DOKUZ KATLI TÜNEL KALIP BİNA SONLU ELEMAN MODELİNİN ZORLAMALI TİTREŞİM TEST VERİLERİ İLE GÜNCELLENMESİ

O. C. Çelik[1], H. Sucuoğlu[2] ve U. Akyüz[2]

[1] *Yardımcı Doçent, İnşaat Mühendisliği Programı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampusu, Kalkanlı, Güzelyurt, KKTC, Mersin 10, Türkiye*
[2] *Profesör, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Üniversiteler Mahallesi, Dumlupınar Bulvarı, No:1, Çankaya, Ankara, Türkiye*
Email: occelik@metu.edu.tr

ÖZET:

Zorlamalı titreşim testleri, yapılara zarar vermeden, yapıların doğal titreşim periyotları (frekansları), mod şekilleri ve modal sönüm oranları gibi dinamik özelliklerinin saptanmasında kullanılan bir yöntemdir. Elde edilen bu özellikler, bina ve diğer yapıların özellikle deprem, rüzgar, vb. dinamik yüklere karşı tasarımında yönetmeliklerce belirlenen minimum yük değerlerinin hesabında kullanılırlar. Dinamik yapısal özellikler, sismik kırılganlık ve risk değerlendirme çalışmalarında yapıların dinamik davranışının tahmininde kullanılan sonlu eleman yapısal modellerin doğrulanması ve kalibre edilmesi için de oldukça değerlidir. Bu bildiride Türkiye'deki çok katlı toplu konut inşaatlarının tipik bir örneği olan dokuz katlı tünel kalıp bir binanın sonlu eleman yapısal modelinin, binanın taşıyıcı sistem inşaatı tamamlandıktan sonra uygulanan zorlamalı titreşim testi verileri ile güncellenmesi sunulmuştur. Binanın üç boyutlu doğrusal elastik sonlu eleman modelinde perde duvarları ve döşeme plakları kabuk elemanları ile modellenmiştir. Daha sonra serbest titreşim analiz sonuçları test verileri ile karşılaştırılmıştır. TS (Türk Standardı) 500'de verilen beton elastisite modülü sonlu eleman modelinde kullanıldığında olduğundan daha rijit bir bina elde edilmiştir; ACI (American Concrete Institute; Amerikan Beton Enstitüsü) 318'de verilen beton elastisite modülü ile çatlamamış (tüm) kesit eylemsizlik momentleri kullanıldığında ise test verileri ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Betonarme, bina, dinamik özellikler, dinamik test, doğal periyot (frekans), saha testi

1. GİRİŞ

Mevcut yapılara uygulanan zorlamalı titreşim testleri, yapılara zarar vermeden, yapıların dinamik özelliklerinin saptanmasında kullanılan direkt bir yöntemdir. Bu testlerde, üst katlardan birine monte edilen titreşim üretecinin yapıya uyguladığı düşük genlikli harmonik kuvvetin yapıda oluşturduğu titreşimler kaydedilir ve kayıtların sayısal sinyal işlemesinden yapının doğal titreşim periyotları (frekansları), mod şekilleri ve modal sönüm oranları tespit edilir. Elde edilen bu dinamik özellikler, bina ve diğer yapıların özellikle deprem, rüzgar, vb. dinamik yüklere karşı tasarımında yönetmeliklerce belirlenen minimum yük değerlerinin hesabında kullanılırlar. Dinamik yapısal özellikler, sismik kırılganlık ve risk değerlendirme çalışmalarında yapıların dinamik davranışının tahmininde kullanılan sonlu eleman yapısal modellerin doğrulanması ve kalibre edilmesi için de oldukça değerlidir.

Bu bildiride dokuz katlı tünel kalıp bir binanın sonlu eleman yapısal modelinin zorlamalı titreşim test verileri ile güncellenmesi sunulmuştur. Döşemeleri betonarme plaklardan duvarları ise betonarme perdelerden oluşan bu yapı Türkiye'deki çok katlı toplu konut inşaatlarının tipik bir örneğidir. Sekiz tane tek eksenli ivmeölçer ile cihazlandırılan bu bina yapısal olmayan elemanları monte edilmeden önce test edilmiştir ve böylece bu elemanların yapı tepkilerine olan belirsiz etkileri kapsam dışı bırakılmıştır. Zorlamalı titreşim testi ile saptanan dinamik özellikler, binanın sonlu eleman yapısal modelinde perde duvarlar ve döşeme plakların modellenmesinde kullanılan kabuk elemanların rijitlik katsayılarının kalibre edilmesinde kullanılmıştır.

