

DOLGU DUVARLARIN BETONARME ÇERÇEVELİ YAPILARIN DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Mehmet BARAN

Kırıkkale Üniversitesi İnş. Müh. Böl., 71450, Kırıkkale.
mbaran@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 15.08.2011; Kabul/Accepted: 16.11.2011)

ÖZET

Türkiye’de betonarme (BA) çerçevesi yapılarında tuğla dolgunun bölme duvar olarak uygulanması çok yaygındır. Tuğla dolgular yapısal çözümleme esnasında her ne kadar taşıyıcı elemanlar olarak kabul edilmeseler de, yıllardır yapılan deneysel çalışmalar ve Türkiye’de yaşanan depremlerden sonra binalar üzerinde yapılan araştırmalar tuğla dolguların yapıların dayanım ve rijitliğine birçok durumda olumlu yönde katkısı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Türk Deprem Yönetmeliğine göre, tuğla dolgu duvarlar yapıya zati yük olarak etkide bulunmakta, fakat yapının taşıyıcı özelliklerine etki etmemektedirler. Bu çalışmanın deneysel kısmında, tek açıklıklı iki katlı betonarme çerçeveler düşey ve depremi andıran tersinir-tekrarlanır yatay yükler altında test edilmiş, boşluklu tuğla dolguların BA çerçevesi deney elemanlarının dayanım ve davranışlarına olan etkileri irdelenmiştir. Çalışmanın kuramsal kısmında kuramsal çalışmaların sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve yapısal çözümleme esnasında tuğla dolgu duvarların basitçe modellenebileceği bir yöntem önerilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Betonarme Bina, Tuğla Duvar, Dolgu Duvar.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF INFILL WALLS ON THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FRAMED STRUCTURES

ABSTRACT

In Turkey, the use of hollow brick infills as partition walls in reinforced concrete (RC) framed buildings is widely used in practice. Although hollow brick infills are considered to be non-structural members, experimental studies conducted for years and investigations made on the structures after the earthquakes occurred in Turkey revealed that, in many cases, hollow brick infills have favorable effects on the strength and stiffness of the structures. According to the Turkish Earthquake Code, hollow brick infills are taken into account only at the calculation of the total dead load, however they do not affect the structural characteristics of the building. In the experimental part of this study, this study, one-bay two story reinforced concrete frames were tested under both vertical and reversed-cyclic lateral loads simulating the earthquake loads, and the effect of hollow brick infills on the strength and stiffness of the RC frames were investigated. In the analytical part of the study, the results of the analytical studies were compared with the results of the tests and a simple modeling of the hollow brick infills during the structural design process was proposed.

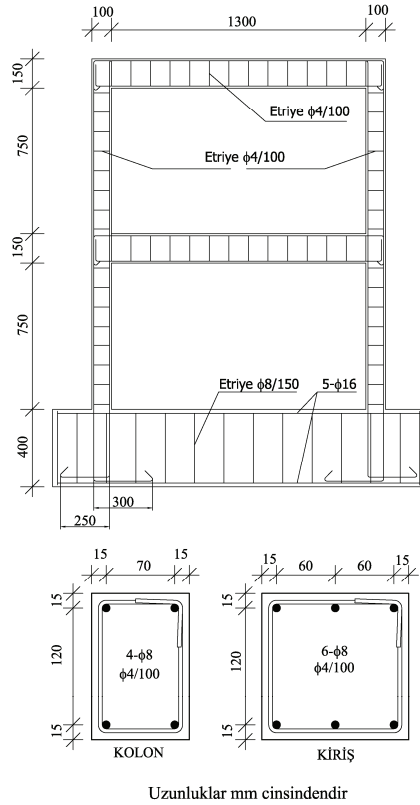
Keywords: Reinforced Concrete Building, Hollow Brick Wall, Infill Wall.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme taşıyıcı sisteme sahip binalarda bölme duvarı olarak tuğla dolgunun kullanılması ülkemizde çok yaygındır. Tuğla dolgunun sadece binanın zati ağırlığında hesaba katılması, dayanım ve rijitlik gibi yapısal özelliklerine katkısının göz ardı edilmesi

fazlaca tercih edilen bir yaklaşımdır. Homojen ve izotropik olmayan tuğla dolgunun, yapısal çözümleme esnasında modellenmesinin birçok değişkenden dolayı karmaşık ve uzun olması bu yaklaşımın tercih edilmesinde çok etkilidir. Bu yaklaşım sonucu yapının doğal periyodu, her bir kolon ve kirişe transfer olan deprem yükü, kolonlarda oluşabilecek kısa kolon

mekanizması, yapının deprem yükü altında oluşabilecek göçme biçimi doğru değerlendirilmiş olmamaktadır. Birçok ülkenin deprem standartları (İsrail, Kosta Rika, Fransa, Cezayir, Avrupa Birliği, Kolombiya, Filipin vs.) dolgu duvarların bina yapısal sistemine etkisinin hesaba katılmasını önermektedir [2]. Hesaba katılmayan ya da gerçekçi bir şekilde modellenmeyen tuğla dolgu duvarlar ile yapılan yapısal çözümlemenin gerçeği yansıtmayacağı ve doğru sonuçlar vermeyeceği bugüne kadar yapılan deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir.



