TUĞLA YIĞMA DUVARLAR İÇİN PERFORMANSA DAYALI BİR DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ

Aldemir, A.[1], Erberik, M.A.[2] ve Sucuoğlu, H.[3]

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

ÖZET:

Yatay yükler altında zayıf davranış gösteren yığma yapıların daha iyi tasarlanması ya da daha önceden belirlenmiş yük etkileri altında nasıl davranacağının değerlendirilmesi için güncel yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu noktadan yola çıkarak, bu çalışmada tuğla yığma yapıların değerlendirilmesine olanak sağlayan performansa dayalı yeni bir yöntem önerilmesi hedef olarak seçilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, sonlu eleman analizi kullanılarak farklı geometrik özelliklere, eksenel yük oranlarına ve duvar basınç dayanımlarına sahip yığma duvar elemanlarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri oluşturulmuştur. Sonra, elde edilen bu kapasite eğrileri FEMA356'da önerilen doğrusallaştırma metodu kullanılarak iki çizgi ve dört parametre ile ifade edilebilecek şekilde basitleştirilmiştir. En son aşamada ise dört parametre ile idealize edilmiş yığma duvar veri tabanından faydalanılarak ve lineer olmayan regresyon analizleri kullanılarak ampirik denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler duvarın geometrik özelliklerine, eksenel yük oranına ve basınç dayanımına bağlı olup herhangi bir tuğla yığma duvar biriminin yük ve yer değiştirme kapasitesinin sonlu elemanlar yaklaşımına gerek olmaksızın gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesine olanak vermektedirler. Böylece farklı özelliklerdeki yığma duvar birimlerinden oluşan bir yığma yapının performans değerlendirmesi aşamasında kapasite eğrisi çok kısa bir zamanda elde edilebilmektedir. Çalışmanın sonunda, basitleştirilmiş değerlendirme yöntemi ve sonlu eleman analiz sonuçlarının birbiriyle tutarlılığını ölçmek amacıyla mevcut bir binanın kapasite eğrisi elde edilip sözü geçen bu binanın olası bir deprem altındaki performansı mevcut deprem yönetmeliğindeki metotlar kullanılarak belirlenmiştir. Kapasite eğrileri karşılaştırıldığında bu araştırmada önerilen basit metodun sonlu eleman analiz tahminlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER : Yığma Duvar, Yığma Yapı, , Sismik Performans, Kapasite Eğrisi, Düzlemsel Davranış

1. GİRİŞ

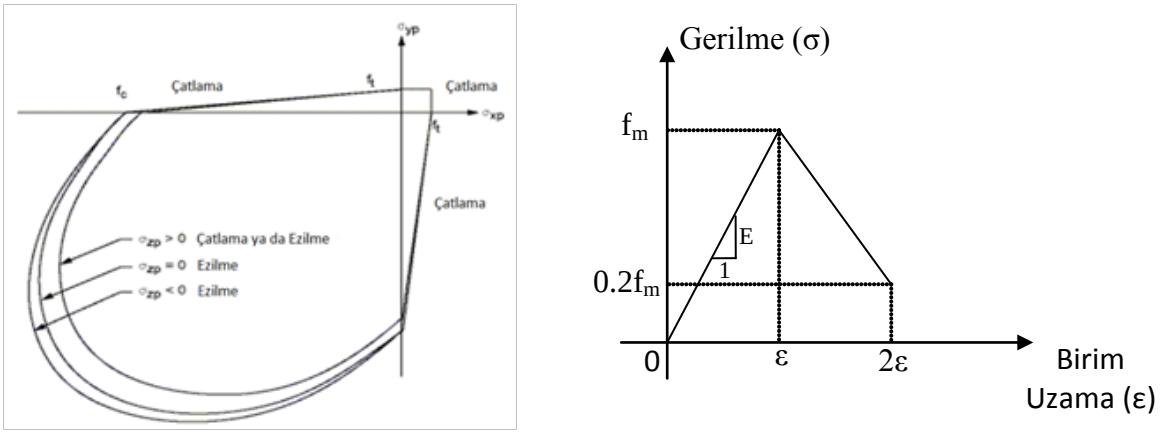
Günümüzde hem tasarım hem de değerlendirme aşamalarında performansa dayalı yaklaşımlar oldukça fazla önem kazanmaya başlamıştır. Bilindiği gibi performansa dayalı yöntemlerin hepsinde ana amaç, önceden belirlenmiş yük etkilerine maruz kalan yapının hasarının belirlenmesi ve bu elde edilen hasara göre binanın durumunun değerlendirilmesidir. Bu sebepten ötürü, ilk etapta yapılması gereken, söz konusu yapının kapasite eğrisini oluşturmaktır. Kapasite eğrisini elde etmek, betonarme ve çelik yapılar için, yığma yapılara göre çok daha kolay olmaktadır. Bunun temel sebebi olarak yığma yapıların davranışının analitik olarak modellemesinin zor olması gösterilebilir. Bir başka deyişle insanların barınma ihtiyaçlarını karşılamaya başladıkları ilk günlerden beri kullanılagelen bu karmaşık malzeme halen tam olarak anlaşılamamıştır. Bu durumda, her ne kadar malzemenin karmaşıklığının rolü çok büyük olsa da yığma yapıların genellikle mühendis gözetimi olmaksızın geleneksel yöntemler kullanılarak yapılmalarının da önemli bir etkisi vardır.

