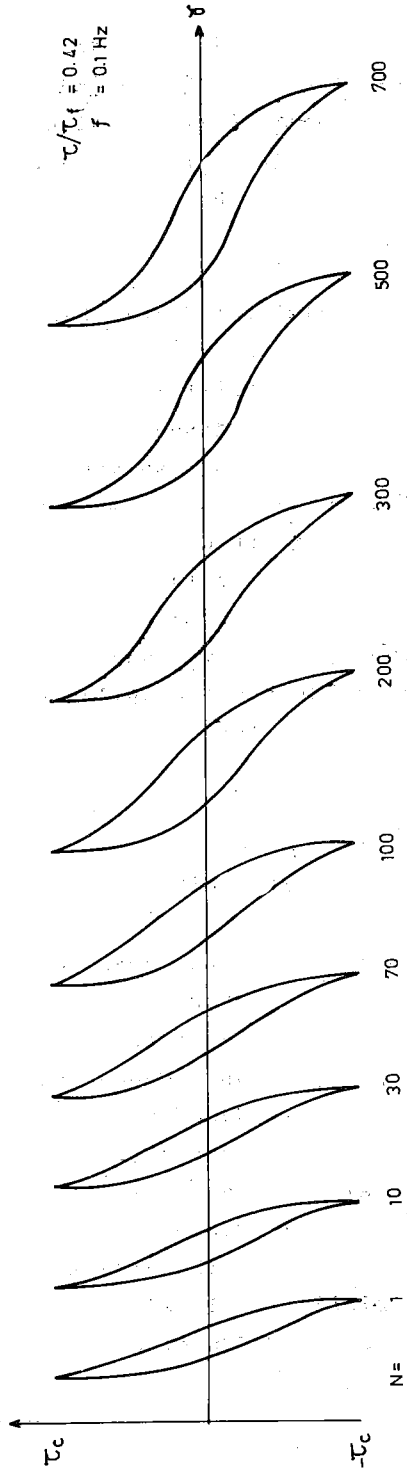
yerleştirilen numune  $1 \text{ kg/cm}^2$  bir çevre basıncı altında konsolidasyona bırakılmıştır. Bu şekilde yoğrularak numune hazırlanmasında amaç numune alma ve hazırlanması sırasında meydana gelebilecek en fazla örselenmenin etkisini incelemektir. Böyle elde olunmuş numunelerde dane yapısının tamamen değiştiği ve izotropik bir yapı özelliği göstereceği düşünölmektedir.

Bu çalışma çerçevesi içinde yapılan bütün deneylerde numuneler suya doğgun hale getirilmiş ve yapılan B parametresi kontrollerinde bulunan B değerinin % 95'ten büyük olması şartı aranmıştır. Deney numuneleri esnek bir membran içine yerleştirilmiş ve tekrarlı kayma gerilmeleri uygulamadan önce izotropik bir çevre gerilmesi altında konsolide ettirilmiştir.

#### 5.1. DENEY SONUÇLARI

Normal konsolide killerin tekrarlı kayma gerilmeleri altında gerilme -şekil değiştirme- boşluk suyu basıncı davranışları ve mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla değişik tekrarlı gerilme genliklerinde ve frekanslarda seri deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde kayma gerilmesi-birim kayma değişimleri bir XY çizicisi yardımıyla izlenmiş ve şekil 23'-de gösterildiği gibi deneyler sırasında histerisis ilmiklerindeki değişimler elde edilmiştir. Burada göröldüğü gibi çevrim sayısının artmasıyla meydana gelen birim kayma değerleri artmakta bu da ilmiklerde büyümeğe ve yatıklaşmağa yol açmaktadır. Diğer bir değişle dinamik kayma modölünün değeri azalmakta ve sonüm oranı artmaktadır.

Deneyler esnasında XY çizicisine ek olarak tekrarlı kayma gerilmesinin, birim kaymanın ve boşluk suyu basıncının çevrim sayısına göre değişimleri de sürekli olarak bir şerit



Şekil:23 Histerisis İlmiklerinin Çevrim Sayısına Göre Değişimi.



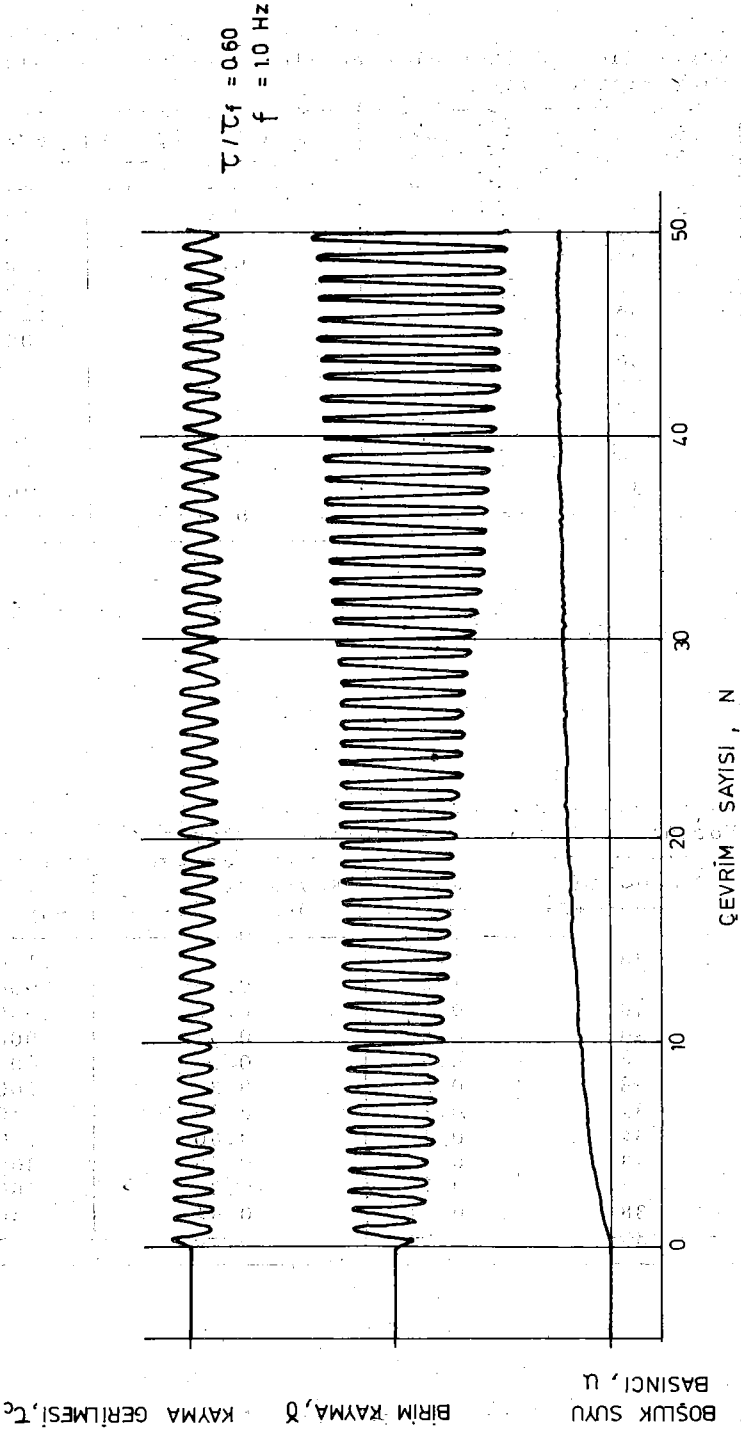
çizici ile izlenmiş ve Şekil 24'de verilene benzer kayıtlar alınmıştır. Örnek olarak verilen bu kayıttan da görüldüğü gibi sabit kayma gerilmesi genliği altında yapılan deneylerde çevrim sayısı ile birlikte birim kayma genliklerinin ve boşluk suyu basıncı değerlerinin sürekli artışlarını gözlemek mümkün olmaktadır.

Yapılan çalışmada iki farklı şekilde hazırlanmış kaolin numuneler üzerinde 1.0, 0.5, 0.1, 0.01 Hz frekanslarda farklı kayma gerilmesi genliklerinde 25 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerin birinci grubu büyük çaplı odometrelerde hazırlanmış numuneler üzerinde yürütülmüştür. Bu grup içinde yapılan deneylerde numunelerin su muhtevaları, uygulanan tekrarlı kayma gerilmesinin frekansı, statik kayma mukavemetine ( $T_f$ ) göre oranı ve çevrim sayısı Tablo 1'de verilmiştir.

İkinci grup deneyler yoğun olarak hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu grupta yapılan deneylerde kullanılan numunelere ait su muhtevaları, frekans, kayma gerilmesi oranı ve çevrim sayısı ile ilgili bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

## 5.2. KAYMA GERİLMESİ GENLİĞİNİN ETKİSİ

Çalışmanın ilk bölümünde amaç aynı şekilde hazırlanmış kaolin numunelerin aynı frekansda fakat farklı tekrarlı kayma gerilmesi genlikleri altında davranışlarını incelemektir. Bu nedenle ilk olarak büyük çaplı odometrelerde hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmış deneylerde birim kayma genliği ve boşluk suyu basıncı artışlarının çevrim sayısına göre değişimleri göz önüne alınmış ve Şekil 25, 26 ve 27'de verilen eğriler elde olunmuştur. Burada numunelere uygulanan tekrarlı kayma gerilmesi genliği statik kayma mukavemetine göre bir oran olarak verilmiştir. Böyle bir gerilme oranı tanımlamanın nedeni bir açıdan deneylerden elde olunmuş sonuçları deneyle-



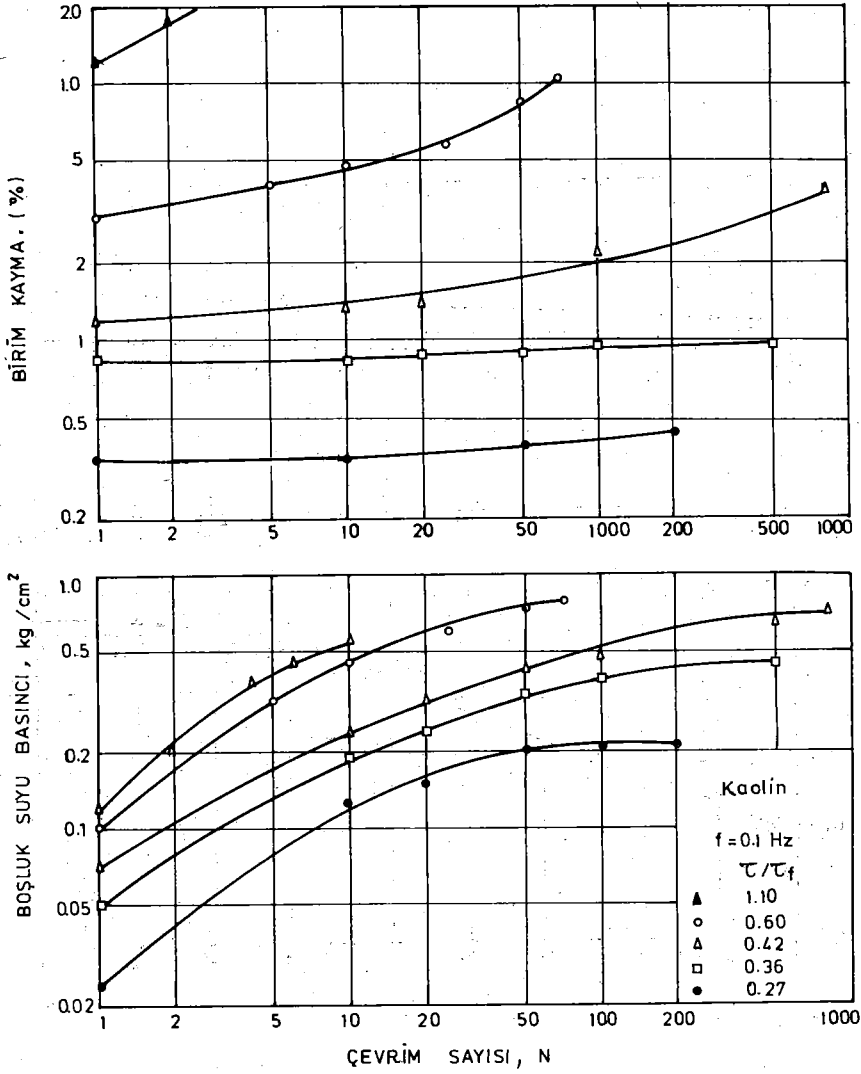
Şekil:24. Tipik bir deney kaydı,

TABLO 1- Büyük Çaplı Odometrelerden Elde Olunmuş Numunelerde Yapılmış Deneyler

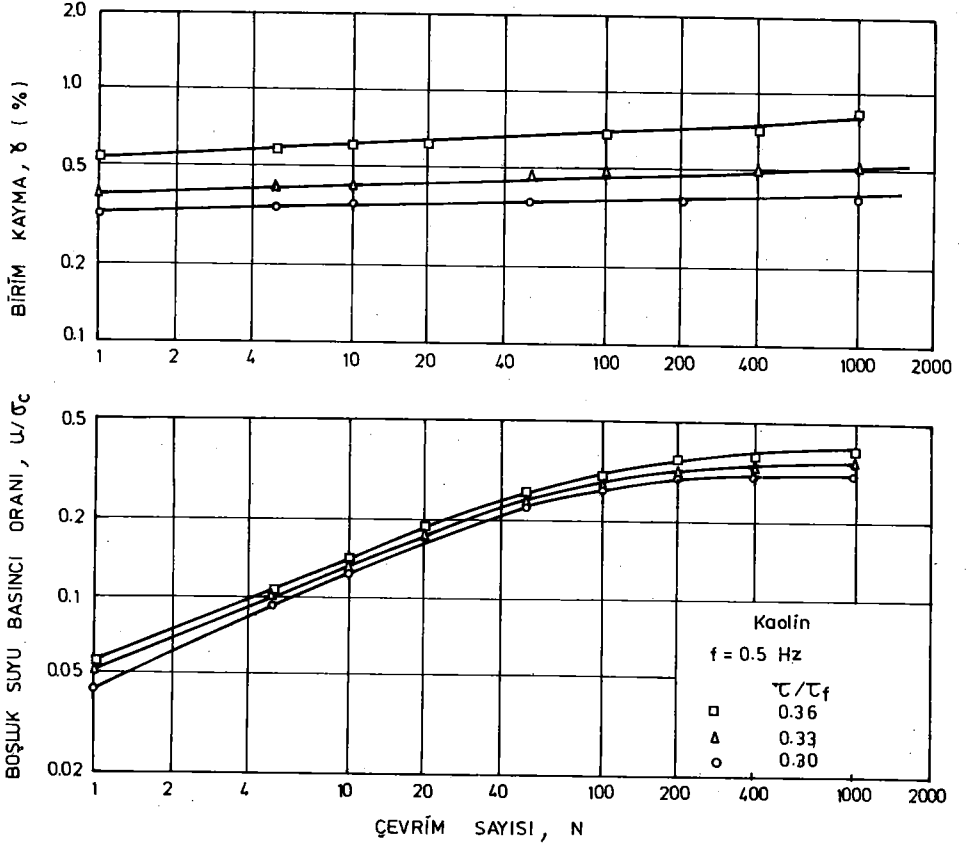
Deney No	Numune Su Muhtevası (%)	Frekans (Hz)	Kayma Gerilmesi Oranı ( $\tau/\tau_f$ )	Çevrim Sayısı
1	36	1.0	0.60	160
2	32	1.0	0.51	2000
3	32	1.0	0.42	2000
4	32	1.0	0.30	1000
5	36	0.5	0.36	1000
6	36	0.5	0.33	1000
7	36	0.5	0.30	600
8	36	0.1	1.10	10
9	36	0.1	0.60	70
10	38	0.1	0.42	800
11	38	0.1	0.36	500
12	36	0.1	0.27	200
13	34	0.01	0.60	70