Şekil 1. Deneysel Çerçevesinin Boyutları ve Donatılandırılması (Dimension and Reinforcement of Test Frames)

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

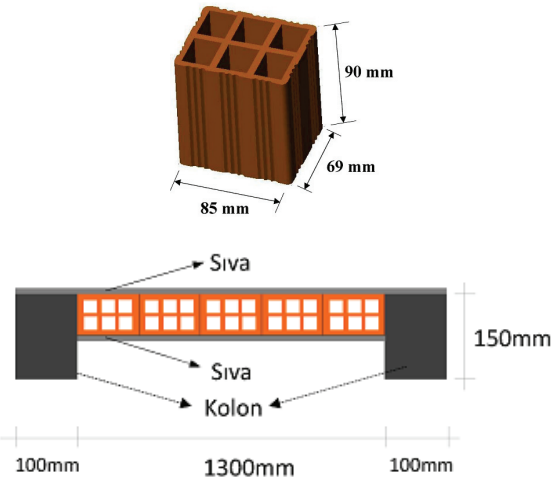
2.1. Deneysel Çerçevesi (Test Frames)

Çalışmanın deneysel kısmında test edilen deneysel çerçeveleri [3] 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, iki katlı betonarme çerçevelerdir. Türkiye’de yapılarda sık karşılaşılan eksiklikler bu çerçevelere bilinçli olarak yansıtılmıştır. Bu eksiklikler düşük beton dayanımı, düz demir kullanımı, katlar arası boyuna donatı eklerinde yetersiz bindirme boyu, yetersiz sargı donatısı ve zayıf kolon-güçlü kiriş birleşimidir. Deneysel çerçevelerinin katları boşluklu tuğla ile örülüp her iki yüzden sıvanmıştır. Çalışmanın amacı dolgu tuğla dolgu duvarların çerçeve davranışına katkısını gözlemek olduğundan, kapasitenin alt ve üst sınırını oluşturacak bir dolgunsuz ve de bir BA dolgulu

çerçeve de test edilmiştir. Deneysel çerçevelerinin boyutları ve donatılandırılması Şekil 1’de gösterilmektedir.

2.2. Malzeme (Materials)

Türkiye’deki gerçek uygulamayı yansıtmaya açısından deneysel çerçevelerinde düşük dayanımlı beton kullanılmıştır. Şekil 2’de gösterilen düzende boşluklu tuğlalar örülüp, yaklaşık 1 cm kalınlığında çimento-kireç karışımı ile her iki yüzden sıvanmışlardır. Boşluklu tuğlaların Manisa’da 1/3 ölçekli olarak üretilmeleri hedeflenmiş fakat fabrika koşullarından dolayı en küçük yaklaşık 1/2 ölçekli üretilmişlerdir. Amaç dolgu duvarların davranışa katkısını gözlemek olduğundan, tüm boşluklu tuğla dolgular delik eksenini aynı olacak şekilde, dik olarak örülmüşlerdir. İşçilik kalitesinin deneysel çerçevelerinin davranışını üzerindeki olası olumlu etkisi düşünülerek dolgu duvarları sıradan bir işçilikle sıvanmıştır. Deneysel çerçevelerinde düz donatı kullanılmıştır. Deneysel çerçevelerinin malzeme özellikleri Tablo 1’de özetlenmektedir.



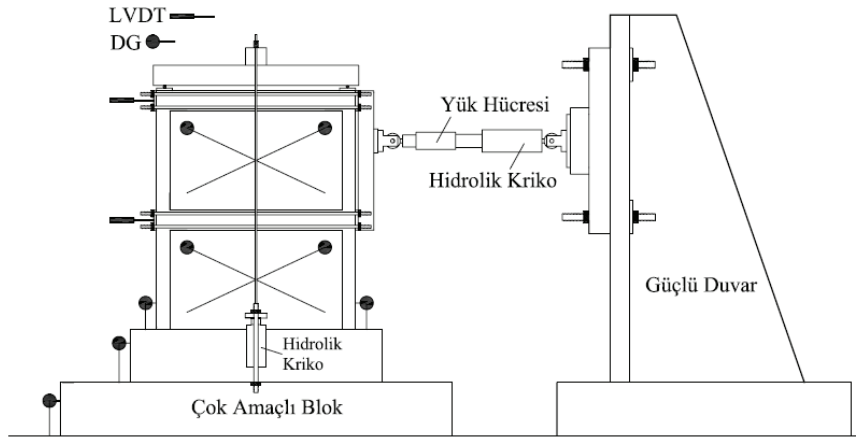
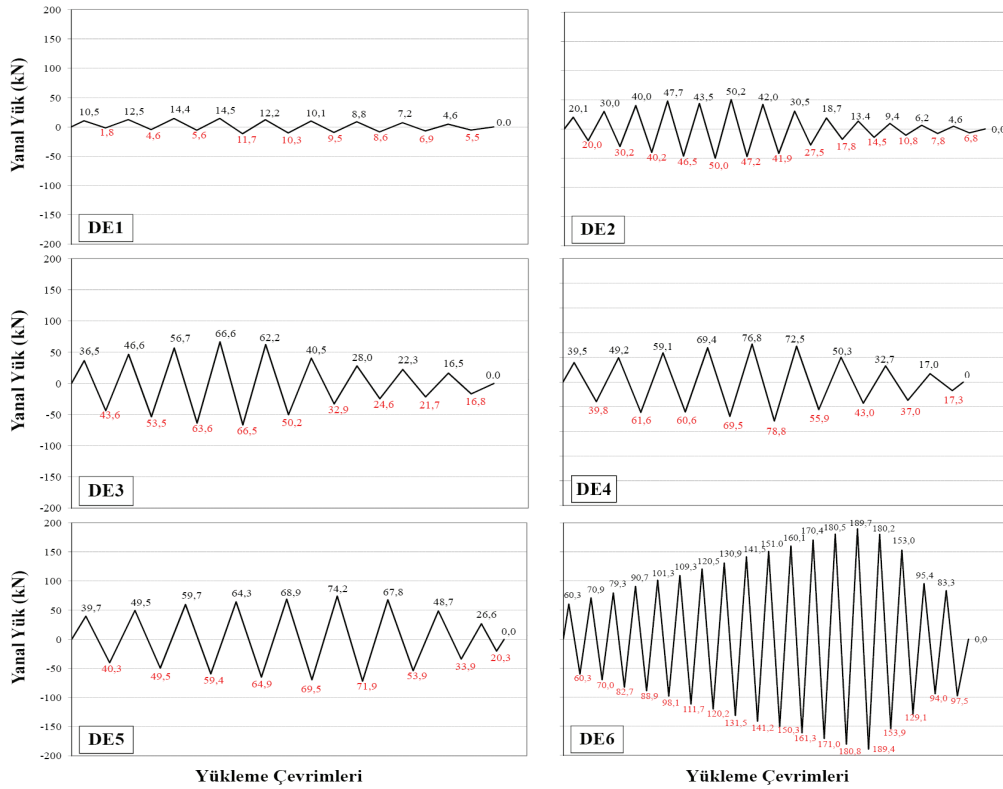
Şekil 2. Çerçevelerde Kullanılan Boşluklu Tuğla ve Örülme Düzeni (Hollow Brick Infills used in the Test Frames and Laying Arrangement)

