DOLGU DUVARLARIN DEPREM DAVRANIŞINA ETKİSİ

A. Yakut[1], B. Binici[1], İ.O. Demirel[2] ve G. Özcebe[1]

[1] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: ayakut@metu.edu.tr

ÖZET:

Bu çalışmada, dolgu duvarların bina deprem davranışı üzerindeki etkisi analitik olarak incelenmiştir. Ülkemizin farklı bölgelerinde bulunan yaklaşık 28 adet betonarme bina üç boyutlu olarak SAP2000 programı ile modellenmiştir. Yapılan itme analizleri sonucunda binaların kapasite eğrileri elde edilmiştir. Her iki ana doğrultuda yapılan analizlerde dolgu duvarlı ve duvarsız modeller kullanılmıştır. Dolgu duvarlar eşdeğer çapraz çubuk elemanları ile literatürdeki öneriler dikkate alınarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarının karşılaştırılması ile bina akma taban kesme kuvveti, bina periyodu ve bina rijitliğindeki değişimler dolgu duvar alanına bağlı olarak irdelenmiştir. Sonuçlar, dolgu duvarların bina dayanımı ve rijitliğini belirgin ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu etki incelenen doğrultudaki toplam dolgu duvar alanının bina toplam kat alanına bölümüne bağlı olarak regresyon sonucu elde edilen ilişkilerle ifade edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Dolgu duvar, itme analizi, çapraz çubuk modeli, betonarme binalar.

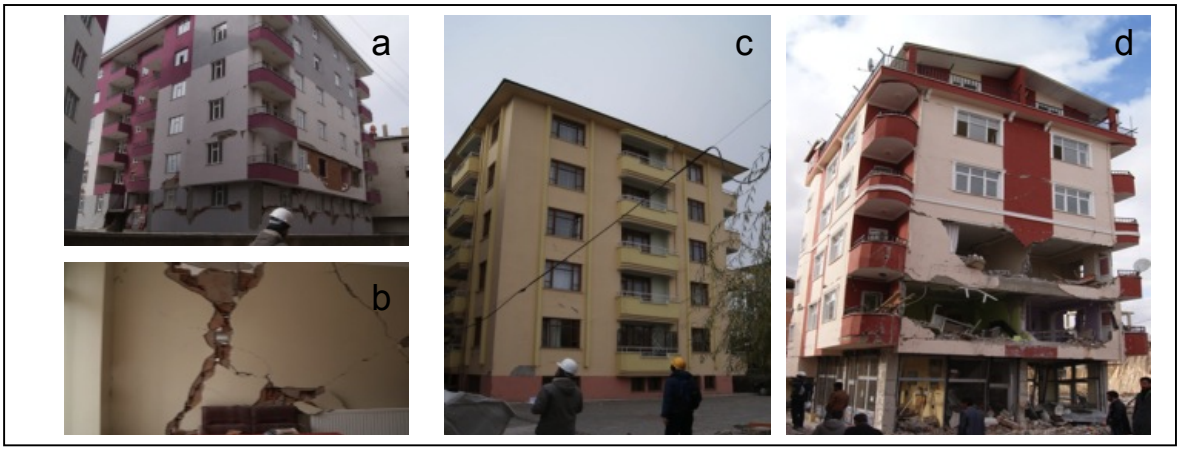
1. GİRİŞ

Dolgu duvarlı betonarme çerçeveler; Türkiye'de ve gelişmekte olan bir çok ülkede yaygın olarak kullanılan yapım şekilleridir. Dolgu duvar malzemesi olarak tuğla, beton biriket ve gazbeton kullanılabilir. Türkiye'de dış cephelerin doldurulması ve iç hacmin ayrıştırılması amacıyla sıklıkla kullanılan malzeme boşluklu fabrika tuğlasıdır. Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerdeki dolgu duvar hasarı depreme bağlı maddi kaybın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Yer sarsıntısı esnasında dolgu duvarların kısmi veya tümden göçmesi, betonarme çerçevelerin yatay yük dayanımını ve deprem performansını bazı durumlarda binanın ayakta kalması ya da yıkılmasını belirleyecek ölçüde etkilemektedir. En son Van Depremi (Ekim 2011) sonrası gözlemler göstermektedir ki; dolgu duvarlar ayakta kalan binaların dayanımına hayli katkıda bulunmuştur. Fakat dolgu duvarlarda kılcal çatlaklar şeklinde hafif hasar oluştuğu durumlarda bile ev sakinleri evlerinde tekrar oturmaktan çekinmektedir.