TABLO 2- Yoğrulmuş Numunelerde Yapılmış Deneyler

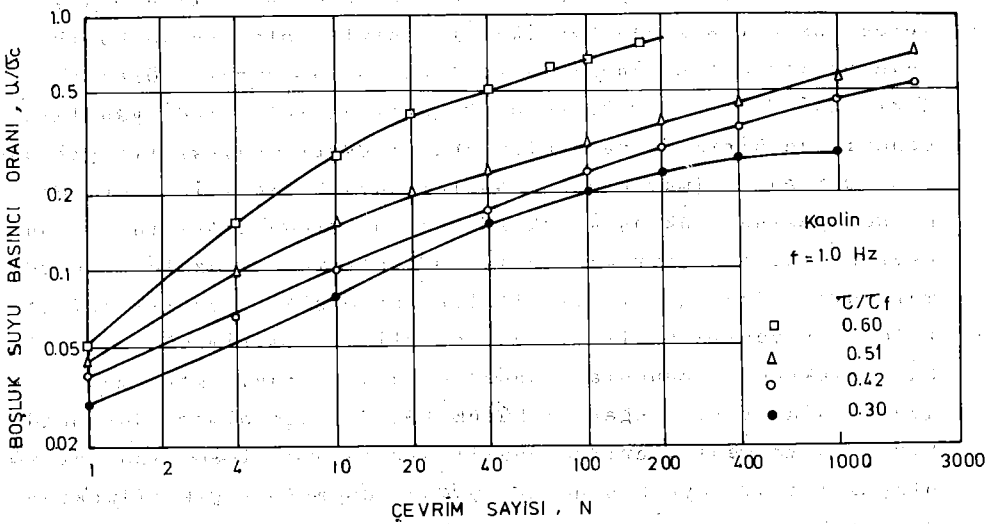
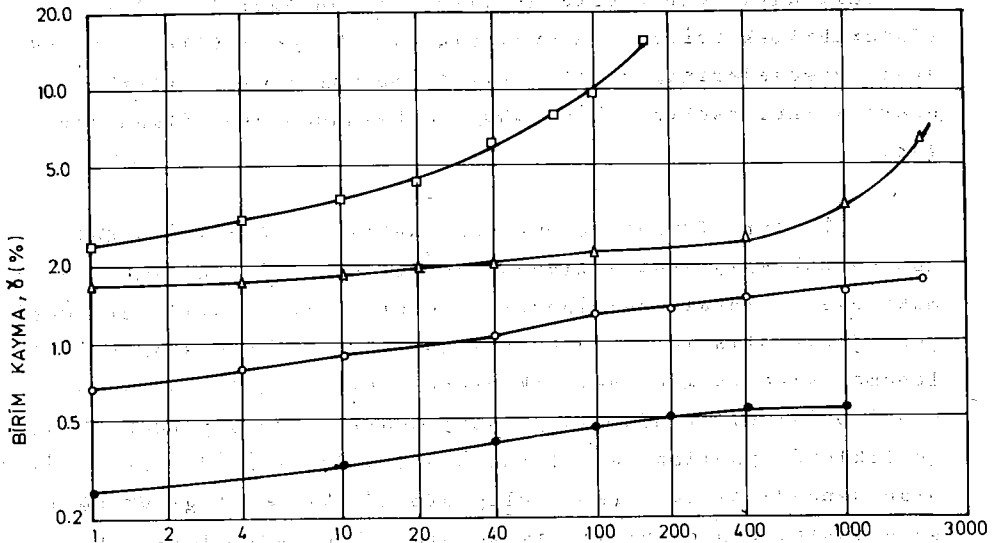
Deney No	Numune Su Muhtevası (%)	Frekans (Hz)	Kayma Gerilmesi Oranı ( $\tau/\tau_f$ )	Çevrim Sayısı
14	33	1.0	0.60	150
15	42	1.0	0.51	2000
16	42	1.0	0.30	1000
17	33	0.5	0.51	1000
18	40	0.5	0.36	600
19	38	0.5	0.30	700
20	33	0.1	0.72	10
21	34	0.1	0.60	80
22	33	0.1	0.36	300
23	33	0.1	0.30	300
24	38	0.1	0.24	50
25	33	0.01	0.60	25



Şekil: 25 Tekrarlı kayma gerilmeleri altında birim kayma ve boşluk suyu basıncı değişimleri



Şekil:26. Tekrarlı kayma gerilmeleri altında birim kayma ve boşluk suyu basıncı değişimleri.



Şekil: 27. Tekrarlı kayma gerilmeleri altında birim kayma ve boşluk suyu basıncı değişimleri.

rin yapıldığı numunelerin özelliklerinden bağımsız olarak gösterebilmek içindir. Sonuçların bu şekilde verilmesi başka zemin numunelerinin de tekrarlı kayma gerilmeleri altında davranışları hakkında bir tahminde bulunulmasına imkan sağlar.

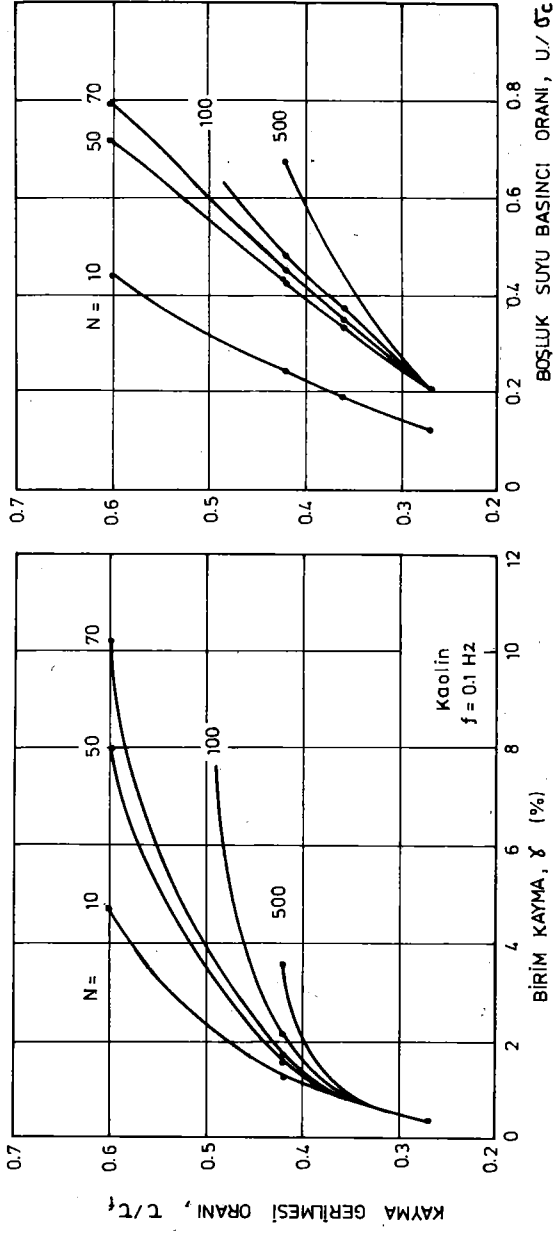
Üç ayrı frekans değerinde yapılmış deneylerden bulunmuş bu davranışlarda gözlenebilen ortak özellik dinamik kayma mukavemeti olarak tanımlanabilecek bir kritik kayma gerilmesi genliğinin olmasıdır. Bu kritik genliğin kesin olarak belirlenememesine rağmen yaklaşık olarak statik kayma mukavemetinin % 50'si civarında olduğu söylenebilir. Bu değerden büyük genliklerde yapılan deneylerde örneğin Şekil 25'de  $\tau/\tau_f = 0.60$  olan deneyde birim kayma genliğinin sürekli arttığı ve boşluk suyu basıncının da hızlı bir şekilde büyük değerlere çıktığı görülmektedir. Bu değerden küçük genliklerde yapılan deneylerde ise birim kayma genlikleri sınırlı kalmakta ve boşluk suyu basınçlarında önemli artışlar oluşmamaktadır. Örneğin Şekil 25'de  $\tau/\tau_f = 0.27$  ve  $0.36$  gerilme oranlarında yapılmış deneylerde birim kayma genliklerinde çevrim sayısı ile bir büyüme meydana gelmemektedir. Boşluk suyu basıncı ise her gerilme seviyesinde yaklaşık ilk 25 çevrim içinde arttığını ve bu çevrimi izleyen çevrimlerde ise artışların çok azaldığı görülmektedir. Küçük gerilme seviyelerinde boşluk suyu basıncı gerilme seviyesine bağlı olarak belirli bir çevrimden sonra sabitleşmektedir. Bununla beraber uygulanan kayma gerilmesi genliğinin kritik değerden küçük fakat yakın olması durumunda birim kayma genliklerinde önemli bir büyüme olmamasına karşın oluşan boşluk suyu basınçları yüksek değerlere çıkabilmektedir. Kohezyonlu zeminlerde boşluk suyu basınçlarının çabuk sönmelenmeyeceğine göre bu durum statik gerilmeler için geçerli bir mukavemet kaybına yol açmaktadır. Özellikle yamaç ve sevrlerde oluşabilecek bu mukavemet kaybı duraylığı etkileyecek mertebelere çıkabilir. Bu açıdan tekrarlı gerilmeler altında suya doygun kohezyonlu zemin tabakalarının davranışları ince-

lenirken en önemli konu oluşması beklenen boşluk suyu basıncı artışlarının bulunabilmesidir.

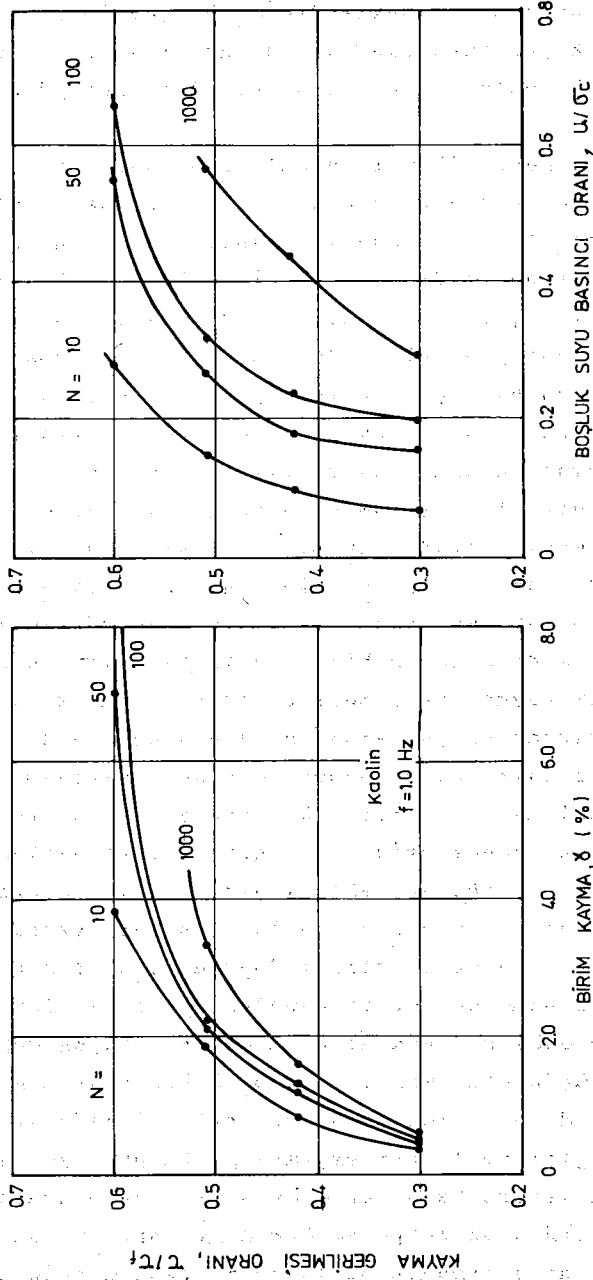
Kohezyonlu zemin tabakalarının deprem yükleri altında davranışları incelenirken zemin numuneleri üzerinde yapılan tekrarlı gerilme deneylerinde kontrol edilebilen faktörlerden biri de çevrim sayısıdır. Laboratuvarda tekrarlı deneylerde çoğunlukla eşdeğer gerilme değeri olarak belirlenen tekrarlı gerilmeler altında davranış ve mukavemet özellikleri bulunur. Yalnız burada sonuçların gerçeğe yakın olması isteniyorsa araştırmanın yapıldığı bölge için beklenen depremlere bağlı olarak bir eşdeğer çevrim sayısı belirlemek gerekir. Eşdeğer çevrim sayısının seçiminde göz önüne alınan değişkenler arasında beklenen depremin manyitüdü, süresi gibi özellikler bulunur. Diğer bir değişle seçilen çevrim sayısına göre davranışların ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi istenir. Bu açıdan yapılan deneylerden elde olunmuş sonuçları Şekil 28 ve 29'da verildiği gibi çevrim sayılarına göre kayma gerilmesi oranı, birim kayma ve boşluk suyu basıncı oranının değişimi biçiminde göstermek daha kullanışlı olabilir. Bu şekillerde görüldüğü gibi tekrarlı kayma gerilmesi oranı-birim kayma değişimleri değişik çevrim sayıları için çizilebilmektedir. Hiperbolik bir değişim gösteren bu eğrilerin başlangıç ve son kısımlarına teğetler çizerek, her çevrim sayısı için yaklaşık olarak bir dinamik kayma mukavemeti belirlenebilir. Diğer yandan zemin kesitinde oluşacak tekrarlı kayma gerilmesi ve eşdeğer çevrim sayısının bir fonksiyonu olarak meydana gelecek boşluk suyu basınçlarının değerleri de kayma gerilmesi oranı-boşluk suyu basıncı oranı eğrilerinden elde edilebilir.