Bahsi geçen sebeplerden ötürü performansa dayalı hesap yöntemlerinin yığma yapılara uyarlanabilmesi için hem deneysel hem de analitik birçok çalışma yapılması gerektiği aşikârdır. Bu bildiri, tuğla yığma yapılar için performansa dayalı bir metot geliştirilmesi için yapılan analitik çalışmaları özetlemektedir. İlk olarak, çalışmanın geri kalanında kullanılacak olan sonlu elemanlar modeli tahkik edilmiştir. Daha sonra ise bu analitik model kullanılarak farklı geometrik özelliklere, eksenel yük oranlarına ve duvar basınç dayanımlarına sahip yığma duvarların kapasite eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen kapasite eğrileri kullanılarak oluşturulan veritabanından ise çalışmanın bir sonraki aşaması olan regresyon analizlerinde faydalanılmıştır. Böylece, yığma duvar elemanlarının kapasite eğrileri ampirik formüller kullanılarak basit bir şekilde elde edilirken bu ampirik formüller karmaşık sonlu eleman analizlerini temel aldığı için de oldukça güvenilirdir.

2. ANALİTİK MODEL

2.1 Model Detayları

Bu kısımda yığma duvarların analitik modellenmesi hususunda ayrıntılı bilgiler verilecektir. Çalışma boyunca kullanılan sonlu eleman modelleri ANSYS (2007) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modellerde 8 düğüm noktasına sahip katı elemanlar (SOLID65) kullanılmıştır. Ayrıca, elemanlarda elastik ötesi davranışı da taklit edebilmek için iki ayrı plastisite modeli birleştirilip kullanılmıştır. Bunlardan ilki betonarme için geliştirilmiş Willam-Warnke (1975) (Şekil 1.a) plastisite modeli ve ikincisi ise çoklu doğrusal izotropik plastisite modelidir (Şekil 1.b). Bu iki model ANSYS tarafından hep içte kalan etkin olacak şekilde birleştirilmektedir.



(a) (b)

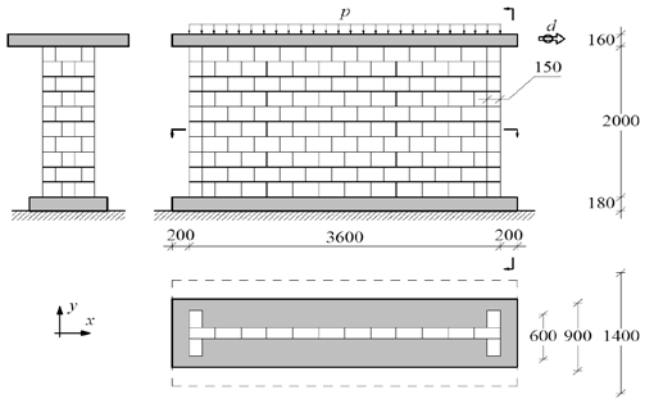
Şekil 1. Analitik Modelde Kullanılan Plastisite Modelleri; (a) Willam-Warnke Plastisite [ANSYS 2007b]; (b) Çoklu Doğrusal Plastisite

Analitik model ve kullanılan malzeme modellerinin daha ayrıntılı açıklamaları Aldemir (2010)'da yer almaktadır.

2.2 Analitik Model Kontrolü

Bu kısımda bir önceki bölümde tanımlanan analitik modelin tuğla yığma duvarın düzlemsel davranışını taklit edip edemediği kontrolü yapılacaktır. Bunun için ETH Zürih'te gerçekleştirilmiş olan test programından faydalanılmıştır. Bu test programı ayrıntıları başka bir kaynakta bulunmaktadır (Lourenco,1996).