2.3. Yükleme ve Ölçüm Düzeni (Loading-Supporting System and Instrumentation)

Deneysel çerçeveleri, depremi benzeştiren tersinir tekrarlanır yatay yüklere maruz bırakılmıştır. Kolon aksel yükleri ardgerme kabloları ile uygulanmıştır. Deprem yüklerini benzeştirmesi amacıyla uygulanan yatay yüklemeyi, üst katın alt kata oranı 2:1 olacak şekilde, paylaştıran bir yük dağıtıcı kiriş kullanılmıştır. Çerçevenin düzlemi dışındaki hareketlerini kısıtlamak için harici bir çelik çerçeve kullanılmıştır. İki safhalı bir yük senaryosu kullanılmış olup, deneysel çerçevesinin kapasite değerine kadar artan yük, kapasiteye ulaştıktan sonra ise artan deformasyon kontrollü yüklemeye yapılmıştır. Yükleme düzeni Şekil 3’de, deneysel elemanlarının yükleme geçmişleri Şekil 4’de verilmektedir.

Tablo 1. Deneç Elemanlarının Özellikleri (Properties of Test Frames)

Deneç Elemanı	Kolon Eksend Yüç Seviyesi (N/N _c)	Kolon Boyuna Donatısı	Bindirmeli Ek Uzunluğu	Boyuna Donatı Akma Day. (MPa)	Etriye Donatısı Akma Dayanımı (MPa)	Çerçeve Betonu Day. (MPa)	Tuğla Örne Harcı Dayanımı (MPa)	Sva Day. (MPa)
DE1	0,11	Sürekli	-	365	271	12,7	-	-
DE2	0,11	Sürekli	-	365	271	13,3	3,4	-
DE3	0,11	Sürekli	-	365	271	12,7	8,4	8,2
DE4	0,19	Sürekli	-	330	220	16,6	6,5	6,5
DE5	0,30	Bind Ekli	20 ϕ	330	220	8,6	3,5	3,5
DE6	0,10	Sürekli	-	405	268	15,0	23,1 ⁽¹⁾	-

⁽¹⁾Betonarme dolgu duvar dayanımı**Şekil 3.** Yüçleme Düzeni (Loading-Supporting System)**Şekil 4.** Deneç Elemanlarının Yüçleme Geçmişleri (Load Histories of all Test Frames)

Ölçüm düzeni Şekil 3’de gösterilmiştir. Kat düzeylerindeki yanal ötelenmeler LVDT’lerle, dolgu duvarlarının kayma deformasyonları ve deney elemanın rijit cisim olarak yaptığı dönme ve ötelenmeler komparatörlerle ölçülmüştür. Elektronik olarak yapılan tüm ölçümler bir bilgisayara kaydedilmiştir.

2.4. Yükleme ve Ölçüm Düzeni (Loading-Supporting System and Instrumentation)

Deney çerçeveleri, depremi benzeştiren tersinir tekrarlanır yatay yüklere maruz bırakılmıştır. Kolon eksenal yükleri ardgerme kabloları ile uygulanmıştır. Deprem yüklerini benzeştirmesi amacıyla uygulanan yatay yüklemeyi, üst katın alt kata oranı 2:1 olacak şekilde, paylaştıran bir yük dağıtıcı kiriş kullanılmıştır. Çerçevenin düzlemi dışındaki hareketlerini kısıtlamak için harici bir çelik çerçeve kullanılmıştır. İki safhalı bir yük senaryosu kullanılmış olup, deney çerçevesinin kapasite değerine kadar artan yük, kapasiteye ulaştıktan sonra ise artan deformasyon kontrollü yükleme yapılmıştır. Yükleme düzeni Şekil 3’de, deney elemanlarının yükleme geçişleri Şekil 4’de verilmektedir.

3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

3.1. Genel Davranış (General Behavior)

Bir adet dolgunsuz ve bir adet BA dolgulu olmak üzere toplam altı adet [3] iki katlı tek açıklıklı çerçeve düşey ve yanal yükler altında test edilmiştir. Boş (DE1) ve BA dolgulu (deney elemanı DE6) çerçeveler haricindeki diğer tuğla dolgulu çerçeveler, özellikle ilk turlarda dolgu duvarın dayanıma etkin katkısı ve dolgu duvarın belli bir yük seviyesinden sonra ezilmeye başlaması üzerine hızlı dayanım ve rijitlik kaybı ile karakterize edilen dolgulu çerçeve davranışı sergilemiştir. Bilinen bu çerçeve davranışı birinci katta oluşan yüksek ötelenmelerle birlikte göçme ile sonuçlanmıştır. Deney Elemanı DE6, BA dolgulu çerçeve davranışını gözlemlemek amacıyla test edilmiştir. Bu davranış dolgulu çerçeve davranışı için üst sınırı teşkil etmektedir. Beklendiği üzere, deney elemanı DE6, göçmenin temel kotu seviyesinde çekme tarafındaki kolonda donatı akması ve basınç

tarafındaki kolon dibinde ezilme ve donatıda burkulma oluşması şeklinde monolitik bir konsol kırış davranışı sergilemiştir. Sıvanmamış boşluklu tuğla dolgulu deney elemanı DE2 de dolgulu çerçeve davranışı sergilemiş olup her ne kadar dayanım bakımından sıvanmış deney elemanlarının seviyesini yakalayamadıysa da, sıvanmış boşluklu dolgulu elemanlardan daha sünek davranmıştır.