Bir önceki bölümde kohezyonlu zeminlerin tekrarlı gerilmeler altında davranışına etki eden faktörlerden birinin de çevrim sayısı olduğu belirtilmişti. Şekil 28 ve 29'dan da görüldüğü gibi dinamik kayma mukavemeti olarak kullanılacak tekrarlı kayma gerilmesi genliği çevrim sayısına bağlı





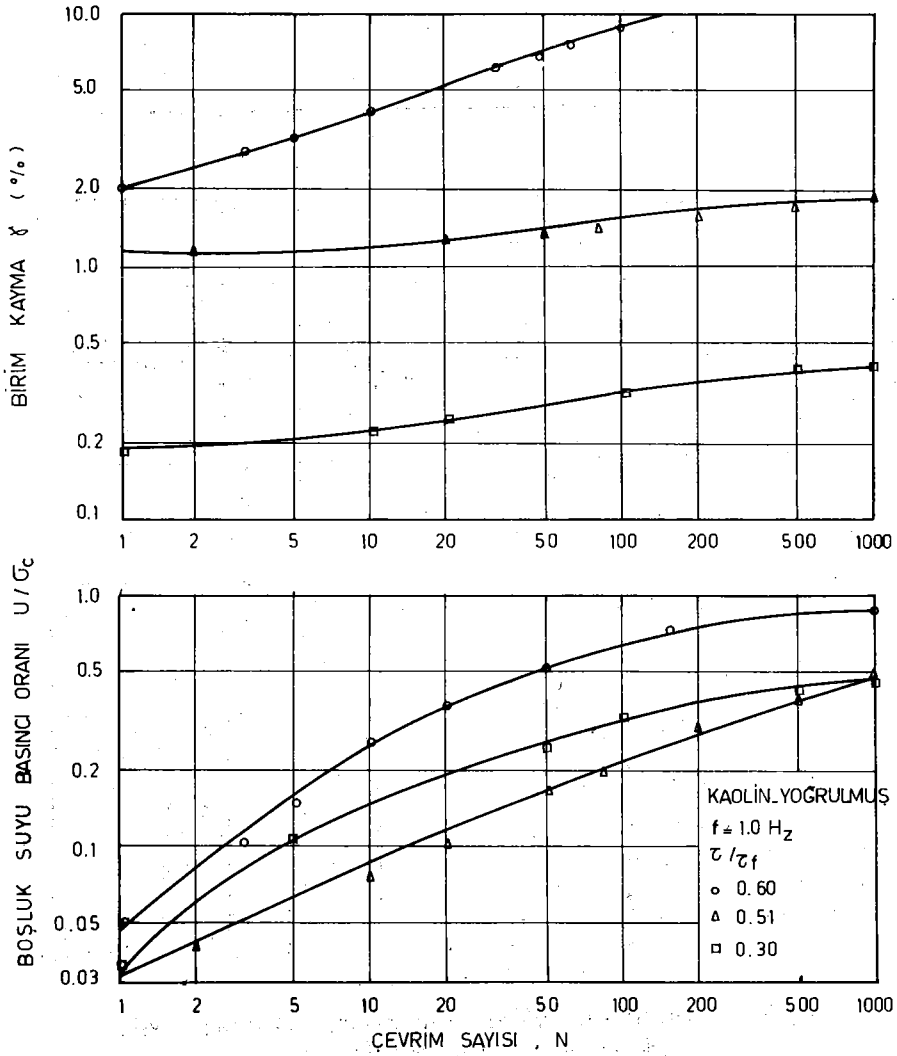
Şekil.28. Tekrarlı kayma gerilmesi - Birim kayma - Boşluk suyu basıncının çevrim sayısına göre değişimi,



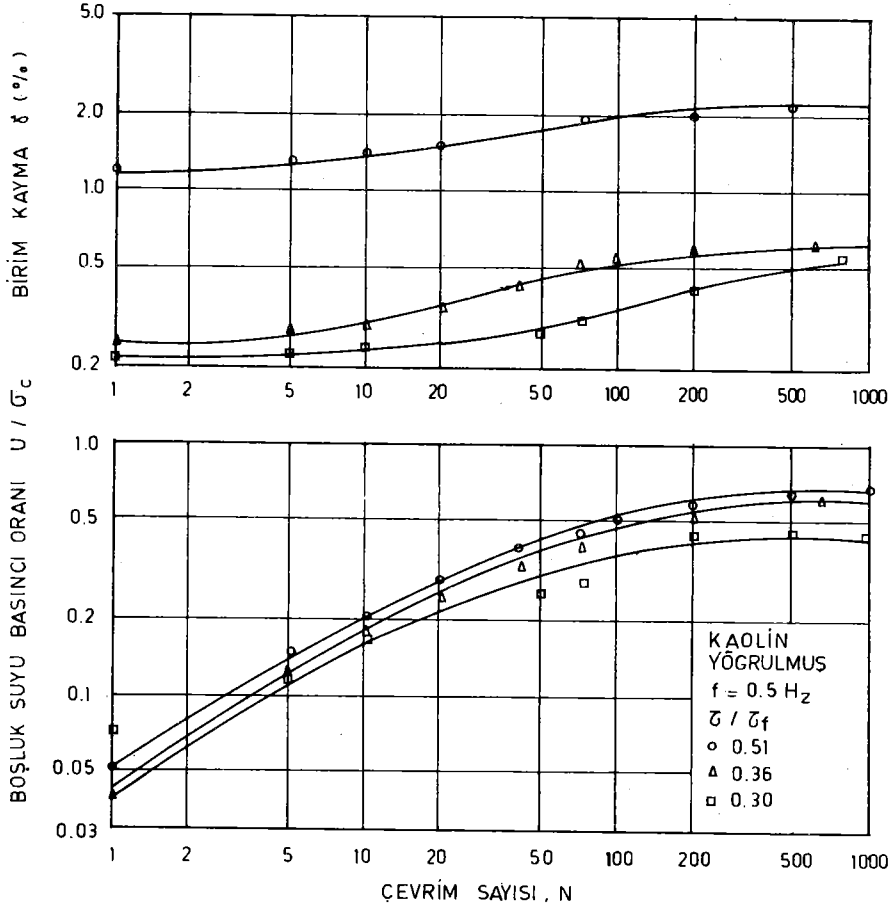
Şekil:29. Tekrarlı kayma gerilmesi - Birim kayma - Boşluk suyu basıncının Çevrim sayısına göre değişimi.

olarak değişmektedir. Beklendiği gibi çevrim sayısının artması dinamik kayma mukavemetinin değerini düşürmekte diğer yandan oluşacak boşluk suyu basıncının değerini büyütmektedir.

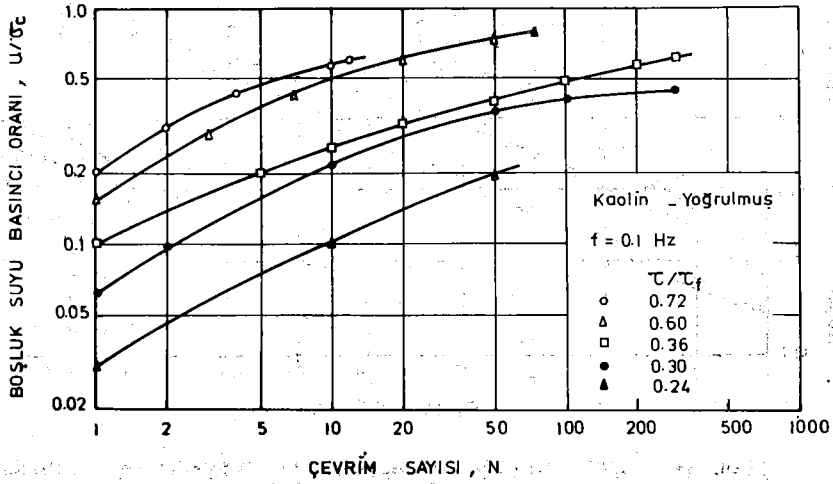
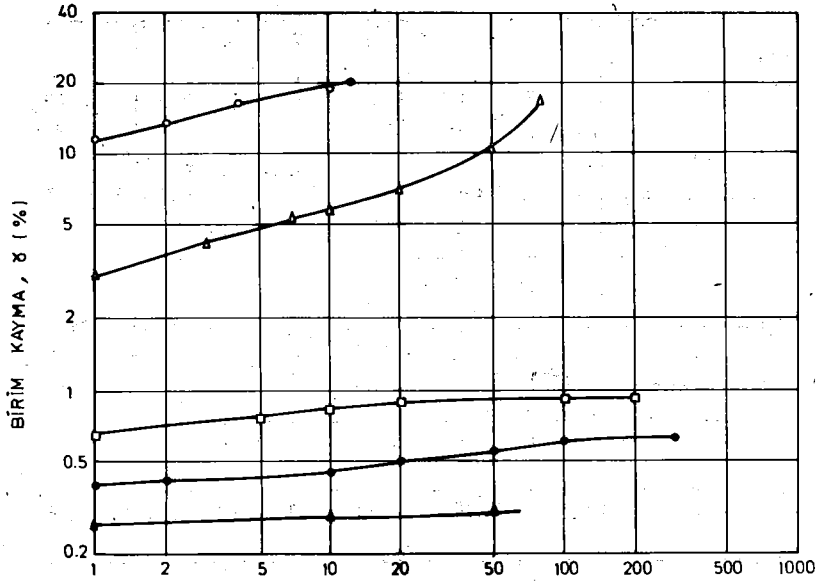
İncelemenin ikinci bölümünde bu sefer yoğrulmuş kaolin numuneler üzerinde aynı frekans değerlerinde farklı kayma gerilmesi genliklerinde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden elde olunan sonuçlarda bir önceki bölümdeki deneylere benzer olarak Şekil 30, 31 ve 32'de gösterilmiştir. Burada da farklı kayma gerilmesi genliklerinde oluşan birim kayma genliğinin ve boşluk suyu basıncı oranının çevrim sayısına göre değişimleri verilmiştir. Bu deneylerde gözlenmiş davranışlarda bir önceki bölümde bulunmuş davranışlara benzemektedir. İki farklı şekilde hazırlanmış numune üzerinde aynı frekansda ve aynı kayma gerilmesi altında yapılmış deneyler karşılaştırıldığında (Şekil 33, 34 ve 35) yoğrulmuş numunelerde daha büyük oranlarda boşluk suyu basınçları olduğu görülmektedir. Diğer yandan meydana gelen birim kayma genliklerinde bir azalma veya dinamik kayma mukavemeti değerinde bir artış olmaktadır. Böyle bir davranışa yol açan ana neden numune dane yapısındaki farklılaşmadır. Büyük odometrelerde hazırlanmış zemin numuneleri düzlemsel izotropik bir yapıya sahip oldukları varsayılırsa, bu numunelerin kayma gerilmeleri altında şekil değiştirmeye karşı gösterecekleri direncin yoğrularak hazırlanmış ve izotropik bir yapıya sahip oldukları varsayılabilen numunelere göre daha az olması doğaldır. Düzlemsel izotropik yapıdaki bir numunede zemin daneleri yatay düzlem içinde daha yönlendirilmiş oldukları için meydana gelecek kayma mukavemeti değeri daha küçük olacaktır. İzotropik bir yapıya sahip olan numunelerde dane yapısı yatay düzlemler içinde bir yönlendirilme olmayacağı gibi böyle bir yapının petek bir yapı olması, şekil değiştirmelere karşı direnci arttırıcı olacaktır. Gene aynı nedenlerden böyle petek bir dane yapısına sahip olan numunelerde aynı mertebede birim kayma genliklerinde daha büyük boşluk suyu basınçları olması beklenmelidir. Aynı mertebeler-



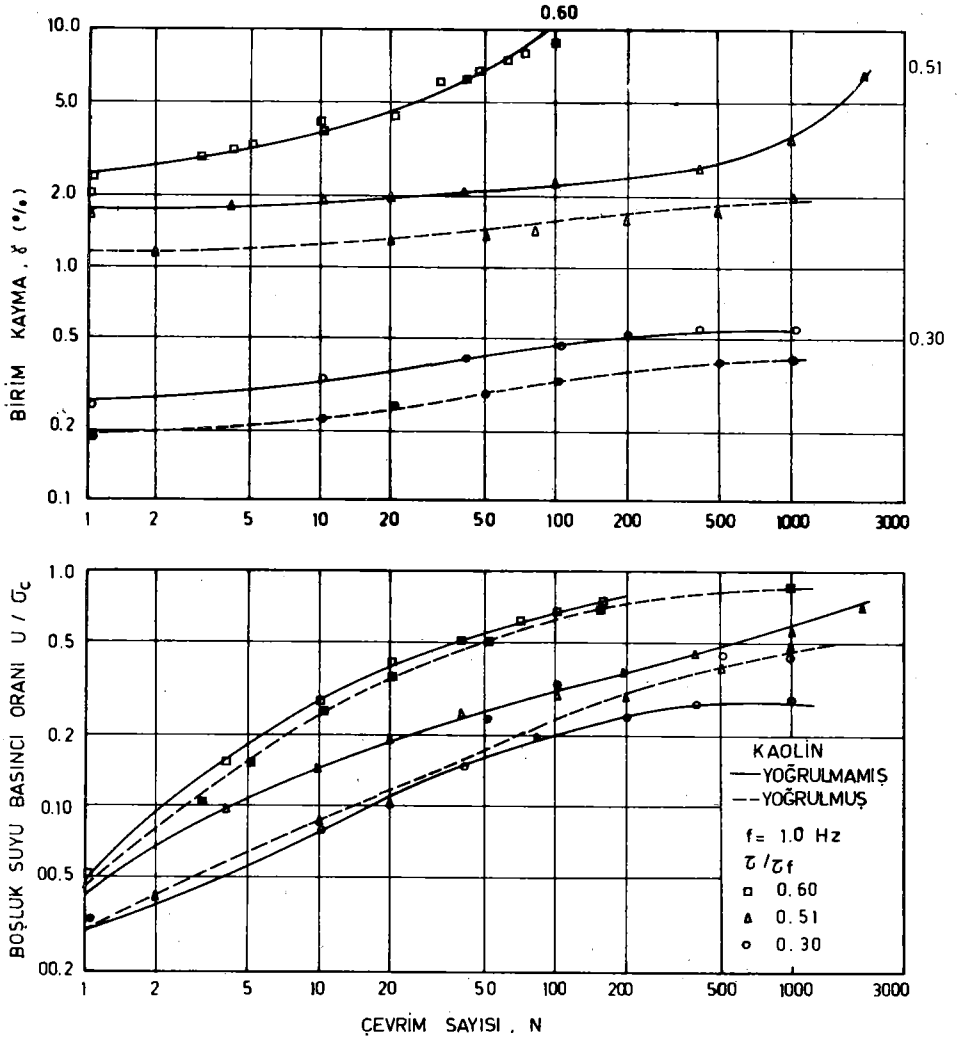
ŞEKİL 30 : YOĞRULMUŞ KAOLİN NUMUNELERİN TEKRARLI KAYMA GERİLMELERİ ALTINDA DAVRANIŞLARI



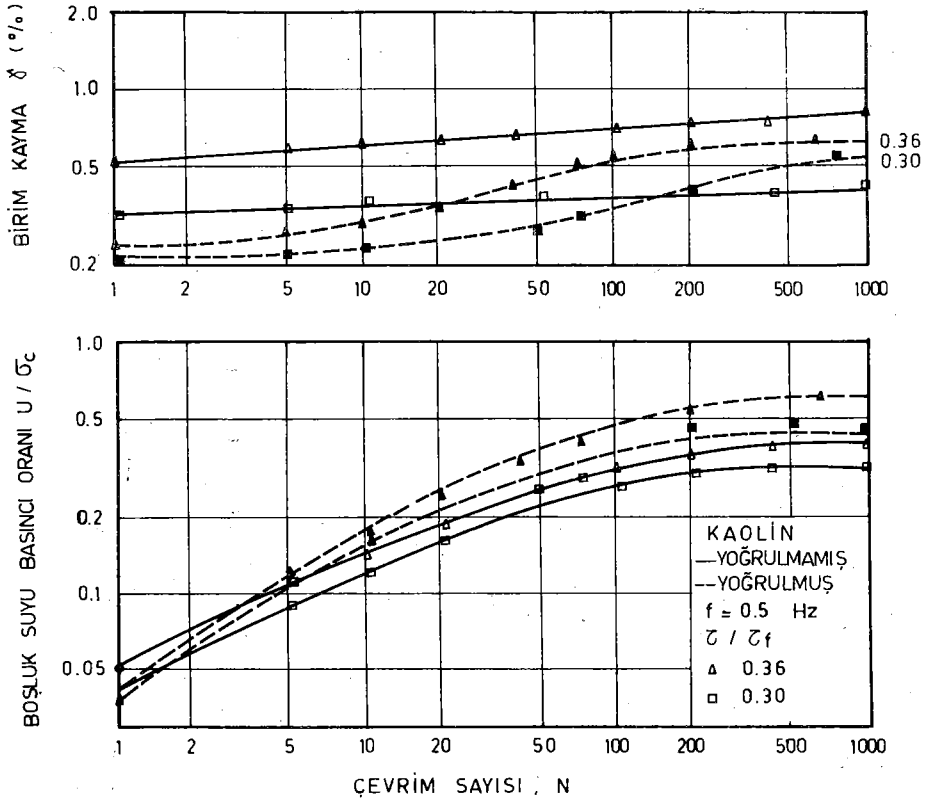
ŞEKİL 31 - YÖGRÜLMÜŞ KAOLİN NUMUNELERİN TEKRARLI KAYMA GERİLMELERİ ALTINDA DAVRANIŞLARI



Şekil:32. Yoğrulmuş Kaolin numunelerin tekrarlı kayma gerilmeleri altında davranışları.