(a) (b) (c)

Şekil 1. Binanın (a) test zamanındaki ve (b, c) güncel fotoğrafları

2. DOKUZ KATLI TÜNEL KALIP BİNANIN ZORLAMALI TİTREŞİM TESTİ

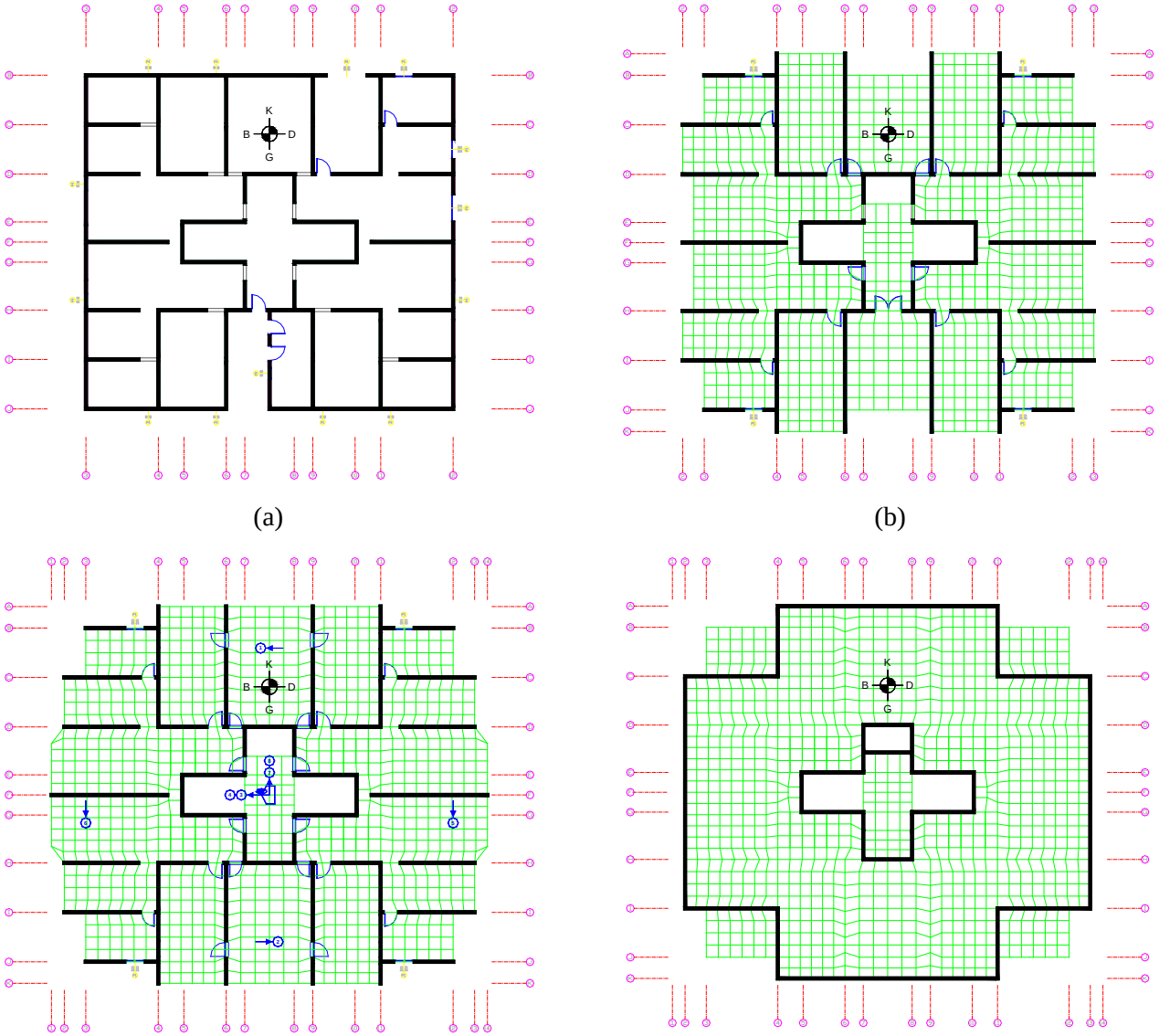
MESA Yonca Evler Sitesi Ankara'da tünel kalıp tekniği ile inşa edilmiş beş tane birbiri ile aynı dokuz katlı apartman bloklarından oluşmaktadır. Bu sitenin 4. blok binasına taşıyıcı sistem inşaatı tamamlandıktan sonra henüz yapısal olmayan duvar vb. elemanları monte edilmeden önce zorlamalı titreşim testi uygulanmıştır (Çelik, 2002). Şekil 1'de binanın test zamanındaki ve güncel fotoğrafları gösterilmektedir. Kat yüksekliği 2,8 m olan dokuz katlı binanın bir bodrum katı ve çatıya uzanan asansör ve merdiven kovası ile birlikte toplam yüksekliği 32,0 m'dir. Yaklaşık kare bir planı vardır; bodrumda 24,0 m'ye 21,6 m, tipik bir katta ise 28,4 m'ye 24,6 m ölçülerindedir. Bodrum, zemin, tipik ve çatı kat planları Şekil 2'de verilmiştir. Taşıyıcı sistem yerleşimi ve boyutları tünel kalıp tekniği gereği bodrum, zemin ve çatı kat hariç bina yüksekliğince aynıdır. Döşeme plakları 15 cm, perde duvarlar ise 20 cm kalınlığındadır. Binada C20 hazır beton kullanılmıştır. Radye temeli olan bina sert kilden oluşan bir zemine oturmaktadır (Ergun, 2000).