Deney Elemanı DE5’in testi, birinci kat kırış-sol kolon birleşiminin hemen altında oluşan diyagonal çatlağın kesme göçmesi şeklinde kolonu kırması nedeniyle sonlandırılmıştır.

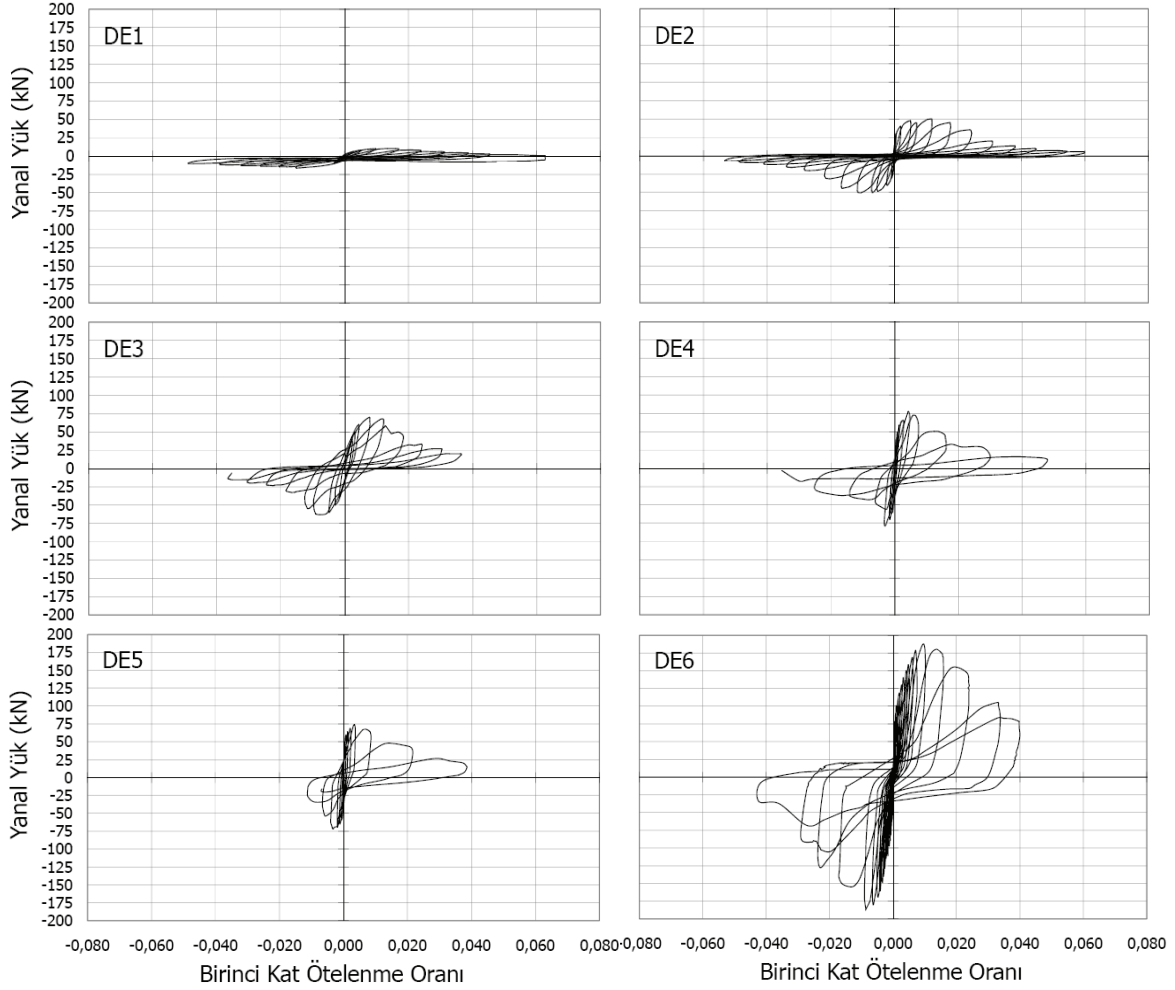
Ölçüm düzeni Şekil 3’de gösterilmiştir. Kat düzeylerindeki yanal ötelenmeler LVDT’lerle, dolgu duvarlarının kayma deformasyonları ve deney elemanın rijit cisim olarak yaptığı dönme ve ötelenmeler komparatörlerle ölçülmüştür. Elektronik olarak yapılan tüm ölçümler bir bilgisayara kaydedilmiştir.

Kat ötelenmesi oranı genelde yapısal olmayan hasarın ölçümünde ve ikinci derece etkileri kontrol altında tutmada kullanılan bir terimdir. Birinci ve ikinci kat ötelenme oranları Tablo 2’de verilmiştir. Tüm deney elemanlarının birinci kat ötelenmesinin yanal yüke bağlı değişimleri ise Şekil 5’de gösterilmiştir. Bu şekillere göre tuğla dolgu kullanımı ve dolgunun her iki yüzden sıvanması çerçevenin dayanımını ve rijitliğini arttırmıştır. Dolgunsuz deney elemanı DE1 maksimum yanal yük seviyesinde %1,60 birinci kat ötelenme oranına ulaşırken bu oran sıvanmamış dolgulu deney elemanı DE2 için %1,13 olmuştur. Sıvanmış dolgulu deney elemanları DE3, DE4 ve DE5 ise sırasıyla %0,43, %0,42 ve %0,35 birinci kat ötelenme oranlarına ulaşmışlardır. Ayrıca, bu değer BA dolgulu deney elemanı için maksimum yanal yük seviyesinde %0,79 olmuştur. Beklendiği üzere, deney elemanı DE2’nin değeri sıvanmış dolgulu elemanların değerinden daha fazla, dolgunsuz deney elemanı DE1’in değerinden az olmuştur. Tüm deney elemanlarında hasar birinci kat çerçeve ve varsa dolgusunda yoğunlaşmış olup çok doğal bir şekilde birinci kat ötelenme oranları ikinci kat değerlerinden daha fazla çıkmıştır.