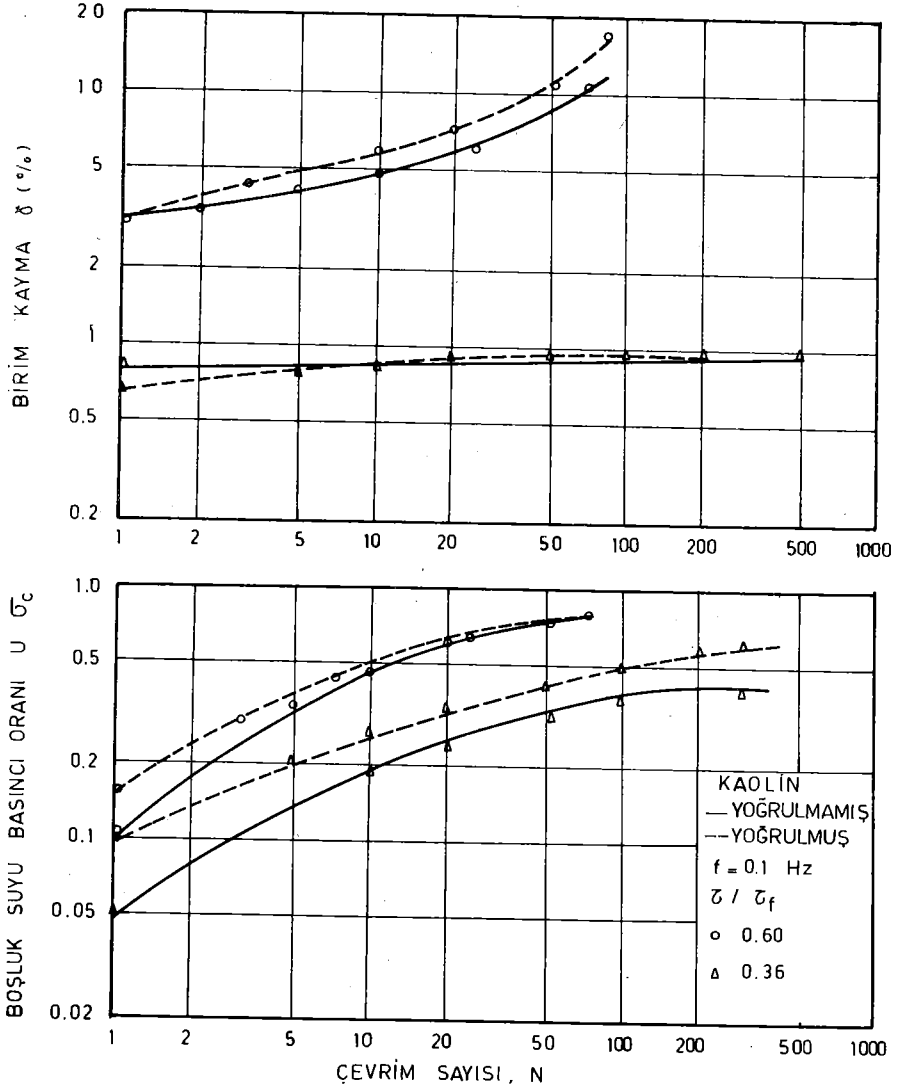


ŞEKİL 33 - FARKLI ŞEKİLDE HAZIRLANMIŞ KİL NUMUNELERİN TEKRARLI GERİLMELER ALTINDA DAVRANIŞLARI



ŞEKİL 34 FARKLI ŞEKİLDE HAZIRLANMIŞ KİL NUMUNELERİN TEKRARLI GERİLMELER ALTINDA DAVRANIŞLARI





ŞEKİL 35 - FARKLI ŞEKİLDE HAZIRLANMIŞ KİL NUMUNELERİN TEKRARLI GERİLMELER ALTINDA DAVRANIŞLARI

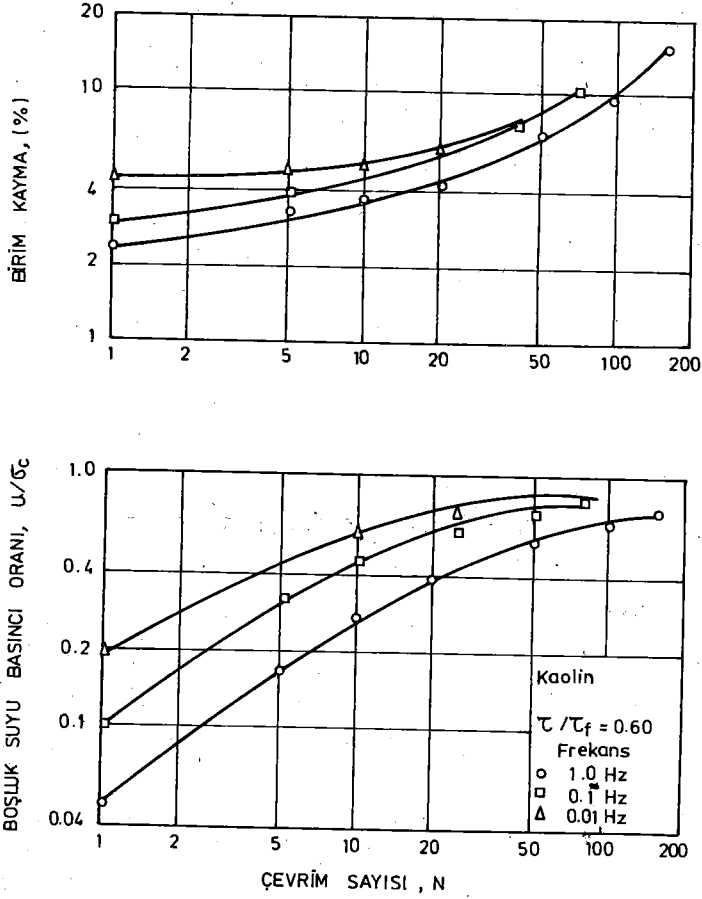
de birim kayma olabilmesi için petek yapıda zemin danelerinin birbirlerine nazaran dönme ve yönlennemeleri daha fazla olacağından boşlukları dolduran suyun daha fazla sıkışması ve boşluk suyu basınçlarının daha büyük değerlere çıkması doğaldır.

Bu iki grup deney sonuçlarının karşılaştırılmasının bir amacı da numunelerde meydana gelebilecek örselenmenin etkisini incelemek olduğu hatırlanacak olursa elde olunmuş davranışlardan oldukça ilginç bir sonuç çıkmaktadır. Numunede meydana gelen örselenme dane yapısını değiştirdiğinden bulunan dinamik kayma mukavemetini arttırmaktadır. Bu da bu değerleri kullanarak yapılacak analizleri daha emniyetsiz tarafta doğru itmektedir. Bu açıdan örselenme mertebesinde bir şekilde göz önüne alınmasını gerektirmektedir.

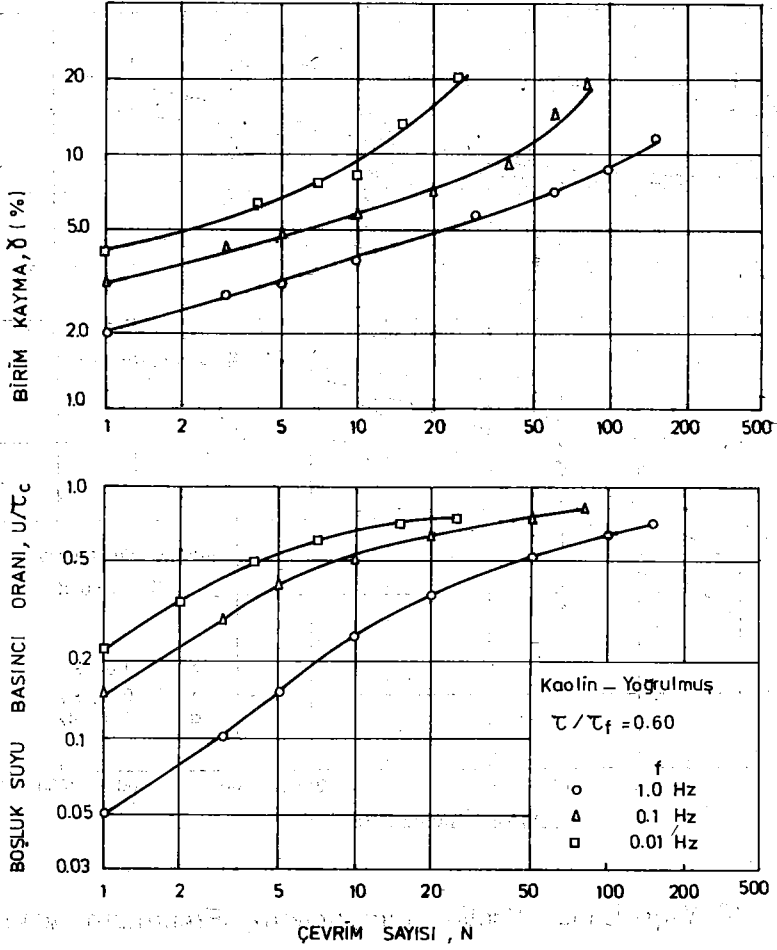
### 5.3. TEKRARLI KAYMA GERİLMESİ FREKANSININ ETKİSİ

Kohezyonlu zeminlerde gerilme-şekil değiştirme davranışlarına etki eden faktörlerden biri de yükleme hızıdır. Tekrarlı kayma gerilmeleri altındaki davranışları incelerken bu nedenle gerilmelerin uygulandığı frekans değeri önem kazanır. Depremlerde zemin tabakaları içinde meydana gelen tekrarlı gerilmeler, depremin ve zemin tabakalarının özelliklerine bağlı olarak değişik frekanslarda olurlar. Dolayısıyla bu durumda kohezyonlu zemin tabakalarının davranışları incelenirken bu frekansın etkisini göz önüne almak gerekir.

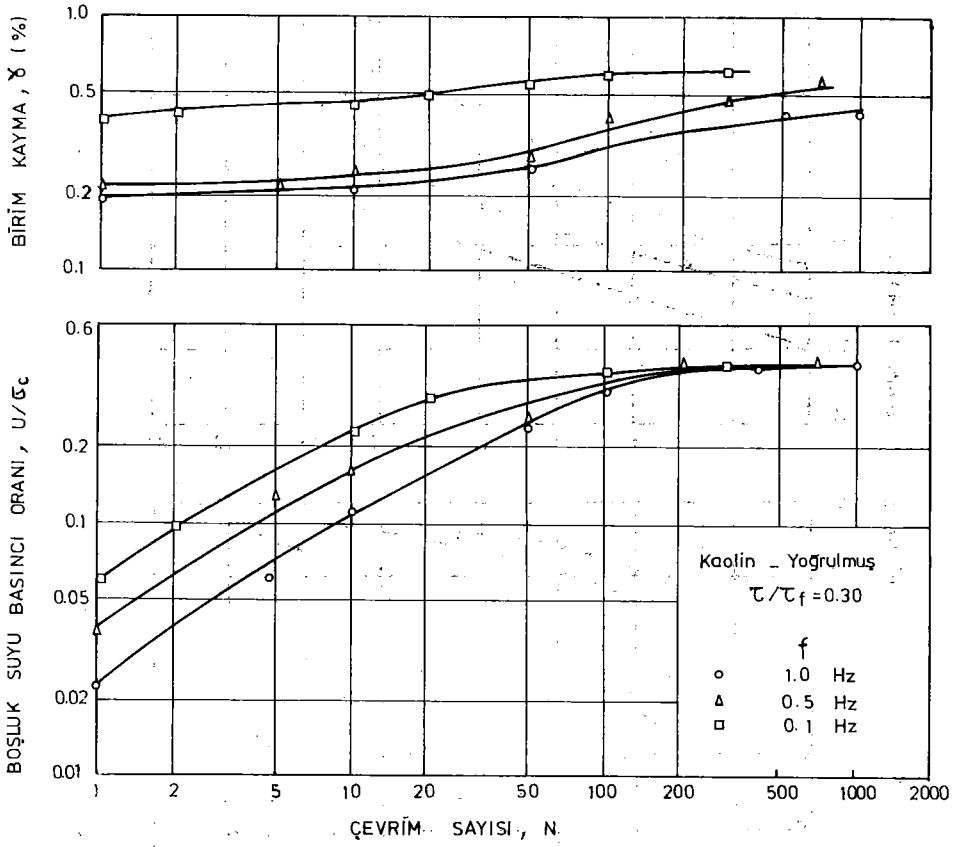
Büyük odometrelerde hazırlanmış zemin numuneleri üzerinde yapılmış deneyler arasından aynı kayma gerilmesi genliğinde ama farklı frekanslarda olanlarda gözlenmiş davranışlar Şekil 36, 37 ve 38'de gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi uygulanan gerilme frekansının azalması çevrim sayısına göre meydana gelen birim kayma genliğini ve boşluk suyu basıncı değerlerini arttırmaktadır. Böyle bir artışın nedeni



Şekil:36. Tekrarlı Kayma Gerilmeleri Altındaki Davranışa Frekansın Etkisi.



Şekil:37. Yoğrulmuş Kaolin Numunelerde Frekansın Etkisi.

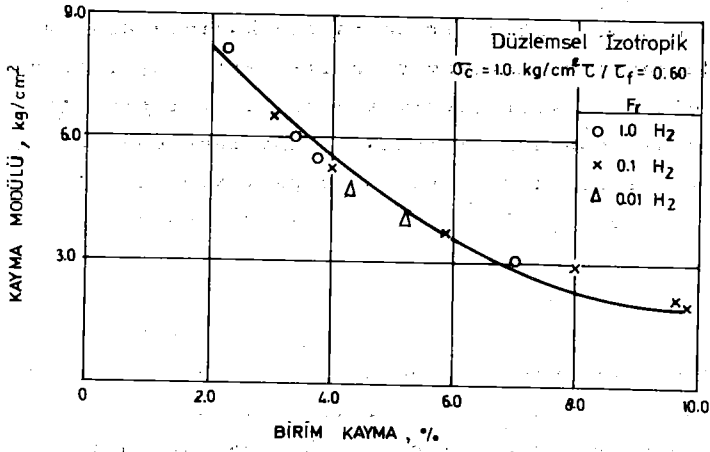


Şekil:38. Yoğrulmuş Kaolin numunelerde Frekansın etkisi.

frekansların yavaşlaması ve kayma gerilmelerinin daha uzun süreli etkili olmasıdır.