Dolgu duvarların betonarme binanın deprem performansına katkısı; dolgu duvar ve betonarme çerçevenin göreceli dayanımlarına, dolgu duvarın yapımındaki işçiliğin niteliğine ve dolgu duvar ile onu çevreleyen çerçevenin bağlantısına bağlıdır. Van depreminde bazı durumlarda (Şekil 1a, b, c), dolgu duvarlar dayanıma önemli ölçüde katkı sağlamış ve binanın ayakta kalmasını sağlamıştır. Bazı durumlarda ise (Şekil 1d) dolgu duvarlar düzlem içi ve düzlem dışı talepler nedeniyle sistemden tamamen ayrışmıştır. Betonarme binaların geleneksel tasarımında dolgu duvarlar, yatay yük dayanımına katkıları ihmal edilerek tasarıma dahil edilmezler. Bu yönelim eğer dolgu duvarlar çerçeveden ayrılsaydı doğru kabul edilebilirdi. Fakat Türkiye'de yapım pratiği bu şekilde değildir. Bu ayrılma dolgu duvarlarla çerçeve arasında boşluk bırakıp deprem sırasında birbirlerine hasar vermeleri önlenerek gerçekleştirilebilirdi. Fakat Türkiye'de yapım pratiği betonarme çerçeveler döküldükten sonra dolgu duvarların çerçevelerin içine yerleştirilmesi ve harç ile çerçeveye tutturulması şeklindedir. İnşaatın bu aşamasında, ölü yükler altında, çerçeve ile dolgu duvar arasında bir yük aktarımı

beklenmez. Fakat yer sarsıntısının neden olduğu yatay yükler altında dolgu duvarlar aktifleşir ve yatay yüklere karşı direnç, çerçeve veya dolgu duvardan birisi göçene kadar ikisinin bileşik etkisiyle sağlanır.

Tasarım aşamasında dolgu duvarları ihmal ederek dayanım ve rijitliğe olan katkılarını yedek kapasite olarak dikkate almak ilk bakışta korunumlu bir yaklaşım olarak görünse de makul değildir. Analitik modellerde dolgu duvarları ihmal etmek her zaman güvenli değildir. Dolgu duvarlar binanın yatay rijitliğini artırarak binanın doğal periyodunun azalmasına, dolayısıyla binanın deprem talebinin artmasına sebep olabilir [1]. Dahası, deprem sonrası gözlemler [2] "yapısal olmayan" dolgu duvarların deprem sırasında genellikle hasar gördüğünü göstermektedir. Dolgu duvarlarda oluşan hasar, yatay yüklere direnme ve enerji sönümleme anlamına gelir ki bu da dolgu duvarların analitik modellerde hesaba katılması gerektirir.



Şekil 1. 2011 Van Depreminde Gözlenen dolgu Duvar Hasarı a) düzlem içi hasar, b) iç duvar hasarı c) orta hasar, d) ağır iç ve dış düzlem hasarı

Son dönemdeki araştırmalar dolgu duvarların yapı davranışındaki etkisinin baskın olduğunu ve özellikle düşük seviyedeki yer sarsıntılarında ihmal edilemeyeceğini göstermektedir. Bir çok araştırmacı bu katkıyı çalışmalarında teyid etmiştir [3, 4, 5 ve 6]. Kappos [3] dolgu duvarların betonarme binaların yatay rijitliğine katkısının %440'a kadar çıkabileceğini araştırmalarında göstermiştir. Aynı çalışmada hizmete elverişlilik seviyesinde enerjinin %95'inin dolgu duvarlardaki çatlamalarla sönümlediği de belirtilmiştir. Calvi ve arkadaşları [5] ise yer sarsıntısının başlarında dolgu panellerin çatlayıp çerçeveden ayrıldığı için davranışa etkilerinin ihmal edilmesi gerektiği görüşünün çürütüldüğünü ve bir çok vakada enerjinin büyük bölümünün dolgu duvarlarda sönümlenip kiriş ve kolonlarda sönümlenmenin düşük kaldığını söylemektedir.

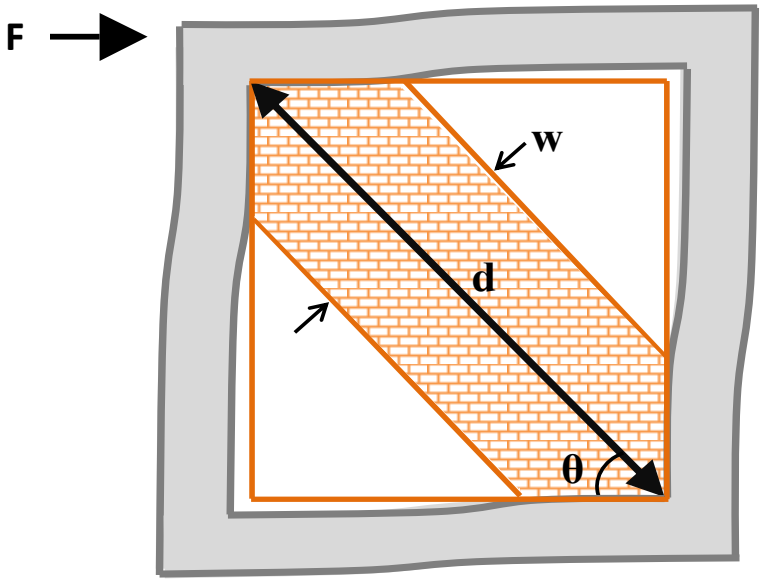
Türkiye'de bina kapasitelerinin yetersiz ve yapım niteliğinin zayıf olduğu göz önüne alındığında dolgu duvarların binaların rijitlik ve dayanımına katkı sağladığına inanılmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi bu katkının seviyesi dolgu duvarın olduğu kadar çerçevenin de özelliklerine bağlıdır. Bu katkının miktarını belirlemek için deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, bu katkıyı araştırmak adına analitik araçlar kullanılmıştır.