Tablo 2. Deney Elemanlarının Test Özetleri (Summary of the Test Results)

Deney Elemanı	Maks. Yanal Yük (kN)	Oran ⁽¹⁾	Maks. Yanal Yükte 1. Kat Ötelenme Oranı δ_1/h	Oran ⁽²⁾	Maks. Yanal Yükte 2. Kat Ötelenme Oranı $(\delta_2-\delta_1)/h$	Oran ⁽²⁾	Göreceli İlk Rijitlik Oranı ⁽¹⁾	Enerji Tüketimi (kJ)	Süneklik
DE1	14,5	1,00	0,0160	2,03	0,0076	1,10	1,0	2,1	4,7
DE2	50,3	3,47	0,0113	1,43	0,0062	0,90	14,4	5,9	5,9
DE3	66,6	4,59	0,0043	0,54	0,0032	0,46	12,6	4,5	2,8
DE4	76,8	5,30	0,0042	0,53	0,0033	0,48	25,6	6,4	4,9
DE5	74,2	5,12	0,0035	0,44	0,0021	0,30	34,8	4,6	7,4
DE6	189,7	13,08	0,0079	1,00	0,0069	1,00	73,7	21,5	4,8

⁽¹⁾ Deney elemanı DE1’in değerine oranı - ⁽²⁾ Deney elemanı DE6’nın değerine oranı



Şekil 5. Tüm Deneysel Elemanların Yanal Yük – 1. Kat Ötelenme Oranı Grafikleri (Lateral Load – First Story Drift Ratio Graphs of Test Specimens)

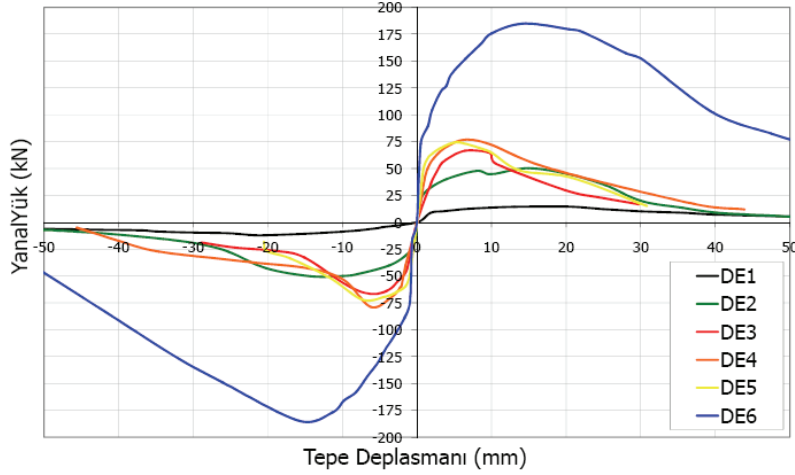
Türk Deprem Yönetmeliğine [4] göre, yapıların doğrusal analizinde maksimum kat ötelenme oranı 0,0035 ile sınırlandırılırken bu değer doğrusal olmayan analiz için 0,010 ile sınırlandırılmıştır. Tablo 2’den görülebileceği üzere, sıvanmış tuğla dolgu duvar sıvanmamış dolgu duvara oranla daha etkili bir oranda deformasyon miktarını azaltmıştır.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (DISCUSSION OF THE TEST RESULTS)

4.1. Dayanım ve Rijitlik (Strength and Stiffness)

Test sonuçları yük-tepe deplasmanı, enerji tüketimi, ilk rijitlik değeri başlıkları altında Tablo 2’de değerlendirilmiştir. Tabloda verilen değerler incelendiğinde deney elemanlarından DE4 ve DE5’in maksimum yanıl yük kapasitelerinin, birinin kat seviyelerinde kolon boyuna donatılarında 20φ (160mm) uzunluğunda bindirmeli ekler varken ve diğerinin kolon boyuna donatıları sürekli olduğu halde, birbirinden çok farklı olmadığı gözlemlenebilir. Bu durum her iki deney elemanının test edilmesi esnasında kolonların üzerine uygulanan aksel yük

seviyesiyle doğrudan ilişkilendirilebilir. Her iki deneyde de kolonların üzerine yaklaşık olarak 117,7 kN toplam aksel yük uygulanmıştır. Bu yük seviyesi kolon aksel yük kapasitesinin %20’sine karşı gelmektedir. Bu seviye diğer deney elemanlarının seviyesine oranla yüksek sayılabilecek düzeydedir. Deney elemanı DE5’in testinde, kolonlardaki yüksek aksel yük seviyesinden ötürü kolon bindirmeli eklerin etkisi maksimum yatay yük seviyesi olan 75 kN civarında bile gözlemlenememiştir. Fakat, uygulanan yük kolon aksel yük kapasitesinin %10’una düşürüldüğünde, çerçevenin yanıl yük taşıma kapasitesi yaklaşık 65 kN seviyesine düşmüştür. Bu durum deney elemanı DE3’ün deneyinde gözlemlenmiştir. Burada hatırlatılması gereken nokta deney elemanı DE3’ün kolon boyuna donatıları sürekli olduğu halde, kolon boyuna donatılarında bindirmeli ek bulunan deney elemanı DE5’ten daha az yanıl yük kapasitesine ulaştığıdır. Bu durum kolon aksel yük seviyesinin BA çerçevelerin davranışındaki önemini göstermektedir.