Diğer bir açıdan frekansa bağlı davranışlar arasındaki fark özellikle Şekil 36'da görüldüğü gibi çevrim sayısının bir fonksiyonu olmaktadır. Küçük çevrim sayılarında değişik frekanslarda yapılmış deneyler arasında farklılaşma daha büyük mertebelerde iken, çevrim sayısının artması ile aradaki farklar azalmaktadır. Her üç şekilde verilmiş boşluk suyu basıncı-çevrim sayısı davranışlarında bu olay açıkça görülmektedir. Birim kayma-çevrim sayısı davranışlarında ise bu olay en belirgin biçimde yoğunlaşmamış numunelerde yapılmış deneylerde görülmektedir. Çevrim sayısının böyle bir etkisi olması farklı türden tekrarlı gerilmeler altında zemin davranışları incelenirken önem kazanır. Eğer bir zemin tabakasının deprem yükleri altında davranış ve mukavemet özellikleri araştırılıyor ise meydana gelecek etkili çevrim sayısı sınırlı olacağı için frekansın etkisi hesaba katılmalıdır. Ama incelenen olay açık deniz platformlarında karşılaşılan dalga yüklerine benzer ve çevrim sayısı göreceli olarak büyük ise frekansın etkisi ihmal edilebilir.

Yapılan deneylerden bulunmuş olan bir özellikte dinamik kayma modülünün değişimidir. Deneyler sırasında elde olunan kayma gerilmesi-birim kayma histeresis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi olarak bulunan kayma modülü değerleri daha önce de belirtildiği gibi çevrim sayısına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 39'da bu yolla ve aynı kayma gerilmesi genliğinde yoğunlaşmamış numuneler üzerinde üç ayrı frekansta yapılmış deneylerden elde olunan kayma modülü değişimi gösterilmiştir. Buradan da anlaşıldığı gibi kayma modülü birim kayma ilişkisinde frekansın bir etkisi olmamaktadır. Diğer bir değişle tekrarlı gerilme-şekil değiştirme davranışını asıl kontrol eden parametre birim şekil değiştirme olmaktadır.



ŞEKİL 39 - BİRİM KAYMA - KAYMA MODÜLÜ DAVRANIŞI

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada tekrarlı gerilmeler altında killi zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ve kayma mukavemeti özellikleri bu konuda yapılmış araştırmalardan da yararlanılarak açıklanmağa çalışılmıştır. Laboratuvarda iki farklı şekilde hazırlanmış kaolin numuneler üzerinde farklı kayma gerilmesi genliklerinde ve farklı frekanslarda dinamik basit kesme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde amaç normal konsolide ve suya doygun killerde tekrarlı kayma gerilmeleri altında oluşan birim kayma ve boşluk suyu basıncı davranışlarını dolayısıyla da dinamik kayma mukavemeti özelliklerini incelemektir.

Çalışmanın ilk bölümünde aynı frekans değerlerinde ve farklı kayma gerilmesi genliklerinde yapılmış deney sonuçları göz önüne alınmıştır. Bu durumda zemin numunelerine uygulanan tekrarlı kayma gerilmesi genliği drenajsız statik kayma mukavemetinin bir oranı olarak verilmiştir. Böyle bir yaklaşım benimsendiğinde çevrim sayısından kısmen bağımsız olan ve yaklaşık olarak statik kayma mukavemetinin % 50 civarında bir kritik kayma gerilmesi genliği değerinin bulunduğu görülmüştür. Bu kritik kayma gerilmesi genliğinin aşılması durumunda numunede birim kayma genliğinin ve boşluk suyu basıncının hızla arttığı görülmüştür. Bu kritik değerden küçük yakın değerlerde yapılmış deneylerde birim kayma genliklerinin sınırlı kaldığı ama statik kayma mukavemetini önemli ölçüde etkileyebilecek mertebelerde boşluk suyu basınçları olduğu göz-



lenmiştir. Kayma gerilmesi genliğinin küçük olması halinde numunelerde hem birim kayma genlikleri hem de artık boşluk suyu basıncı artışları sınırlı kalmaktadır. Killi zeminlerin sınırlı çevrim sayısı söz konusu olan tekrarlı gerilmeler (depremler gibi) altında dinamik mukavemet özellikleri belirlenmek istendiğinde çevrim sayısının önemli bir etkisi olmaktadır. Dolayısıyla dinamik mukavemet bulunurken kayma gerilmesi-birim kayma-boşluk suyu basıncı değişimleri çevrim sayılarına bağlı olarak tanımlanmalıdır. Bu şekilde bulunan dinamik mukavemetin değeri hem biraz daha büyük hem de gerçek duruma daha uygun olacaktır.

Farklı şekillerde hazırlanmış kaolin numuneler üzerinde aynı frekans ve kayma gerilmesi genliklerinde yapılmış deneylerden elde olunmuş sonuçlar kil numunelerde yoğrulmanın etkisini belirlemek için karşılaştırılmıştır. Aradaki farklılık her zaman aynı doğrultuda olmamasına rağmen genelde yoğrulmanın birim kayma genliklerini azalttığı buna karşın boşluk suyu basıncı arttırdığı görülmüştür. Böyle bir davranışa yol açan ana nedenin dane yapısındaki farklılık olduğu düşünülmektedir. Bu durumda zemin numunelerinde meydana gelecek örselenmenin sonuçları emniyetsiz tarafa doğru öteleyeceği görülmektedir.

Çalışmanın son bölümünde tekrarlı kayma gerilmesi frekansının killerin dinamik davranışlarını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Frekans değerinin büyümesi statik deneylerdekine benzer olarak dinamik mukavemeti de büyütmektedir. Deneylerden gözlenen diğer bir özellik de depremler gibi sınırlı sayıda çevrim sayısı olan tekrarlı yüklemelerde frekansın etkisi önemli bir biçimde olurken çevrim sayısının artması frekansın etkisi ihmal edilebilir düzeye indirmektedir. Bu da yapılacak deprem analizlerinde frekansın etkisinin önemini göstermesi açısından ilginç bir sonuçtur.

## 7. KAYNAKLAR

- 1- Andersen, K.H., Pool, J.H., Brown, S.F. ve Rosenbrand, W.F., (1980), "Cyclic and Static Laboratory Tests on Drammen Clay", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.106, No.GT5, pp.499-529.
- 2- Annaki, M. ve Lee, K.L., (1977), "Equivalent Uniform Cycle Concept in Soil Dynamics", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, No.GT6, pp.549-564.
- 3- Ansal, A.M. ve Erken, A., (1982), "Rate Dependent Dynamic Behavior of Normally Consolidated Clay", 7<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Athens, Greece, Vol.2, pp.329-336.
- 4- Brown, S.F., Lashine, A.K.F. ve Hyde, A.F.L., (1975), "Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay", Geotechnique, Vol.25, No.1, pp.95-114.
- 5- Finn, W.D.L., Pickering, D.J. ve Bransby, P.L., (1971), "Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, No.SM4, pp.639-659.
- 6- Hardin, B.O. ve Black, W.L., (1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.94, No.SM2, pp.353-369.

- 7- Hardin, B.O. ve Drnevich, V.P., (1970), "Shear Modulus and Damping in Soils: I. Measurement and Parameter Effects, II. Design Equations and Curves", Technical Report UKY 27-70-CE 2 and 3, College of Engineering, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
- 8- Ishihara, K., (1980), "Strength of Cohesive Soils Under Transient and Cyclic Loading Conditions", Proceedings of 7th World Conference on Earthquake Engineering, State-of-the-Art Volume, pp.159-169, Istanbul.
- 9- Ladd, C.C., (1964), "Stress-Strain Modulus of Clay in Undrained Shear" Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.90, No.SM5, pp.103-122.
- 10- Lashine, A.K., (1973), "Deformation Characteristics of a Silty Clay Under Repeated Loading", Eight World Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, USSR, Vol.1.1, pp.237-244.
- 11- Matsui, T., Ohara, H. ve Ito, T., (1980), "Cyclic Stress-Strain History and Shear Characteristics of Clay", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No.GT10, pp.1101-1120.
- 12- Seed, H.B. ve Chan, C.K., (1966), "Clay Strength Under Earthquake Loading Conditions", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.92, SM2, pp.53-78.
- 13- Seed, H.B. ve Idriss, I.M., (1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering and Research Center, University of California, Berkeley.

- 14- Seed, H.B. ve Peacock, W.H., (1971), "Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, No.SM8, pp.1099-1119.
- 15- Thiers, G., (1965), "The Behavior of Saturated Clay Under Seismic Loading Conditions" Ph.D.Dissertation, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley, California.
- 16- Thiers, G. ve Seed, H.B., (1968), "Cyclic Stress-Strain Characteristics of Clay", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.94, No.SM2, pp.555-568.
- 17- Toğrol, E., Özudoğru, K. ve Güler, E.F., (1977), "Tekrarlı Yüklerin Zemin Mukavemetine Etkisi", İ.T.Ü.İnşaat Fakültesi Teknik Rapor, No.29, 61 sf.
- 18- Wilson, S.D. ve Dietrich, R.J., (1960), "Effect of Consolidation Pressure on Elastic and Strength Properties of Clay", Proc.ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, University of Colorado, pp.419-435.
- 19- Wilson, N.E. ve Greenwood, J.R., (1974), "Pore Pressure and Strains After Repeated Loading of Saturated Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol.11, No.2, pp.269-277.

1983 ERZURUM-KARS DEPREMİ KUVVETLİ YER HAREKETİ İVME KAYITLARININ  
MÜHENDİSLİK SİSMOLOJİSİ YÖNÜNDEN ANALİZİ

Rüçhan YILMAZ (X)

SUMMARY

A series of engineering seismological analysis was conducted based upon an accelerogram obtained at a distance of 20 km. from the epicenter of the 1983 Erzurum-Kars, East Turkey, Earthquake. These are conversions to time historical records in terms of velocity and displacement, Fourier and response spectral analysis, earthquake magnitude determination and so forth.

1- GİRİŞ

Depremler insan topluluklarının etkilendiği büyük felaketlerden olup etkilerini azaltmak bilim adamlarının ana hedeflerinden birisidir. Bu noktadan hareketle depreme dayanıklı bina yapımı deprem mühendisliğinde çok önemlidir. İvme değerlerinin zamana bağlı değişimleri ile bunların spektrumları depreme dayanıklı bina yapımı tasarımında asal veri olarak önemli rol oynar. Pek çok bilim adamı ve araştırma kurumu bu konuda daha fazla bilgi sahibi olabilmek için kuvvetli yer hareketi ivme kayıtları üzerindeki çalışmalarını sürdürmektedir.

Bu çalışma 30 Ekim 1983'te meydana gelen sığ odaklı Erzurum-Kars depreminin kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının mühendislik sismolojisi yönünden analizlerini kapsamaktadır.

2- VERİLERİN ANALİZİ

Analizlerde episanırdan 20 km. uzaklıkta, Horasan'da (Şekil-1) depremden duvarlarında küçük çatlakların oluştuğu, Meteoroloji Genel Müdürlüğüne ait tek katlı bir bina içine yerleştirilmiş kuvvetli yer hareketi akseleografı (SMA-1) kayıdı kullanılmıştır. Orijinal kayıdın küçültülmüş bir kopyası Şekil-2 de gösterilmiştir.

Kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının analizi ivme, hız ve ötelemenin zamana bağlı değişimleri ile mukabele ve Fourier spektrumlarını verir. Bu değerlerin bulunması için Şekil-3 te akış diyagramı gösterilen hesaplama yöntemi uygulanmıştır.

2-1. SAYISALLAŞTIRMA, DOZELTME, HIZ ve ÖTELEMeye DÖNÜŞTÜRME

Sayısallaştırma orijinal kayıdın (70 mm film) bir kopyasından Hokkaido Üniversitesi Bilgisayar Merkezinin yarı-otomatik sayısallaştırıcı cihazını kullanarak yerine getirilmiştir. Bu işlem sü-

(X) Bayındırlık ve İskan Bakanlığı  
Teknik Araştırma ve Uygulama Genel Müdürlüğü  
Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı

resince sayısallaştırıcının büyüteç ve çapraz kılıkları olan okuma kolu kullanılarak kayıtlar tepeden tepeye okuma tekniği yani eşit olmayan zaman aralıklarında hassas bir sonuç gereken yeterli sayıda ara noktalar ile tüm tepe noktalarının okunması şeklinde yapılmıştır. Okumalar çizilip orijinal kayıtlarla karşılaştırılmış ve sonuçlardan tatmin olunduktan sonra eşit zaman aralıklı (0.01 sn) ivme değerleri bulunmuştur. Sıfır (baz) çizgisinin yerini tesbit etmek için en küçük kareler yöntemi uygulanmıştır. Düzeltilmiş ivme değerlerini elde edebilmek için yapılan hesaplamalarda her üç bileşen içinde sismograf duyarlılıkları ile alet düzeltilmesi, zaman-penceresi (time-window) analizi ve filtreleme (band-pass, 0.05 Hz - 33.3 Hz) işlemleride uygulanmıştır. Düzeltilmiş ivme değerlerinden hareketle her bileşen için sayısal integrasyon yöntemiyle hız ve ötelemenin zamana bağlı değişimleri bulunmuştur (Şekil-4,5,6). Bulunan maksimum ivme, hız ve öteleme değerleri Tablo-1 de belirtilmiştir.

Tablo-1 30 Ekim 1983 Erzurum-Kars depreminin maksimum değerleri

Bileşen	İvme (gal)	Hız (cm/sn)	Öteleme (cm)
N-S	148.15	22.66	15.46
U-D	64.33	11.06	5.33
E-W	134.64	36.63	24.69

## 2-2. SPEKTRAL ANALİZ

Depremlerin meydana getirdikleri zemin hareketlerinin frekans bileşenlerinin tam olarak tariflenebilmeleri için mukabele ve Fourier spektrumları gerekir. Bu çalışmada mukabele ve Fourier spektrumları ile güç spektrumunda hesaplanmıştır. Mukabele spektrumunun tüm kayıt boyunca hesaplanması gerekmez. Maksimum değer elde edildikten sonra kaydın geri kalan kısmı bir mana ifade etmediğinden hesaplamalarda kaydın ilk 5 saniyelik bölümü kullanılarak mukabele spektrum eğrileri elde edilmiştir (Şekil-7,8,9). Fourier ve güç spektrumları hesaplarında ise tüm kayıt kullanılmıştır (Şekil-10,11). Ayrıca her bileşen için spektrum değerlerinin zamana bağlı değişimlerinin ifadesinde yararlı olan kayan-pencere (running-window) analizi yapılmıştır (Şekil-12,13,14).

## 2-3. MAGNİTUD HESABI

Magnitüd deprem büyüklüğünün belirlenmesinde basit etkili bir skala olup hesaplamalarda çeşitli yöntemler ileri sürülmüştür. Bunlar arasında Richter (1935) tarafından ortaya atılan lokal magnitüd mühendislikte en muteberidir. Çünkü mühendislik uygulamalarında kullanılan period aralığında hesaplanır. Bilindiği gibi, episanırdan 100 km. uzaklıkta ve sert bir zemine yerleştirilmiş wood-Anderson tipinde bir sismografla kaydedilmiş zemin hareketinin mikron cinsinden ölçülen maksimum genliğinin 10 tababına göre logaritmasına local magnitüd veya Richter magnitüdü denir. Kuvvetli yer hareketi ivme kayıtları kullanılarakta local

magnitüd hesaplanabilir. Bunun için gerçek zemin ivme değerleri bir osilatöre Wood-Anderson sismometresinin karakteristik katsayıları (Doğal period  $T=0.8$  san. , Kritik sönüm oranı  $h=0.8$ , Büyütme  $V=2800$ ) ile giriş olarak verilip yapay Wood-Anderson cevabı bulunur. 30 Ekim 1983 depreminin bu yöntem uygulanarak bulunan Wood-Anderson cevabı Şekil-15 te gösterilmiştir. Richter'e göre (1935,1958),

$$M = \log A - \log A_0$$

M : lokal magnitüd

A : Wood-Anderson kaydındaki maksimum genlik

$\log A_0$  : Sönüm faktörü düzeltme katsayısı

$\log A_0$  nın episantr uzaklığına göre aldığı değerler çeşitli araştırmacılar tarafından hesaplanmış olup Şekil-16'da grafik olarak verilmiştir. Yukarıda özetlenen teknik uygulanarak lokal magnitüd  $M=6.42$  olarak bulunmuştur.

