T.M.M.O.B.
İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI
İZMİR ŞUBESİ

ÇOK KATLI YAPILAR SEMPOZYUMU

(21-22-23 Eylül 1989)

İnş. Yük. Müh. Nejat BAYÜLKE

ÇOK KATLI YAPILAR VE DEPREM

ÇOK KATLI YAPILAR VE DEPREM

Nejat Bayülke

Deprem Mühendisliği Şube Müdürü
Deprem Araştırma Dairesi

1. GİRİŞ

Çok katlı yapılar kat adedi 8-10 ve daha çok olan yapılar olarak tanımlanabilir. Çok katlı yapıların deprem deneyimleri diğer tip yapılara göre daha sınırlı sayıdadır. Bu durum şiddetli depremlerin bu tür yapıların çok olduğu büyük kentleri etkileyen depremlerin az sayıda olmasının bir sonucudur. Şimdiye kadar başka ülkelerdeki çok katlı yapıların deprem davranışlarından sonuçlar çıkarılmış ve bu sonuçlar çok katlı yapıların tasarımında yön verici olmuştur. Bu bildiride önce depremlerin ve çok katlı yapıların dinamik özelliklerinden söz edilecek daha sonra çeşitli şiddetli depremlerde gözlenmiş çok katlı yapı deprem hasarı ve davranışının değerlendirilmesi yapılacaktır.

2. ÇOK KATLI YAPILARIN VE DEPREM YER HAREKETİNİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Depremlerde yapılara genliği zamana bağlı olarak değişen atalet kuvvetleri etkir. Bu kuvvetlerde olan değişimin zaman süresi yapının doğal titreşim periyodunun 10 katından az yada ona eşit ise yapıda dinamik nitelikli yüklemeler oluşmakta, bir diğer deyişle yapının kütlesi (harekete karşı direnci) ile ilgili atalet kuvvetleri oluşmaktadır. Bu durumda zamana bağlı olarak değişen deprem kuvvetlerinin dinamik özellikleri ile yapının dinamik özellikleri arasındaki ilişki önem kazanmaktadır.

2.1 Çok Katlı Yapıların Dinamik Özellikleri

Yapıların en önemli dinamik özelliği doğal titreşim periyodudur. Periyot yapının ağırlığı ve taşıyıcı sisteminin yatay yüklere karşı rijitliğine bağlıdır. Çok katlı yapıların titreşim periyodu yapının kat adedine ve taşıyıcı sistemine göre değişmektedir.

Yapıların doğal titreşim periyotları analitik yöntemlerle hesaplanabilir ancak bu oldukça zaman alıcı bir işlem olduğu için bir çok ülkenin deprem yönetmeliklerinde birinci mod titreşim periyotları ampirik formüllerle verilmektedir:

$$T = 0.1 \sim 0.07\ (N)$$

Bir diğer deyişle 10 katlı (N=10) çerçeve taşıyıcı sistemli bir yapının 1nci mod titreşim periyodu 1.0 saniye alınabilir. Eğer yapının taşıyıcı sistemi perde duvarlı ise periyot daha kısalmaktadır, 0.7 saniye gibi. Aynı formül ile 20 katlı perde duvarlı bir yapının titreşim periyodu 1.4 saniye olmaktadır. Prefabrike panolu yapıların da 1nci mod titreşim periyotları yerinde dökme perde duvarlı yapılara göre biraz daha kısa olmaktadır.

Çok katlı yapılar üzerinde ülkemizde yapılmış periyot ölçümleri vardır (Aytun 1972, Erdik 1985). Örneğin Kızılay Ankara Gökdeleninin periyodu 1.35-1.42 saniye olarak ölçülmüştür (Aytun 1972). Yine Ankaradaki Sabancı Öğrenci yurdunun 1nci mod periyodu 1.67 saniye, 2nci mod titreşim periyodu 0.38 saniye olarak bulunmuştur (Erdik ve Diğerleri 1985). Aynı yapıda çevrel titreşimlerin frekans analizinden bulunan 1nci ve 2nci mod titreşim periyotları 1.47 ve 0.36 saniye olmuştur. Çevrel titreşimlerin genliği zorlanmış titreşimlerden daha küçüktür. Bir başka örnek olarak Türkiye İş Bankası Genel Merkez Binasının 1nci Mod periyodu 1.25, 2nci mod periyodu 0.37 ve 3ncü mod periyodu 0.18 saniye olarak çevrel titreşimlerden hesaplanmıştır.

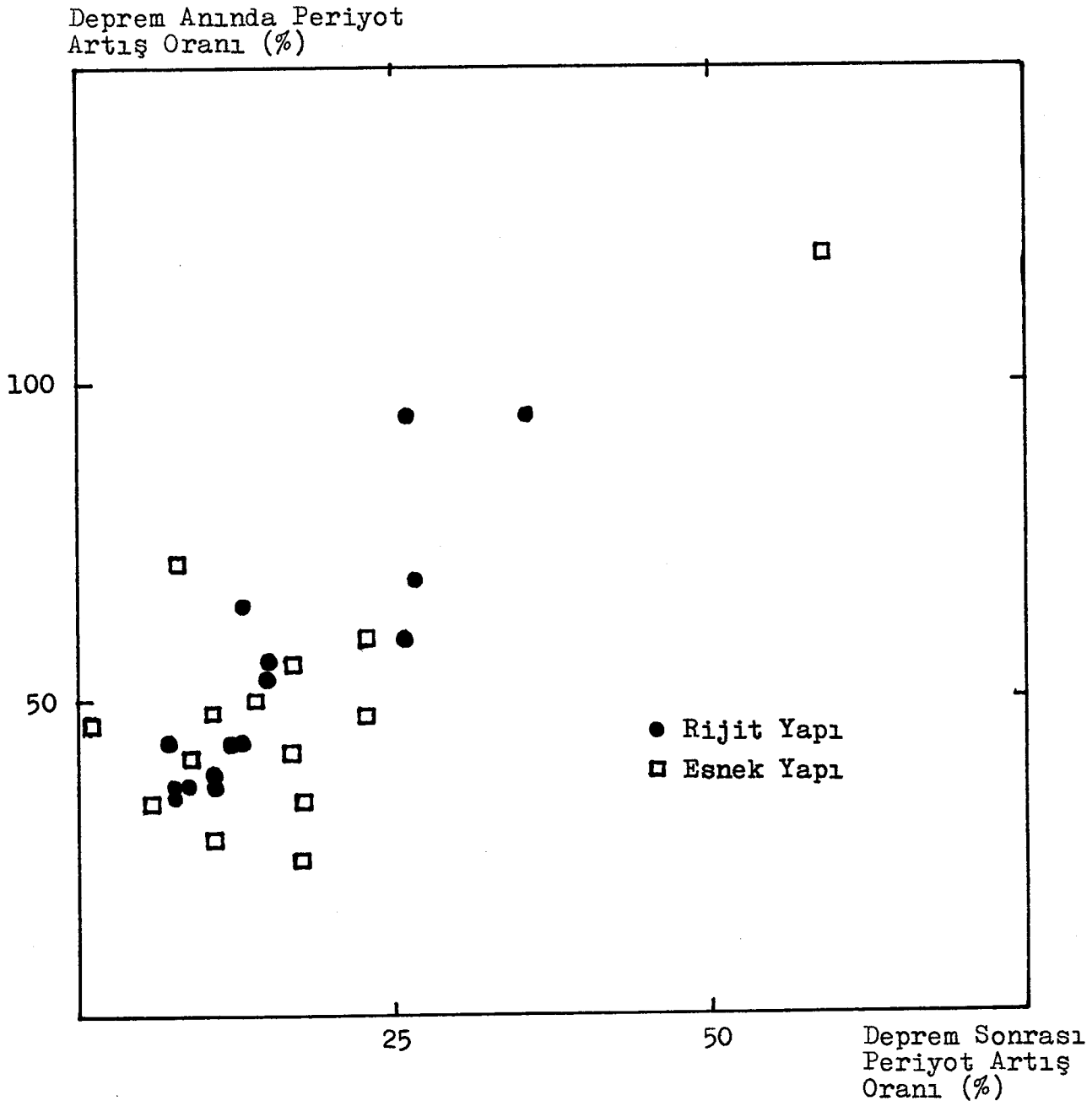
Çok katlı yapıların kat adetleri kadar doğal titreşim periyotları bulunmakla birlikte bunların ilk birkaç tanesi önemlidir. Çünkü yüksek modlardaki titreşimlerin gerektirdiği enerji çok büyük olduğu için yapılar çoğunlukla ilk birkaç yada en çok beş modda titreşim yaparlar, yada yaptıkları titreşim bu ilk birkaç moddaki titreşimlerin süperpozisyonundan oluşur.

Yapıyı titreştiren kuvvetlerin düzeyi arttıkça yapının periyodu uzar. Bu yapının rijitliğinin doğrusal olmadığını gösterir. Yapıların kuvvetli bir yükleme sonrasındaki periyotları yükleme öncesine göre daha uzun olabilir. Bu durum bir çok yapıda deprem öncesi ve sonrası yapılmış periyot ölçümlerinden gözlenmiştir. Deprem sırasında etkiyen kuvvetler depremin şiddeti ile ilgilidir. Bu bakımdan hafif bir depremden sonra periyot artışı yapıda çatlaklar yapacak kadar şiddetli bir depremden sonra olacak artıştan daha az olacaktır. Bu tür bir inceleme 1971 San Fernando Depreminden sonra yapılmıştır (Mulhern and Maley 1973). Çok sayıda değişik taşıyıcı sistemli ve çok katlı yapıların periyotları depremden önce ve sonra ölçülmüştür. Bu yapılardaki deprem kuvvetli hareketi ivme ölçerlerinin kayıtlarının analizinden de yapıların deprem anındaki titreşim periyotları bulunmuştur. Şekil-1 de bu yapılardaki deprem sonrası ve öncesi periyotlardaki artış oranı ile deprem anındaki periyotta deprem öncesi periyoda göre artış oranı verilmektedir. Yapı periyodunda deprem anında % 100'e varan artışlar olmakta bu ise yapının deprem sonrası periyodunu % 50 kadar artırmaktadır.

Yapıların periyotları ve kütle ve rijitlik arasında

$$T \approx \sqrt{m/k}$$

gibi bir ilişki vardır. Yapı periyodundaki bir artış tümü ile yapının yay katsayısı (k), yatay yükler altında ötelemenin ters fonksiyonudur, azalması yani rijitliğin azalmasının bir sonucudur.



Şekil-1 Çok Katlı Yapılarda Gözlenmiş Periyot Artış Oranları, 1971 San Fernando Depremi

Bir başka deyişle deprem sonrası yapı periyodunda olacak % 100 bir artış yapının k-katsayısının % 400 azaldığını gösterecektir. Bu yapıda ciddi taşıyıcı sistem hasarının işaretidir. Şekil-1'deki yapılar betonarme taşıyıcı sistemli ve depremin merkezinden yaklaşık 20-50 km uzakta yer almakta idiler. Depremlerin etkisi sonucu yapıların rijitliğinde bir yumuşama olmaktadır. Kısaca bir yapı için titreşim periyodu çok değişik değerlerde olabilir ve bu yapının durumunun değerlendirilmesinde etkili bir kıstas olarak kullanılabilir. Bu bakımdan yönetmeliklerde verilen formüllerden hesaplanmış periyot ancak yapının bir deprem öncesi düşük düzeylerdeki titreşim özelliklerini gösterir.

Çok katlı yapıların dinamik özelliklerinden doğal titreşim periyodunun depremde yapıya gelen yer hareketinin hakim titreşim periyodu ile olan ilgisi de önemlidir. Çünkü gelen hareketin hakim periyodu ile yapının doğal titreşim periyodu birbirine yakın ise rezonans oluşmakta ve yapılarda hasar büyümektedir. Bu durumda deprem yer hareketinin periyod özelliklerinin incelenmesini gerektirmektedir.

2.2 Deprem Yer Hareketinin Periyot Özellikleri

Deprem sırasında ortaya çıkan şok, sarsıntı, dalgaları yer kabuğu ve yüzeyinde yayılırlar. Bu yayılma sırasında geometrik olarak giderek büyüyen dalgaların şiddetinin azalması yanında dalgaların geçtikleri ortamlarda enerji kaybı ile sönüme uğramaları sonucunda yer hareketinin niteliği giderek değişmektedir.

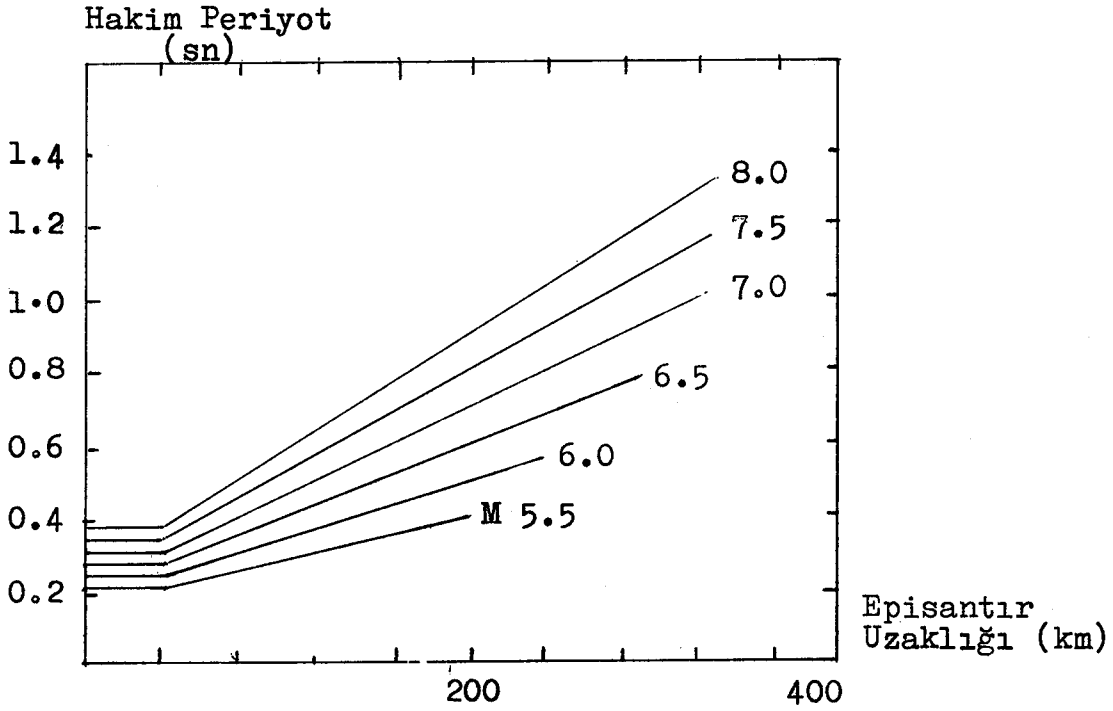
Önce yer hareketi içindeki yüksek frekanslı, kısa periyotlu titreşimler fazla uzaklara gidememektedir. Uzaklara kadar gidebilen sarsıntı dalgaları daha küçük frekanslı, uzun periyotludur. Çok katlı yapıların doğal titreşim periyotlarının uzun oluşu dikkate alınırsa genel olarak çok katlı yapıların "Uzak" depremlerden daha çok etkilenecekleri hemen anlaşılacaktır.Bunun Türkiye'den bir örneği 1967 Adapazarı Depreminde Ankara'daki o zamanki İmar ve İskan Bakanlığının 10 katlı binasının bodrum kat kolonunda çatlama oluşmasıdır.