2. DOLGU DUVARLARIN MODELLENMESİ

60 yılın üzerindeki çabaya rağmen, dolgu duvarlar için ne iyi geliştirilmiş tasarım tavsiyeleri, ne de kabül görmüş analitik yöntemler bulunmaktadır [7]. Betonarme çerçeve elemanlarından kaynaklanan doğrusal olmayan davranışın yanında (örn. Betonun çatlaması, çeliğin akması ve sıyrılması) dolgu duvar malzemesinin

çatlama-patlaması ve çerçeve ile dolgu duvar arasında temasın kaybolması gibi doğrusal olmayan davranışlar dolgu duvarlı çerçevelerin tasarımını zorlaştırmaktadır. Her ne kadar tüm bu doğrusal olmayan davranışları hesaba katan sofistike sonlu elemanlar modelleri önerilmişse de büyük bina modellerine uygulanabilecek basit ama güvenilir yaklaşımlar gerekmektedir.

Dolgu duvarlarının bilinen en kolay modelleme yöntemi çapraz çubuk modelleridir. Bu modelin arkasındaki düşünce oldukça basittir. Yatay yük seviyesi artıp çerçevenin şekli bozulmaya başladığında dolgu panel ile paneli çevreleyen çerçeve arasındaki temas ikisinin arasında çekme direnci olmadığından dolayı kaybolmaya başlar. Yatay yük arttıkça çerçeve ve dolgu panel arasındaki temas basmaya çalışan köşelerle sınırlı kalır ve bu bölge eşdeğer basınç çubuğu olarak modellenir [5]. Çubuk modelinde yatay olarak yüklenen köşe ile karşı çapraz köşeyi birleştiren bir çubuk elemanı çerçeve sistemine eklenerek dolgu duvar tarafından oluşturulan basma çubuğunun direnci idealize edilir (Şekil 2). Eşdeğer çubuğun malzeme özellikleri ve kalınlığı dolgu malzemesiyle aynı kabul edilir. Dayanım ve rijitliği belirleyecek temel parametre çubuğun genişliğidir. Tablo 1 değişik araştırmacıların eşdeğer basma çubuğu için önerdiği genişlikleri özetlemektedir.



Şekil 2. Yatay yük altında çapraz basma çubuğunun oluşumu

3. DOLGU DUVARLI BİNALARIN ANALİZLERİ

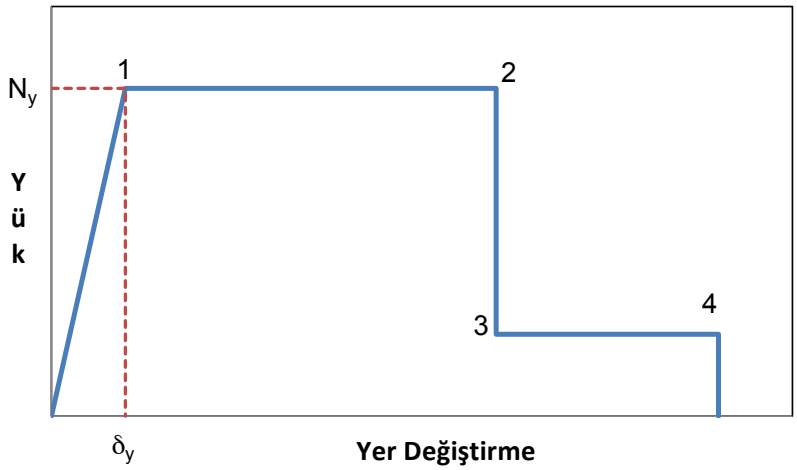
Dolgu duvarlı çerçevelerin betonarme binaların deprem davranışına katkısını incelemek için Türkiye'nin farklı bölgelerinden seçilen belli sayıda temsili betonarme bina kullanılmıştır. Bu binaların tipik özellikleri Tablo 2 de verilmiştir.