### 3- SONUÇLAR

Episantrdan 20 km. uzaklıkta elde edilen maksimum ivme değerinin (148.15 gal, N-S bileşeni) daha önce Türkiyede olmuş deprem değerleri ile karşılaştırıldığında oldukça küçük olduğu görülür (Tablo-2).

Tablo-2

Deprem	Magnitüd ( $M_S$ )	Episantr mes. (km)	Max. ivme (gal)
1976 Denizli	4.7	10	340
1977 İzmir	5.3	30	210
1979 Dursunbey	5.2	10	290
1981 Antakya	6.5	65	176
1983 Erzurum-Kars	7.1	20	148

Bu küçük ivme değeri kısmen yüksek frekanslı dalgaların önemli miktarda sönüme uğradığı ve aletinde üzerinde kurulduğu alüvial çökeltilere bağlanabilir. Şekil-4,5 ve 6 da görüldüğü gibi kayıtlarda periodu 1 sn. den daha büyük dalgalar hakimdir. Şekil-7 ve 8'de görüldüğü gibi ise spektral domende zemin hakim titreşim periodu 3 sn civarındadır. Bu sonuçlar enerji kaynağında sismik dalgaların uzun periodlarda ivme özelliklerinin belirlediği kısa periodlara göre daha güçlü olduğunu ortaya koyar. Dolayısıyla bu durum küçük ivme genliklerine ve  $M_S$  (7.1, yüzey dalgalarından bulunan magnitüd) ile M (6.42, lokal magnitüd) arasındaki farkın büyük olmasına neden olur.

Bu çalışmada kuvvetli yer hareketi ivme kaydından bulunan lo-

kal magnitüd  $M=6.42$ 'dir. Hesaplama sadece bir kayıt kullanılmasına rağmen sonuç Richter'in  $M=1.59 M_b - 3.97$  ampirik formülü ile  $M_b=6.5$  (Kandilli) değerini kullanarak bulunan rakamla gayet iyi uyum sağlamıştır. Bu uyum bize local magnitüd değerinin bulunmasında Wood-Anderson kaydı olmasa bile kuvvetli yer hareketi kaydıyla oldukça sağlıklı sonuçlara varılacağını gösterir.

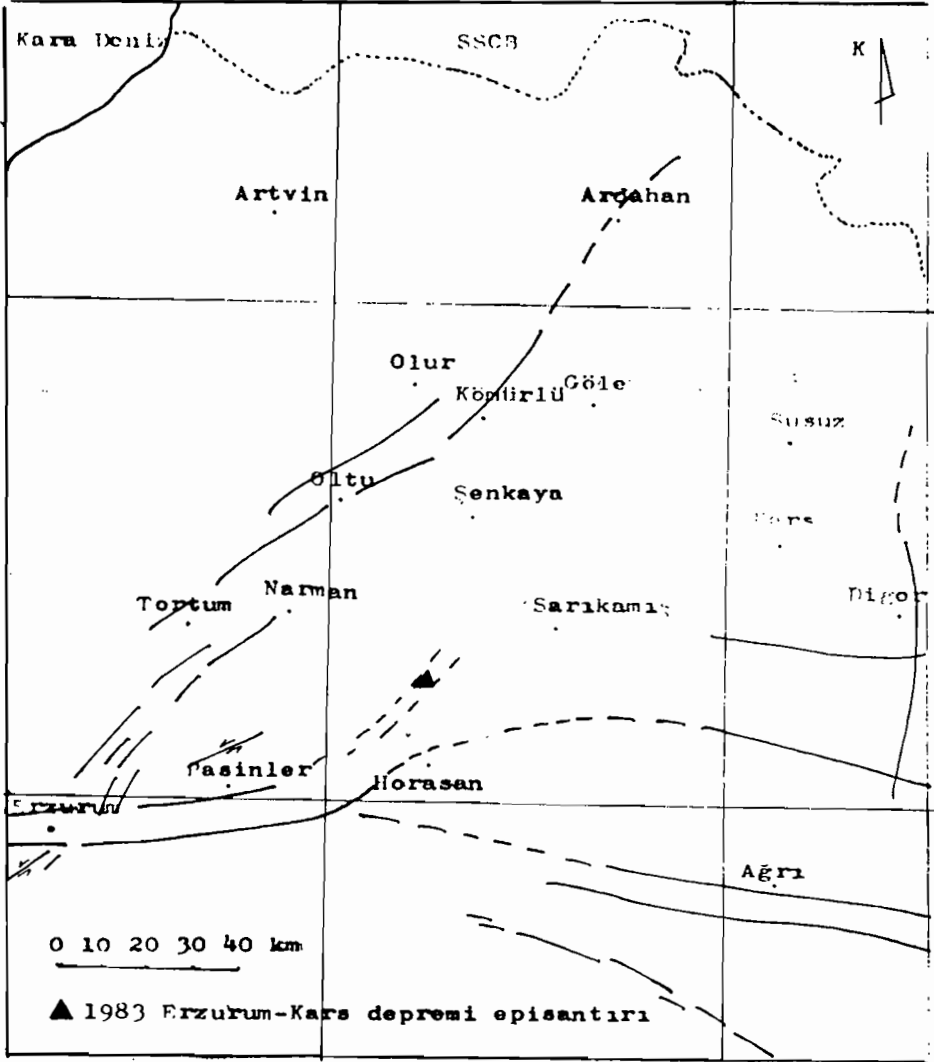
#### AÇIKLAMA

Bu çalışma 29.5.1984 - 18.7.1984 tarihleri arasında Hokkaido Üniversitesinde Prof. Yutaka Ohta'nın önderliğinde yapılmıştır.

#### KAYNAKLAR

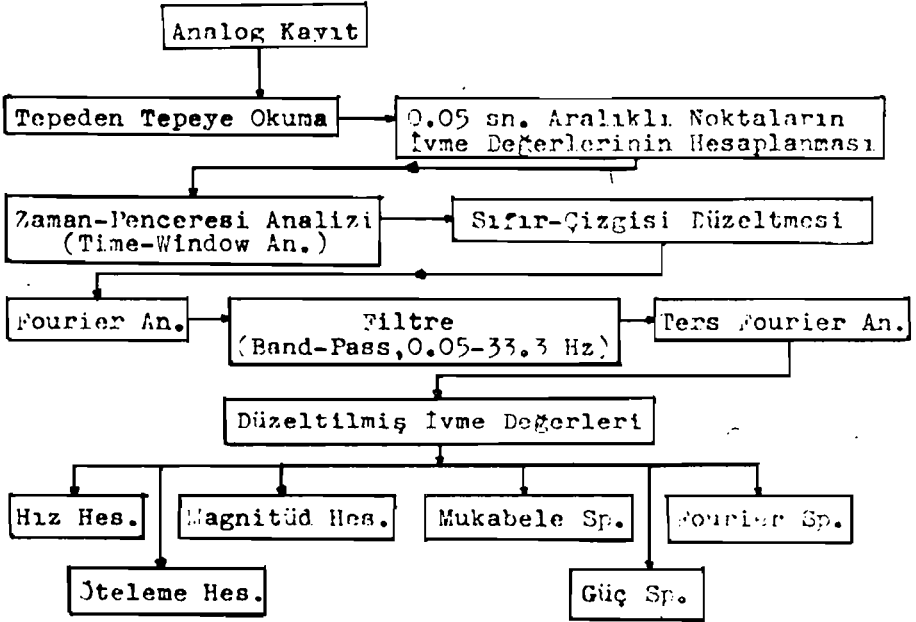
1. Davis, J.C. Statistics and Data Analysis in Geology  
John Wiley and Sons inc. (1976)
2. Ergünay, O. ve Tabban, A. 30 Ekim 1983 Erzurum-Kars Depremi Raporu, Deprem Araştırma Dairesi (1983)
3. Hudson, D.E. Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms, California Institute of Technology (1979)
4. Kanamori, H ve Jennings, P.O. Determination of local Magnitude,  $M_l$ , From strong Motion Accelerograms Bull. Seism. Soc. Am. (April, 1978)
5. Kasahara, K. Earthquake Mechsism  
Cambridge Universty Press (1981)
6. Kurata, E., Lai, S., Yokayama, Y., Noda, S. Annual Report On Strong Motion Earthquake Records in Japanese Ports (1980)
7. Ohta, Y. (ed) A Comprehersive Study on Earthquake Disasters in Turkey in view of Seismic Risk Reduction Special Issue, Faculty of Engineering, Hokkaido Universty (1983)
8. Takeo, M. and Abe, K. Local Magnitude Determination from Near-Field Accelerograms (1981)



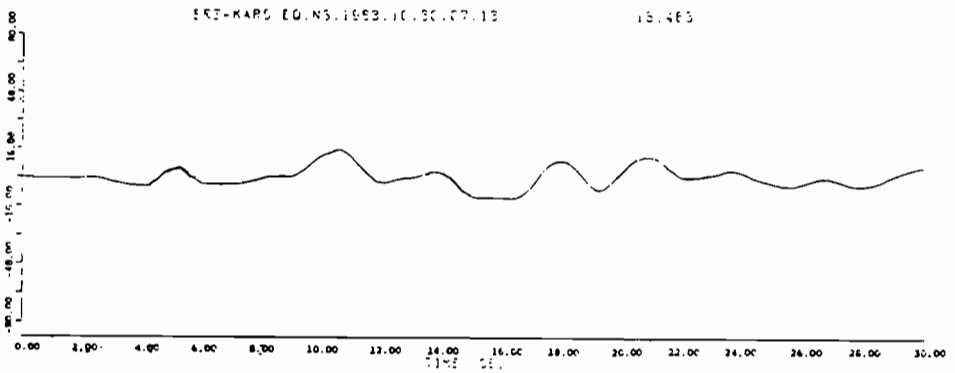
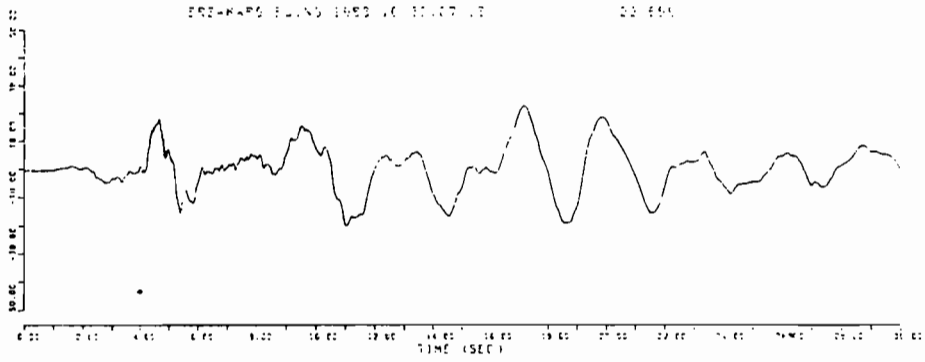
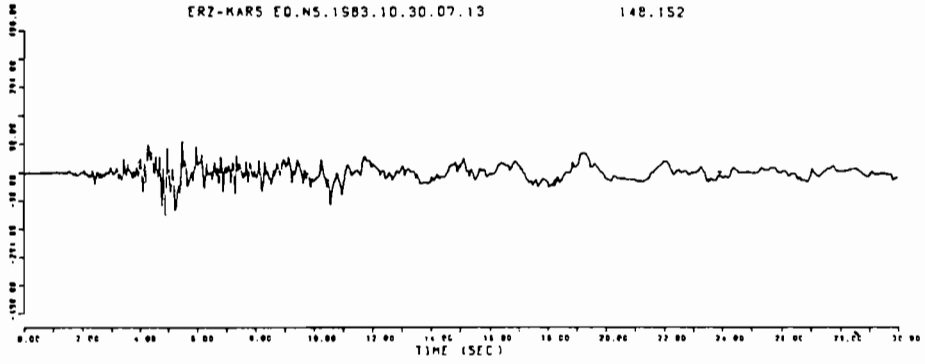


Sekil 1. 30 Ekim 1983 Erzurum-Kars deprem bölgesindeki genel tektonik hatlar.

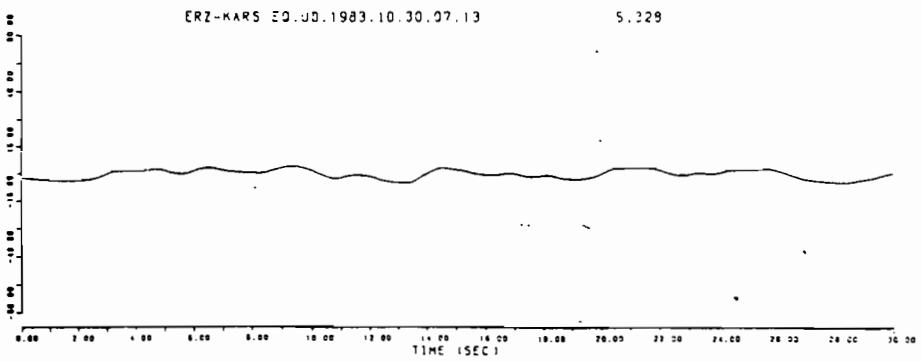
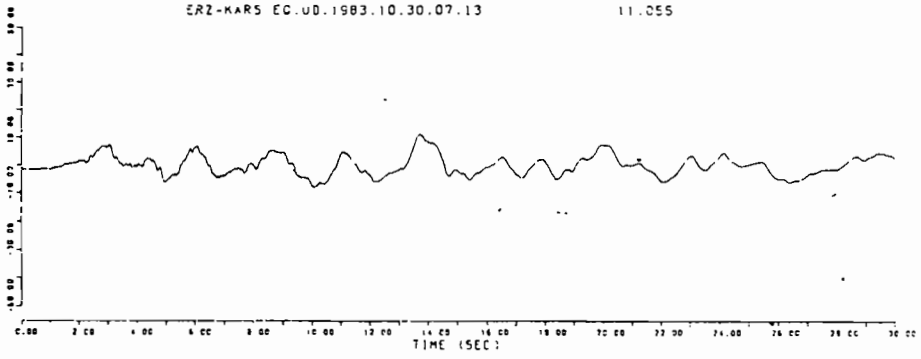
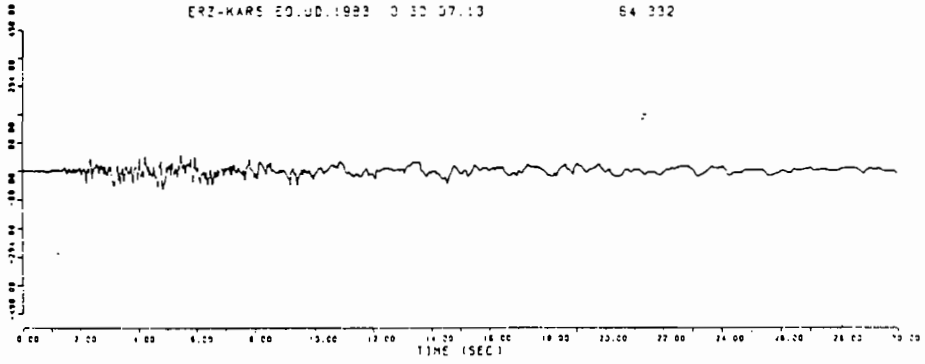
Şekil 2. 30 Ekim 1983 Erzurum-Kars depremi kuvvetli yer hareketi ivme kaydı.



