

Tünel Kalıp ile İnşa Edilen Yapıların Deprem Yükleri Altındaki Davranışları

C. Balkaya

*Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Ankara 06531, Türkiye*

E. Kalkan

*Rensselaer Polytechnic Institute, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Troy,
NY 12180, USA*

ÖZET: Yakın geçmişte Kuzey Anadolu Fay hattında art arda meydana gelen depremler yatay yüklerin taşınmasında perde-duvarlı sistemlerin sergilemiş olduğu yüksek performansa karşın bundan yoksun mevcut yapı stokunun ne denli zayıf olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu çalışmada, özellikle deprem bölgelerinde konvansiyonel yapıım tekniklerine alternatif olarak tercih edilmeye başlanan tünel kalıp ile inşa edilen yapıların deprem yükleri altındaki davranışları ve dinamik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, seçilen modellerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen üç boyutlu ve iki boyutlu itme analizlerinin neticeleri son depremlerden alınan kayıtların zamana bağlı deplasman eğrileri ile mukayese edilmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yapılarda ki burulma etkileri, döşeme ile duvar ve duvarlar arası etkileşimler ve birleşim noktalarındaki detaylar ve bu detayların önemi özellikle vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Perde Duvar; Tünel Kalıp Sistemi; Sonlu Elemanlar Yöntemi;
Kapasite Spektrum Metodu, Doğrusal Olmayan İtme Analizi;

ABSTRACT: The occurrences of two consecutive destructive earthquakes in North Anatolian Fault in 1999 once again demonstrate the high performance of shear-wall dominant structures and poor seismic resistance of existing building stock having insufficient lateral resistance. In this study, seismic behavior and dynamic properties of tunnel form buildings, commonly preferred to other conventional building types especially in region under high seismic risk, were investigated in details. For that purpose, selected models were examined by employing 3D and 2D nonlinear pushover analyses and their results were compared to spectral displacement curves derived from recent earthquake records. Based on the obtained results, the importance of torsional behavior, the slab-wall interaction and constructive details of connections in these structures were emphasized.

Giriş

Tünel kalıp tekniği ile inşa edilen yapılar özellikle deprem tehlikesinin yüksek olduğu Şili, Japonya, İtalya ve Türkiye gibi ülkelerde sıkça tercih edilmeye başlanmıştır. Ancak, her geçen gün artan tünel kalıp bina stokuna karşın bu yapıların analizi, dizaynı ve deprem yükleri altındaki güvenilirliği ile ilgili oldukça az sayıda bilimsel araştırma ve yayın bulunmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada özellikle tünel kalıp yöntemi ile inşa edilen yapıların deprem yükleri altındaki davranışı ve dinamik özellikleri incelenmiştir.

Genel olarak tünel kalıp sistemi, Şekil 1’de de gösterildiği gibi birbirine dik açılarla monte edilmiş yarım tünel şeklinde kalıpların montajı ile oluşmaktadır. Bu tür yapılarda konvansiyonel binalardan farklı olarak yatay ve düşey yüklerin aktarımı kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve sistemler yerine döşeme ve taşıyıcı duvarlar ile sağlanmaktadır. Genel uygulamada, duvar ve döşeme kalınlıkları hemen hemen aynı tutulmaktadır. Özellikle bu tür yapıım tekniğinde döşeme ve duvar betonunun kat seviyesinde eş zamanlı dökülmesi soğuk derz oluşumunu minimuma indirerek monolitik bir yapı oluşumunu sağlamaktadır. Kritik duvar ve döşeme birleşim yerlerinin bu monolitik özelliği yatay yüklere karşı yapının rijitliğini artırıcı bir rol oynamaktadır.



Şekil 1. Tünel kalıp ve yapım tekniği¹

Tünel kalıp sistemi ile inşa edilen binaların bahsi geçen konstrüktif özellikleri nedeni ile deprem yükleri altında göstermiş oldukları iyi performans karşın, yürürlükteki deprem şartnameleri ve dizayn standartları bu yapıların dizaynı, analizi ve yapım detayları ile ilgili yetersiz kalmaktadır. Özellikle, bu yapıların gerçek davranışının incelenmesi amacıyla döşeme esnekliği, 3-boyut davranış farkı, döşeme ile duvarlar arası etkileşim, malzemedeki doğrusal olmayan davranış ve çatlak mekanizması, açıklık ve boşluklardaki stres dağılımı, donatı miktarı ve montaj yeri ve son olarak burkulma etkileri analizler sırasında göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada yukarıda belirtilen faktörlerin etkileri ve önemi 5 katlı bir yapı örneği üzerinde gerçekleştirilen doğrusal olmayan itme analizi ile incelenmiştir. Elde edilen 3-boyutlu analiz neticeleri, pratikte özellikle tercih edilen 2-boyutlu analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Örnek yapının doğrusal olmayan sismik performansını olabildiğince kesin şekilde elde etmek amacıyla, detaylı bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve perde-duvarların,

¹ Şekil 1’de sunulan resimler www.mesaimalat.com.tr adresinden alınmıştır.