Binanın 8. kat geometrik merkezine monte edilen titreşim üretecinin binaya uyguladığı harmonik kuvvetin binada oluşturduğu titreşimler sekiz tane tek eksenli ivmeölçer ile kayıt edilmiştir. Şekil 2c'de titreşim üreteci ve ivmeölçerlerin yerleşim planı verilmiştir. Dört tane ivmeölçer (1, 2, 5 ve 6 nolu) 8. kata, iki tanesi (3 ve 7 nolu) 6. kata ve iki tanesi (4 ve 8 nolu) de 4. kata monte edilmiştir.

Zorlamalı titreşim testi kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularında ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve binanın bu doğrultulardaki 1. yanal modları harekete geçirilmiştir. Titreşim üretecinin çalıştırıldığı her frekans değerinde binanın kararlı-durum tepkileri kayıt edilmiş ve kayıtların sayısal sinyal işlemesinden ivme-frekans tepki eğrileri elde edilmiştir (Çelik, 2002). Kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularında ayrı ayrı elde edilen bu eğriler, hesaplanan doğal titreşim frekansları ve periyotları (f_{rez}, T) ve modal sönüm oranları (ξ) ile birlikte Şekil 3'te verilmiştir. Rezonans frekanslarında ölçülen tepkilerden elde edilen mod şekilleri daha sonra sunulmuştur.

3. ÜÇ BOYUTLU SONLU ELEMAN YAPISAL MODELİ

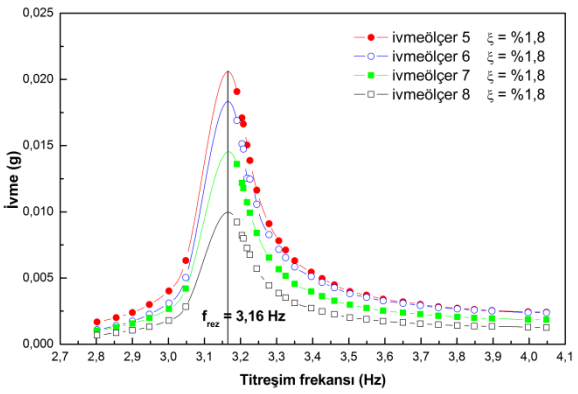
Binanın üç boyutlu doğrusal elastik sonlu eleman yapısal modeli SAP2000 programı (Computers and Structures, Inc., 2010) ile oluşturulmuştur (Şekil 4). Perde duvarlar ve döşeme plakların modellenmesinde (ince) kabuk elemanları kullanılmıştır. Perde duvarlardaki kapı ve pencere boşlukları, döşemelerdeki asansör ve merdiven boşlukları modelde göz önüne alınmıştır. Bodrum ve çatı katları da modellenmiştir. Zemin, tipik ve çatı kat döşemelerinin sonlu eleman ağı Şekil 2b–d'de verilmiştir. Analizlerde yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamıştır.