Deprem yer hareketinin hakim periyodunun deprem mağnitüdü ve uzaklık ile değişimi Şekil-2'de verilmektedir. Bu ilişkiden görüleceği gibi uzakta olan şiddetli bir depremin hakim periyodu ile çok katlı yapıların doğal titreşim periyotları çakışmakta ve dolayısı ile ortaya 'rezonans' olayı çıkma olasılığı artmaktadır. Kısaca çok katlı yapıların uzakta olacak (100 km ve daha uzak) şiddetli depremlerden etkilenecekleri beklenmelidir.

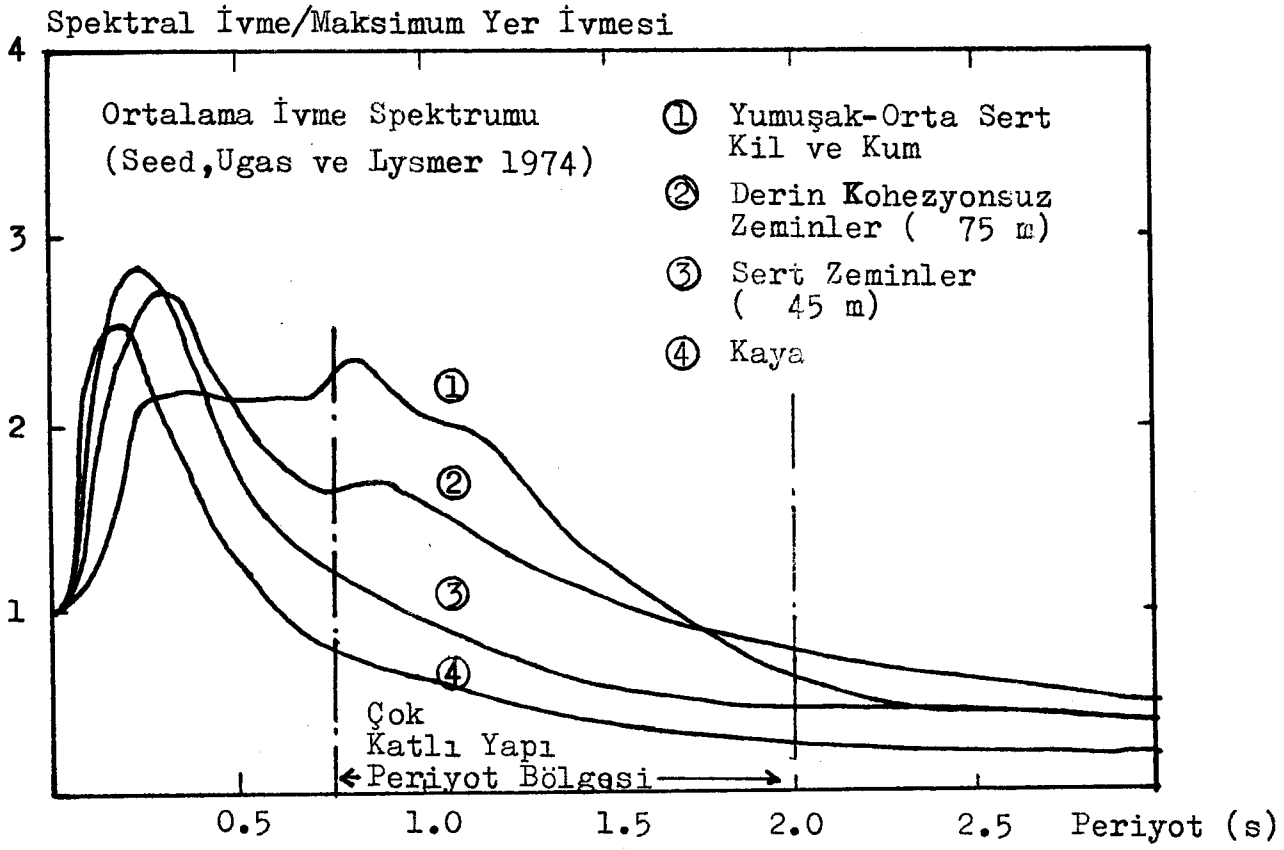
Depremlerde olan yer hareketinin periyot kapsamı üzerinde etkili olan bir başka faktör de yerel zemin koşullarıdır. Şekil-3'de değişik tür zeminler için deprem yer hareketi mukabele spektrumları verilmektedir. Bunlar bir anlamda yer hareketinin periyot kapsamını göstermektedir. Bu şekillerden görüleceği gibi yumuşak zeminler, genç dolgular üzerindeki deprem kuvvetli yer hareketinin büyük genliğe sahip olduğu periyot aralığı ile yüksek yapıların doğal titreşim periyotları bölgesi çakışmaktadır.

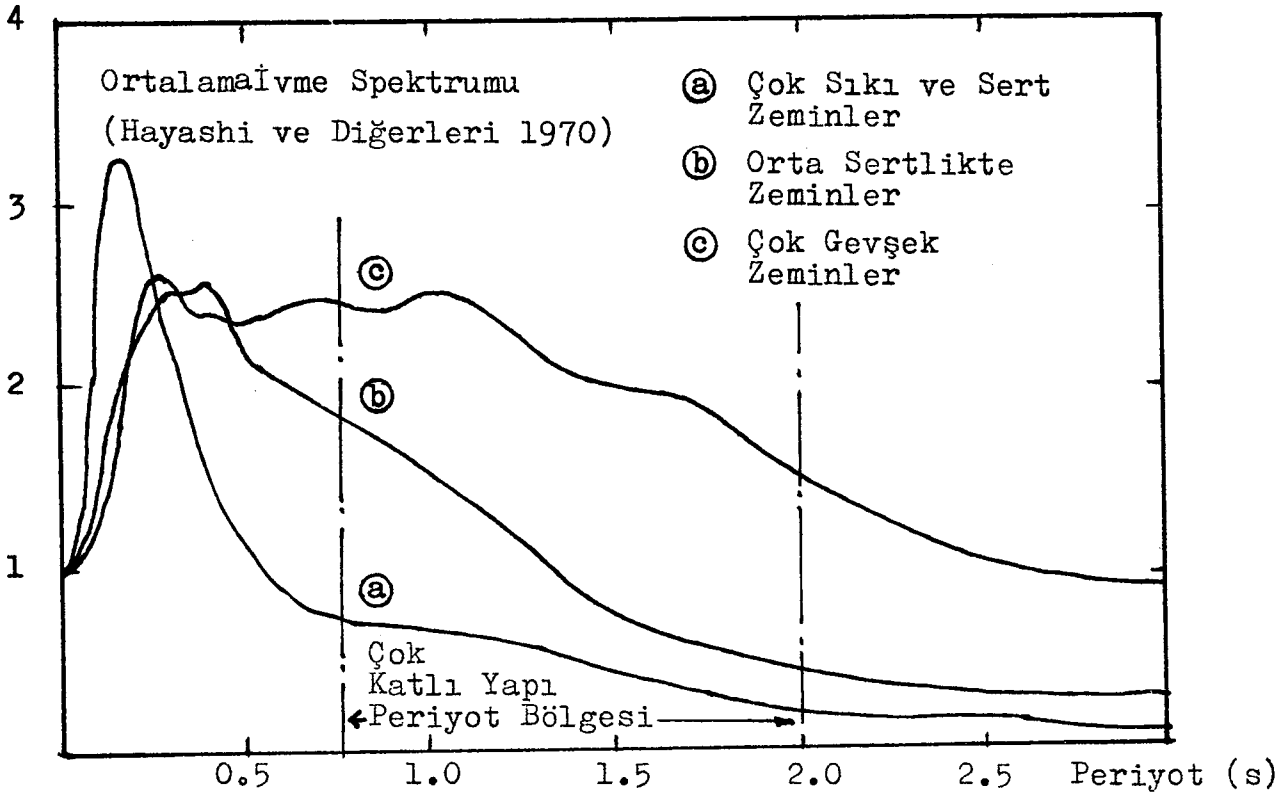
Bu şekillerin İzmir için özellikle önemi vardır. İzmir'in önemli bölümleri: Karşıyaka, Deniz Bostanlısı tarafları, Alsancak, gibi zemin kazık temeller gerektirebilecek kadar zayıf ve sıkışmamış genç dolgulardan oluşmaktadır. Buralar aynı zamanda çok katlı yapıların yaygın olarak yapıldığı alanlardır. Bu tür zeminler çok katlı yapılara uzak depremlerden büyük deprem kuvvetlerinin gelmesine son derece elverişlidir. Çok katlı yapıların bu bölgelerde tasarım ve yapımında deprem etkisinin önemi büyüktür.

Deprem yer hareketinin zemin cinsine göre etkisinin farklı olması konusunda İzmir'den bir örnek verilebilir. 1 Şubat 1974 Depreminin yer hareketi İzmir'de Fuar Müdürlüğü Binası ve Yine İzmir Yeşilyurt semtinde bulunan Yapı ve Kredi Bankası binasındaki sismoskoplarca kaydedilmiştir (Ergünay,Bayülke ve Gencoğlu 1974). Şekil-4'de Yeşilyurt'ta alınan kayıt, Şekil-5'de de Fuar 'da alınan kayıtlar verilmektedir. Kayalık (andezit) bir zeminde olan Yeşilyurt'da ölçülen maksimum ivme N-S yönünde 0.06 g iken

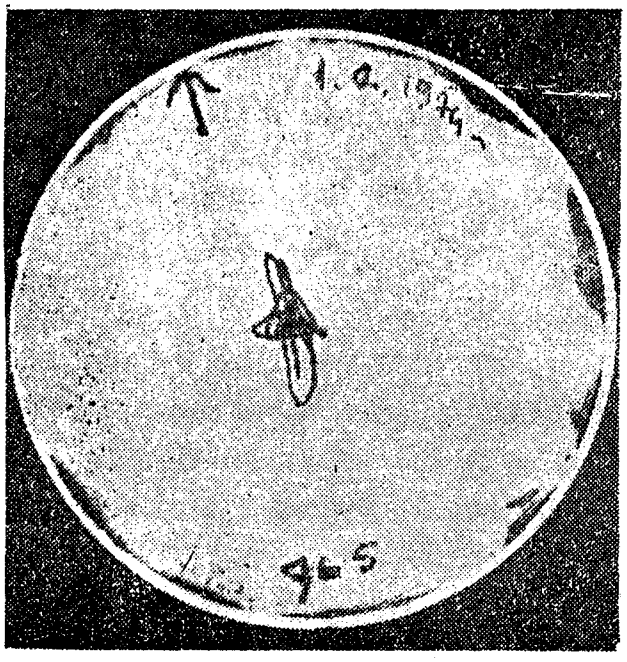


Şekil-2 Deprem Yer Hareketinin Hakim Periyodunun Deprem Mağnitüdü ve Uzaklık ile Değişimi (Seed ve Diğerleri 1969)

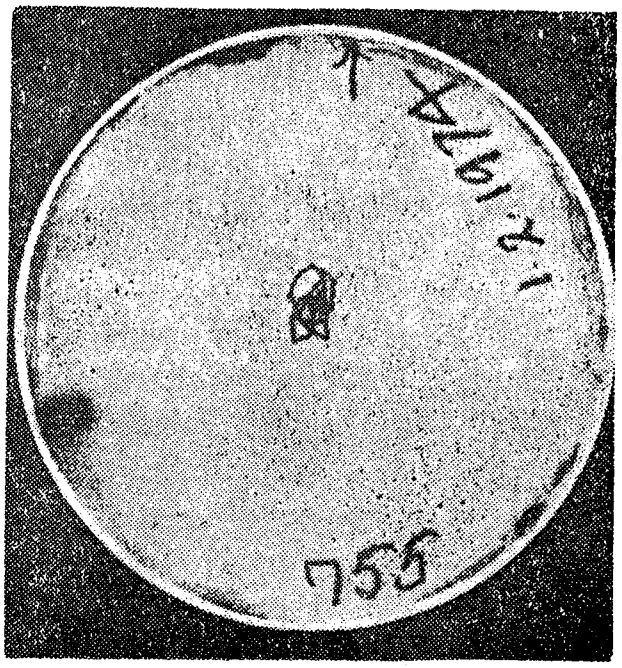




Şekil-3 Değişik Zeminlerin Yer Hareketinin Genliği Üzerindeki Etkileri



Şekil-5 1 Şubat 1974 İzmir Depreminin
Dolgu Zemin Üzerindeki Hareketi
Fuar Müdürlüğü Binası



Şekil-4 1 Şubat 1974 İzmir Depreminin
Kayalık Zemin Üzerindeki Hareketi
Yeşilyurt Yapı Kredi Binası

yaklaşık 200 m kalınlıkta dolgu zemin üzerinde olan Fuar'daki kayıtta maksimum ivme 0.125 g olarak, yaklaşık 2.5 kat daha büyük olmuştur. Bu depremde alınan kayıtlar İzmir'de dolgu zeminler üzerinde kuvvetli yer hareketinin daha büyük olacağının güçlü bir kanıtıdır.

Buraya kadar anlatılanların kısa bir özeti: yüksek yapıların uzakta olan depremlerden ve yumuşak zeminleredeki deprem yer hareketinden etkilenecekleri ve özel olarak da İzmir'de bu tür yumuşak zeminlerin bulunduğu ve bu zeminlerdeki yer hareketinin de gerçek depremlerde daha sert olan kayalık zemine göre daha büyük olacağıdır. Bu açıdan bakılınca bugün deprem bölgesi olarak görünmeyen yerlerde yapılacak bir çok katlı yapı birkaç yüz kilometre uzakta olan bir depremden ciddi ölçüde hasar görebilecektir eğer depreme karşı gerekli önlemler alınmamış ise.