Kullanılacak test duvarı delikli fabrika tuğlalarından meydana gelmektedir. Ayrıca, test elemanı bir adet yığma duvar paneli (3600x2000x150 [mm^3]) ve iki tane uç elemanından (150x2000x600 [mm^3]) oluşmaktadır (Şekil 2). Şekil 2'den de kolaylıkla anlaşılacağı gibi test edilen duvarda, gerçek bir yığma duvarı doğru temsil edebilmesi için, betonarme temel ve betonarme döşeme de bulunmaktadır. Duvarda kullanılan malzemenin mekanik özellikleri ise Tablo 1'de özetlenmektedir.

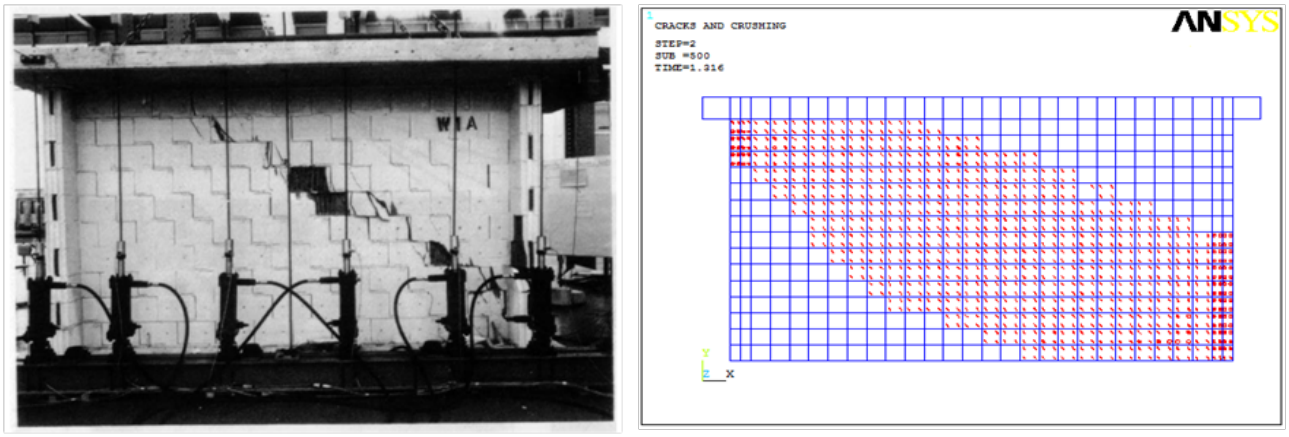


Şekil 2. Test edilen duvarın boyutları (Lourenco, 1996)

Tablo 1. Test edilen duvar malzemesinin mekanik özellikleri

E (MPa)	ν	G (MPa)	f_m (MPa)	f_{mt} (MPa)
2460	0.18	1130	7.61	0.28

Test yönteminden de kısaca bahsetmek gerekirse; öncelikle duvarın üzerine dikey olarak düzgün yayılı bir yük ($p=0.61$ N/mm^2) uygulanmaktadır ve sonra duvar döşeme hizasından sağa doğru çekilmektedir. Deney sonrasında oluşan çatlaklar ve aynı deneyin analitik modelinden elde edilen çatlak tahminleri Şekil 3'te verilmektedir.



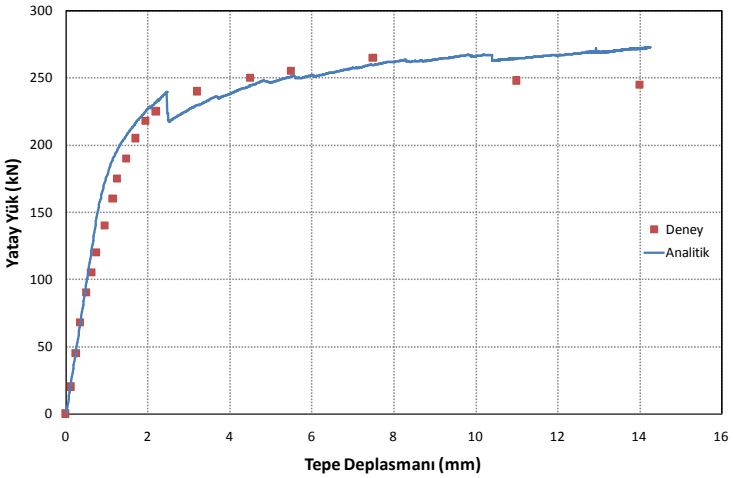
(a) (b)

Şekil 3. Duvarın yıkılma anındaki çatlakları: (a) ETH Zürih Testi (Lourenco, 1996); (b) Analitik Model

Şekil 3 incelendiğinde duvarın yıkılma sebebinin duvar köşegeninde oluşan çatlak olduğu savunulabilir. Bu sav analitik model tarafından da desteklenmektedir. Yani, analitik model duvarın göçme mekanizmasını oldukça iyi bir şekilde tahmin etmiştir.