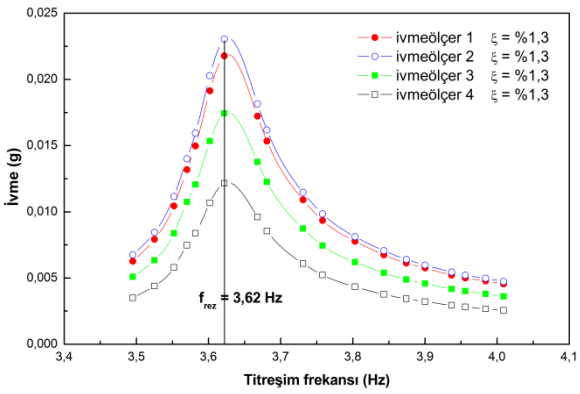
(a) (b)

(c) (d)

Şekil 2. (a) Bodrum, (b) zemin, (c) tipik ve (d) çatı kat planları; titreşim üreteci ve ivmeölçerlerin yerleşim planı; sonlu eleman ağı

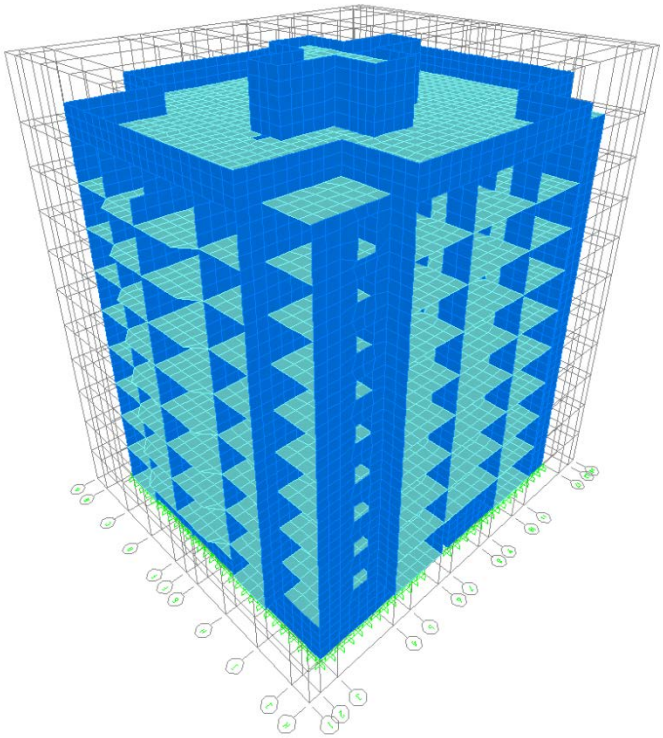


(a) T = 0,32 s



(b) T = 0,28 s

Şekil 3. (a) Kuzey-güney doğrultusundaki testte 5–8 nolu, (b) doğu-batı doğrultusundaki testte 1–4 nolu; ivmeölçerlerden elde edilen ivme-frekans tepki eğrileri



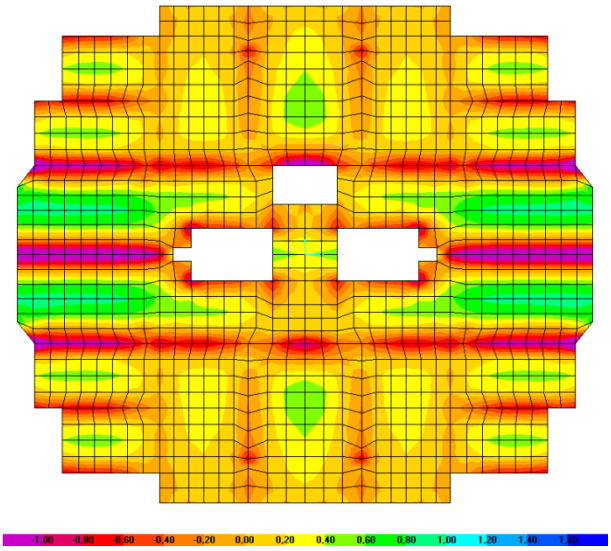
Şekil 4. Binanın üç boyutlu sonlu eleman yapısal modeli