Şekil 6. Eleman Zarf Eğrileri (Response Envelopes of all Specimens)

Deney elemanı DE2, deney elemanı DE3, DE4 ve DE5'ten farklı olarak, sıvanmamış tuğla dolgu ile test edilmiştir. Beklendiği üzere, bu deney elemanının yanal yük taşıma kapasitesi deney elemanları DE3, DE4 ve DE5'in kapasitelerine oranla daha düşük olan yaklaşık 50 kN seviyelerinde çıkmıştır. Deney elemanı DE2'nin yanal yük taşıma kapasitesindeki artış yalın çerçevenin kapasitesine oranla 3,5 kat olmuştur. Bu durum sıvanmış tuğla dolgulı çerçeveler olan DE3, DE4 ve DE5'lerde yaklaşık olarak 5,0 kat olmuştur. Bu durum, sıvanmamış olsa bile boşluklu tuğla dolgunun BA çerçeve davranışı üzerindeki olumlu etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, boşluklu tuğlanın sıvanması dayanım artışını daha da arttırmaktadır. Fakat, sıvanmamış dolgulı deney elemanı DE2 sıvanmış dolgulı elemanlara oranla daha sünek bir davranış sergilemiştir ve bu durum sıvanmış boşluklu tuğladan daha rijit olmasına bağlanabilir.

Elemanların dayanım ve rijitlikleri ile genel davranışları bir bütün olarak Şekil 6'da verilen zarf eğrilerinin yardımıyla değerlendirilmiştir. Deney elemanlarının test sonrası görüntüleri Şekil 7' de verilmiştir.

Bir deney elemanının ilk rijitlik değeri, ilk ileri çevrimdeki yük-tepe ötelenmesi grafiğindeki lineer bölümün eğimi olarak alınmıştır. Bu değerler deney elemanlarının rijitliklerindeki rölatif artışın hesaplanmasında kullanılırlar. Tablo 2'den de görülebileceği üzere, tuğla dolgu duvarlar deney elemanlarının ilk rijitliklerini yaklaşık 20 kat arttırmışlardır. Burada not edilmesi gereken önemli nokta tuğla duvar örme ve sıvama işçilik kalitesinin deney elemanlarının ilk çevrimlerindeki rijitlik değerlerinde son derece önemli rol oynamasıdır.

4.2. Enerji Tüketme Kapasiteleri (Energy Dissipation Capacities)

Enerji tüketme kapasitesi bir yapının kuvvetli yer hareketlerine karşı direnç gösterebilmesinin ve davranıştaki olası iyileşmenin bir göstergesidir. Tüm

elemanlar için bu değer, yanal yük-tepe ötelenmesi grafiklerindeki tam çevrimlerin alanlarının toplanması ile elde edilmiştir. Elemanların yükleme geçmişleri bu değerlerin oluşmasında çok önemli yer tutmaktadır. Eleman yüklemesinin birinci safhası olan yük kontrollü kısımda tüm eleman testlerinde aynı yük seviyelerine, ikinci safha olan deplasman kontrollü kısımda da tüm elemanlar için aynı deplasmanlara ulaşılmaya özen gösterilmiştir. Deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri Tablo 2'de verilmiştir. Tuğla dolgu duvarlar deney elemanlarının enerji tüketme kapasitelerini arttırmıştır.

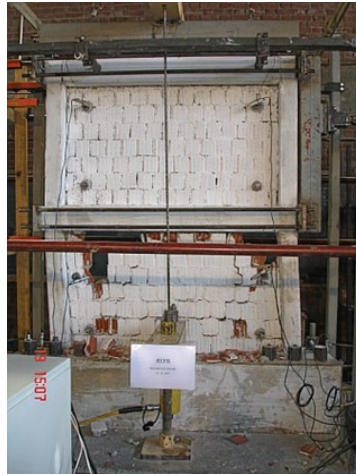
4.3. Süneklik (Ductility)

Deplasman sünekliği en yüksek deplasmanın akma deplasmanına oranı olarak tanımlanmıştır. En yüksek deplasman, eleman maksimum yanal yük taşıma kapasitesinin %85 değerine düştüğü noktadaki ikinci kat seviyesi deplasman değeri olarak kabul edilmiştir. Akma deplasman değeri orijin noktasından başlayan ve eleman maksimum yanal yük taşıma kapasitesinin tepe öncesinde %70 değerine ulaştığı noktalar arasında çizilen sekant ile tanımlanabilir ve bu sekant doğrusu ile maksimum yanal yük seviyesinden yatay olarak uzatılan doğrunun kesiştiği noktadaki tepe deplasmanı değeri akma deplasmanı olarak kabul edilmiştir [3].

Deney elemanlarının süneklik değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, sıvasız tuğla duvarlı deney elemanı DE2 alt ve üst sınır değerleri oluşturan deney elemanları DE1 ve DE6'dan daha sünek davranış sergilemiş olduğu gözlemlenebilir. Diğer bir noktada, kolon boyuna donatılarında bindirmeli ek bulunan deney elemanı DE5 diğer tüm deney elemanlarından daha sünek bir davranış sergilemiş olup bu durumun muhtemel sebebi olarak da deney elemanının maksimum yanal yük seviyesinde ulaştığı düşük kat ötelenme oranları gösterilebilir.