3.1. Binaların Modellenmesi

Binaların 3 Boyutlu modelleri SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur [15]. Doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucunda taban kesme kuvvetine karşılık çatı deplasmanı eğrileri elde edilmiştir. Sonrasında çift doğrusallaştırılan bu eğrilerin başlangıcındaki doğrusal kısımlarına uyumlu olan modal özellikleri belirlenmiştir. Yapısal bileşenlerin modellenmesinde kirişler için kiriş elemanı, kolonlar için kiriş-kolon elemanı, dolgu duvarlar için çubuk elemanları ve döşemeler için rijit diyaframlar kullanılmıştır. Her bina dolgu duvarların olduğu ve olmadığı durumlar için iki kez modellenmiştir.

Tablo 2. Kullanılan binaların özellikleri

	Kat Sayısı	f_{ck} [MPa]	Kat Alanı [m^2]	Dolgu Duvar Alanı X-Yönü [m^2]	Dolgu Duvar Alanı Y-Yönü [m^2]
BLD1	6	15	152.5	1.30	0.80
BLD2	6	14	120.5	0.23	4.21
BLD3	5	17	408	10.98	9.83
BLD4	6	20	221	0.28	8.43
BLD5	6	20	388	0.00	15.50
BLD6	5	20	201	1.90	2.26
BLD7	3	20	277	9.59	4.60
BLD8	4	20	115	5.48	1.08
BLD9	5	17	185	6.12	0.00
BLD10	6	13.6	190.2	4.86	3.90
BLD11	2	13.6	96	1.89	3.89
BLD12	4	8.5	142.2	1.74	2.60
BLD13	3	14	139	1.22	3.30
BLD14	4	17	279	4.55	2.08
BLD15	4	12.75	107	1.83	2.20
BLD16	5	22.1	163.5	2.72	2.12
BLD17	4	8.5	124	0.69	3.06
BLD18	2	17	147	2.64	1.29
BLD19	2	8.5	124	1.76	1.26
BLD20	3	13.6	159	0.92	1.57
BLD21	2	17	407	1.71	11.04
BLD22	3	10.2	135.15	2.94	1.48
BLD23	2	13.6	91	0.96	1.03
BLD24	3	17	284	4.27	4.67
BLD25	5	14	188	1.07	2.49
BLD26	5	13	258	0.73	3.40
BLD27	4	10	375	3.33	8.28
BLD28	3	10	350	1.72	14.62



Şekil 3. Çubuk modeli için yük-yer değiştirme grafiği

Eşdeğer çubuğun akma noktası Tablo 1 de Smith [9] tarafından önerilen çubuk modeli esas alınarak belirlenmiştir. Eşdeğer çubuk genişliği (w) Denklem 1'e göre çubuğun çapraz uzunluğu, d, kullanılarak hesaplanmıştır. Sonrasında çubuğun eksenel rijitliği Denklem 2' ye göre duvarın kalınlığı, t, ve elastik modülü (E) kullanılarak hesaplanmıştır. Eşdeğer çubuğun akma dayanımı (N_y) çapraz çubuğun eksenel yük altında göçme ve dolgu duvarın kesme altında kayma durumlarından kritik olanı tarafından belirlenmiştir. Başlangıçtaki rijitlik ve akma dayanımı değerleri kullanılarak eşdeğer çubuğun akma durumundaki ötelenmesi Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemde ,h çubuğun boyu, θ ise çubuğun yatayla yaptığı açıdır.

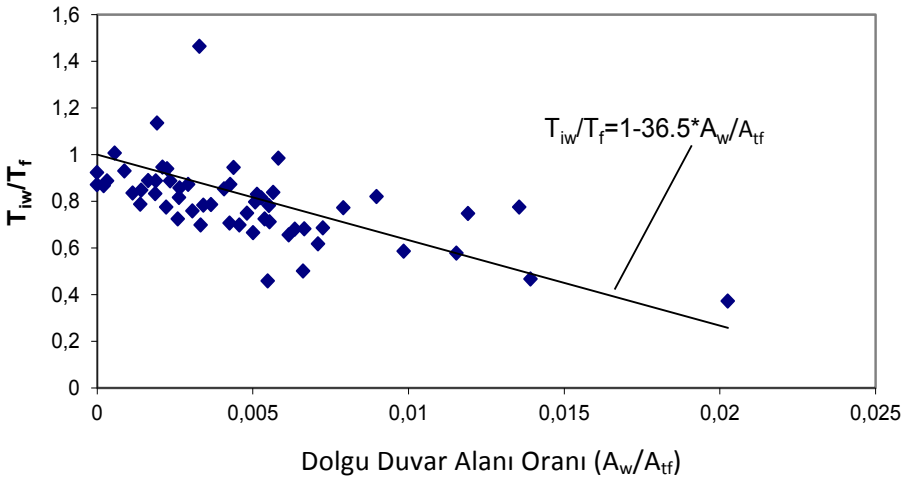
$$w = 0.175(\lambda h)^{-0.4} d \tag{1}$$