Tablo 1. Sonlu eleman yapısal modeli serbest titreşim analiz sonuçları ve test verileri

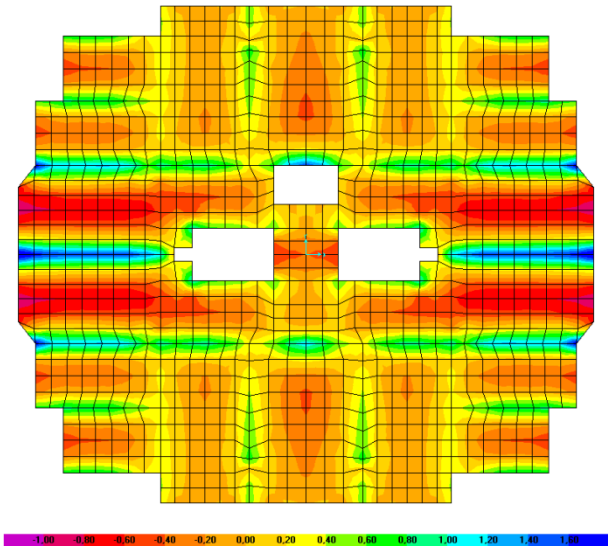
	T (s)	
	Kuzey-Güney	**Doğu-Batı**
Test	**0,32**	**0,28**
1/ 1,0I_g (perde, döşeme); E (TS 500)	0,27	0,25
2/ 1,0I_g (perde); 0,35I_g (döşeme); E (TS 500)	0,28	0,26
3/ 1,0I_g (perde, döşeme); E (ACI 318)	0,31	0,29
4/ 1,0I_g (perde); 0,35I_g (döşeme); E (ACI 318)	0,32	0,30

C20 betonun elastisite modülü (E) için TS (Türk Standardı) 500 (Türk Standardları Enstitüsü, 2000) 28.000 MPa, ACI (American Concrete Institute; Amerikan Beton Enstitüsü) Standardı 318 (ACI Committee 318, 2008) ise 21.200 MPa değerlerini vermektedir. Binanın yapısal modelinde beton birim ağırlığı 24 kN/m^3 kabul edilmiştir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007) Bölüm 3.2.3'te deprem yüklerinin hesabında (ve binanın deprem doğrultusundaki hakim doğal periyodunun hesabında) çatlamamış kesite ait kesit rijitliklerinin kullanılması istenir. ACI 318 Bölüm 8.8'de ise kullanım yükleri altında eleman rijitliklerinin Bölüm 10.10.4'te tasarım yükleri için verilen eleman rijitliklerinin 1,4 katı alınması istenir. Bu da çatlamamış perde duvarlar için tüm kesit eylemsizlik momentine (1,0I_g) döşemeler için ise 0,35I_g değerine karşılık gelmektedir. Binanın sonlu eleman yapısal modelinde yukarıda bahsedilen yönetmelikler ışığında beton elastisite modülü ve kabuk elemanların rijitlik katsayıları için dört farklı kombinasyon söz konusudur. Tablo 1'de bu dört farklı kombinasyon için oluşturulan modellerin kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularındaki serbest titreşim analiz sonuçları zorlamalı titreşim testinden elde edilen doğal titreşim periyotları ile birlikte verilmiştir.