3. ÇOK KATLI YAPILARIN DEPREMLERDE GÖZLENMİŞ DAVRANIŞLARI

Bildirinin bu bölümünde geçmişte gözlenmiş çok katlı yapı deprem davranışları ele alınacaktır. Ülkemizde çok katlı yapılarımız henüz şiddetli bir deprem deneyimi geçirmemişlerdir. Burada sözü edilecek örnekler 1964 Alaska, 1967 Caracas, 1971 San Fernando, 1972 Managua, 1977 Vrança ve 1985 Mexico-City depremlerinden alınmıştır. Bu depremlerden çok katlı yapı hasarı örnekleri verilirken depremin büyüklüğü, uzaklığı ve yer hareketinin nitelikleri üzerinde de olabildiğince bilgi verilecektir.

3.1 1964 Alaska Depremi

Bu depremin Richter ölçeğine göre mağnitüdü 8.4'dür. Depremin yer hareketinin şiddetli olarak sürdüğü bölümünün 3 dakika kadar olduğu kabul edilmektedir (Steinbrugge 1970). Depremin uzun sürmüş olması yapıların tekrar tekrar kalıcı plastik deformasyonlar bölgesine girmesine ve düşük devirli yorulma hasarına yol açmaktadır.

Depremin merkezinden yaklaşık 125 km uzakta olan Anchorage şehrindeki bazı çok katlı yapılardaki hasar üzerinde durulacaktır. Anchorage'da depremin kuvvetli yer hareketi kayıt edilmemekle birlikte yer hareketi içinde kısa periyotlu hareket bileşenlerinin olmadığı oluşan hasardan anlaşılmaktadır. Şehirdeki çok sayıdaki rijit ve kısa periyotlu kargir yığma yapılarda hiç bir hasar olmaz iken çok katlı yapıların çoğunda hasar olmuştur.

Bu depremde 14'er katlı 2 betonarme apartımanın dış cephesindeki taşıyıcı perde duvarları birbirine bağlayan elemanlarda hasar olmuştur. Şekil-6. Bu elemanlar özel bağ kirişi olarak yeterli biçimde tasarlanıp donatılmamıştır. Bunun sonucu yapıdaki bu elemanlar kolayca mafsallaşarak perde duvarların birbirine mafsallı elemanlar olarak çalışmalarına yol açmıştır. Binaların içindeki düşey taşıyıcı duvarlarda bu tip hasar oluşmamıştır.

Yine bu depremde 14-katlı çelik çerçeveleri de olan bir başka yapıda bazı çelik kolonlar devrilme momentinin oluşturduğu büyük düşey yüklerden dolayı burkulmuşlardır (Steinbrugge 1970).

Bu deprem yüksek yapıların uzak depremlerden etkileneceğini ve devrilme momentlerinin çok katlı yapıların alt katlarında düşey yüklere ek olarak büyük miktarlarda depremden dolayı düşey yük oluşturabildiğini ve boşluklu perdelerde bağ kirişlerine gelen momentlerin hızla mafsallaşmaya yol açabileceğini göstermiştir. Bu arada uzun süren deprem hareketinin düşük devirli yorulmaya neden olabileceği mesajıda alınmıştır. Bu durum daha sonra 1985 Meksiko Şehri depreminde de görülecektir.

3.2 1967 Caracas Depremi (Hanson ve Degenkolb 1969)

Bu depremde Caracas şehrinde bulunan çok katlı yapılarda önemli hasar gözlenmiştir. Caracas yaklaşık 5 km genişliğinde 14 km uzunluğunda çanak biçiminde bir vadinin içinde yer almaktadır.

Depremin mağnitüdü Richter ölçeğine göre 6.5 Caracas'a uzaklığı 50 km'dir. Vadinin içinde hasarlı çok katlı yapıların bulunduğu alanda alüvyon tabakasının derinliği 40 m yada daha çoktur. Ancak çok katlı yapı hasarı ile alüvyon tabakası kalınlığı arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır. Bu depremin kuvvetli yer hareketi kaydedilmemiştir. Ancak depremin yaklaşık 1 dakika sürdüğü ve bu sürenin 1/4-1/3 kadar bir sürede hareketin kuvvetli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu depremde olan toplam 266 can kaybından 156'sı yıkılan dört çok katlı yapıda olmuştur. Ayrıca çok sayıda çok katlı yapıda önemli hasar olmuştur. Bu depremde yıkılan dört yapının özellikleri aşağıda verilmektedir:

Mijagual: 13 katlı bu yapıda döşemeler asmolen dolgu olup 30 cm derinlikte 55 cm genişlikteki kirişler sadece bir yöndedir. Şekil-7. Yapı kirişlere dik yönde yıkılmıştır.

Neveri: 12 katlı olan bu yapıda da taşıyıcı sistem çerçevelidir. Döşemeler asmolenli dişli döşemedir. 125 cm genişliğinde ve 30 cm derinliğindeki kirişler tek yönlüdür. Bu yapı da kirişlere dik yönde yıkılmıştır. Şekil-8'de yapının planı ve kesidi verilmektedir.

Corvin: 10 katlı apartıman planda H-şeklindedir (Şekil-9). Üç ayrı bloktan oluşan yapının ortasındaki asansör ve merdiven bloğunda perde duvar olmasına karşın diğer iki bloktan bu perdeye bağlantı bulunmamaktadır. Bu yapıda döşemeler asmolenli dişli döşeme olup taşıyıcı sistem tek yönde sığ kirişlerle bağlı çerçeve sistemi diğer yönde ise çerçeveyi oluşturan yalnızca asmolen döşeme vardır. Bu yapının doğudaki bloğu güney doğu yönüne yıkılmıştır. Bu binanın bir tarafının yıkılmasına karşın diğer tarafının yıkılmamasında, yıkılmayan bölümde zemin katda dolgu duvarlarının oluşu yıkılan taraf da ise dolgu duvarlarının bulunmaması önemli bir rol oynamıştır.

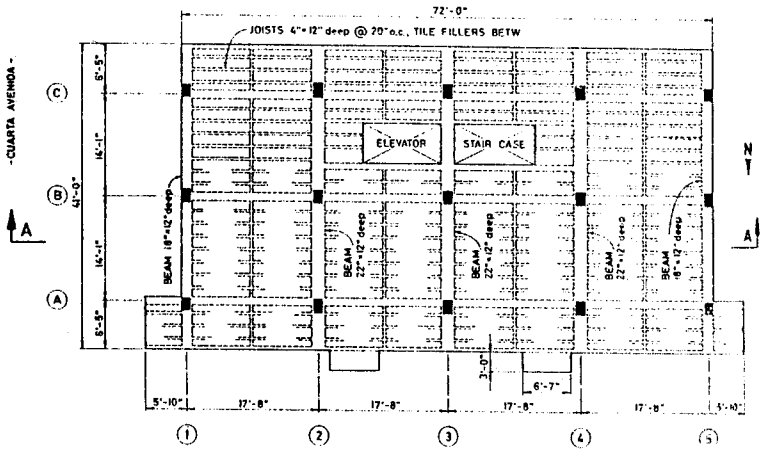


Fig. 30. TYPICAL FLOOR PLAN-
MIJAGUAL BUILDING

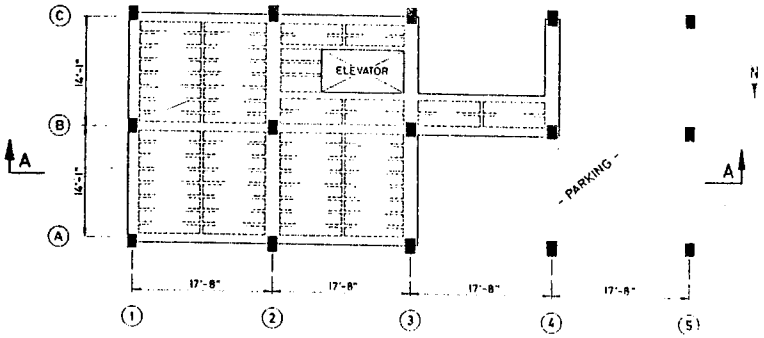


Fig. 31. 2nd FLOOR-
MIJAGUAL BUILDING

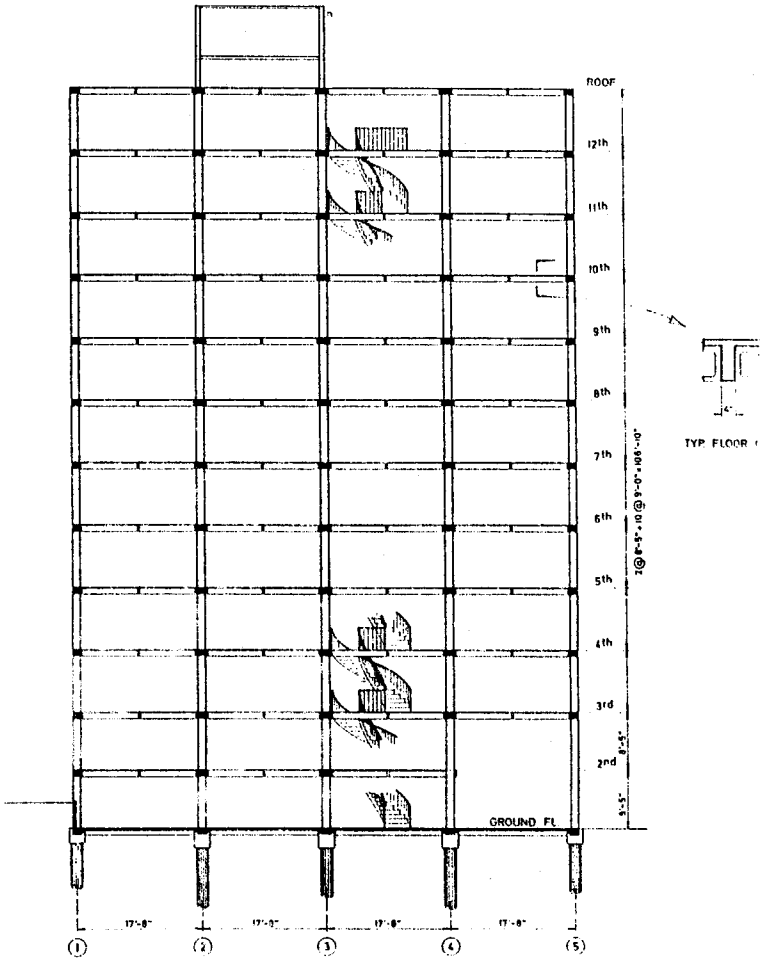
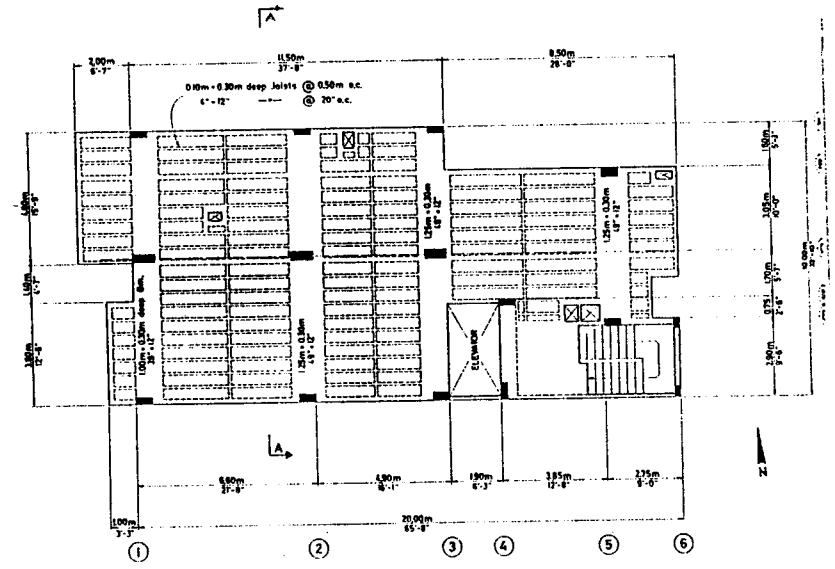
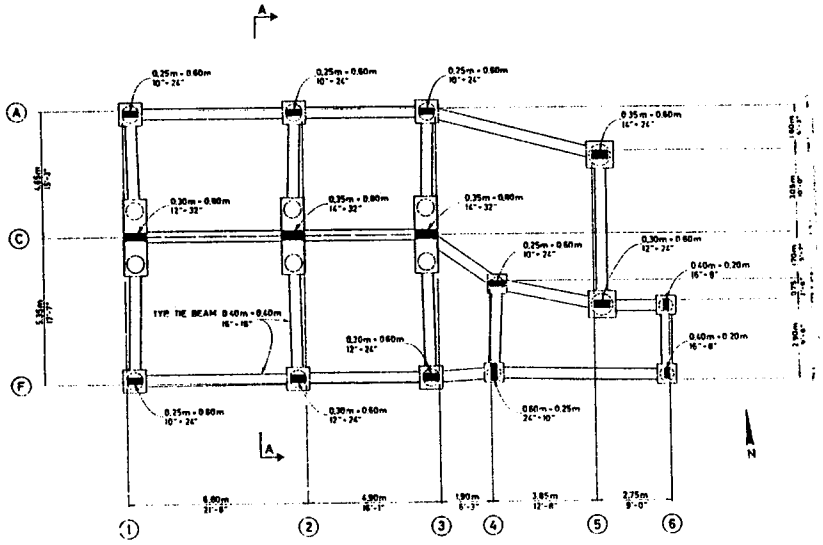