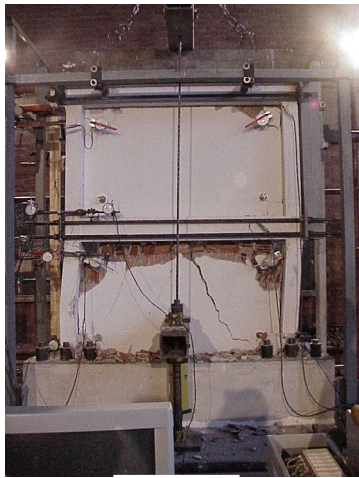
DE1



DE2



DE3



DE4



DE5



DE6

Şekil 7. Deney Elemanlarının Test Sonrası Görüntüleri (Photographs of all Specimens after tests)

5. KURAMSAL ÇALIŞMALAR (ANALYTICAL STUDIES)

5.1. Dolgu Duvarın Kuramsal Modellenmesi (Analytical Modeling of the Infill Wall)

İlk çalışma ellili yıllarda Polyakov [5] tarafından gerçekleştirilmiş olmakla birlikte dolgu duvarlarla ilgili çalışmalar yaklaşık elli senedir sürdürülmektedir. Polyakov, çalışmaları esnasında dolgunun merkezinde diyagonal çatlaklar, modelin karşılıklı çapraz yüklenmemiş köşelerinde çerçeveyle dolgu arasında boşluklar ve yüklenmiş iki çapraz köşede de tam bir temas gözlemlemiştir. Altmışlı yıllardan günümüze birçok araştırmacı [6-15] dolgu duvarlarla ilgili kuramsal ve deneysel çalışmalar yapıp, dolgulu çerçeve davranışının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuşlardır.

Smith ve Carter [7] çalışmalarında çerçeve ve dolgunun birbirlerine bağlı olmadıklarını varsaymışlardır. Yük çerçeveye uygulandığında dolgu duvar karşılıklı olan iki köşede, kiriş ve kolonun belli

bir uzunluğu boyunca ayrılmakta ve çerçeve-dolgu duvar arasındaki temas diğer iki karşı köşede devam etmektedir. Bu aşamada, temasın devam ettiği bir köşeden diğerine çizilen bir çizgi basıncın yönünü göstermektedir. Dolgu bu çizgi doğrultusunda basıncı aktarmaktadır. Basıncın oluştuğu bu yöne dik yöndeki çekme gerilmeleri kritik değeri aştığı anda çatlama meydana gelir ve bu da çubuk davranışına geçiş anının başlangıcını gösterir. Eşdeğer basınç çubuğu oluşumundan sonra genelde köşe ezilmeleri olur ve bu final durumdur. Bu sayede dolgunun, eşdeğeri olan sanal bir basınç çubuğuyla modellenebileceği Şekil 8'de gösterilmektedir. Yapılan deneyler ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen kuramsal çalışmalardan yük transfer mekanizmasının eşdeğer basınç çubuğu ile yeterli bir şekilde temsil edildiği gözlemlenmiştir. Şekil 8'deki α ve β temsil oranlarıdır. Dolguyu temsil eden bu sanal basınç çubuğunun mekanik ve geometrik özelliklerinin belirlenmesi için FEMA [16] tarafından aşağıdaki denklemler önerilmiştir;

$$a = 0,175 (\lambda \cdot h_{kol})^{-0.4} d \quad (1)$$

$$\lambda = 4 \sqrt[4]{\frac{E_{dolgu} b_w \sin(2\beta_s)}{4E I h}} \quad (2)$$

Denklemlerde, a_{dolgu} eşdeğer basınç çubuğunun efektif genişliğini, h_{kol} kolonun giriş merkezleri arasındaki yüksekliğini, d dolgu duvarının köşegen uzunluğunu, E_{dolgu} dolgunun elastisite modülünü, b_w eşdeğer basınç çubuğunun dolgu düzlemine dik kalınlığını, β_s tanjantı dolgunun yüksekliğinin uzunluğuna oranı olan açığı, E kolonun elastisite modülünü, I kolonun atalet momentini, h dolgunun yüksekliğini göstermektedir. Eşdeğer çubuğun kalınlığı modellediği dolgu duvarının kalınlığı ile aynı olacaktır.

Kuramsal çalışmalarda sıvanmış boşluklu tuğla dolgu duvarların modellenebilmesi için eşdeğer basınç çubuklarının aksel dayanım ve rijitliklerinin hesaplanmaları Baran ve Sevil tarafından önerilen bir yöntemle [3] hesaplanabilir. Sıvanmış boşluklu tuğla dolgunun dikey yöndeki dayanım ve rijitlikleri, $f_{dolgu-90}$ ve $E_{dolgu-90}$, aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilirler;

$$f_{dolgu-90} = \frac{(f_{tuğla} \cdot t_{tuğla} + f_{siva} \cdot t_{siva})}{(t_{tuğla} + t_{siva})} \quad (3)$$

$$E_{dolgu-90} = \frac{(E_{tuğla} \cdot t_{tuğla} + E_{siva} \cdot t_{siva})}{(t_{tuğla} + t_{siva})} \quad (4)$$

$t_{tuğla}$ ve t_{siva} sırasıyla boşluklu tuğlanın ve sıvanmış dolgu düzlemine dik kalınlıklarıdır (mm). $E_{dolgu-90}$ dolgu malzemesinin elastik modül değeridir (MPa) ve bu değer Binici ve Özcebe [17] tarafından $f_{dolgu-90}$ (MPa) değerinin 500 ile 1500 katı arasında değiştiği varsayılmıştır. Sıvanmış tuğla dolgu duvarın yatay yöndeki dayanımı $f_{dolgu-0}$ (MPa) boşluklu tuğlanın yatay ve dikey yönlerde basınçta kalan çeper alanlarının oranı kullanılarak bulunabilir.