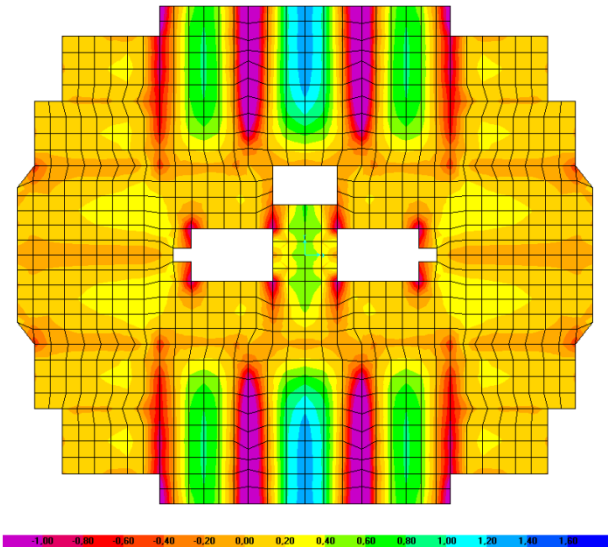
Şekil 5'te 3 nolu modelden elde edilen binanın kendi ağırlığı altında döşeme plaklarındaki tipik gerilmeler gösterilmiştir. Döşeme açıklıklarında alt yüzdeki çekme gerilmeleri hem kuzey-güney doğrultusunda (Şekil 5a) hem de doğu-batı doğrultusunda (Şekil 5c) C20 beton için TS 500'de tanımlanan karakteristik çatlama gerilimini (f_{ctk} = 1,6 MPa) aşmamaktadır. Bu durumda çatlamamış (tüm) kesit eylemsizlik momentlerinin kullanıldığı 3 nolu model, test verileri ile en iyi uyumu göstermektedir. 4 nolu modelin de iyi sonuçlar



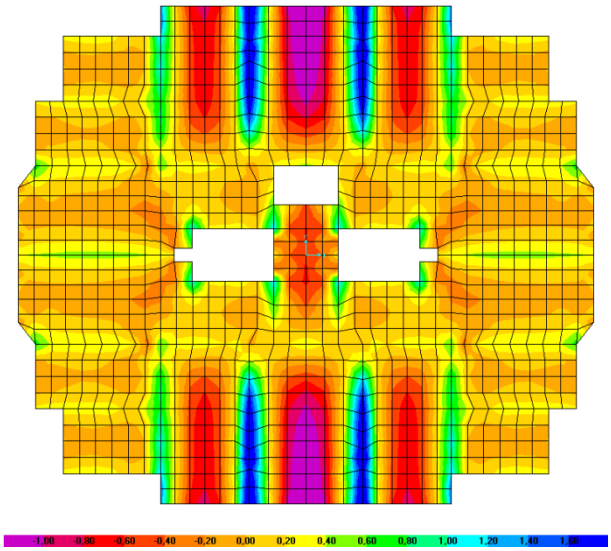
(a) alt yüz kuzey-güney doğrultusu



(b) üst yüz kuzey-güney doğrultusu



(c) alt yüz doğu-batı doğrultusu



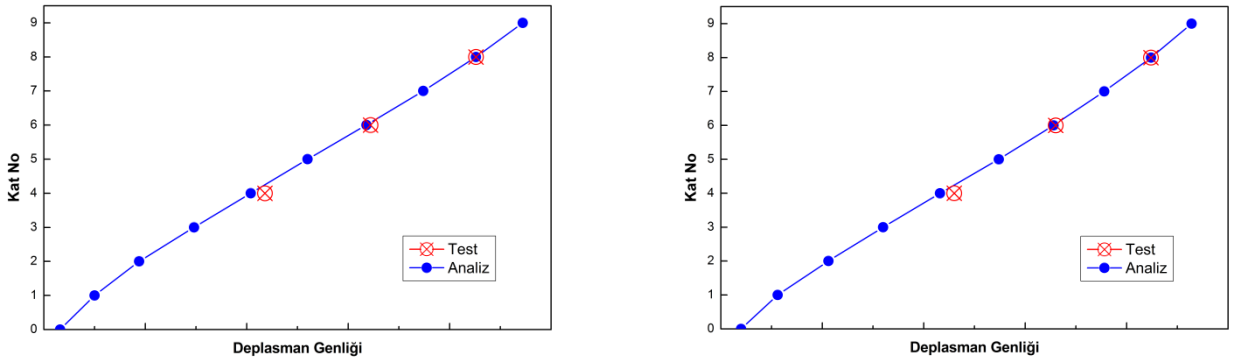
(d) üst yüz doğu-batı doğrultusu

Şekil 5. Binanın kendi ağırlığı altında döşeme plaklarındaki tipik gerilmeler (MPa; + çekme, − basınç)

verdiği söylenebilir; döşemelerdeki çatlaklar doğal titreşim periyotlarını çok değiştirmemektedir (bk. Tablo 1). TS 500'de verilen beton elastisite modülü sonlu eleman yapısal modelinden daha kısa periyot değerleri alınmasına yol açıyor. Bundan sonraki sonuçlar 3 nolu modelle yapılan analizlere aittir.