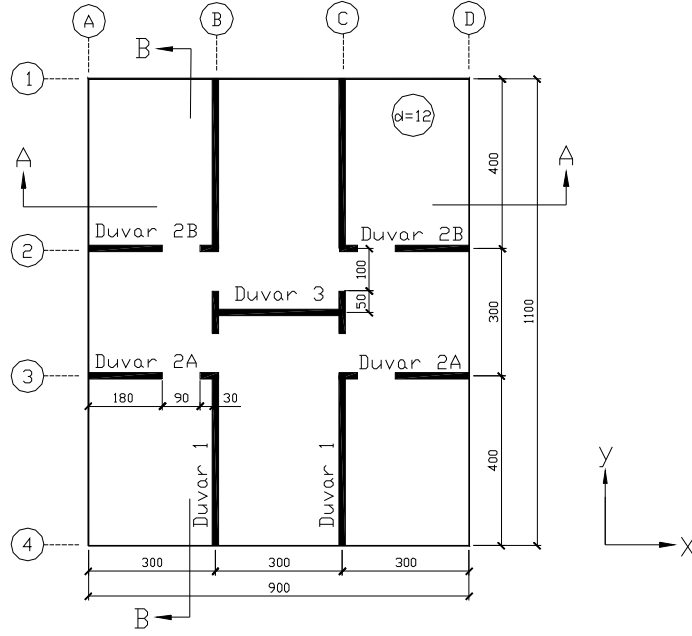
döşemelerin ve birleşim noktalarının tüm geometrik ve mukavemet özellikleri dikkate alınmıştır. Ayrıca, sayısal dengeyi bozmadan girdi ve çıktı verilerini minimize edecek 3-boyutlu ve 2-boyutlu doğrusal olmayan modeller tercih edilmiştir. Bu çalışmada, modeller üzerine iki tip analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yük-deformasyon eğrilerini ivme-deplasman-yanıt-spektrumu (ADRS) formatına çevirmek amacıyla, modellerin doğal titreşim periyotları ve birinci mod deformasyon eğrileri ilk olarak uygulanan dinamik analiz sonucu elde edilmiştir. Daha sonra, doğrusal olmayan itme analizi önceden hesaplanan ve nizami olarak artırılan yatay yük etkisi altında gerçekleştirilmiştir. İncelenen yapının analizler sırasında göstermiş olduğu düşük çatı seviyesi yatay deplasmanları nedeniyle sadece malzemedeki kaynaklanan doğrusal olmayan davranış türü dikkate alınmış ve P-Delta etkileri göz ardı edilmiştir. Kullanılan analitik modelin detayları, kabuller, teori ve analiz sonuçları ileriki kısımlarda ayrıntılı olarak verilmiştir. Verilen tüm bu bilgiler doğrultusunda, 3-boyutlu doğrusal olmayan itme analizinin perde-duvarlı sistemlere uygulama teorisi ve sistem içerisindeki kısıtlamalar örnek çalışma üzerinde gösterilmiştir.

Analitik Modelin Geliştirilmesi

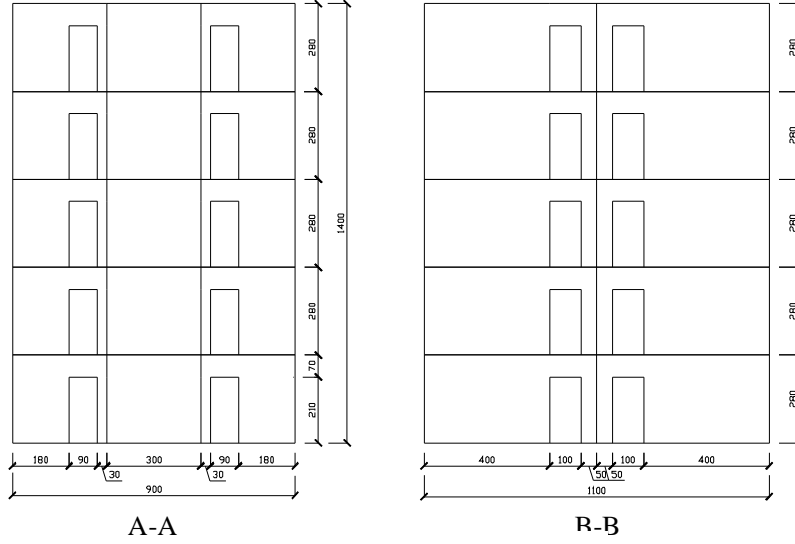
Tünel kalıp binaların doğrusal olmayan kapasite hesapları 3-boyutlu ve 2-boyutlu olarak modellenen 5-katlı bina örneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Örnek yapı, tipik betonarme konut formunda olup, yapının mimari detayı Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Binanın taşıyıcı sistemi genel pratikte de olduğu gibi eşit kalınlıktaki perde-duvar ve döşemelerden oluşmaktadır. Mimari plandan da görüldüğü üzere yapının orta kısmındaki perde-duvarlar döşeme etkileşimi ile yatay yüklerin taşınmasında asıl rolü üstlenmektedirler. Bu duvarlar yatay yüklere karşın göstermiş oldukları mukavemetin yanı sıra kat seviyelerinden gelen dikey yöndeki yükleri de zemine transfer etmektedirler.