$$k = \frac{E_I t w}{d} \tag{2}$$

$$\delta_y = \frac{N_y \cos\theta}{kh} \tag{3}$$

3.2. Analiz Sonuçları

Her bir binanın doğrusal olmayan statik itme analizi sonuçları çift doğrusallaştırılmış ve statik itme eğrilerinin çıkarılması için parametreler sağlamıştır. Bu parametreler dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız modeller için karşılaştırılmıştır. Şekil 4, dolgu duvarlı (T_{iw}) ve dolgu duvarsız (T_f) bina periyotlarındaki değişimi dolgu duvar alanının (A_w) toplam kat alanına (A_{tf}) bölünmesi cinsinden vermektedir. Dolgu duvarlardan dolayı bina periyodundaki düşme Denklem 4 ile gösterilebilir. Dolgu duvar alanının kat alanına oranı %1 olduğu durumda bu düşüş %40 olmaktadır.

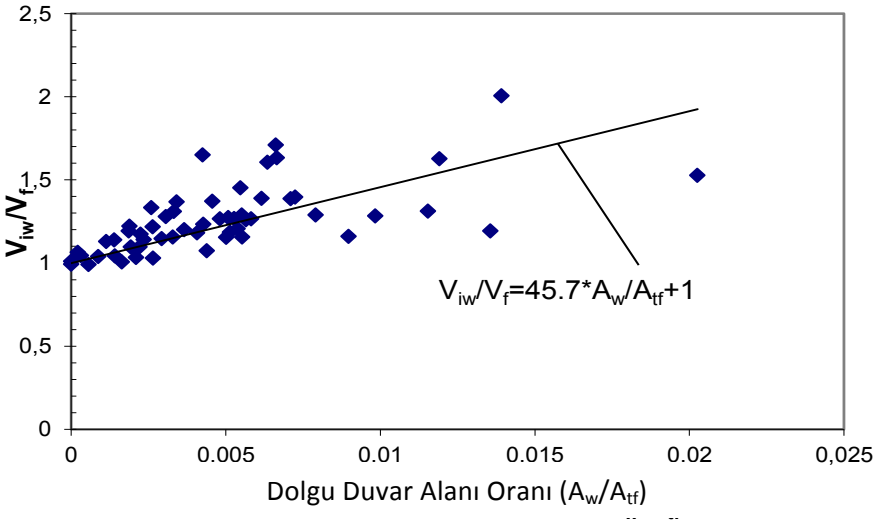


Şekil 4. Dolgu duvarların bina periyoduna etkisi

$$\frac{T_{iw}}{T_f} = 1 - 36.5\frac{A_w}{A_{tf}} \tag{4}$$

Dolgu duvarlı binaların akma taban kesme kuvvetinin dolgu duvar alanına bağlı olarak değişimi Şekil 5 'te gösterilmiştir. Dolgu duvarlı binaların akma taban kesme kuvvetinin (V_{iw}) dolgu duvar bulunmayan duruma (V_f)

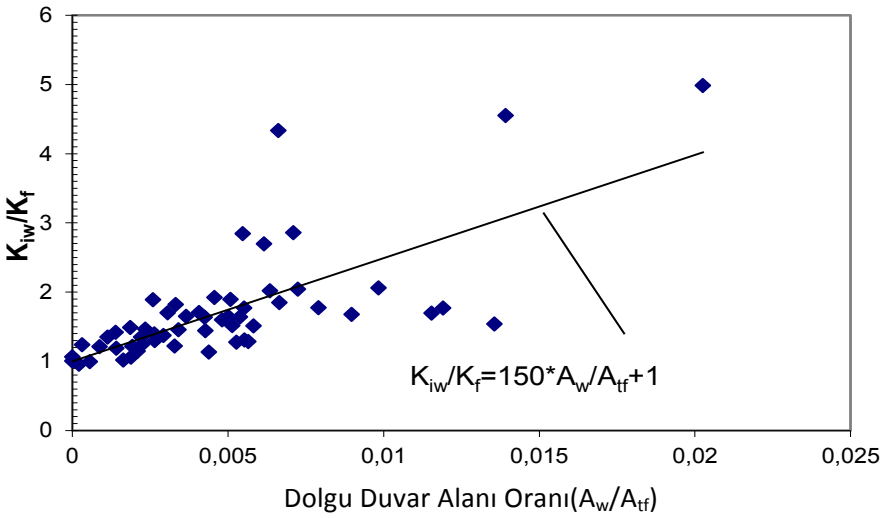
göre oranı dolgu duvar alanına bağlı olarak Denklem 5'te verilmiştir. Akma taban kesme kuvveti dolgu duvarlı durumda önemli ölçüde artarak dolgu duvar bulunmayan duruma göre iki katına kadar artabilmektedir.