Fig. 32. SECTION A-A
MIJAGUAL BUILDING

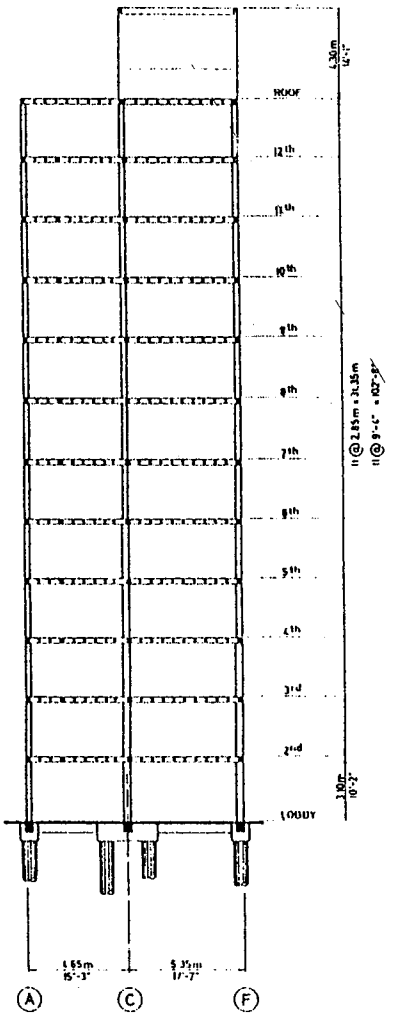
Şekil-7 Mijagual Binasının Plan ve Kesit Görünüşü



TYPICAL FLOOR PLAN

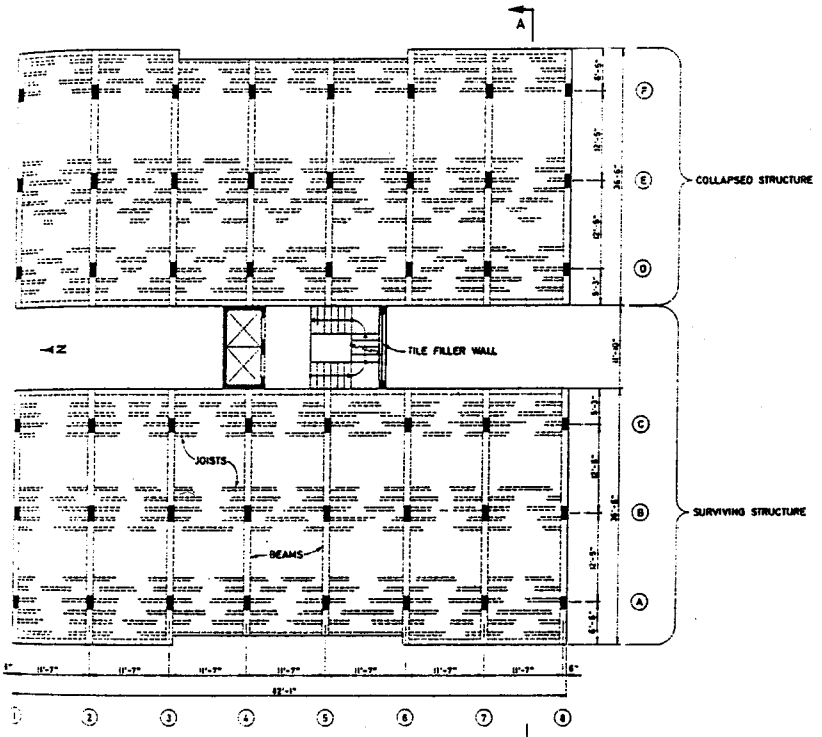


FOUNDATION PLAN
NEVERI BUILDING

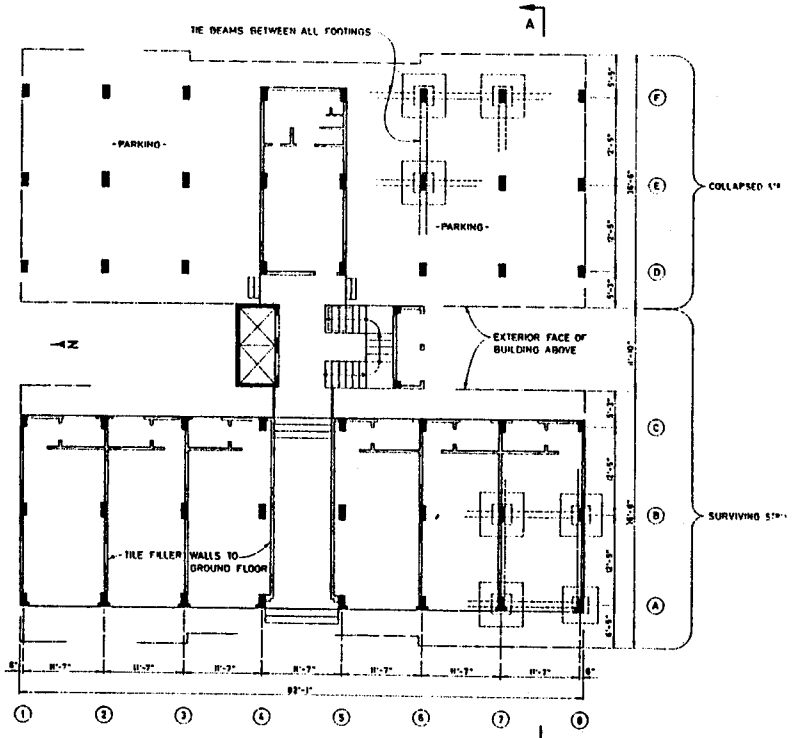


SECTION A-A
NEVERI BUILDING

Şekil-8 Neveri Binasının Plan ve Kesit Görünüşü

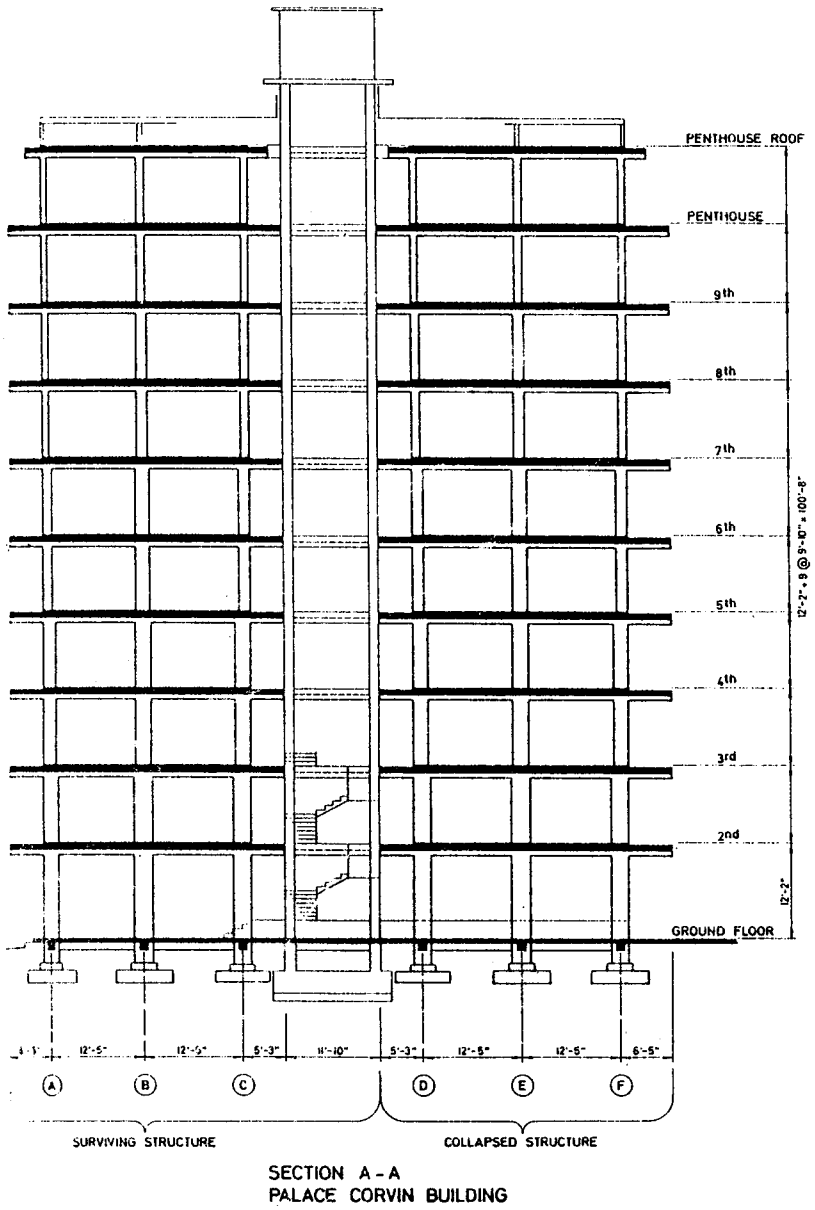


TYPICAL FLOOR PLAN -
PALACE CORVIN BUILDING



GROUND FLOOR PLAN -
PALACE CORVIN BUILDING

Şekil-9 Corvin Binasının Plan Görünüşleri



Şekil-9 Corvin Binasının Kesit Görünüşü

San Jose: 10 katlı olan bu yapıda projesine göre döşemenin iki yönlü dişli kaset döşeme olması öngörülmüş iken yapı tek yönlü dişli asmolen döşemeli olarak yapılmıştır. Binanın ortasındaki asansör ve merdiven boşluğu çevresine yapılması öngörülen beton arme perde duvarlar da yapılmamıştır. Şekil-10.

Bu depremde yıkılan dört çok katlı yapının hepsinin tek yönlü dişli döşemeli ve tek yönde rijitliği az çercevelerden oluşması dikkat çekicidir. yatay yükleri alacak çerçeve sisteminin yeter siz oluşu ve perde duvar olmayışının sonucu yapılar iskambil kağıdından evler gibi bir yöne kayarak yıkılmışlardır. Bu açıdan bu yapılardaki yıkılma ve hasar, bu depremden tam bir hafta önce 22 Temmuz 1967'de Adapazarında olan ve yine 7 adet asmolen dişli döşemeli yapının yıkılma ve hasarından farklı değildir.

Bu depremde taşıyıcı sisteminde süreksizlikler olan, perdesiz çerçeveli çok sayıda çok katlı yapıda önemli hasar gözlenmiştir.

Deprem çok katlı yapıların tasarımında önemli bazı noktaları vurgulamıştır:

1- Zemin katlarında dolgu duvarlarının bile bulunmaması yapının zemin katında ani bir rijitlik değişimi yaratmakta ve bunun sonuçları yapının yıkılmasına bile yol açmaktadır.

2- Çok katlı yapılarda devrilme momentleri özellikle zemin katlarda önemli miktarlara ulaşabilmektedir. Genellikle kolon hesabında kolonun en büyük moment ve eksenel yüke göre tasarımı yapılmaktadır. Ancak deprem sırasında eksenel yük devrilme momentinden dolayı bir yönde artarken diğer yönde azalabilmekte ve sonuçta kolonda özellikle çok katlı yapıların dış aks kolonlarında çok az eksenel basınç yükü hatta çekme olmakta ve bu durumda kolonun moment taşıma gücü azalmaktadır.

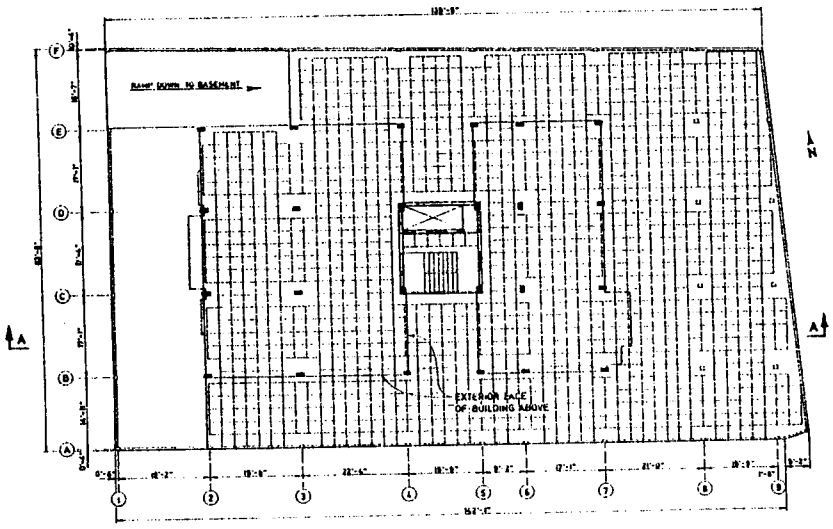


Fig. 57

1st FLOOR PLAN (LOBBY) - SAN JOSE BUILDING

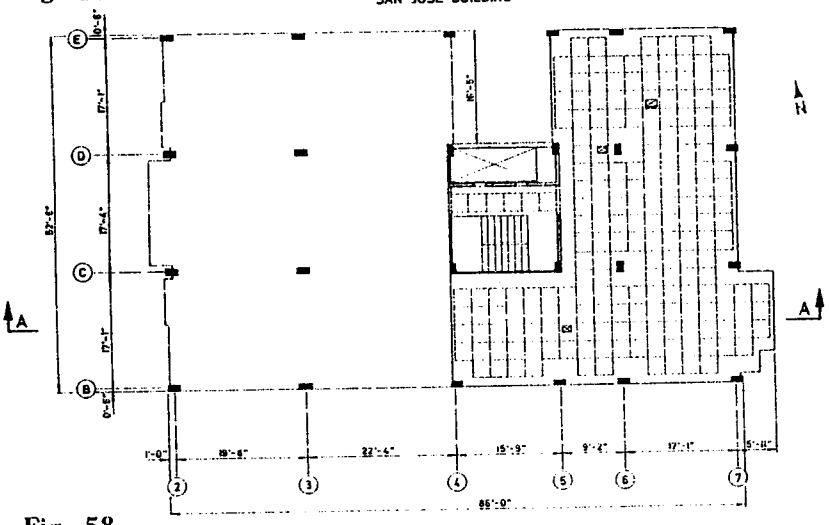


Fig. 58

2nd FLOOR PLAN - SAN JOSE BUILDING

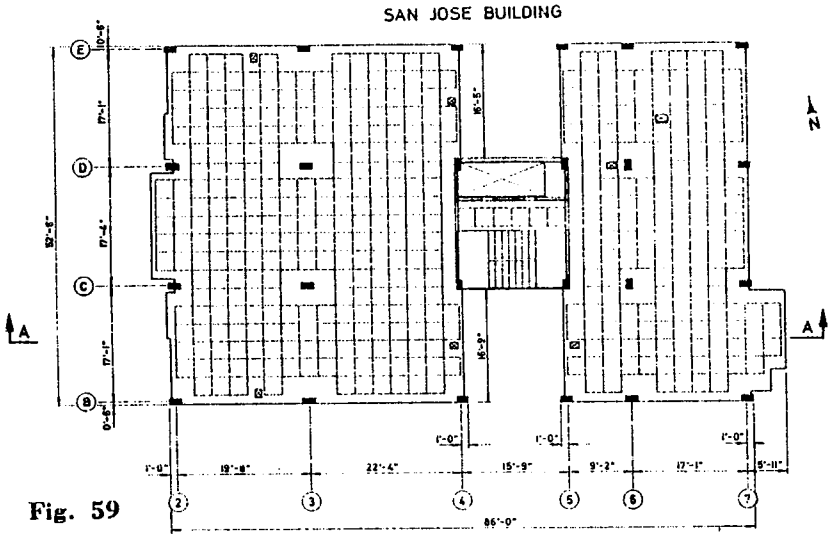


Fig. 59

TYPICAL FLOOR PLAN - SAN JOSE BUILDING

Şekil-10 San Jose Binasının Plan Görünüşü

3- Perde duvarlı yapılarda döşemeyi perde duvara bağlayan özel donatılara gerek vardır. Yoksa perde ile döşemeden perdeye kuvvet aktarılamamakta yada perde deki dönme döşeme ile perdenin birbirinden ayrılmasına yol açmaktadır. Böylece perdenin yatay yükleri taşıyıcı eleman olarak çalışması mümkün olmamaktadır.