Analitik çalışma için 2 ve 3 boyutlu modeller oluşturulmuş ve bu modellemelerde kapı ve döşeme boşlukları özellikle göz önüne alınmıştır ayrıca tüm model içerisindeki donatı yerleşik olduğu bölgenin yapısal önemi doğrultusunda tabaka (smear) şeklinde yada tekil (discrete) olarak modellenmiştir. Perde-duvarlar temel seviyesinde ankastre olduğu kabul edilmiştir. Döşemelerin modellenmesinde, duvarlar içinde kullanılan eğilme ve membran özelliğine sahip sonlu elemanlar kullanılmıştır. Perde-duvarlı sistemlerin 3-boyutlu doğrusal olmayan analizi için membran ve eğilme özellikli doğrusal olmayan ve her noktasında 5 serbestlik derecesine sahip kabuk elemanı kullanılmıştır. Bu elemanın seçilmesinden kasıt, modelleme sırasında köşe elemanlarda değişken dereceli deplasmanların sağlanabilmesidir. Ayrıca, beton ile donatı arasındaki beton miktarının tam olarak modellenmesinde yukarıda belirtilen köşe noktaları ki bunlar donatının tekil olarak modellenmesinde kullanılan köşe noktalarıdır, kenar boyunca uygun nokta üzerine gelebilecek hareket etme özelliğine sahip olmalıdırlar. Bu çalışmada kullanılan kabuk elemanı potansiyel olarak bu özellikleri yansıtabilmektedir. Bilgisayar hesaplamalarının alacağı zamanı optimuma indirebilmek amacıyla 3-boyutlu modellemelerde değişken dereceli sonlu elemanlar tercih edilmiştir. Boşlukların olduğu lokasyonların modellenmesinde normal bölgelere göre daha fazla sayıda sonlu eleman kullanılmıştır, ayrıca bu tür yüksek dereceli sonlu elemanlar özellikle stres konsantrasyonun yüksek olabileceği kritik bölgelerin de modellenmesinde kullanılmıştır. Aynı prensip ile, 5-katlı yapının doğrusal olmayan analizinde ilk 2 kat diğer katlara göre daha fazla sayıda sonlu eleman ile modellenmiştir. ACI (1989) şartnamesinde de

belirtildiği üzere, modellerdeki minimum donatı miktarı her iki yönde eşit olacak şekilde %0.4 alınmıştır. Kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.



(a) Plan



(b) A-A ve B-B kesitleri

Şekil 2. (a) Plan, (b) 5-katlı yapı için kesitler (birimler cm’dir)

Tablo 1. Beton ve çelik için malzeme özellikleri

Beton	Çelik	Çelik Çubuk Elemanı
$E = 2.14 \times 10^6 \text{ t/m}^2$	$E = 2 \times 10^7 \text{ t/m}^2$	$E = 2 \times 10^7 \text{ t/m}^2$
$\nu = 0.2$	$\nu = 0.0$	$\nu = 0.3$
$f_{tu} / f_{cu} = 0.06823$	$A_s(\text{üst}) = 0.2\%$ her iki yönde	$A_s = 0.000226 \text{ m}^2$ (açıklıklarda)
$f_{c28} = 1925 \text{ t/m}^2$	$A_s(\text{alt}) = 0.2\%$ her iki yönde	$A_s = 0.000452 \text{ m}^2$ (kenarlarda)
	$f_y = 22000 \text{ t/m}^2$	$f_y = 22000 \text{ t/m}^2$

Doğrusal Olmayan İzoparametrik Kabuk Elemanı

2 ve 3 boyut modellemelerde değişken kenar dereceli, rasgele yerleştirilebilme ve kenar üzerinde hareket etme özelliğine sahip (bu özelliği ile donatı açıklık üzerlerinde tekil olarak modellenilebilmektedir) doğrusal olmayan izoparametrik kabul elemanı 'CBAL' (Baklaya, 1993) kullanılmıştır. Bu eleman POLO-FINITE programına adapte edilmiş ve tüm doğrusal olmayan analizler bu program ile gerçekleştirilmiştir.