Bunlara ek olarak analitik model ve laboratuarda gerçekleştirilen test sonrası elde edilen kapasite eğrileri de karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar Şekil 4'te verilmektedir. Bu şekle bakıldığında analitik modelin gerçek kapasite eğrisini iyi bir şekilde tahmin ettiği söylenebilir. Örneğin, deneyde 265 kN olarak elde edilmiş olan maksimum yatay yük, analitik model tarafından 272.8 kN olarak hesaplanmaktadır. Aradaki fark yüzde cinsinden %2.94'tür. Bu fark yığma gibi birçok belirsizliği içinde barındıran yapı tipinde önemsenmeyecek kadar azdır. Ayrıca, maksimum yatay deplasman deneyden 14.2 mm elde edilirken model bunu 14 mm

olarak tahmin etmiştir ki bu değerler arasındaki yüzde cinsinden hata %1.43'tür. Fakat, Şekil 4'ten anlaşılacağı gibi analitik modelin duvarın elastik ötesi azalan kapasitesini taklit edemediği çok açıktır. Bunun temel sebebi ANSYS'te lineer ötesi çözümler için Newton-Raphson metodunun iterasyon içinde kuvvet kontrolü uygulanmadan kullanılmasıdır.



Şekil 4. Analiz ve deneyden elde edilen kapasite eğrileri

3. ANALİZLER

Bu bölümde ikinci kısımda açıklanan analitik model kullanılarak farklı geometrik özelliklere ve farklı eksenel yük oranlarına sahip yığma duvarların kapasite eğrileri oluşturulacaktır. Bunun için ilk önce yığma duvarlar en-boy oranlarına, eksenel yük kapasitelerine ve eksenel yük oranlarına göre sınıflandırılmıştır. Tablo 2-4, analizlerde kullanılacak yığma duvar sınıflarını özetlemektedir. Bu uygulanan sınıflandırmanın detayları daha ayrıntılı bir şekilde Aldemir (2010)'da bulunabilir.

Tablo 2. Eksenel kapasiteye göre sınıflandırma

Kategori	Eksenel Basınç Kapasitesi (MPa)
Düşük	2
Orta	5
Yüksek	8

Tablo 3. En-boy oranına göre sınıflandırma

Kategori	En-boy oranı
Bodur	0.25
Bodur	0.5
Normal	0.75
Normal	1.0
Normal	1.25
Normal	1.5
Narin	1.75
Narin	2.0

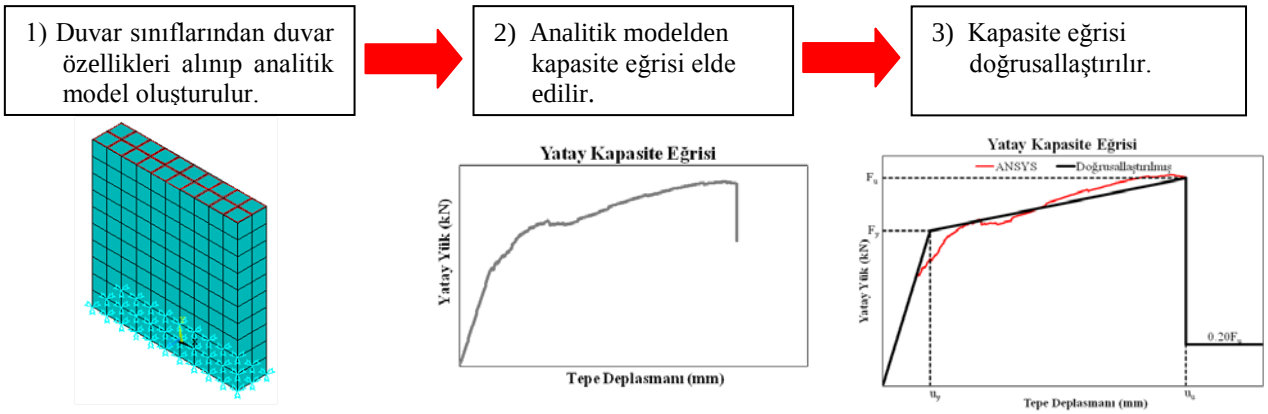
Tablo 4. Eksenel yük oranına göre sınıflandırma (f_m duvarın eksenel basınç kapasitesidir.)