4- Bu depremde de çok katlı yapılar uzak bir depremin uzun periyotlu yer hareketinden etkilenmişlerdir. Depremde yıkılan bu dört yapının bulunduğu bölgede rijit ve kısa periyotlu yapıların hasar görmemesi en azından bu bölgedeki yer hareketinin uzun periyotlu olduğunu göstermektedir.

3.3 1971 San Fernando Depremi (Gates 1973)

Bu depremde çok sayıda çok katlı yapıda deprem sırasında yapının ivmesi zemin, orta ve en üst katlarda kaydedilmiştir. Bu kayıtların değerlendirilmesi ile çok katlı yapıların deprem davranışları konusunda çok yararlı bilgiler toplanmıştır:

1- Alınan kayıtların değerlendirilmesinden matematik modelleme yöntemleri ve bilgisayarlı çözüm yolları ile yapıların deprem davranışları yeterli biçimde belirlenebilmiştir. Kullanılan analitik yöntemler tasarımda kullanılabilir.

2- Yaklaşık Modal Analiz Yöntemi ile yapının maksimum mukabelesinin hesaplanması da çoğunlukla yeterli güvenlikte sonuçlar vermektedir.

3- Çelik çok katlı yapılar için kuvvetli deprem ivme kayıtlarından hesaplanmış yapı periyotları Yönetmeliklerde verilen periyotların iki katı daha büyük olmuştur.

4- Bütün yapıların deprem sonrası çevrel titreşim periyotları deprem öncesi titreşim periyotlarından uzun olmuştur. Bu da yapılarda deprem sırasında kalıcı etkiler olduğunu göstermektedir.

5-Çok katlı yapıların en üst katlarında yada çatısında çok büyük düşey ivmeler oluşabilmektedir.

6-Depremde yapılarda oluşan yatay ötelemeler yönetmelik hesap yüklerine göre oluşması beklenen yatay ötelemelerin 2-4 katı daha büyük olmuştur.

7-Farklı boyutlardaki yapılar arasında bırakılacak derzler gerçek deprem ötelemeleri göz önüne alınarak bırakılmalıdır. Yoksa yapı bölümlerinin birbirine çarparak hasara yol açması kaçınılmazdır. Yapı içindeki eşyalar da katlara arasında olabilecek en büyük ardışık ötelemelere dayanabilecek biçimde tasarlanmalıdır. Aynı durum bölme duvarları içinde söz konusudur.

8- Kolonlar mutlaka elastik bölgede kalmalı mafsallaşma kiriş uçlarında olmalıdır. Yoksa yapıda deprem sonucu düşey yüklerin taşınması problem olmaktadır

9- Bir deprem sonrasında yerinden çıkıp çevresine zarar verebilecek yada can kaybına yol açacak mekanik ve elektrik donanımı ve diğer taşıyıçı olmayan yapı elemanları için özellikle önlem alınmalıdır.

10-Çok katlı yapının çevresindeki alçak yapılara çarpmasını önleyecek önlemler alınmalıdır.

11- Yüksek modlardaki devrilme momentlerinin yapının devrilme momentini azaltacağı varsayımının doğru olmadığı gözlenmiştir.

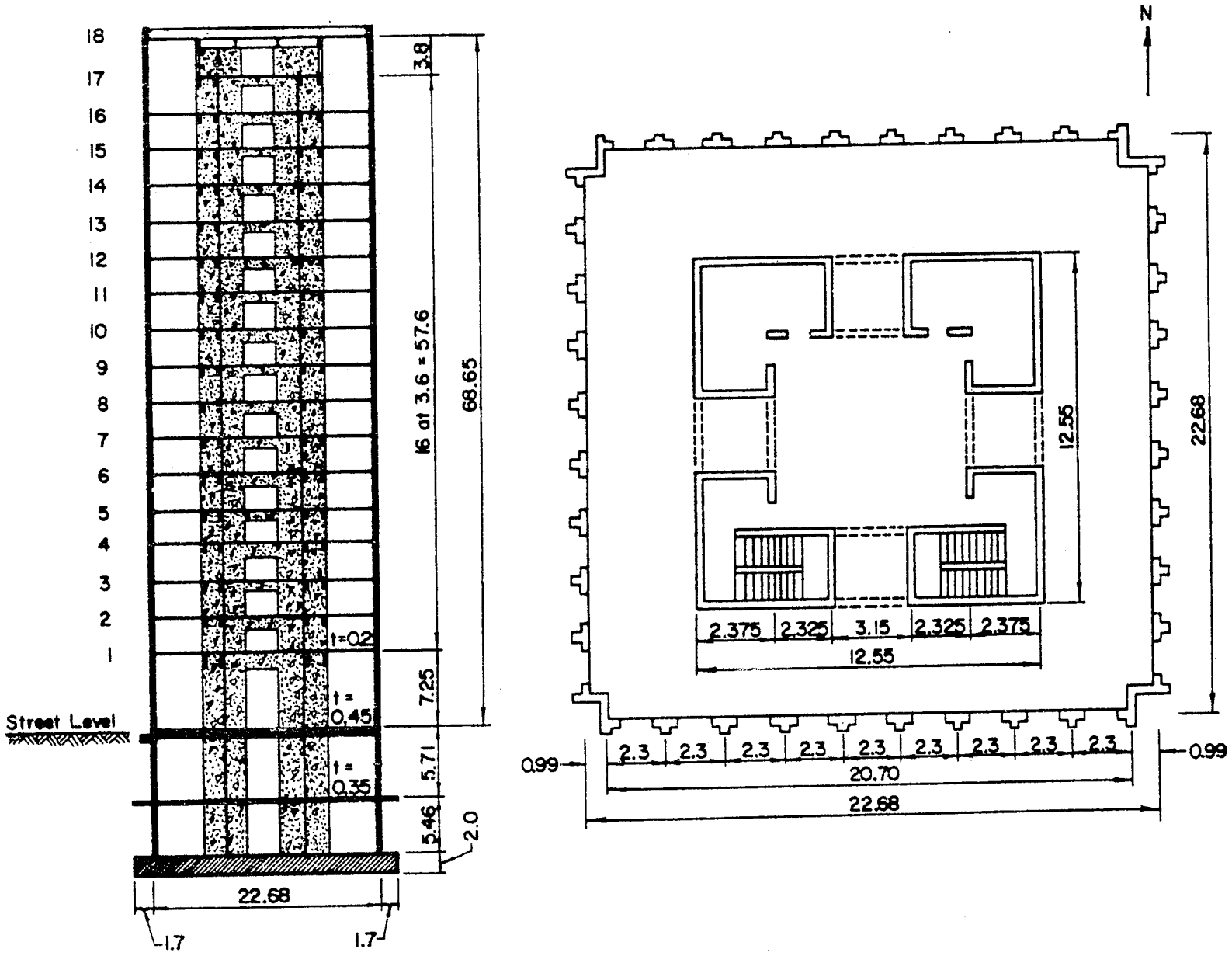
12- Özellikle köşe kolonları olmak üzere bütün kolonların tasarımı iki eksenli eğilme etkilerine göre yapılmalıdır.

13- Yükseklik/ Derinlik oranı 4'den büyük olan yapılarda yüksek modların etkileri önem kazandığından tasarımda dikkate alınmalıdır.

3.4 1972 Managua Depremi

Bu depremin çok katlı yapılar açısından en önemli özelliği Managua şehrinde depremin merkezinde bulunan biri betonarme çerçeve taşıyıcı sistemli diğeri ise perde duvar çekirdekli çerçeve sistemli iki çok katlı yapının deprem gördükleri hasarın farklılığı olmuştur. Perde duvarlı yapıda mimari ve taşıyıcı olmayan sistem hasarı çok sınırlı kalırken, çerceveli yapıda mimari ayrıntılar ve yapı içindeki eşyalar çok ağır hasar görmüştür. Perde duvarı da olan yapı depremden sonra çok minimum bir onarım ile kullanılabilecek bir durumda iken salt çerçeveli yapıda yapı bedelinin çok önemli bir miktarına ulaşan onarım gereği ortaya çıkmıştır. Çerçeveli yapının taşıyıcı sisteminde bir hasar olmamasına karşın kullanım açısından çerçeveli yapı ağır hasarlı olmuştur. Bu depremde çok katlı yapılar hemen depremin merkezinde yer almışlardır. Depremin mağnitüdü Richter ölçeğine göre 5.6 gibi oldukça küçük bir miktardadır. Depremde Managua'da ölçülen maksimum yer ivmesi 0.4 g civarında olmuştur. Depremin merkezinde alınan kuvvetli yer hareketi kaydında hakim periyotların 0.0-0.5 saniye bölgesinde olduğu, çok katlı yapıların periyot bölgesinde ise yer hareketinin genliğinin çok büyük olmadığı anlaşılmaktadır.

Perde Duvarlı Yapı:1965-1967 yılları arasında yapılmış 18 katlı betonarme Banco de America binasının plan ve kesit görünüşü Şekil-11'de verilmektedir(Sözen ve Shibata 1973). Binada deprem hasarı perde duvarları birbirine bağlayan bağ kirişlerinde kılcal çatlaklar oluşması ile sınırlı kalmıştır(Selna ve Cho 1973). Betonarme perde duvarlar depremin yanal hareketinin tümünü almış bazı perde duvarlarda katlar arasında hafif kılcal x-çatlakları görülmüştür. Bu arada bazı katlarda döşeme ile perde duvarın birleşim yerlerinde döşemede hafif çatlaklar gözlenmiştir. Kısaca yapının taşıyıcı perdelerinde önemli hasar olmamıştır(Selna and cho 1973). Yapının kat yatay kesme kuvveti kapasite katsayısı ile

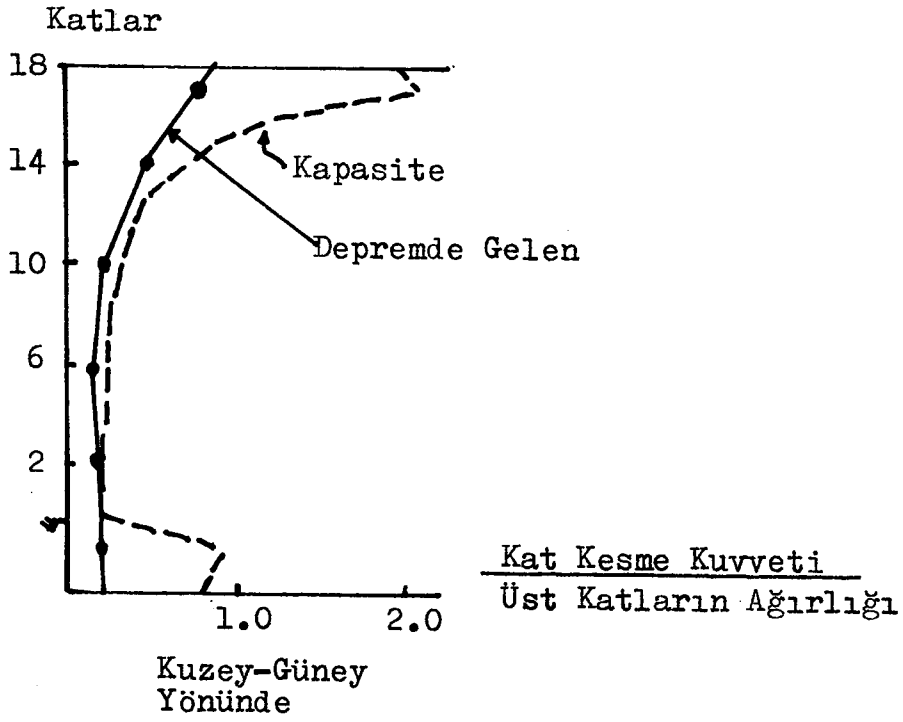


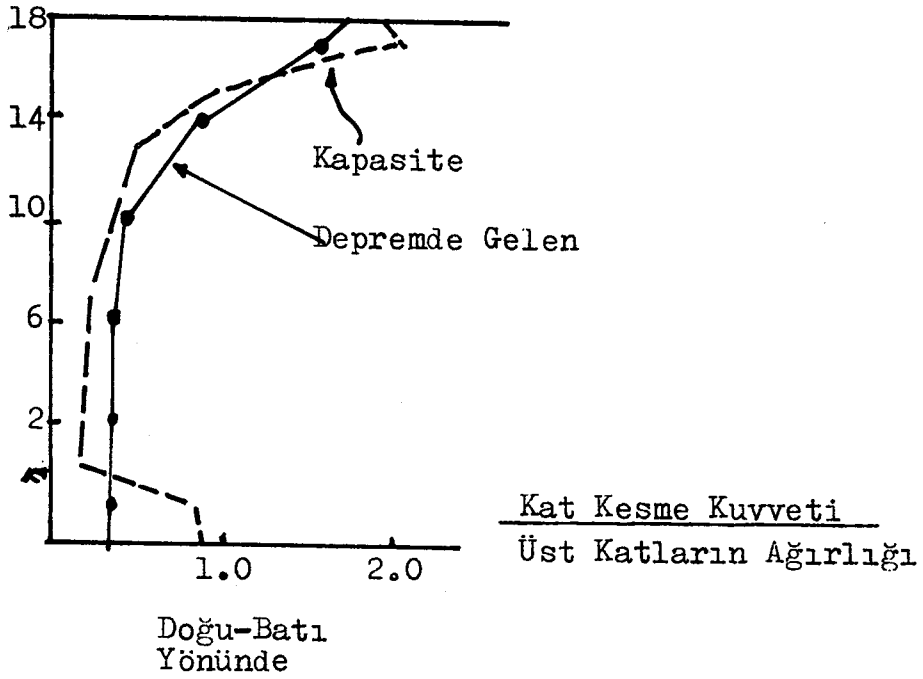
Şekil-11 Banco de America Binasının Düşey Kesidi ve Plan Görünüşü

depremde gelen yatay kuvvet katsayısı birbirine yakın olmuştur. Bu depremde yapıya gelen maksimum deprem yatay yük katsayısı 0.48 g kadar olmuştur. Şekil-12.