Donatının Modellemesi

Betonarme eleman içerisindeki donatı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değişik şekillerde modellenilebilmektedir. Donatı, tekil (discrete) yada beton ile birlikte kombine bir eleman olarak yada beton tabakalar arasında yayılmış tabaka (smeared) şeklinde modellenilebilir. Tekil modellemede, donatı belirlenen noktalar arasında özel çubuk elemanı olarak düşünülür. Genel olarak, bu elemanlar iki uç noktalıdır ve komşu beton elemanlar ile uyumsuzluk gösterebilme potansiyeline sahiptirler. Bu bölgelerde yüksek dereceli elemanların kullanılması daha gerçekçi sonuçlar getirecektir. Eğer yüksek dereceli eleman kullanılacak ise bu durumda içerisinden donatı çubuğu geçen beton ile kombine eleman tercih edilmelidir. Bir başka açıdan ise tabaka şeklinde kabul edilen donatı modelleme açısından ve çelikteki yüklerin betona en rahat şekilde transferi açısından kolaylıklar getirebilmektedir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan donatı elemanı boşluk çevrelerinde kullanılmış ve tekil donatı ise kenar bölgelerde kullanılmıştır. Tüm bu elemanlar elasto-plastik stres-gerilme karakterine sahiptir. Tabaka şeklinde donatı modeli genel donatının modellemesinde tercih edilmiş ve donatı her iki yüzeyde ve her iki yönde hesaba katılmıştır.

Çatlak Mekanizmasının Modellemesi

Betonda bulunan çatlakların modellenmesinde donatı modellemesinde olduğu gibi, tabaka (smear) yada tekil (discrete) şeklinde modelleme kullanılabilir. Gerstle'ninde (1981) belirttiği gibi bu iki yöntem güvenilir bir şekilde çatlak mekanizmasının betonarme içerisinde modellenmesinde tercih edilebilir. İlk yaklaşımda, tek tek çatlakların derinlikleri ve miktarlarının hesaplanmasından yana tüm çatlaklar tek bir eşdeğer çatlak gibi kabul edilip içerdiği elemanın özelliklerinde yer alır. İkinci yaklaşımda ise, her bir çatlak tek tek dikkate alınır. Tekil çatlak modellemesinde kesme kuvveti ve çatlakların açılma etkisi çatlakın modellenmesinde kullanılan elemanın özellikleri içerisinde yer almalıdır ancak bu yaklaşım çatlakların ne derece olacağı ve lokasyonları konusunda yaklaşık bir bilgiyi de gerektirmektedir (Vecchio, 1982). Özellikle kesme kuvvetinin etkisinin temel seviyesinde yüksek olduğu yapılarda tekil çatlak modelinin kullanılması çatlak mekanizmasından kaynaklanan etkilerin tam olarak yansıtılması açısından daha uygun olacaktır (Okamura, 1990). Tabaka halindeki (smeared) çatlak modelinde ise çatlak modeli sabit yada dönme yeteneğine sahip olabilir. Bir çok sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen betonarme sistemlerde çatlak yönleri sabit kabul edilmiştir. Bundan kasıt çatlak oluştuğu anda modeldeki çatlakların açık durumda sabit kaldığı kabulüdür ancak bu yaklaşım limit durumlar için yeterli hassasiyeti sağlamamaktadır (Gupta, 1984). Çatlakların yönlerindeki değişimler ve bunlardan kaynaklanan rijitlikte ki değişimler Vecchio ve Collins'in (1986) yapmış oldukları deneylerde açıkça gösterilmiştir. Dönme özellikli çatlak modelinde çatlaklar maksimum stres ve gerilme yönlerine ortogonal olacak şekilde oluşturulmaktadır. Bu durumlarda, stresden kaynaklanan dönme özellikli yada gerilmeden kaynaklanan dönme

özelliikli çatlak modeli tercih edilebilir. Dönme etkisine sahip çatlak mekanizması Gupta ve Akbar (1984) tarafından daha detaylı olarak incelenmiş ve geliştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada çatlaklardan kaynaklanan olası dönme etkilerini konvansiyonel çatlak beton için bilinen tanjant matrisine yansıtmişlar ve böylece çatlak mekanizmalı tanjant rijitlik matrisini oluşturmuşlardır. Daha sonra bu model, Milford ve Schnobrich tarafından 1985’de basınç altındaki betondaki oluşan çatlaklarda donatı üzerindeki çekmeden kaynaklanan rijitlik artış etkilerinin de göze alınması ile daha da geliştirilmiştir. Genel olarak dönme etkili çatlak modeli betonarmenin gerçek davranışı yansıtmakta oldukça etkili olmaktadır (Milford, 1985). Bu çalışmada Gallegos ve Schnobrich (1988) tarafından oluşturulan çatlak mekanizmasını içeren rijitlik matrisi kullanılmıştır.