Kategori	Eksenel Yük Oranı
Düşük	0.05 f_m
Düşük	0.10 f_m
Orta	0.20 f_m
Orta	0.30 f_m
Yüksek	0.40 f_m
Yüksek	0.50 f_m

Sonraki aşamada ise yukarıda verilen sınıflandırmaya göre oluşturulan veritabanının kapasite eğrileri analitik olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu eğriler daha sonra regresyon analizlerinde kullanılabilmek için FEMA356'da verilen doğrusallaştırma yönteminden faydalanılarak iki çizgi ve dört parametre ile ifade edilebilecek şekilde basitleştirilmiştir. Bu uygulanan yöntem daha kolay anlaşılabilmesi için Şekil 5'te özetlenmektedir.

Bu işlemlerin ardından oluşturulan veritabanı kullanılarak herhangi bir yığma duvarın kapasite eğrisini oluşturmak için lineer olmayan regresyon analizleri yapılmıştır. Bu analizler SPSS (2006) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve analizler sonucunda duvarın lineer davranışının değiştiği noktanın kuvveti (F_y) ve

deformasyonu (δ_y), maksimum kapasitenin oluştuğu noktanın kuvveti (F_u) ve deplasmanı (δ_u) basit formüller vasıtasıyla hesaplanabilir hale gelmektedir. Bilindiği gibi lineer olmayan regresyon analizlerinde öncelikle bir matematiksel model belirlenmelidir. Bu nedenle birçok matematiksel model içinden determinasyon katsayısı (r^2 değeri) en yüksek olanlar dikkate alınmıştır. Regresyon analizlerinde kullanılan matematiksel modeller ve analiz detayları Aldemir (2010)'da bulunabilir.



Şekil 5. Analizlerde kullanılan yöntemin şematik anlatımı

Regresyon analizleri sonucunda elde edilen formüller aşağıda verildiği gibidir. Bu formüllerde kullanılan katsayıların (C_i) değerleri ise Tablo 5'te verilmektedir. Ayrıca, bu analizler sonucunda determinasyon katsayıları F_y, F_u, δ_y, ve δ_u için sırasıyla 0.984, 0.982, 0.982 ve 0.962 olarak hesaplanmıştır.

$$\hat{F} = C_1 * p^{C_2} * {f_m}^{C_3} * e^{C_4 \lambda} * L * t \quad (1)$$

$$\delta_y = C_1 * p^{C_2} * e^{C_3 f_m} * \lambda^{C_4} * L \quad (2)$$

$$\delta_u = C_1 * p^{C_2} * e^{C_3 f_m} * \lambda^{C_4} * L * t \quad (3)$$

Yukarıdaki formüllerde $\hat{F}$ kuvvet (kN), δ_y ve δ_u deplasman (mm), p eksenel basınç (MPa), f_m eksenel basınç kapasitesi (MPa), λ en-boy oranı, L duvar uzunluğu (m), t duvar kalınlığı (m) ve C_i katsayılardır.