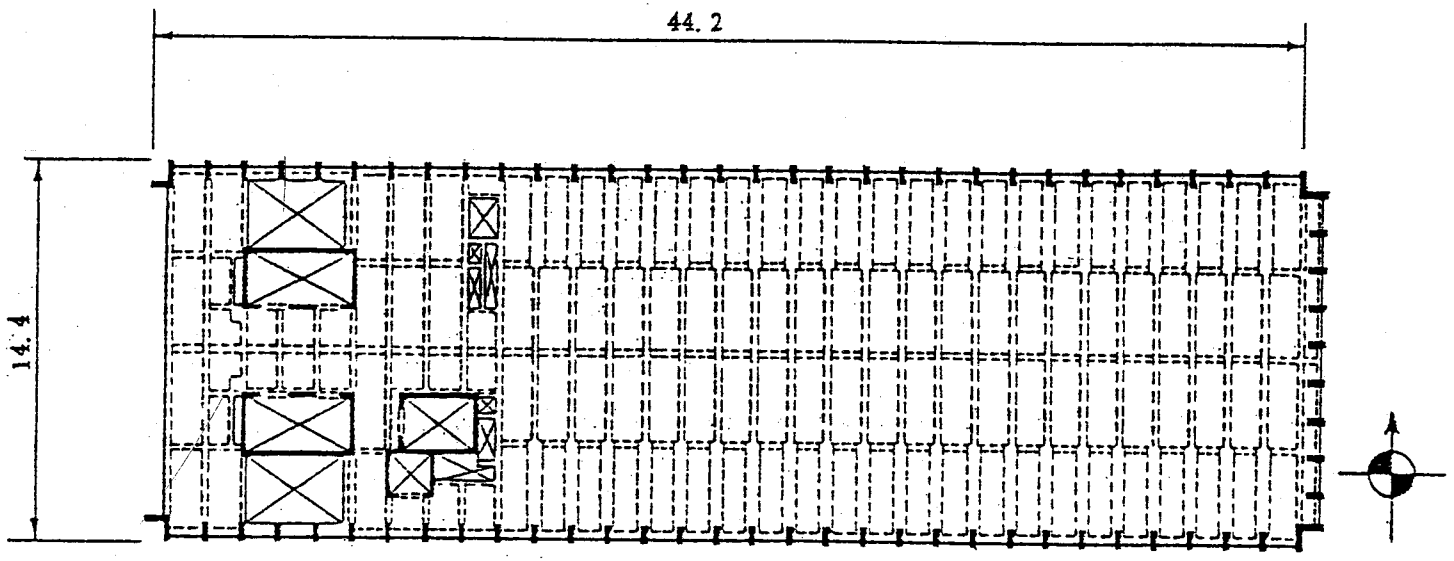
Çerçeveli Yapı: Perde duvarlı yapının hemen yanında yer alan Banco Central Binası 15 katlıdır 1962-1964 yıllarında yapılmıştır. Şekil-13'de yapının plan görünüşü verilmektedir. Yapının cephesindeki narin kolonların hepsinin alt ve üst uçlarında çatlaklar oluşmuştur. Bu kolonların uçlarında plastik mafsallaşma başlamıştır. Kolonlar arasındaki tuğla bölmeler çatlamıştır. Asansör boşluğu kenarındaki döşemeler ile asansör perde duvarları arasında çatlaklar oluşmuş. Asansör boşluklarını bağlayan bağ kirişlerinde kırılmalar olmuş, ayrıca kesme kırılmaları ve devrilme momenti hasarı belirtileri gözlenmiştir(Wylie 1973). Banco Central binasında yatay yüklerin esnek olan çerceveler atarafından alınması öngörülmesine rağmen asansör boşluğu çevresindeki perde duvarlarında gelen yatay yüklerin yaklaşık % 35'ini aldığı sanılmaktadır. Binada daha çok doğu-batı yönünde kuvvetli sallanma olmuştur. Yapıda çok önemli boyutta mimari ve taşıyıcı olmayan aksam hasarı olmuştur. Asma tavanlar, bölme duvarları bütün yapı yüksekliği boyunca düşmüş devrilmiş ve yıkılmıştır. Merdiven boşluklarının çevrelerindeki asmolen dolgu duvarları yıkılmış ve merdivenlerden geçmek olanaksızlaşmıştır. Bankanın müşterilere açık geniş salonunun asma tavanı tümü ile yıkılmıştır. Depremin çalışma saatleri dıyında olması nedeni ile binanın boş oluşu yıkılan ve devrilen şeylerin insanlara zarar vermesine ve de yapı içinde panik olmasına yol açılmamıştır. Yapının çerçeveli taşıyıcı sistemli olmasından dolayı çok esnek oluşu yapı içindeki eşyaların ve taşıyıcı olmayan bölümlerin ciddi hasarına yol açmıştır.

Bu depremde birbirine çok yakın iki çok katlı yapıdan perde duvarı olanda hasarın salt çerceveli yapıya göre çok az olması yapı içindeki eşyaların korunması için çok katlı yapıların daha rijit olan perde duvarlı olarak yapılması ve yapının yanal ötelemelerinin





Şekil-12 Banço America Binasının Kat Kesme Kuvveti Katsayıları



Şekil-13 Banco Central Binasının Plan Görünüşü

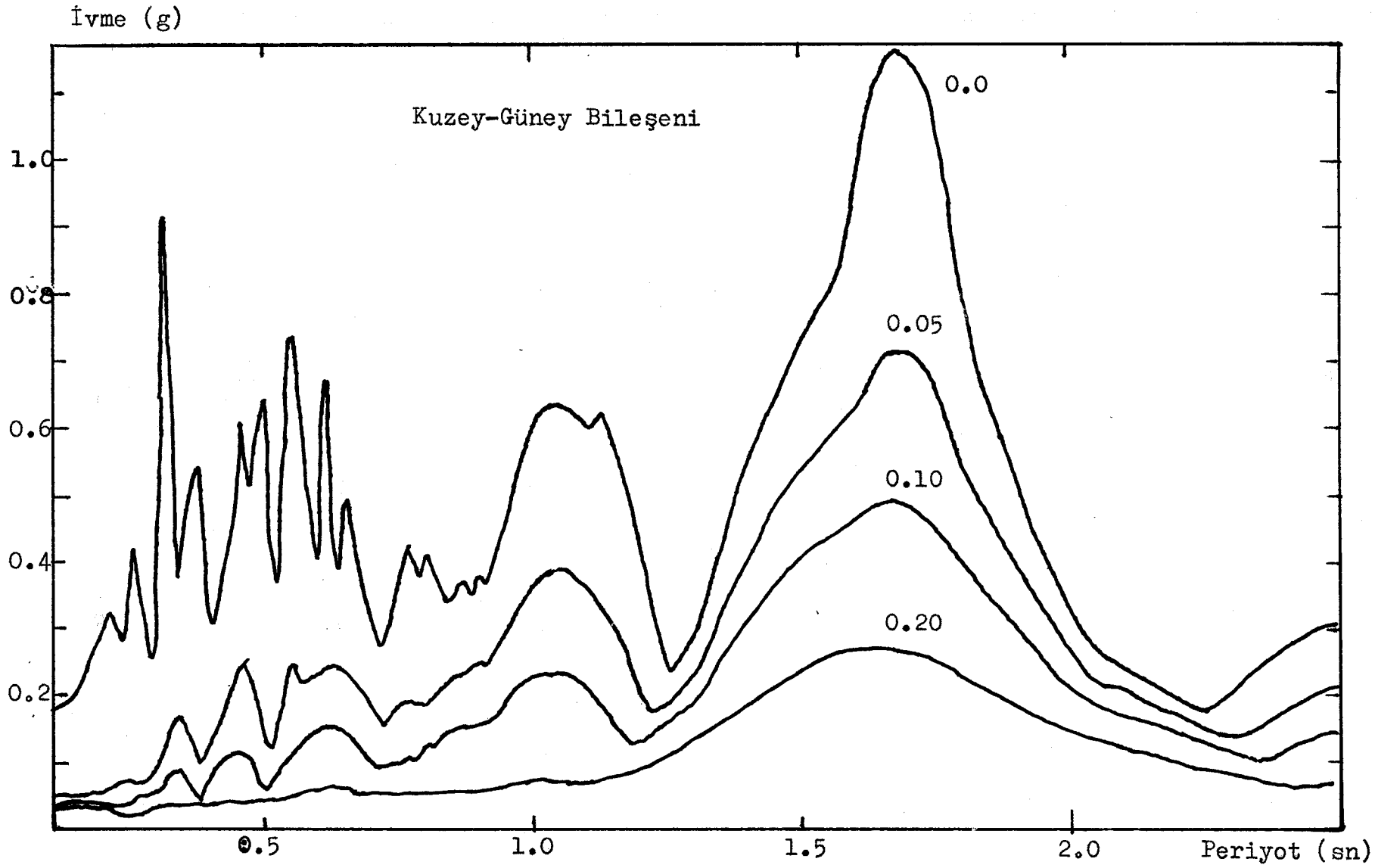
sınırlanarak yapı içindeki eşyanın korunması gereği ortaya çıkmış ve perde duvarlar ile bunun sağlanabileceği anlaşılmıştır. Çok katlı yapıların mutlaka perde duvarlı yada perde duvarlı çerçeveli olarak yapılması gereği bu depremden sonra tartışılmaz olmuştur(Berg 1973)

3.5 1977 Vrança Depremi

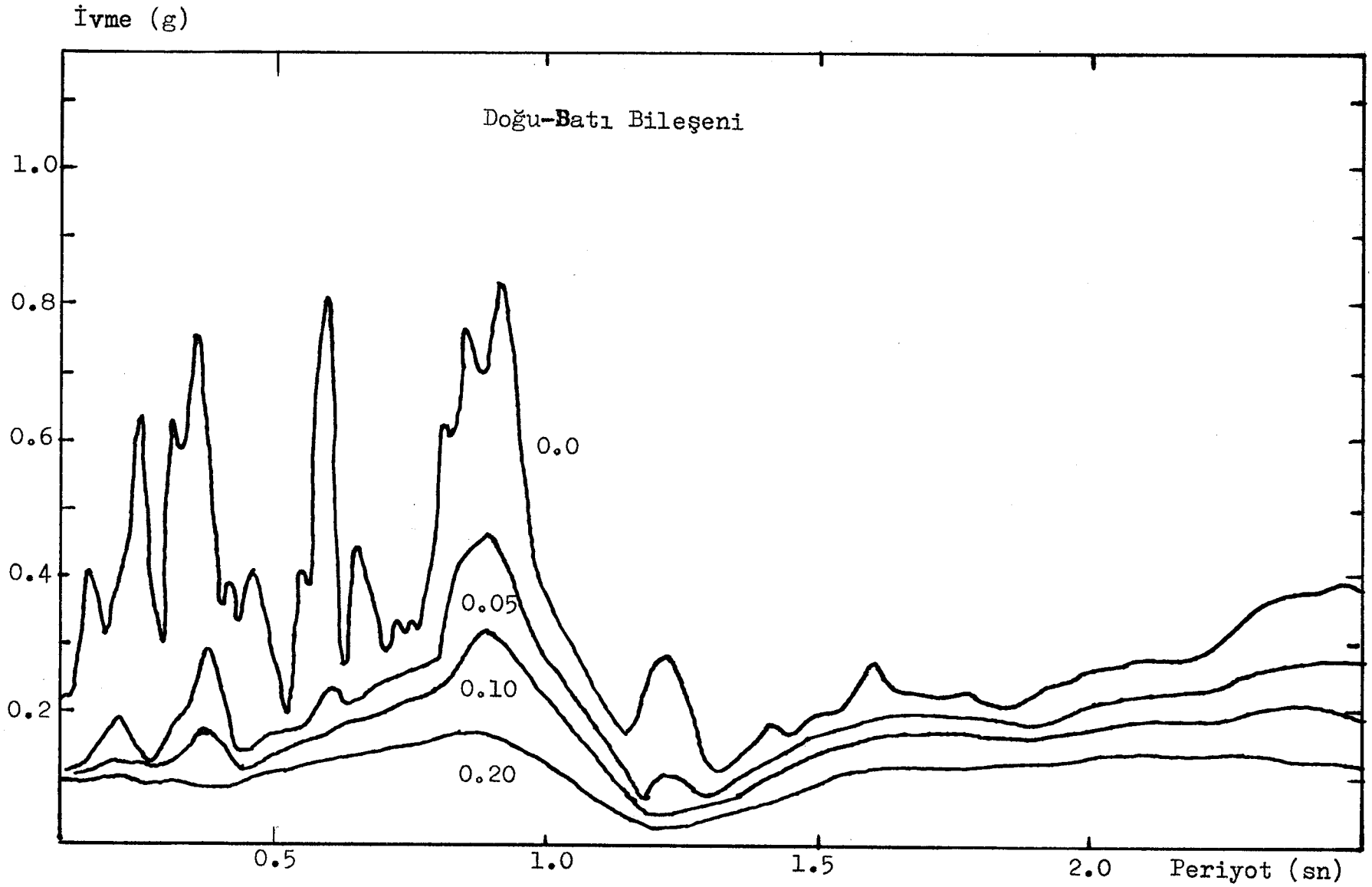
Richter ölçeğine göre mağnitüdü 7.2 olan bu depremin merkezinden 160 km kadar güneybatıda yer alan Bükreş kentinde özellikle yüksek yapılarda hasar olmuştur. Depremin çok derin odaklı olması (110 km) deprem dalgalarının enerjisinden fazla kaybetmeden çok uzaklardan hissedilmesine yol açmıştır (Tezcan ve Diğerleri 1977). Depremin kuvvetli yer hareketi Bükreş'de kaydedilmiştir. Bu kayıttan Kuzey-Güney, Doğu-Batı ve Düşey bileşenlerinde hesaplanmış mukabele spektrumları (Tezcan ve Diğerleri 1977) Şekil-14,15 ve16 da verilmektedir. Buradan görüleceği gibi harekette uzun periyotlar hakimdir. Bükreş'in yerel zemin yapısı oldukça yumuşak olduğu, genellikle lös, kumlu killi tam sıkışmamış birikintilerden oluştuğu ve bunun sonucunda da zeminde uzun periyotlu deprem hareketlerinin daha da büyütüldüğü görülmektedir. Bu açıdan Bükreş'de depremin yer hareketi hem uzak deprem olduğu için uzun periyotlu olmuş ve bu hareket esnek olan yüzey tabakaları tarafından daha da büyütüldüğü için uzun periyotlu yapıları, çok katlı, daha çok etkileyecek bir deprem yer hareketi oluşmuştur. Bunun sonucu alçak, masif ve ağır olan yığma kargir yapılarda hasar çok az olmuştur. Buna karşılık çeşitli zamanlarda yapılmış çok katlı betonarme yapılarda daha fazla hasar ve yıkım olmuştur.