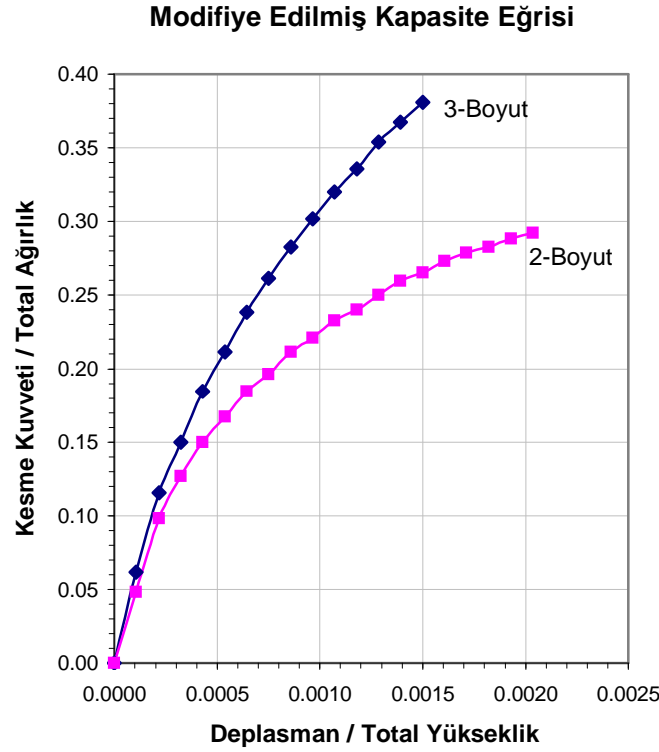
5-Katlı Yapı için Kapasite Spektrum Analizi

Kapasite spektrum analizi için gerekli itme analizi ATC-40’da (1996) verilen prosedür doğrultusunda örnek yapı için uygulanmıştır. Bu amaçla seçilen yapıya öncelikle dikey yönde ölü ve hareketli yükler tesir ettirilmiş ve daha sonra bu yükler sabit tutularak binaya amaçlanan yatay deplasman seviyesine ulaşana kadar düzenli olarak arttırılan statik yatay yük uygulanmıştır. Yatay yükler yapıya kat seviyelerinden yayılı olarak etki ettirilmiştir. Bu yapıların analizlerinde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da yatay yüklerden kaynaklanan burulma etkileridir. Bu binalarla ilgili çalışmalar göstermiştir ki, tünel kalıp yapım tekniğinden kaynaklanan kısıtlamalar ve perde-duvarların plan içerisinde dağılımı yapıda istenmeyen burulma etkilerine yol açabilmektedir (Baklaya, 2002). Kapasite eğrilerini oluştururken bu tür burulma etkilerini hesaba katacak kabul edilir bir yaklaşım ATC-40’da verilmiştir. Bu çalışmada incelenen örnek yapıda, burulma etkisi yapının birinci modunda ortaya çıkmış ve elde edilen kapasite eğrileri yukarıda bahsi geçen yaklaşım doğrultusunda modifiye edilmiştir. Sonuç olarak 5-katlı yapı için elde edilen ve modifiye edilmiş kapasite eğrileri Şekil 3’de verilmiştir. Bu eğriler itme analizinin son bulunduğu noktaya kadar devam ettirilmiş ve analizler temel seviyesinde daha fazla elastik olmayan çatlak oluşumuna izin vermeyecek durumda ileri derecedeki çatlak mekanizmasının oluştuğu noktada sonlandırılmıştır. Kabuk elamanlar ile modellenen perde-duvar sistemlerinde çökme mekanizmasının tam olarak elde edilmesinde ki zorluk nedeni ile yukarıda verilen yaklaşım kullanılmıştır. Bu yapıların yatay ve dikey yükleri taşımada sadece perde-duvar ve döşeme sisteminden oluşması, davranışlarının konvansiyonel kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve tipi sistemlerden farklı olmasına neden olmaktadır ki bu durum plastik-mafsallı mekanizmalarının perde-duvarlarda oluştuğu bölgelerin tespitinde zorluklara neden olmaktadır. Bu yapı türünde global akma perde-duvarların temel seviyelerinde ve boşluklardaki bileşim noktalarında oluşmuştur. Plan üzerinde dağıtılmış perde-duvarların oluşturduğu mekanizma ve kat mekanizması kombinasyonu bu yapılarda çökme öncesi dikkate değer ölçüde deformasyonlara imkan vermektedir. Özellikle tüm sistem davranışı, simetrik olarak yerleştirilmiş perde-duvarlar ile kontrol edilmiştir.