Tablo 5. δ_y, F_y, δ_u and F_u için Regresyon katsayıları

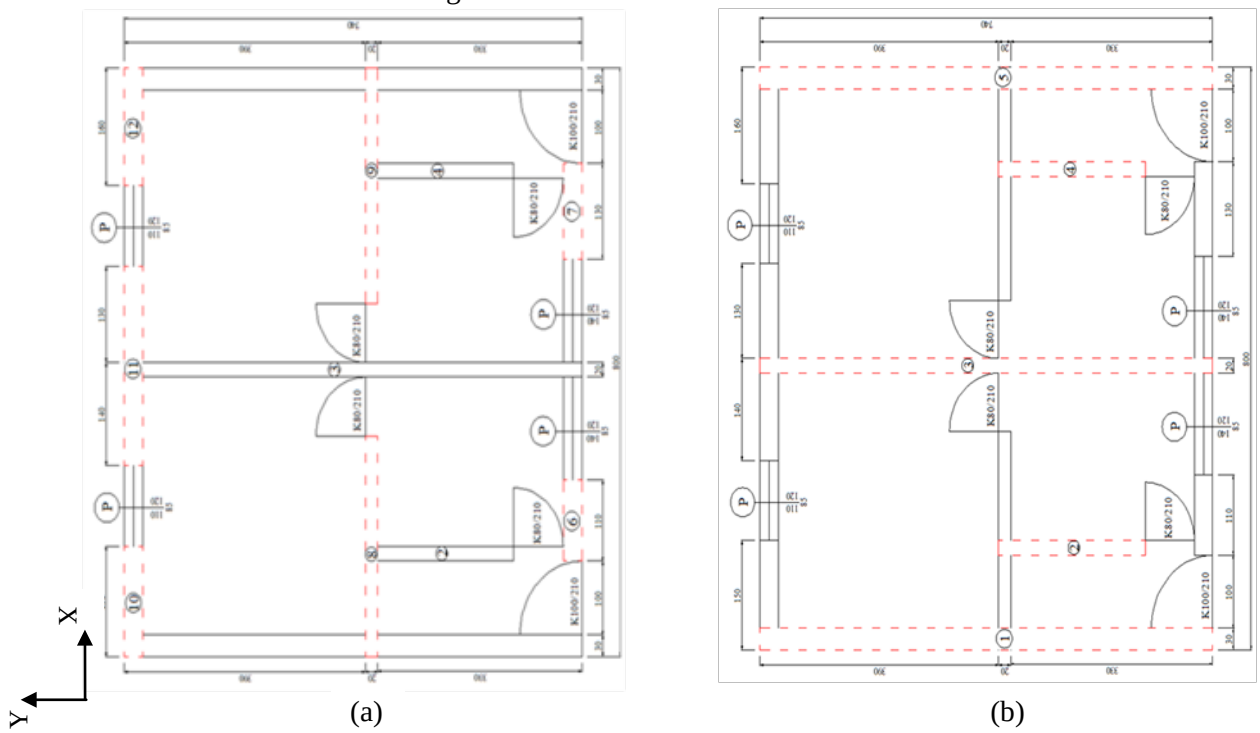
Değişken Adı	**Regresyon Katsayısı**			
	C_1	**C_2**	**C_3**	**C_4**
δ_y (mm)	0.587	0.543	0.095	1.426
F_y (kN)	70.629	0.604	0.414	-0.931
δ_u (mm)	0.477	-0.540	0.319	1.414
F_u (kN)	70.431	0.498	0.501	-0.856

4. VAKA ÇALIŞMASI

En son olarak bu kısma kadar anlatılmış olan kapasite eğrisi elde etme yöntemlerinin gerçek durumlara uygulanmış halini göstermek amaçlı bir vaka çalışması yapılmıştır. Bu çalışmayla amaçlanan

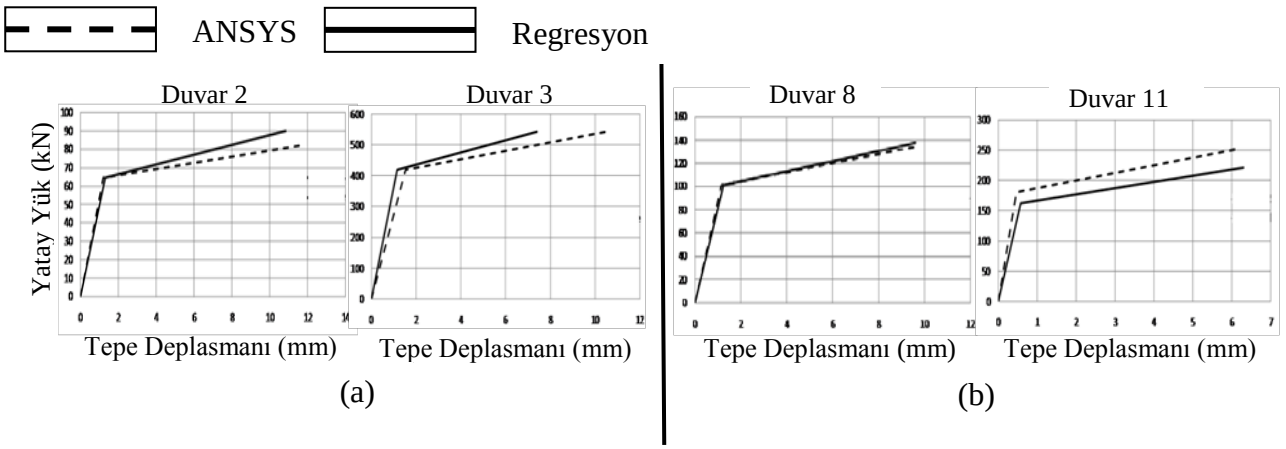
a) Basit bir şekilde yığma bina değerlendirmesi yapmak
b) Değerlendirme aşamasında hem ANSYS analizleri kullanarak hem de oluşturulan kapasite eğri denklemlerinden faydalanılarak basit kapasite eğrilerini sınamaktır.