Depremin hasarını yerinde inceleyen Tezcan ve Diğerleri (1977)'nin vardıkları sonuçlardan çok katlı yapılar için geçerli olanlar kısaca aşağıdaki gibidir:

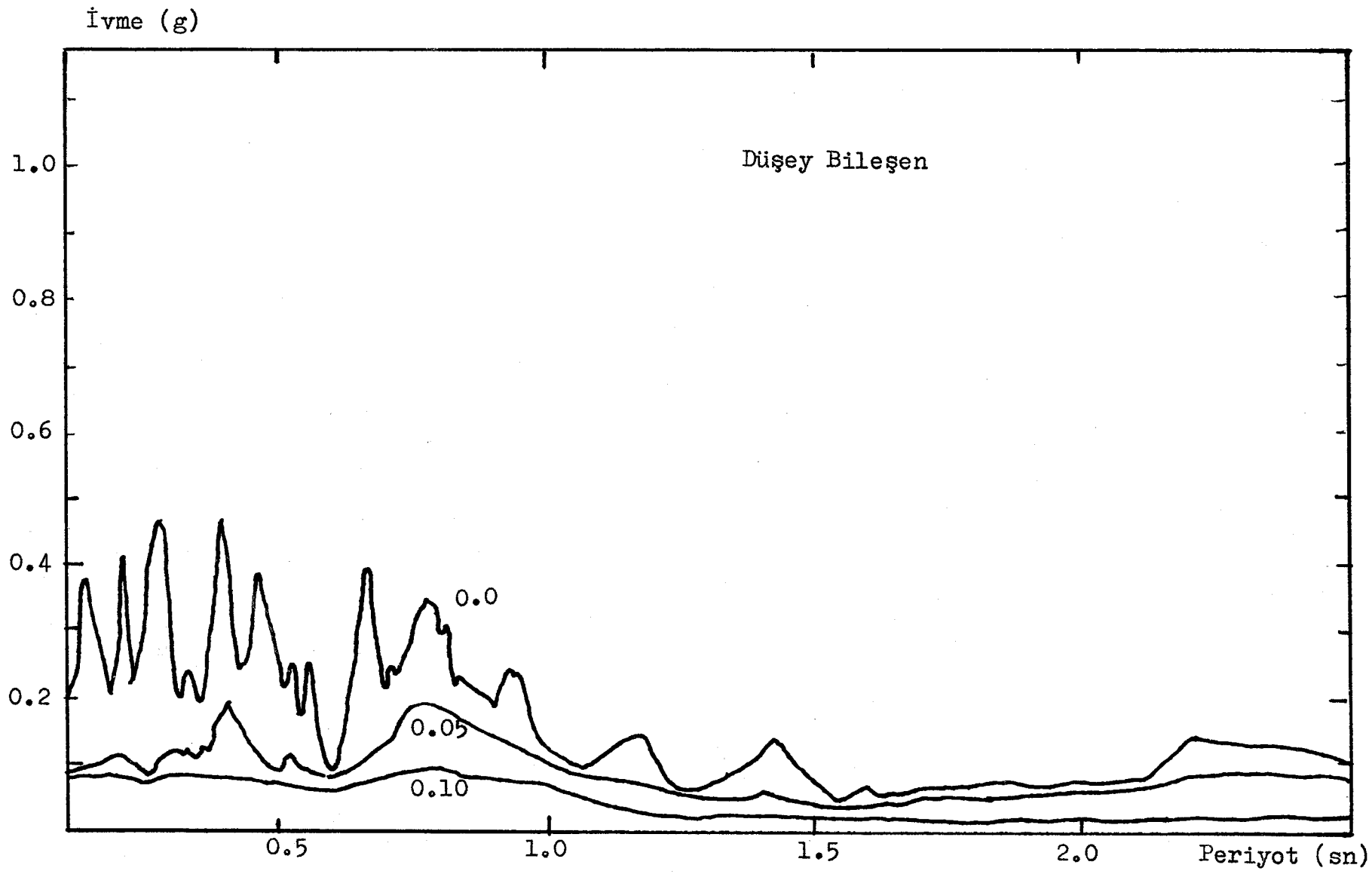
1- Deprem 1nci mod titreşim periyotları 1.0-1.5 saniye civarında olan yüksek, narin yada esnek yapılarda daha etkili olmuştur ki bunlar genellikle çok katlı yapılardır. Bu sınıfa giren ve de



Şekil-14 4 Mart 1977 Vrança Depremi Kuzey-Güney Bileşeni İvme Spektrumu(Tezcan ve Diğerleri 1977)



Şekil-15 4 Mart 1977 Vrança Depremi Doğu-Batı Bileşeni İvme Spektrumu (Tezcan ve Diğerleri 1977)



Şekil-16 4 Mart 1977 Vrança Depremi Düşey Bileşeni İvme Spektrumu (Tezcan ve Diğerleri 1977)

çeşitli zayıflıkları olan yapılarda hasar ağır olmuş bazıları yıkılmıştır.

2- Hasar gören modern yerinde dökme betonarme çok katlı yapılarda 1nci mod titreşim periyotları ile deprem yer hareketinin hakim periyotları birbirine çok yakın olmuş bu da hasarı artırmıştır. Kötü beton kalitesi ve hatalı donatı yerleştirme hasarın belli diğer nedenleridir. Bu arada üst katlardan zemin kata geçişte ani rijitlik azalmaları olan yapılarda da hasar fazla olmuştur.

3- Bükreş'de önemli sayıda çok katlı panolu prefabrike yapı bu depremin deneyiminden geçmiştir. 9-11 katlı betonarme panolu bu yapılar deprem sırasında çok iyi davranmışlardır. Panoların yatay ve düşey derzlerinde hafif çatlaklardan başka hasar olmamıştır. Ancak bu yapıların oldukça rijit oluşları onların periyotları bakımından depremin ivme mukabele spektrumunun en kritik bölgelerinin dışında kaldıkları depremden daha az etkilenmelerine yardım ettiği düşünülmelidir. Bir başka deyişle bu yapıların dinamik özellikleri ve deprem yer hareketinin dinamik özelliklerinin farklı oluşu yapıların fazla zorlanmadıklarını göstermektedir. Bükreş'deki prefabrike yapılar için bu deprem ciddi bir deneyim olarak ele alınmamalıdır.

3.6 1985 Meksiko City Depremi

Richter ölçeğine göre 8.1 büyüklüğünde olan bu depremin merkezinden 350 km uzakta olan Meksiko City'deki çok katlı yapılarda büyük hasar ve yıkım olmuştur. Bu hasarda yine kentin üzerinde yer aldığı zeminin yapısı ile çok katlı yapıların dinamik özellikleri ve depremin uzak deprem oluşu etkili olmuştur. Bütün bu faktörlere yapılardaki taşıyıcı sistem, yapım ve tasarım kusurları eklenince çok sayıda çok katlı yapı yıkılmış ve onbinlere ulaşan can kaybı olmuştur.

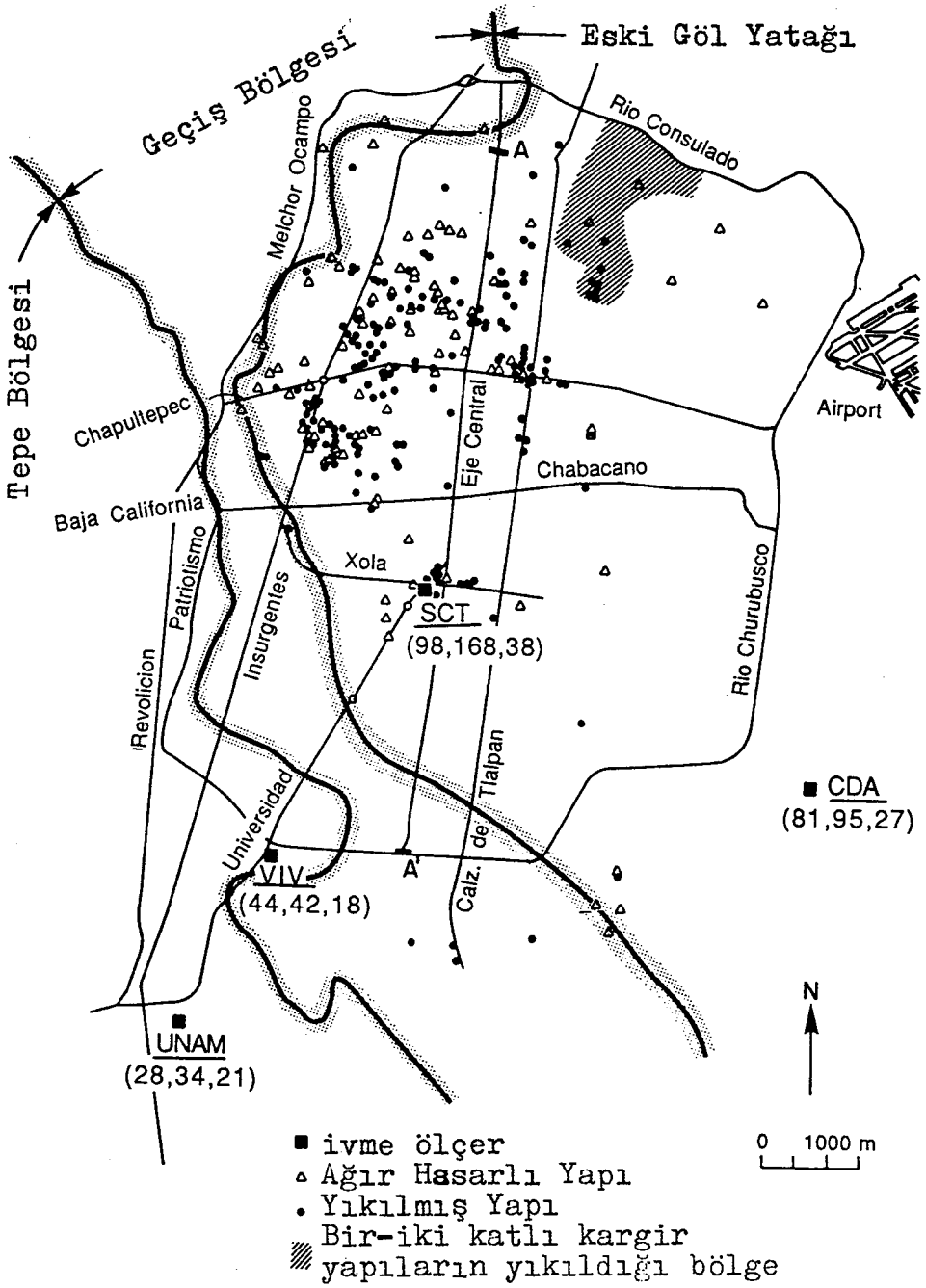
Meksiko City'nin zemin yapısı: Meksiko şehri eskibir göl yatağı birikintisi üzerinde kurulmuştur. Bu açıdan şehir üç bölgeye ayrıl-

maktadır: Eski göl yatağı, tepelik bölge ve bu iki bölgenin arasındaki geçiş bölgesi (Şekil-17) Tepe bölgesinde en sıkı zeminler yer almaktadır. Depremde yıkılan yapıların hemen hepsi eski göl yatağı üzerindedir (Anders n ve Diğerleri 1986). Göl yatağında çok yumuşak bir kil tabakası vardır ve bu tabakanın üst 30-40 metrelik bölümünde su oranı çok yüksektir. Bu zemin üzerine yapılmış yapılarda büyük oturmalar olmaktadır. Göl yatağı üzerinde alınan ivme kayıtlarında süre 5 dakikadır ve hakim periyot çok uzundur. Şekil-18 şehrin çeşitli yerlerinde alınmış kuvvetli yer hareketi ivme kayıtları verilmektedir. Buradan görüleceği gibi yer hareketinin periyodu özellikle yumuşak zeminler üzerinde çok uzundur. Şekil-19'da Meksiko şehri için kuvvetli deprem yer hareketi kaydı alınan noktalarda deprem hesap katsayısı ve 1985 depreminin mukabele spektrumları verilmektedir. Yumuşak zemin dışındaki bölgelerde deprem katsayısı oluşan hareketin mukabele spektrumu değerinin altında iken, yumuşak zeminde oluşan hareketin genliği özellikle 1.0-2.0 saniye periyot bölgesinde proje katsayısının 5 katı kadar büyüktür.