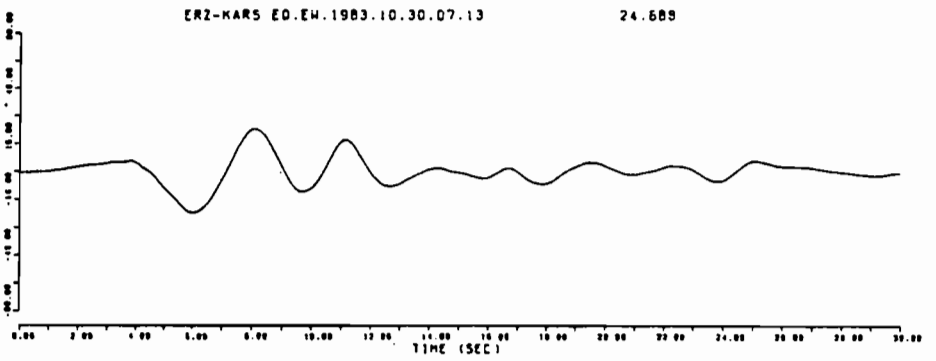
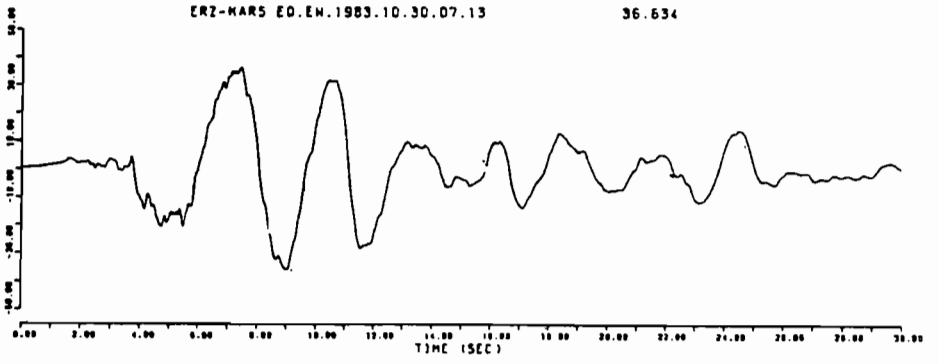
Şekil 3. Uygulanan hesaplamaları gösterir akış diyagramı



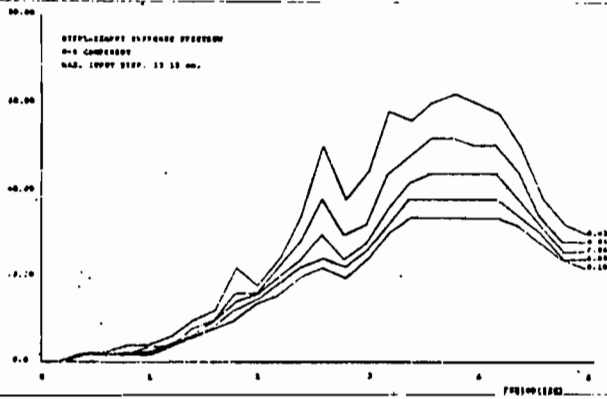
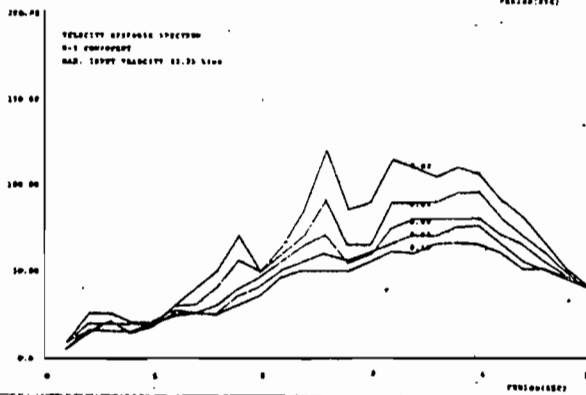
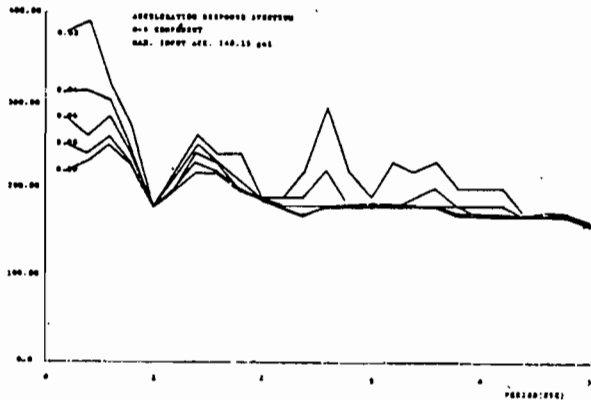
Şekil 4. İvme, hız ve öteleme (K-G bileşeni)



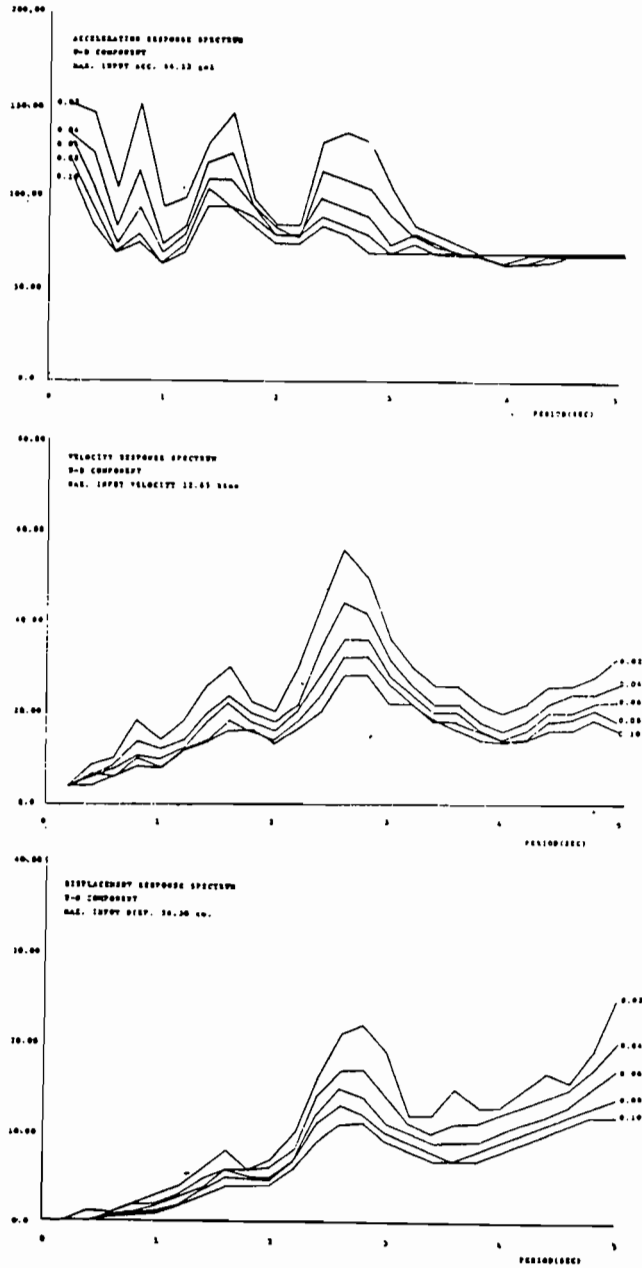
Sekil 5. İvme, hız ve öteleme (düşey bileşen)



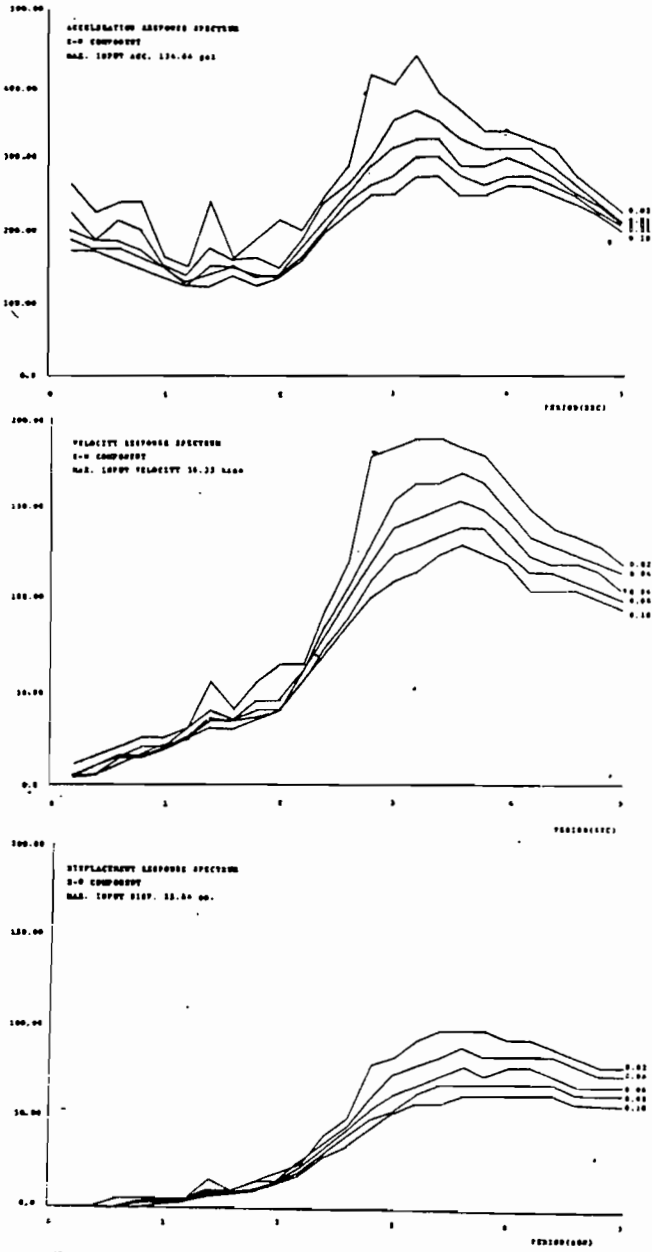
Sekil 6. İvme, hız ve öteleme (D-B bileşeni)



Şekil 7. Mukabele spektrumları (K-G bileşeni)

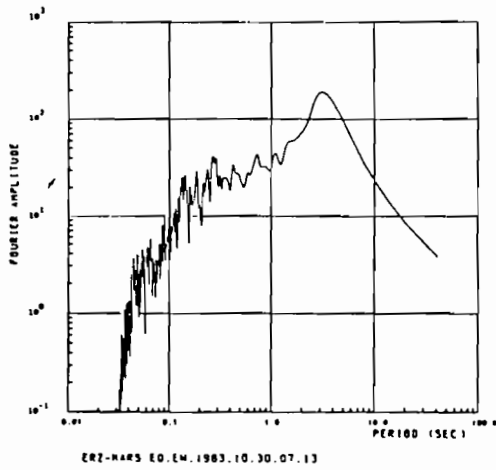
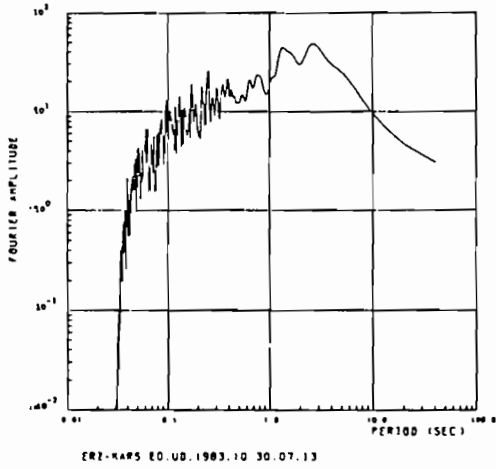
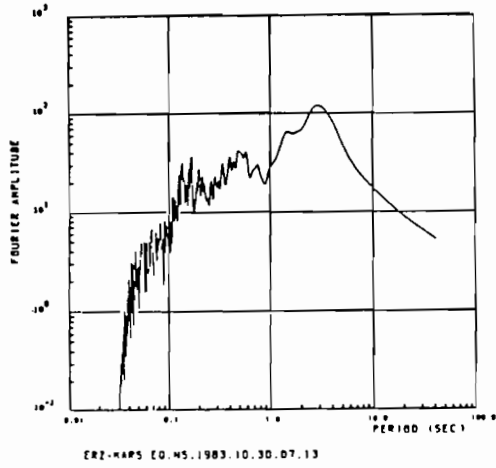


Şekil 8. Mukabele spektrumları (düşey bileşen)

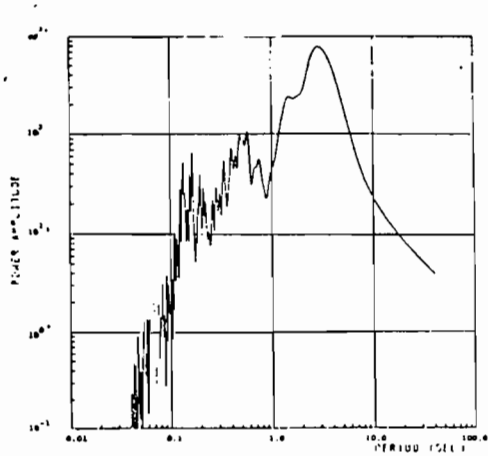


Şekil 9. Mukabele spektrumları (D-B bileşeni)

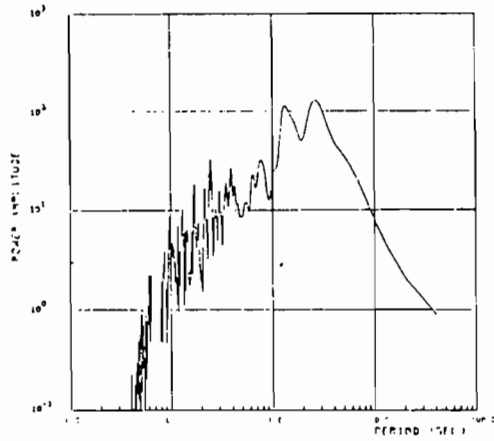




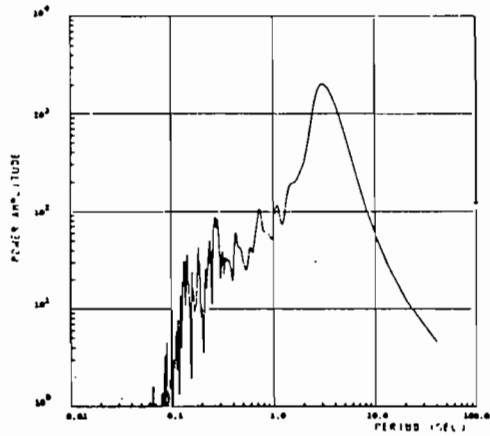
Şekil 10. Fourier spektrumları



ERZ-KARS EQ. NS (1983.10.30.07.13)