Seçilen bina İstanbul'da bulunan 3 katlı bir tuğla yığma yapıdır. Bu binanın ilk kat yüksekliği 2.9 m olup diğer katların yüksekliği 3m'dir. Binanın malzeme detayları bulunmadığı için ANSYS analizlerinde kullanmak maksatlı elastisite modülü 2000 MPa, basınç dayanımı 5 MPa, çekme dayanımı 0.35 MPa ve Poisson oranı 0.20 olarak alınmıştır. Bu binanın plan görünümü Şekil 6'da verilmektedir. Yine Şekil 6'da binanın duvarlarına verilen etiketler de gösterilmektedir.



Şekil 6. Binanın plan görünümü: (a) X yönündeki duvar etiketleri; (b) Y yönündeki duvar etiketleri

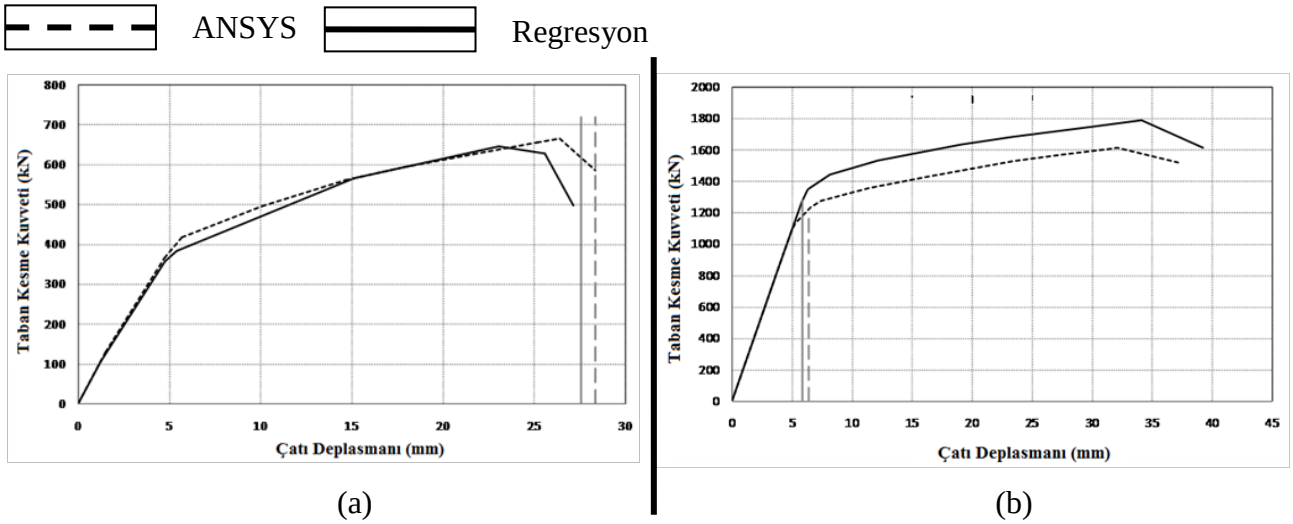
Yığma duvarların yüksekliklerini belirlemek için Dolce (1989)'nin önerdiği metot kullanılmıştır. Böylece her duvarın geometrik özelliği belirlenmiştir. Daha sonra bu duvarların kapasite eğrileri hem ANSYS analizlerinden hem de regresyon formüllerinden elde edilmiştir. Bu eğrilerin iki yönde de farklı duvarlar için karşılaştırılması Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. Duvarların kapasite eğrileri: (a) Y yönündeki iki duvar; (b) X yönündeki iki duvar

Bu kapasite eğrileri kullanılarak binanın itme analizi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem SAP2000 (2009) kullanılarak yapıldığı için bu elde edilen kapasite eğrileri SAP2000'deki kesme mafsallarının özellikleri

girilirken kullanılmıştır. Bu yüzden elde edilen bina kapasite eğrileri birbirinden farklılık göstermektedir (Şekil 8). Ayrıca modelleme ve kapasite hesap detayları Aldemir (2010)'da bulunabilir.