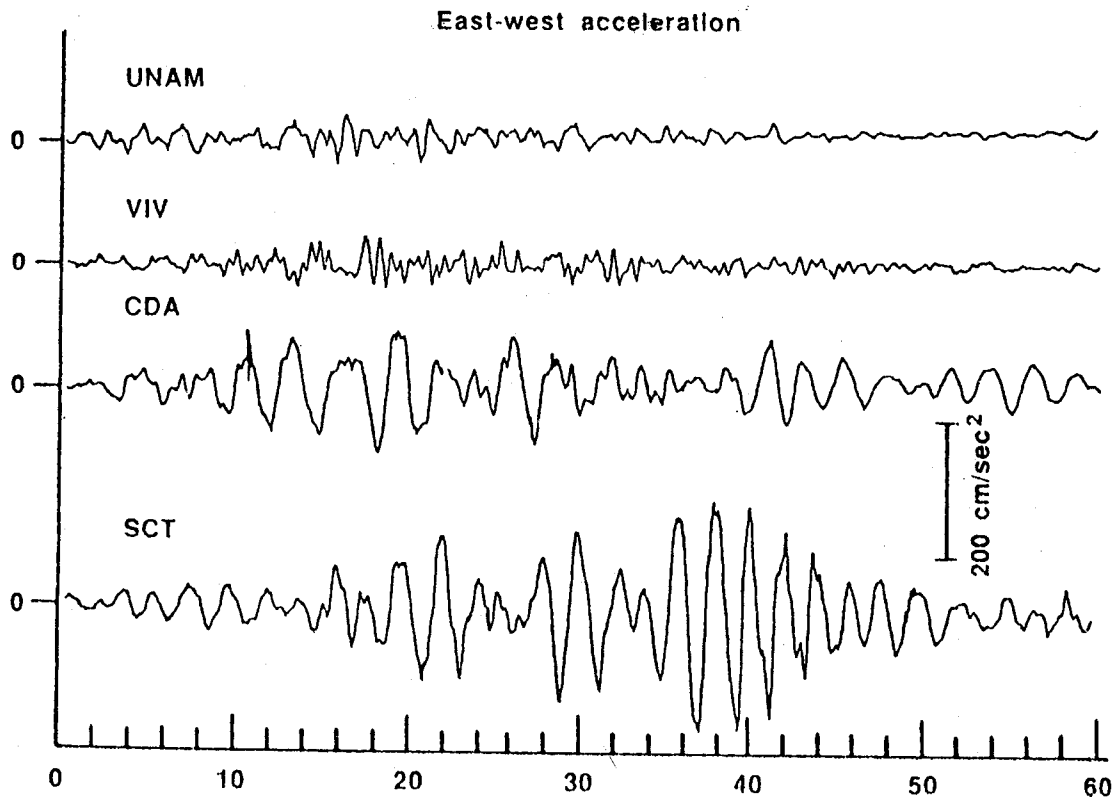
Meksiko şehrinde yıkılan ve ağır hasar gören yapıların tablosuna bakılınca (Fairweather 1986) bu tür yapıların 6-10 kat arasında olduğu görülmektedir. Bu durum periyodu deprem yer hareketinin periyoduna yakın olan yapılarda deprem daha yıkıcı olmuştur.

Depremde çok sayıda yapının üst katlarında hasar olmuştur. Ayrıca yine birbirine şiddetle çarpan yapılar hasar görmüşlerdir. Bu tür hasarın nedeni çok yumuşak zemini olan Meksiko'daki yüksek yapıların tabanında önemli ölçüde dönme oluşmuş olmasıdır (Rosenblueth 1986)

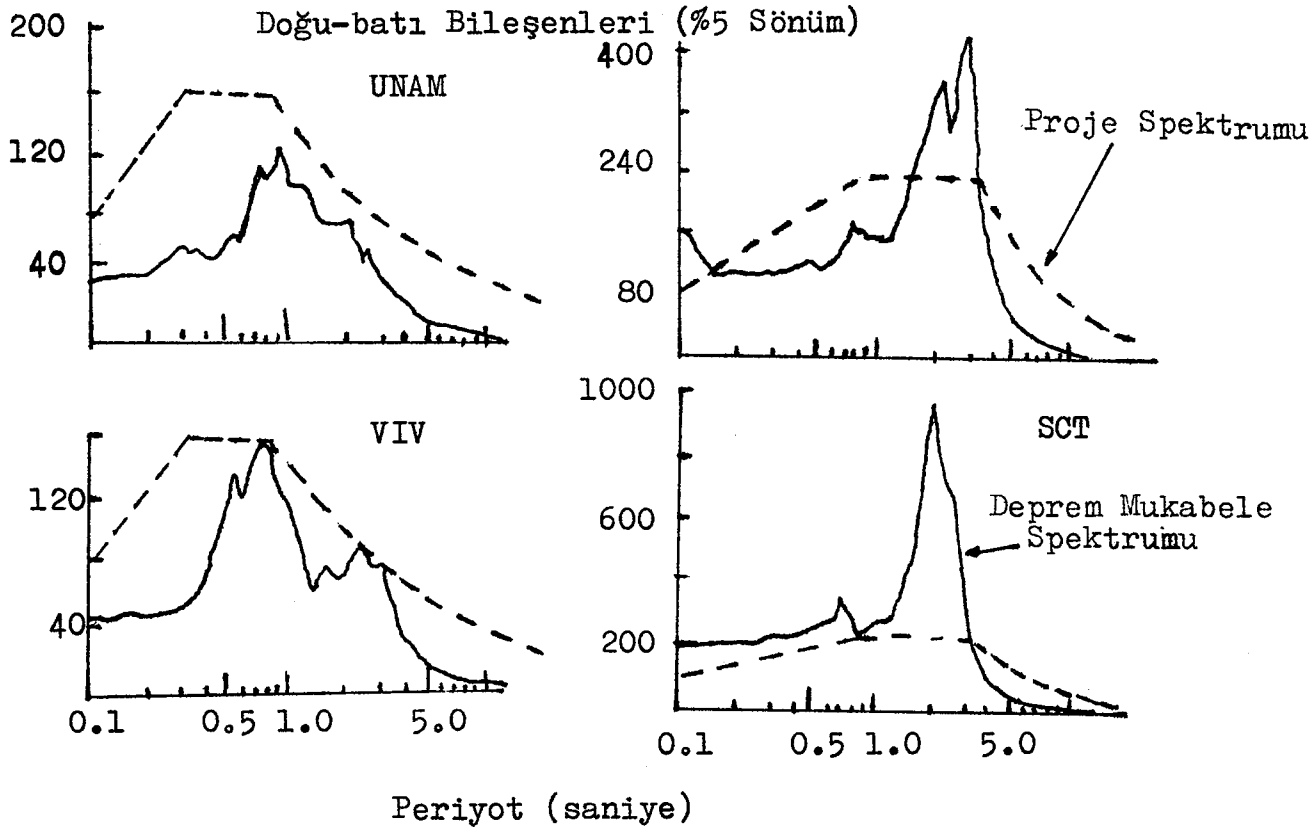
Kirişsiz döşemeli yapılarda da hasar büyük olmuştur. Kolon-döşeme bağlantısında düktilitenin zayıf oluşu ve depremin uzun sürmesi sonucu birbirini izleyen elastik limitlerin çok ötesinde çekme-basınc devresel yüklemelerin çok sayıda olması sonucu ek ve bağ-



Şekil-17 Meksiko Şehrinin Zemin Bölgeleri, Hasar Dağılımı ve İvme Ölçülen Noktalar



Şekil-18 Meksiko Şehrinin Çeşitli Yerlerinden Alınmış Deprem Kayıtları



Şekil-19 Meksiko'da Alınmış Kayıtlardan Hesaplanmış Mukabele Spektrumlarının Proje Spektrumları ile Karşılaştırılması(Anderson ve Diğerleri (1986)

lantı yerleri hızla düşük devirli yorulma ile taşıma güçlerini yitirerek yıkılmaya yol açmışlardır (Rosenblueth 1986).

Meksiko depremi çok uzakta olan depremin yarattığı uzun periyotlu yer hareketinin yine çok uzun periyotlu hareketleri büyüten yumuşak zeminlerde bulunan uzun periyotlu yapıların üzerinde etkili olması sonucu büyük hasara yol açmıştır. Bu açıdan Meksiko depremi çok katlı yapılar için şimdiye kadar benzeri olmayan bir deprem değildir. Benzer durum 1977'de Bükreş'de de oluşmuştur. Ancak Meksiko'nun 18 milyon civarındaki nufusu ve Bükreş'e göre daha yoğun olan yapılaşması, özellikle çok katlı yapılar bakımından, daha etkili olmuştur.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çok katlı yapıların deprem davranışları üzerine şimdiye kadar edinilmiş deneyimler şöyle sıralanasilir:

1-Uzakta olan şiddetli depremler yumuşak dolgu zeminler üzerinde yapılmış çok katlı yapılar için kritik olmaktadır.

2-Çok katlı yapılarda perde duvarlı sistemler yatay yüklere karşı hem yapının hemde yapı içindeki eşyaların korunması bakımından çok etkili olmaktadır.

3-Boşluklu perde duvarlı yapılarda perdeleri birbirine bağlayan bağ kirişleri mafsallaşarak depremin enerjisini tüketebilmekte ve yapıların depremlerden fazla zarar görmeden çıkmasını sağlamaktadır.

4-Yapıların dinamik özellikleri (periyot ve sönüm) deprem sırasında önemli ölçüde değişmektedir. Yapının deprem sırasında bir miktar hasar görerek periyodunun uzaması onu yer hareketinin periyot açısından kritik bölgesine yaklaştırabileceği gibi dışına da çıkarabilmektedir. Depremden önce ve sonra yapılacak periyot

ölçümleri ile yapının depremden etkilenme derecesi belirlenebilmektedir.

5-Yumuşak zeminler üzerinde olan çok katlı yapılarda zemin-Yapı karşılıklı etkileşmesi önemlidir ve tasarımda mutlaka dikkate alınmalıdır.

6-Çok katlı yapılarda yapı yüksekliği ve planda rijitliklerin uyumlu bir biçimde dağılması, ani rijitlik azalmalarının olmaması deprem açısından çok önemlidir. Özellikle çok katlı yapıların zemin katlarında ani rijitlik azalmaları 'esnek zemin kat' olayı denilen ve bütün etkilerin en ağır biçimde zemin kat oluşmasına yol açan davranışa ve yıkılmaya yol açmaktadır. Perde duvarların zemin katta kolonlara taşıtılması gibi rijitlik azalmaları kritik olurken, dolgu duvarları gibi taşıyıcı olmayan bölümlerin bile zemin kat da yapılmaması 'esnek zemin kat' olayına yol açabilmektedir.

7-Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasında 3 ve 4 ncü Bölge olarak belirtilen yerlerde uzakta olan şiddetli depremlerin etkisi beklenmektedir. Buralarda yapılacak çok katlı yapının zemin durumuna göre 200-300 km uzakta olacak şiddetli depremin yer hareketinden etkilenebileceği özellikle yumuşak zeminlerde bu hareketin uzun periyotlu yapılar için daha büyük olacağı düşünülerek deprem yatay yük katsayısının seçiminde daha emniyetli olunmalıdır.

KAYNAKLAR

Anderson,J.G., and Others (1986) "Strong Ground Motion From the Michoacan Mexico Earthquake" Science Vol 233. Sept. 5 pp 1043-1049

Aytun,A. (1972) "Yapıların Doğal Titreşim Periyotlarının Deneysel Yolla Çözümü" Türkiye de Deprem Sorunu ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 2-5 Şubat, ODTÜ, Ankara

Berg,G.V., and Degenkolb,H.J. (1973) "Engineering Lessons from the Managua Earthquake" Managua, Nicaragua Earthquake of December 23,1972, EERI Conference Proceedings, Vol.II pp 746-767

Erdik,M.,Bayülke,N., Başaran,C., ve Güler,F. (1985) "Sabancı Yurt Binası Dinamik Deneyleri" Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi ODTÜ-Ankara

Ergünay,O., Bayülke,N., ve Gencoğlu,S. (1974) "1 Şubat 1974 İzmir Depremi Raporu" İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara

Fairweather,V. (1986) "Rebuilding Mexico City" Civil Engineering January, pp 36-37

Hanson,R.D., and Degenkolb,H.J., (1969) "The Venezuela Earthquake July 29, 1967" American Iron and Steel Institute.

Hayashi,S. and Others (1970) "Acceleration Response Spectra on Various Site Conditions" Proc. of the 3rd Japan Earthquake Engineering Symposium

Mulhern,M.R., and Maley,R.P. (1973) "Building Period Measurements Before, During and After the San Fernando Earthquake " The San Fernando California Earthquake of February 9, 1971 Vol. 1 Part B pp 725-734, US Department of Commerce

Rosenblueth,E. (1986) "The Mexican Earthquake: A First Hand Report" Civil Engineering January, pp 38-40

Seed,H.B., Idriss,I.M., and Kiefer,F.W. (1969) "Characteristics of Rock Motions During Earthquakes" Journal Soil Mech. and Foundation Division ASCE 95, No SM5 Sept. pp 1199-1218

Seed,H.B., Ugas, C., and Lysmer,J. (1974) "Site Dependant Spectra for Earthquake Resistant Design" Report No EERC 74-12, Earthquake Engineering Research Center, U. of California, Berkeley

Selna, L.G., and Cho, W.D. (1973) "Banco de America, Managua A High-Rise Shear Wall Building Withstands a Strong Earthquake" Managua, Nicaragua Earthquake of December 23, 1972, EERI Conference Proceedings Vol. II pp 551-570

Sözen,M.A., and Shibata,A. (1973) " An Evaluation of the Performance of the Banco de America Building Managua, Nicaragua" Managua, Nicaragua Earthquake of December 23, 1972, EERI Conference Proc. Vol. II pp 529-550

Steinbrugge, K.V. (1970) "Earthquake Damage and Structural Perfor-Mance in the United States" Earthquake Engineering by R.L. Wiegel, Coordinating Editor, Prentice-Hall, pp 167-226

Tezcan,S.S., Yerlici,V. ve Durgunoğlu,H.T. (1977) "Romanian Earthquake of March 4, 1977" Internal Report No. 77-12E, Boğaziçi University Earthquake Engineering Research Institute, İstanbul

Wyllie, L.A., Jr. (1973) "Performance of the Banco Central Building" Managua, Nicaragua Earthquake of December 23, 1972,EERI Conference Proceedings Vol.II pp 571-585

Meksiko Depreminde Hasar Gören Yapıların Dağılımı

Yapı Tipi	Hasar Durumu	Yapıldığı Yıl ←1957	1957-76	1976→	Kat Sayısı ≤5	6-10	11-15	>15	Yıkık ve Ağır Hasar
Betonarme Çerçeve	Yıkık	35	59	13	36	62	9	0	107
	Ağır	9	19	7	8	23	4	1	36
Çelik Çerçeve	Yıkık	5	4	0	4	2	1	2	9
	Ağır	1	0	0	0	0	1	0	1
Kirişsiz Döşeme	Yıkık	3	35	12	23	23	4	0	50
	Ağır	5	20	11	9	18	8	0	35
Kargir	Yıkık	7	4	1	10	2	0	0	12
	Ağır	2	3	0	4	1	0	0	5
Diğer	Yıkık	0	1	1	1	1	0	0	2
	Ağır	2	4	2	6	2	0	0	8
Toplam	Yıkık ve Ağır	69	149	47	101	134	27	3	265