Kapasite Spektrum Metodu (CSM) ile Performans Analizi

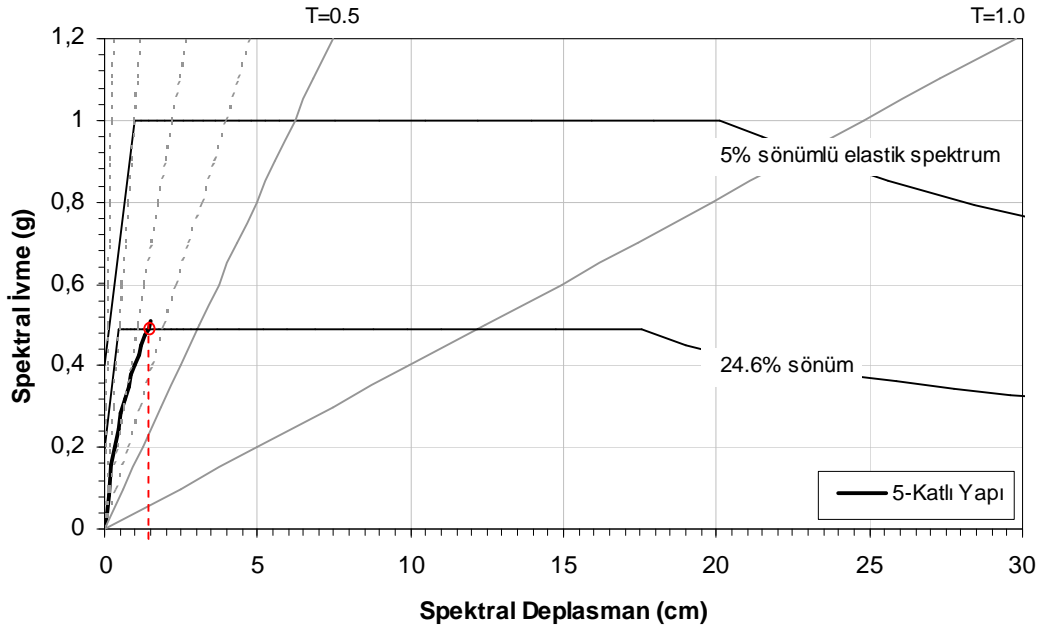
Bir yapı için kapasite eğrisi, yapıya uygulanan deprem kuvvetlerinden bağımsızdır. Fakat, yapının performansı için sağlam bir yargıya varabilmek amacıyla yapıdan beklenen dizayn seviyesindeki deprem yükleri altındaki deformasyon talebi ile göstermiş olduğu kapasitenin aynı format da karşılaştırılması gerekmektedir. Bu genel

kabul kapasite spektrum metodunun da temelini oluşturmaktadır. Burada, talep eğrisi sismik yanıt spektrumu olarak kullanılmıştır. Genel olarak %5 sönüm değerli yanıt spektrumu, özellikle doğrusal ve elastik davranış düzeyinde olan yapılardan olan talebi yansıtmaktadır. Bu çalışmada elde edilen kapasite eğrileri ATC-40’da verilen prosedür ışığında ivme-deplasman-yanıt-spektrumu (ADRS) formatına çevrilmiştir. Bu prosedür modal kütle katsayısı ve yapının birinci doğal salınım moduna göre kapasite eğrisinde modifikasyon yapılmasını ön görmektedir. Dinamik analiz sonucu 5-katlı yapının etkin salınım periyodu 0.23sn olarak bulunmuştur. Bu yapı 3-boyutlu analiz ile kabaca çatı seviyesinden maksimum 2.10cm yanal deplasman yapacak şekilde itilmiş ve yapısal davranış tipi ATC-40’a göre *Tip-A* olarak belirlenmiştir. Elde edilen modal katılım (PF_{RF}) faktörü ve etkin kütle katsayısı (α_m) sırası ile 1.38 ve 0.76 olarak bulunmuştur. Sismik talep miktarı yürürlükteki deprem şartnamesine (1998) göre hesaplanmıştır. Bunlara tekabül eden sismik talep ve kapasite eğrileri ivme-deplasman-yanıt-spektrumu formatında Şekil 4’de verilmiştir.