Şekil 8. Binanın kapasite eğrisi: (a) X doğrultusu; (b) Y doğrultusu

Şekil 8'den de anlaşılacağı gibi binanın x doğrultusundaki itme analiz sonuçları hem ANSYS hem de regresyon eğrileri kullanılarak yapıldığında birbirine çok yakın cevaplar vermektedir. Fakat, binanın y doğrultusundaki kapasitesi regresyon denklemleri kullanılarak yapılan analizlerde ANSYS analizlerine göre daha yüksek çıkmaktadır. Bunun temel sebebi regresyon formülleriyle y yönündeki en büyük duvarın (Duvar 3) kapasitesini doğru tahmin edilememesidir (maksimum deplasman kapasitesi %40 hata içermektedir.). Bu duvarın bu kadar hatalı olarak tahmin edilmesinin nedeni ise çok nadir görülen bir geometriye sahip olması olarak gösterilebilir. Çünkü, bu yönde üç tane 7.4 m uzunluğunda duvar bulunmaktadır ki bu genellikle karşılaşılmayan bir durumdur.

Son olarak Türk Deprem Yönetmeliği (2007) uyarınca bu binadan istenen deplasman talebi incelenmiştir. Bu değerler Şekil 8'de grafik üzerine işaretlenmiştir. Şekil 8'e bakıldığında binanın x doğrultusunda kendisinden istenen deplasman talebini karşılayamayacağını ama y doğrultusunda ise minimum hasarla bu deprem taleplerini atlatacağını görmekteyiz.

5. ÖZET VE SONUÇLAR

Bilindiği gibi yığma yapılar tüm yapı türleri içinde belki de en az anlaşılmış malzeme özelliklerine sahiptir. Bu nedenle bu yapı tiplerinin tasarımında oldukça basitleştirilmiş ve çoğu zaman ampirik hesap yöntemleri kullanılmaktadır. Ayrıca, bu basitleştirilmiş hesap yöntemlerinin geliştirilmesi ve daha güvenilir bir hale getirilmesi için hem deneysel hem de analitik çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Yukarıda anlatılan sebeplerden ötürü bu çalışmada tuğla yığma yapılar için basitleştirilmiş bir performansa dayalı yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunun için ilk olarak yığma duvarların sonlu eleman analizleriyle kapasite eğrileri elde edilmiş ve bu model kullanılarak daha basit bir hesap yöntemi için veritabanı oluşturulmuştur. Bahsi geçen basit hesap yönteminde sadece birkaç formül kullanılarak farklı geometrik ve malzeme özelliklerine sahip bir duvarın kuvvet-yer değiştirme eğrisi oluşturulabilmektedir. Böylece karmaşık ve zaman alıcı analizler yapmaksızın performansa dayalı yöntemlerde kullanılabilecek kapasite eğrilerine çok kolay ve güvenilir bir şekilde ulaşılabilmektedir.

En son olarak bu basitleştirilmiş kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin (regresyon formülleri) güvenilirliği ve gerçek bir yapının performansa dayalı hesabında nasıl kullanılabileceğine dair bir örnek vaka çözümü yapılmıştır. Bu örnek bina incelemesinin sonucunda kullanılan basit formüllerin karmaşık sonlu eleman analizlerine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, karmaşık sonlu eleman analizlerinin saatler aldığı göz önünde bulundurulursa bu basitleştirilmiş hesap yönteminin kazandırdığı zamanın da hiç de azımsanmayacak bir değer olduğu öne sürülebilir.

KAYNAKLAR

1) Aldemir, A. (2010) A Simple Seismic Performance Assessment Technique for Unreinforced Brick Masonry Structures, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara (İngilizce).
2) ANSYS Inc. (2007a) Basic Analysis Guide for ANSYS 11, SAS IP Inc (İngilizce).
3) ANSYS Inc. (2007b) Theory Reference for ANSYS 11, SAS IP Inc (İngilizce).
4) Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (2007) Deprem Bölgesinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik TEC-07, Ankara.
5) Dolce, M. (1989) "Schematizzazione e modellazione per azioni nel piano delle pareti (Models for in-plane loading of masonry walls)", Corso sul consolidamento degli edifice in muratura in zona sismica, Ordine delgi Ingegneri, Potenza, Italy (İtalyanca).
6) Lourenço, P.B. (1996) Computational Strategies for Masonry Structures, Doktora Tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Hollanda (İngilizce).
7) FEMA356 (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Washington, DC: Federal Emergency Management Agency (İngilizce).
8) SAP2000 (2009) CSI Analysis Reference Manual Ver. 14, Computers and Structures Inc., Berkeley, California (İngilizce).
9) SPSS Manual (2006) SPSS Inc., SPSS Ver. 15.0, Chicago, IL (İngilizce).
10) Willam, K.J., and E.D. Warnke (1975) Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete. *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy, p. 174 (İngilizce).