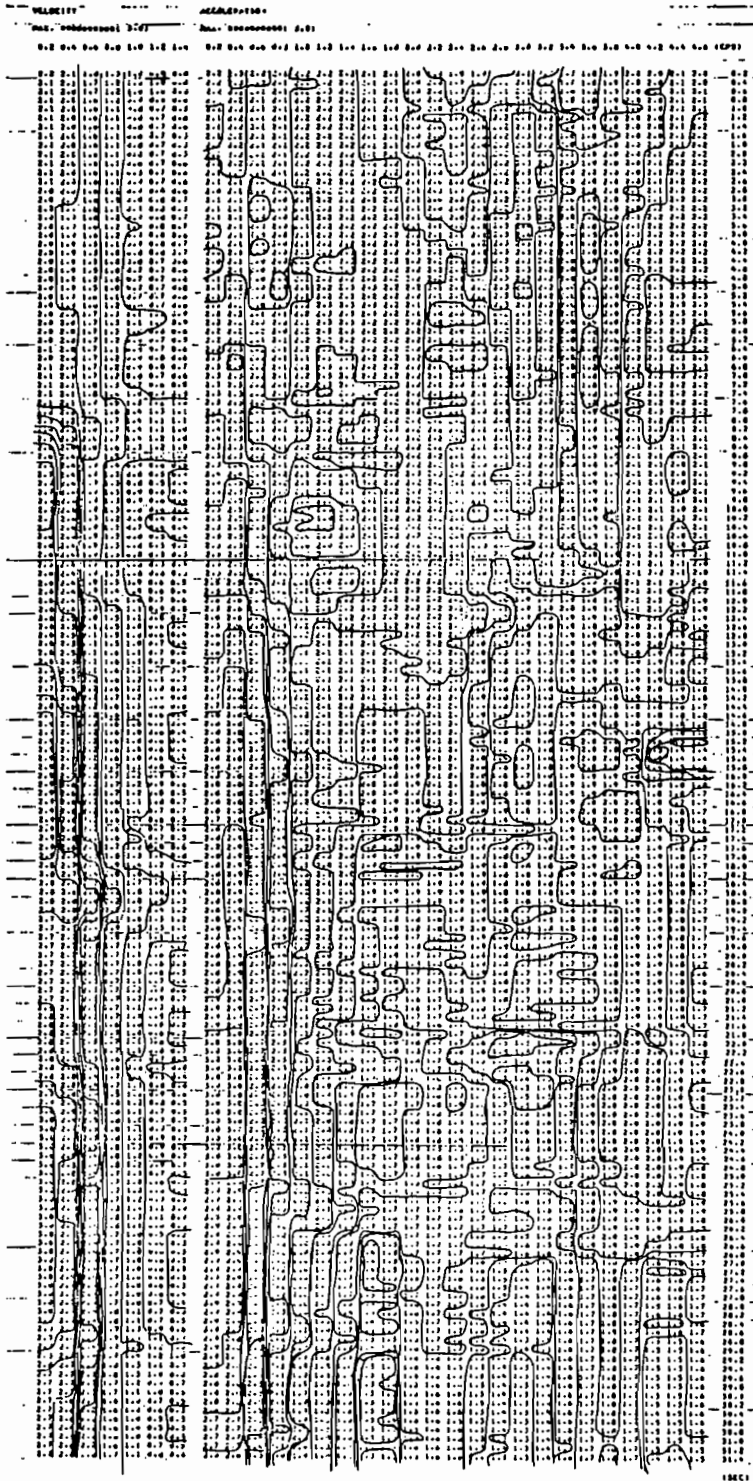


ERZ-KARS EQ. UD (1983.10.30.07.13)

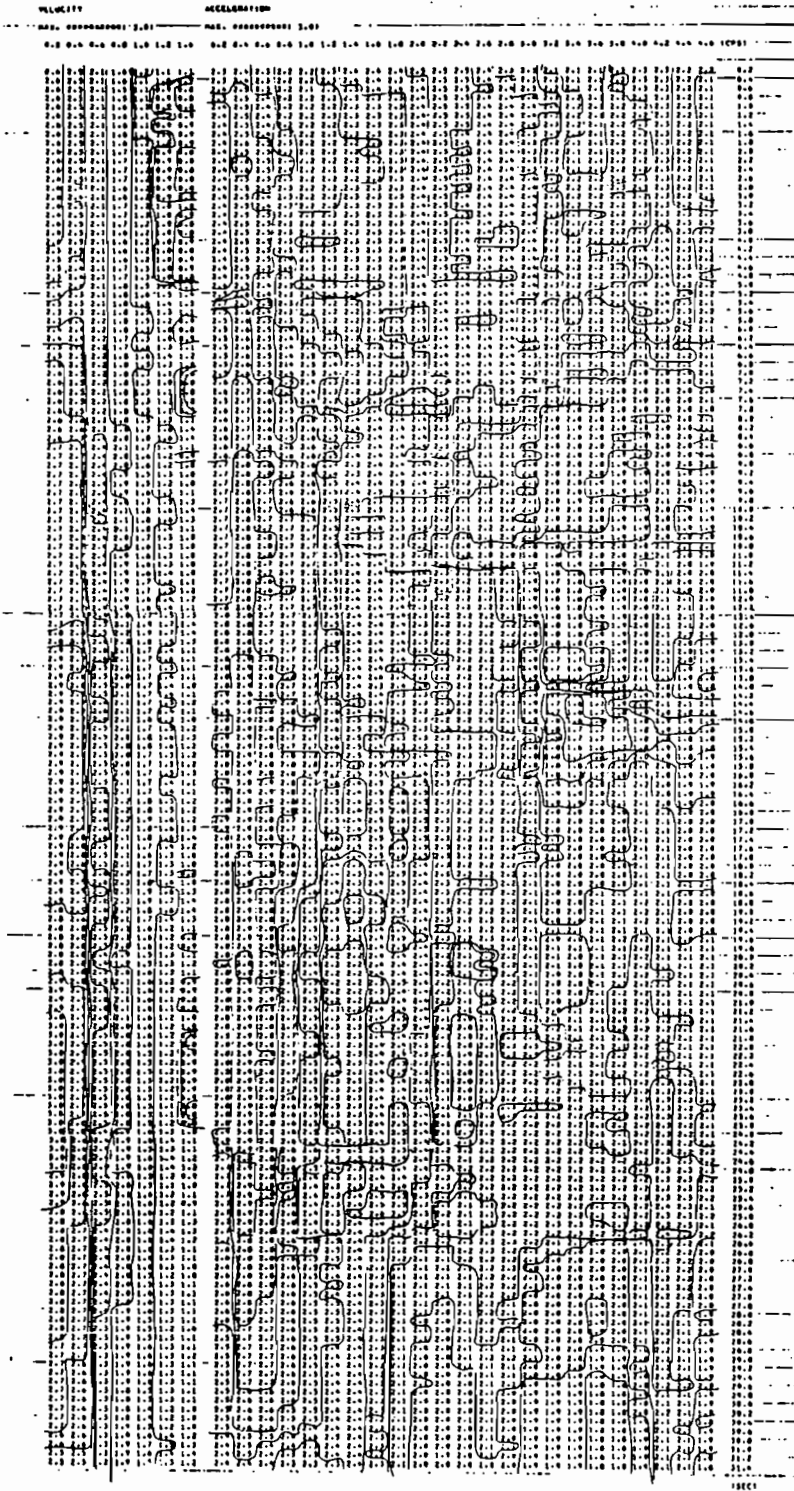


ERZ-KARS EQ. EW (1983.10.30.07.13)

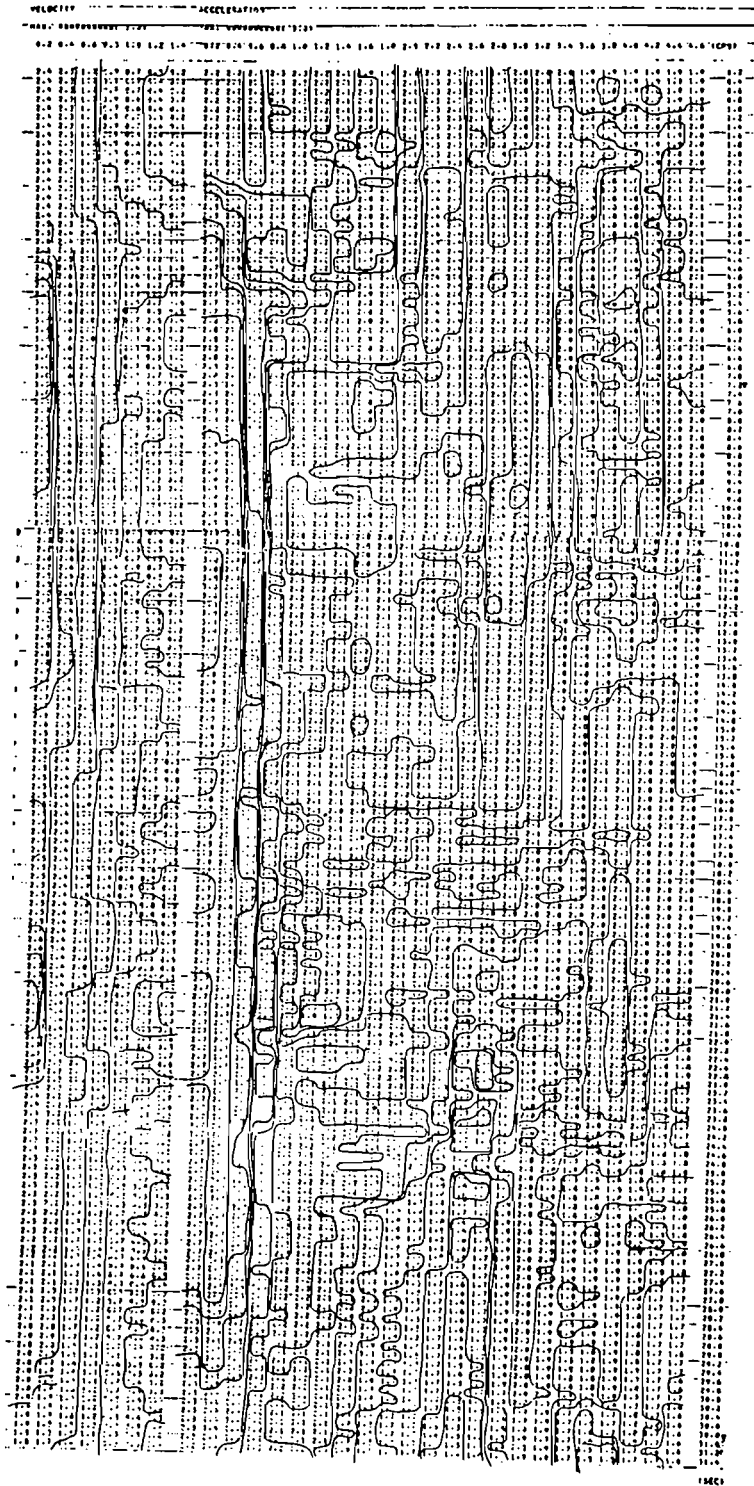
Şekil 11. Güç spektrumları



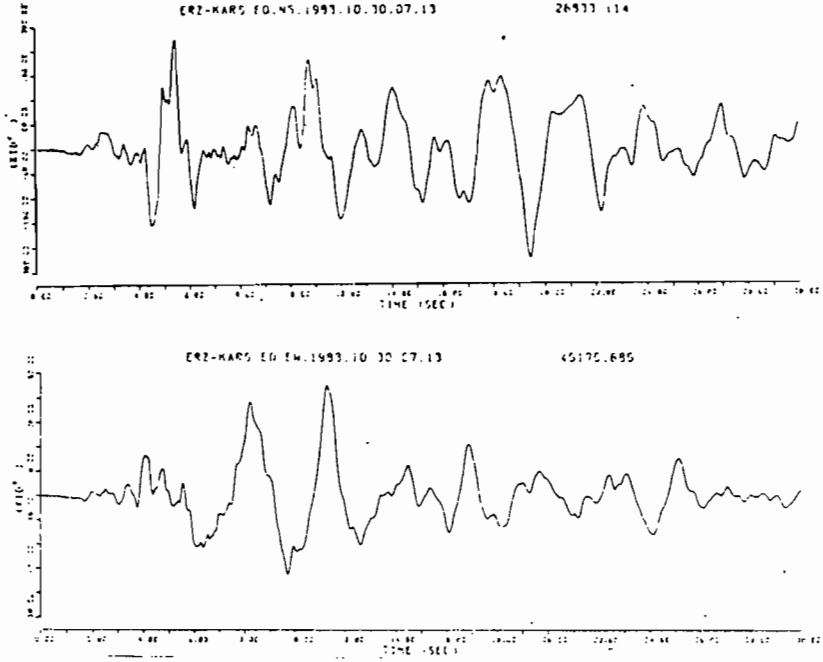
Şekil 12. Kayan-Pencere (Running-Window, K-G bileşeni)



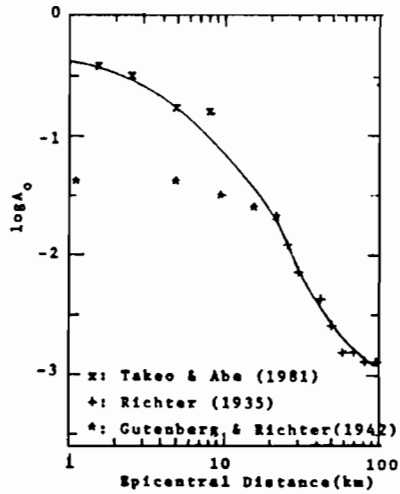
Sekil 13. Kayan-Pencere (Running-Window, düşey bileşen)



Sekil 14. Kayan-Pencere (Running-Window, D-B bilisen)



Şekil 15. Hesaplanmış Wood-Anderson cevabı.



Şekil 16. Düzeltme kaysayısı  $\log A_0$

DEPREM ARAŞTIRMA BÜLTENİ  
YAYIN KOŞULLARI

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 kağıdın yalnız bir yüzüne en az iki nüsha olarak yazılmış bulunması,
  - e) Şekillerin aydıngeçer kağıdına çini mürekkebi ile çizilmiş olması,
  - f) Fotoğrafların net ve klise 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. Bayındırlık ve İskan 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 yayımlandıktan sonra tahakkuka bağlanır.
5. Bültende yayımlanacak yazılara, "Kamu Kurum ve Kuruluşlarınca Ödenecek Telif ve İşlenme Ücretleri Hakkında Yönetmelik" esaslarına göre ücret ödenir.
6. Yazılarda bulunan şekiller için, gerekli olan asgari alan içinde bulunabilecek kelime sayısına göre ücret taktir edilir.
7. Yazıların bültende yayınlanması Genel Müdürlüğümüz 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 yayımlanıp yayımlanmayacağı 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 Genel Müdürlüğümüz sorumlu değildir.
11. Yayımlanan yazılardaki fikir, görüş ve öneriler tamamen yazarlarına ait olup, Teknik Araştırma ve Uygulama Genel Müdürlüğünü bağlamaz ve Genel Müdürlüğümüzün resmi görüşünü yansıtmaz.
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. Genel Müdürlüğümüz mensupları Genel Müdürlükçe kendilerine verilen görevlere ait çalışmalardan ötürü her hangi bir telif ya da tercüme ücreti talep edemezler.