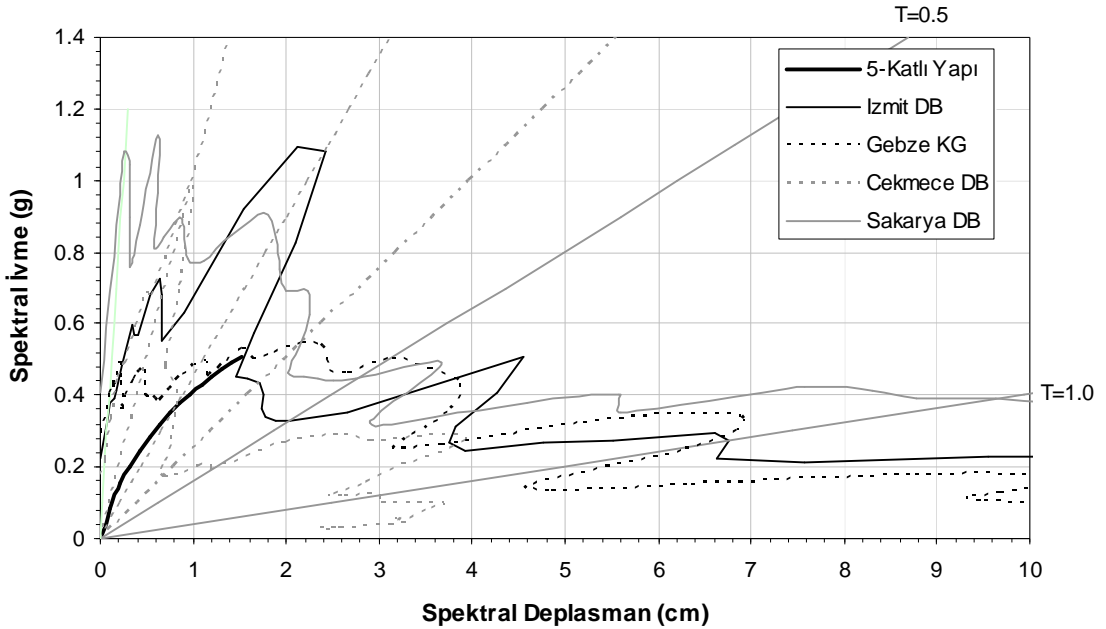
Şekil 3. 5-katlı yapının 2 ve 3 boyutlu modellerinin kapasite eğrileri

5-katlı yapının üst sınırdaki enerji sönümleme kapasitesi %24.6 vizkoz sönüm değeri olarak bulunmuştur, ($a_y=0.31g$, $d_y=0.41cm$, $a_p=0.51$, $d_p=1.52$). Bu sonuçlara göre incelenen yapı deprem şartnamesinde verilen dizayn spektrumun ivme etkin bölgesi içerisinde davranış göstermektedir. Kapasite ve talep eğrileri çatı seviyesi deplasmanının toplam yüksekliğe oranının 0.0015 olduğu noktada kesişmekte ve 5-katlı yapı için performans noktasını oluşturmaktadır. Bu seviyede bina ATC-40’da belirtilen ‘immediate occupancy’ performans düzeyine tekabül etmektedir. Şekil 4’de de görüldüğü üzere, 5-katlı yapı için performans noktası 1.42cm (S_d) spektral deplasman seviyesinde oluşmaktadır. Bu spektral deplasman, 1.95cm ($\Delta_R = S_d \times PF\Phi_R$) çatı seviyesi deplasmanına ve 0.37 ($V/W = \alpha S_a$) temel seviyesi kesme kuvveti katsayısına denk gelmektedir.



Şekil 4. Yürürlükteki deprem şartnamesi dizayn spektrumunu kullanılarak 5-katlı yapı için kapasite spektrum metodunun uygulaması

Genel olarak deprem şartnamelerinde verilen dizayn spektrumları düzgün çizgi ve eğrilerden oluşmaktadır. Ancak, gerçekte deprem kayıtlarından elde edilen yanıt spektrum eğrileri düzensiz, inişli ve çıkışlı eğrilerden meydana gelmektedir. Bu çalışmada yukarıda belirtilen kapasite spektrum metodu, 1999 (M_w 7.4) Kocaeli depremi KG ve DB kayıtları (%5 sönüm) kullanılarak tekrar edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1999 Kocaeli depremi güçlü deprem kayıtları kullanılarak (5% sönüm) 5-katlı yapı için kapasite spektrum metodunun uygulaması