Şekil 5. Dolgu duvarların akma taban kesme kuvvetine etkisi

$$\frac{V_{iw}}{V_f} = 1 + 45.7\frac{A_w}{A_{tf}} \tag{5}$$

Akma taban kesme kuvvetine benzer şekilde statik itme eğrisinin etkili rijitliği de dolgu duvar alanına bağlı olarak önemli derecede değişmektedir. Bu değişim Şekil 6 ve Denklem 6 'da gösterilmiş. Rijitlikteki değişim de doğrusal bir eğilim izlemektedir ve 4 kata kadar değişebilmektedir.

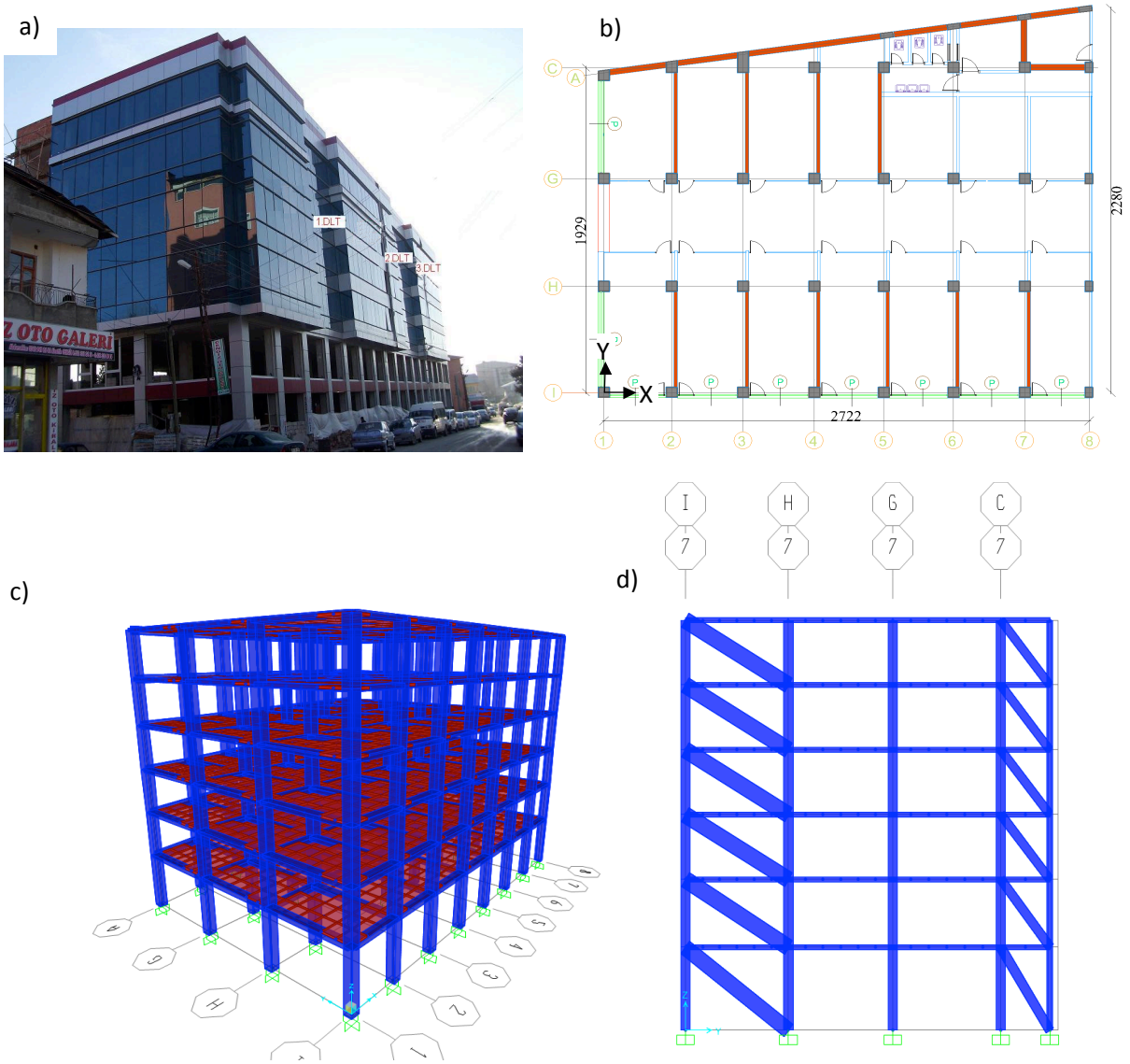


Şekil 6. Dolgu duvarların bina rijitliğine etkisi

$$\frac{K_{iw}}{K_f} = 1 + 150\frac{A_w}{A_{tf}} \tag{6}$$

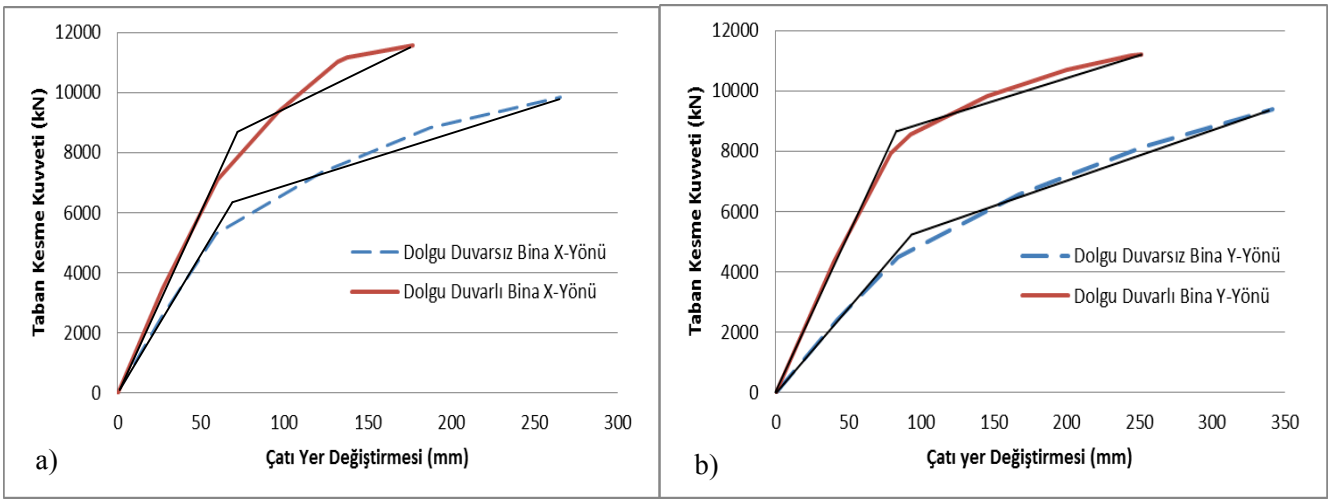
4. ÖRNEK BİNA ÜZERİNDE UYGULAMA

Önerilen denklemlerin geçerliliği Erciş'te bulunan ve 2011 Van depreminden etkilenen 6 katlı bir bina üzerinde sınanmıştır (Şekil 7a). Bina dilatasyonla ayrılan 3 bloktan oluşmaktadır. Alınan beton numunelerinin ortalama dayanımı 20 MPa' ın üzerinde olmasına rağmen binanın 3. bloğu depremde ağır hasar görmüş ve 3. blok için yıkım kararı çıkmıştır. Bu bildiride binanın 1. bloğu dolgu duvarlı ve dolgu duvar olmayan durumlar için incelenmiştir. Binanın betonarme çerçeveleri arasındaki dolgu duvarlar Şekil 7b' de kırmızı ile işaretlenmiştir. Kapı ve pencere boşluklarının olduğu dolgu duvarlar yatay yük altında basma çubuğu davranışı gösteremeyeceği için ihmal edilmiştir. Bilgisayar modeli oluşturulurken (Şekil 7c-d); dolgu duvar basma dayanımı 4.2 MPa, elastik modülüsü 2310MPa (E=550fm) olarak alınmış ve Smith' in [9] önerdiği şekilde etkili duvar genişlikleri hesaplanmıştır. Ayrıca dolgu duvarları temsil eden çapraz çubuk elemanlarının yük deplasman ilişkisi eksenel yönde atanan yığılı mafsallarla bölüm 3.1' de tarif edildiği şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 7. Van-Erciş' te bulunan vaka binası