Şekil 6'da binanın sonlu eleman yapısal modelinin serbest titreşim analizinden elde edilen kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularındaki mod şekilleri zorlamalı titreşim test verileri ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları, test verileri ile tutarlıdır.

Binanın üç boyutlu sonlu eleman yapısal modeli oluşturulurken göz önüne alınan düşey ve yatay taşıyıcı sistemdeki boşlukların ve bodrum ve çatı katlarının, serbest titreşim analizinden elde edilen doğal titreşim periyotlarına etkisi Tablo 2'de sunulmuştur. Perde duvarlardaki kapı ve pencere boşlukları (bk. Şekil 2) en etkili parametre olarak göze çarpmaktadır; modelde dikkate alınmaması durumunda sırasıyla kuzey-güney ve doğu-batı doğrultularındaki doğal titreşim periyotları %24 ve %29 oranında daha düşük alınmaktadır ve daha rijit bir bina davranışı söz konusudur. Döşeme boşlukları ise en etkisiz parametredir; modelde dikkate



(a) (b)

Şekil 6. Sonlu eleman yapısal modeli ve zorlamalı titreşim testinden elde edilen (a) kuzey-güney ve (b) doğu-batı doğrultularındaki mod şekilleri

Tablo 2. Modelleme parametrelerinin doğal titreşim periyotlarına etkileri

	T (s)		3 Nolu Model ile Fark (%)		
	Kuzey-Güney	**Doğu-Batı**	**Kuzey-Güney**	**Doğu-Batı**	
Test	0,32	0,28			
3 nolu model	**0,31**	**0,29**			
Kapı ve pencere boşlukları yok	0,24	0,20	24	29	daha rijit
Bodrum katı yok	0,26	0,25	15	13	daha rijit
Çatı katı yok	0,29	0,27	5	5	daha rijit
Döşeme boşlukları yok	0,31	0,29	< 1	< 1	daha esnek

alınması periyot değerlerinde ihmal edilebilir bir değişime neden olmaktadır. Bodrum katı ikinci en etkili parametredir; modellenmemesi durumunda periyot değerleri %15 ve %13 oranında daha düşük alınmaktadır. Çatı katının modellenmemesi durumunda ise değişim %5'te kalmaktadır.

4. SONUÇLAR

Dokuz katlı tünel kalıp bir binanın betonarme perde duvarları ve döşeme plakları kabuk elemanları ile modellenerek üç boyutlu doğrusal elastik sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Serbest titreşim analiz sonuçlarının, binanın taşıyıcı sistem inşaatı tamamlandıktan sonra uygulanan zorlamalı titreşim testinden elde edilen doğal titreşim periyotları ile karşılaştırılması sonucunda en iyi uyumu ACI 318'de verilen beton elastisite modülü ve çatlamamış (tüm) kesit eylemsizlik momentlerinin kullanıldığı sonlu eleman modeli göstermiştir. TS 500'de verilen beton elastisite modülü sonlu eleman modelinden daha kısa periyot değerleri alınmasına yol açmıştır. Perde duvarlardaki kapı ve pencere boşlukları ve bodrum katı modelden elde edilen periyot değerlerini en fazla etkileyen parametreler olarak öne çıkmışlardır.

5. TEŞEKKÜR

Bu araştırma Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampusu Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu'ndan BAP-FEN-9 proje kodu ile desteklenmiştir. ODTÜ KKK'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

ACI Committee 318 (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara.

Computers and Structures, Inc. (2010). SAP2000 version 14.2.4, http://www.csiberkeley.com/sap2000 [12 Ağustos 2011], Berkeley, California, USA.

Çelik, O. C. (2002). Forced Vibration Testing of Existing Reinforced Concrete Buildings. M.S. Thesis, Civil Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara.

Ergun, U. (2000). MESA Yonca Evler Sitesi Zemin ve Temel Mühendisliği Raporu, Ankara.

Türk Standardları Enstitüsü (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TS 500, Ankara.