Sonuç

Doğrusal olmayan itme analizinin tünel kalıp binaların yatay yükler altındaki davranışını belirlenmesinde ki hassaslığı ve uygulaması bu çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla seçilen 5-katlı yapı 2 ve 3 boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ve bu modelleme sırasında akma noktalarının ve çatlak mekanizmasının en iyi şekilde simule edebilecek izoparametrik kabuk elemanı kullanılmıştır. İtme analizinin doğrusal olmayan sonuçlara ulaşmada etkili bir araç olduğu bir kez daha vurgulanmış ve bu analiz türünün eğer yeterince dikkat ve özündeki kısıtlamalara özen gösterilerek kullanıldığı takdirde tünel kalıp binaların dizaynı ve analizinde halen kullanılmakta olan elastik analizlerden çok daha gerçekçi ve hassas sonuçlar sağlayacağı kanısına varılmıştır. Bu teknik özelliği ile mevcut yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarını hesaplamada ve rehabilitasyonunda oldukça etkili olacağı düşünülmektedir. Nitekim bu yapıların analizlerinde çoğu zaman gerçek davranışı hesaplamak amacıyla yürürlükteki deprem şartnamelerinde verilen deprem yükleri azaltma katsayısı kullanılmaktadır. Ancak unutulmamalıdır ki, dizayn kodlarındaki R faktörü çoğu zaman genel mühendislik yaklaşımlarına ve geçmiş depremlerdeki gözlemlere dayanmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen doğrusal olmayan analiz neticeleri göstermiştir ki, tünel kalıp yapı türü için deprem şartnamesinde verilen R faktörünün değeri bu yapıların gerçek doğrusal olmayan davranışını yansıtmamakta ve modifiye edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, 2 ve 3 boyutlu analizlerin karşılaştırması yapılmış ve elde edilen neticeler göstermiştir ki 3-boyutlu modelleme yapının gerçek performansını belirlemede 2-boyutlu modellemeye göre daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Genel olarak, 3-boyutlu model analiz neticelerinden elde edilen kapasite miktarı 2-boyutlu model analizine göre daha fazla bulunmuştur. Kullanılan programlardan kaynaklanan kısıtlamalara ve bir takım pratik uygulamalardan dolayı göz ardı edilen komplike davranışlara karşın (yüksek mod etkileri) doğrusal olmayan statik itme analiz tekniği yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarının tespitinde etkili bir çözüm sunmaktadır. Özellikle birinci doğal şalinim modunda davranış gösteren yapılarda ki bu çalışmada ele alınan örnek yapıda olduğu gibi, itme analizi global davranışı belirlemede ve doğrusal olmayan deformasyonları hesaplamada oldukça etkili olmaktadır. Bu analiz ayrıca, elastik analiz ile tespit edilemeyen dizayndan kaynaklanan eksikliklerin aydınlanmasında da yarar sağlamaktadır. Yüksek deformasyon talebi, mukavemetteki düzensizlikler, boşluklar ve bileşim noktaları gibi kritik lokasyonlarda ki aşırı yüklenmeler bahsi geçen başlıca zayıf noktaları oluşturmaktadır. Bu çalışmada sunulan analitik yaklaşım, perde-duvarlı yapıların 3-boyutlu doğrusal olmayan analizlerinin gerçekleştirilmesinde yol gösterici metodolojiyi içermektedir.

Referanslar

ACI Committee 318 ,1989, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, pp. 73-74, 218, 242.

Applied Technology Council, Nov. 1996, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Report No: ATC-40, Redwood, CA.

Balkaya, C., Schnobrich, W.C., 1993, Nonlinear 3-D Behavior of Shear-Wall Dominant RC Building Structures, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 1, No.1, pp.1-16.

Balkaya, C., Kalkan, E., 2002, Estimation of Fundamental Periods of Shear-Wall Dominant Building Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (in press).

Gallegos-Cezares S., Schnobrich W.C., 1988, Effects of Creep and Shrinkage on the Behavior of Reinforced Concrete Gable Roof Hyperbolic-Paraboloids, *Structural Research Series*, No. 543, University of Illinois at Urbana Champaign.

Gerstle, K.H., 1981, Material Modeling of Reinforced Concrete. IABSE Colloquium DELF, Introductory Report, Vol. 33, pp. 41-61.

Gupta, A.K., Akbar. H., 1984, Cracking in Reinforced Concrete Analysis. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 8, pp. 1735-1746.

Milford, R.V., Schnobrich, W.C., 1985, The Application of the Rotating Crack Model to the Analysis of Reinforced Concrete Shells, *Computers & Structures*, Vol. 20, pp. 225-234.

Ministry of Public Works and Settlement, 1998, Specification for Structures to be Built in Disaster Areas, Ankara.

POLO-FINITE, A Structural Mechanics System for Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Okamura, H., Maekawa, K., April 1990, Nonlinear Analysis and Constitutive Model to the Analysis of Reinforced Concrete Shells, *Proc. of SCI-C, Computer Aided Analysis and Design of Reinforced Concrete Structures*, Pineridge Press, pp. 831-850.

Vecchio, F.J., Collins, M.P., 1982, The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses, Publications 82-03, Dept. of Civil Engineering, University of Toronto.

Vecchio, F.J., Collins, M.P., 1986, The Modified Compression-field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI Structural Journal*, Vol. 83, No. 2, pp. 219-231.