Bina modeli tamamlandıktan sonra düşey yük, titreşim ve statik itme analizleri yapılarak binanın kapasite eğrileri çıkarılmıştır (Şekil 8). Bina ağırlığı 24700 kN, çatı katı yüksekliği 23 metredir. Statik itme analizlerinde binaya döşeme seviyesinden etkiyen yatay yükler binanın dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız her iki durumu için de mod şekilleriyle uyumlu olarak tanımlanmıştır. Sonrasında kapasite eğrileri çift doğrusallaştırılarak etkili rijitlik ve akma taban kesme kuvveti gibi parametreler elde edilmiştir.



Şekil 8. Vaka binası çift doğrusallaştırılmış kapasite eğrileri a) X yönü, b) Y yönü

Binanın X ve Y yönlerinde toplam duvar alanı 9.24 ve 8.06 m^2 dir. Bu alanın binanin toplam kat alanına (592*6=3552 m^2) oranı ise sırasıyla %0.26 ve %0.23 dür. Dolgu duvarsız analiz sonuçlarıyla birlikte bu oran Denklem 4, 5 ve 6' da kullanılarak binanın dolgu duvarlı durumda hakim titreşim periyodu, akma taban kesme kuvveti ve etkili rijitliği tahmin edilmiştir. Yapılan tahminlerin dolgu duvarlı analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması Tablo 3 'de verilmiştir. Buradaki örnek bina malzeme özellikleri iyi malzeme kullanıldığı varsayımına dayanmakta olup, daha kötü malzeme varsayımlarından elde edilen tahmin değerlerin hesaplanan değerlere daha yakın olacağı düşünülmektedir.

Tablo 3. Önerilen denklemlerin örnek bina analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

Açıklama	X Yönü			Y Yönü		
	T (sec)	**Vy (kN)**	**Ky (kN/m)**	**T (sec)**	**Vy (kN)**	**Ky (kN/m)**
Dolgu Duvarsız Bina	0.870	6250	94.5	1.053	5200	69.2
Dolgu Duvarlı Bina	0.822	8800	123.1	0.780	8650	127.7
Tahmin Edilen Dolgu Duvarlı Bina	0.788	6993	131.4	0.966	5739	92.8
Hata	4.2%	20.5%	6.8%	23.8%	33.6%	27.3%

5. ÖZET VE SONUÇ

Bu çalışma betonarme binaların dayanım, rijitlik ve dinamik özelliklerine dolgu duvarların katkısını irdelemiştir. Bir çok olanaklı dolgu duvar modeli arasından en yaygın olarak kullanılan Smith [9] modeli seçilerek betonarme binaların analitik modellenmesinde kullanılmıştır. Değişik miktarlarda dolgu duvar içeren 28 bina iki temel doğrultuda incelenmiştir. Her bina dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız olacak şekilde modellenmiştir. Statik itme analizleri yapılarak dayanım, yer değiştirme, periyot ve etkili rijitlik gibi kapasite eğrisi parametreleri belirlenmiştir. Betonarme binaların akma taban kesme kuvveti, periyot ve etkili rijitliklerindeki değişimler dolgu duvar alanı oranına bağlı olarak verilmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki, dolgu duvarlar betonarme binaların dayanım ve rijitliğini dolgu duvar alanı oranına bağlı olarak önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu değişimi tahmin etmek için önerilen denklemlerin kullanmı oldukça basittir ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Örnek bina üzerinde yapılan analizlerde dolgu duvarların betonarme bina davranışına ait değişkenler %5-%30 hata aralığında tahmin edilmiştir. Bu hata oranı malzeme özelliklerine bağlı olarak daha da düşük seviyelere inebilmektedir.

KAYNAKLAR

[1]: El-Dakhakhni, W. W., Hamid, A. A., Hakam, Z. H. R., and Elgaaly, M. Hazard mitigation and strengthening of unreinforced masonry walls using composites. Compos. Struct., 73/4 (2006) 458–477.

[2]: METU EERC, 9 November 2011 Van Earthquake Report. METU, Ankara, Turkey, 2011.

[3]: Kappos, A. J. Seismic design and performance assessment of masonry infilled RC frames. Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering, International Association of Earthquake Engineering (IAEE), Tokyo, 2000.

[4]: Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S., Chrysostomou, C.Z. Mathematical Macromodeling of Infilled Frames: State of the Art. Journal of Structural Engineering. 137 (2011) 1508-1517.

[5]: Calvi, G.M., Bolognini, D. And Penna, A. Seismic Performance of Masonry-Infilled RC Frames – Benefits of Slight Reinforcements. Proceedings of SISMICA 2004, 60 Congresso Nacional de Sismologiae Engenharia Sismica, Portugal, 2004.

[6]: Hashemi, A., and Mosalam, K. M. Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 35(14) (2006) 1827–1852.

[7]: Shing, P. B. and Mehrabi A. B. Behaviour and analysis of masonry-infilled frames. Prog. Struct. Engng Mater, 4 (2002) 320–331.

[8]: Holmes, M. Steel frames with brickwork and concrete infilling. ICE Proc., 19/4 (1961) 473–478.

[9]: Smith, B. S. “Lateral stiffness of infilled frames.” J. Struct. Div. 88/6 (1962) 183–199.

[10]: Mainstone, R. J. Supplementary note on the stiffness and strengths of infilled frames, Building Research Station, Garston, UK, 1974.

[11]: Hendry, A. Structural brickwork, Macmillan, London, 1981.

[12]: Liauw, T. C., and Kwan, K. H. "Nonlinear behaviour of nonintegral infilled frames." Comput. Struct. 18 (1984) 551–560.

[13]: Paulay, T., and Pristley, M. J. N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, Wiley, New York, 744, 1992.

[14]: Flanagan, R. D., and Bennett, R. M. "In-plane analysis of masonry infill materials." Pract. Period. Struct. Des. Constr. 6/4 (2001) 176–182.

[15]: Computer and Structures, Inc., SAP 2000 Nonlinear, Version 7.21, Structural Analysis Program, Berkeley, CA, 2000.

[16]: Erduran, E. Component Based Seismic Vulnerability Assessment Procedure for RC Buildings. Ph.D. Dissertation. Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.