Çerçeve yanal olarak yüklendiğinde dolgu duvar da diyagonal yönde basınç altında kaldığı için El-Dakhkhni ve diğerleri [15] dolgunun diyagonal yöndeki özelliklerinin baskın olacağını varsaymışlardır. Sıvanmış tuğla dolgu duvarlar anizotropik olduğu halde El-Dakhkhni ve diğerleri [15] tarafından ortotropik olarak kabul edilmişler ve bu durum Şekil 8'de gösterilmiştir. Dolgunun basınç altındaymış gibi davrandığı varsayımından hareketle ve ortotropik plak ve aks transformasyon matrisleri kullanılarak sıvanmış boşluklu tuğla dolgunun elastik modül değeri olan $E_{dolgu-0}$ (MPa)'yı veren aşağıdaki denklem türetilmiştir;

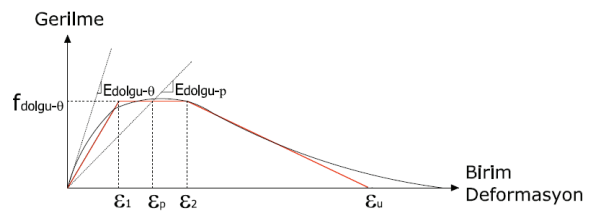
$$E_{dolgu-0} = \frac{1}{\frac{1}{E_{dolgu-0}} \cos^4 \theta + \left[\frac{2\nu_{0-90}}{E_{dolgu-0}} + \frac{1}{G} \right] \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + \frac{1}{E_{dolgu-90}} \sin^4 \theta} \quad (5)$$

ν_{0-90} değeri tuğla örme harcı yönüne paralel yöndeki deformasyondan kaynaklanan tuğla örme harcı yönüne dik doğrultudaki Poisson oranıdır ve değeri 0.25 olarak alınabilir. G kayma modülüdür (MPa).

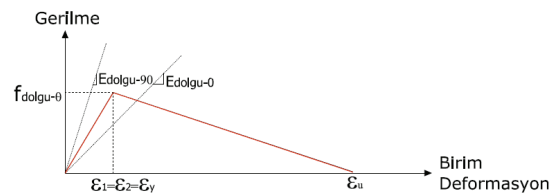
Dolgunun dayanım değerinin yükleme açısıyla değiştiği Hamid ve Drysdale [18] tarafından irdelenmiş ve diyagonal yöndeki dayanım değeri için $f_{dolgu-0} = 0.7f_{dolgu-90}$ olduğu Seah [19] tarafından önerilmiştir. Yazar tarafından diyagonal yöndeki dolgu dayanımı için Denklem (6) kullanılmış, diyagonal yöndeki elastik modül değeri için de bu yöndeki dolgu dayanım değerinin 1000 ile 1500 katı arasında bir değer kullanılması önerilmektedir;

$$f_{dolgu-0} = 0,5 \cdot (f_{dolgu-90} + f_{dolgu-0}) \quad (6)$$

El-Dakhkhni ve diğerleri beton duvar dolgu için parabolik gerilme-birim deformasyon grafiğinin Şekil 9'daki gibi üç doğrusal kısımdan oluşan eğri ile temsil edilebileceğini önermişlerdir. Bu yaklaşım analizler için daha kolay ve pratik olacaktır. Deformasyon değeri ε_2 'yi ε_1 'e eşit kabul etmek eşdeğer basınç çubuğunun deformasyon kapasitesini hesaplamada tatmin edici sonuçlar vermiştir. Bu nedenle, sıvanmış boşluklu tuğla dolgu duvarları temsil eden eşdeğer basınç çubuklarının kuramsal modellenmesinde Şekil 10'da verilen gerilme-birim deformasyon grafiği kullanılmıştır. Saneinejad ve Hobbs [14], doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle yaptıkları analizler sonucu dolgu çerçevelerin yanal yük kapasitesindeki sekant rijitliğinin ilk rijitliğinin yarısı olması gerektiğini önermişlerdir. Bu öneri, maksimum yanal yükteki elastik modül değerinin hesaplanması için de $E_{dolgu-p} = 0,5E_{dolgu-0}$ şeklinde adapte edilebilir.



Şekil 9. Beton Dolgu Duvarın Basitleştirilmiş Gerilme-Birim Deformasyon Diyagramı (Simplified Stress-Strain Diagram of Concrete Masonry)



Şekil 10. Eşdeğer Basınç Çubuğu için Gerilme-Birim Deformasyon Diyagramı (Stress-Strain Diagram for the Compression Strut)

Test sonuçları kolon eksenel yük seviyesinin artması deney elemanlarının kapasitelerini arttırdığını ortaya koymuştur. Bu sebeple, kolon eksenel yük seviyesinin eşdeğer basınç çubuğunun yük taşıma kapasitesi hesabında gözönüne alınması gereklidir. Böylece, çubuk eksenel yük kapasitesi Denklem (7) kullanılarak hesaplanabilir;

$$F = \gamma \cdot f_{\text{dolgu-0}} \cdot a \cdot b_w \quad (7)$$

Gerçekleştirilen testlerin sonuçları analiz edildiğinde γ değerini Denklem (8)'deki şekilde ayarlamak pratik olacak ve güvenilir sonuçlar verecektir;

$$\gamma = 1 + \left(\frac{N}{N_0} \right) \leq 1,3 \quad (8)$$

λ değeri için 1.3 değeri üst sınır olarak önerilmiştir çünkü deney elemanı DE5'in testinde kolonlara uygulanan eksenel yük, kapasitenin %30'una denk gelmektedir. Ayrıca, $\epsilon_u=0,018$ olarak kabul etmek kuramsal çalışmalarda tatmin edici sonuçlar vermiştir.

5.2. Bindirmeli Eklerin Donatı Dayanımına Etkisi (The Effect of Lap-Splices on the Strength of Longitudinal Reinforcement)

Kolon boyuna donatılarının azaltılmış akma dayanımı, f'_y , Denklem (9) kullanılarak hesaplanmıştır [28];

$$f'_y \cong f_y \cdot \sqrt{\frac{20\phi}{40\phi}} = 0,7071 \cdot f_y \quad (9)$$

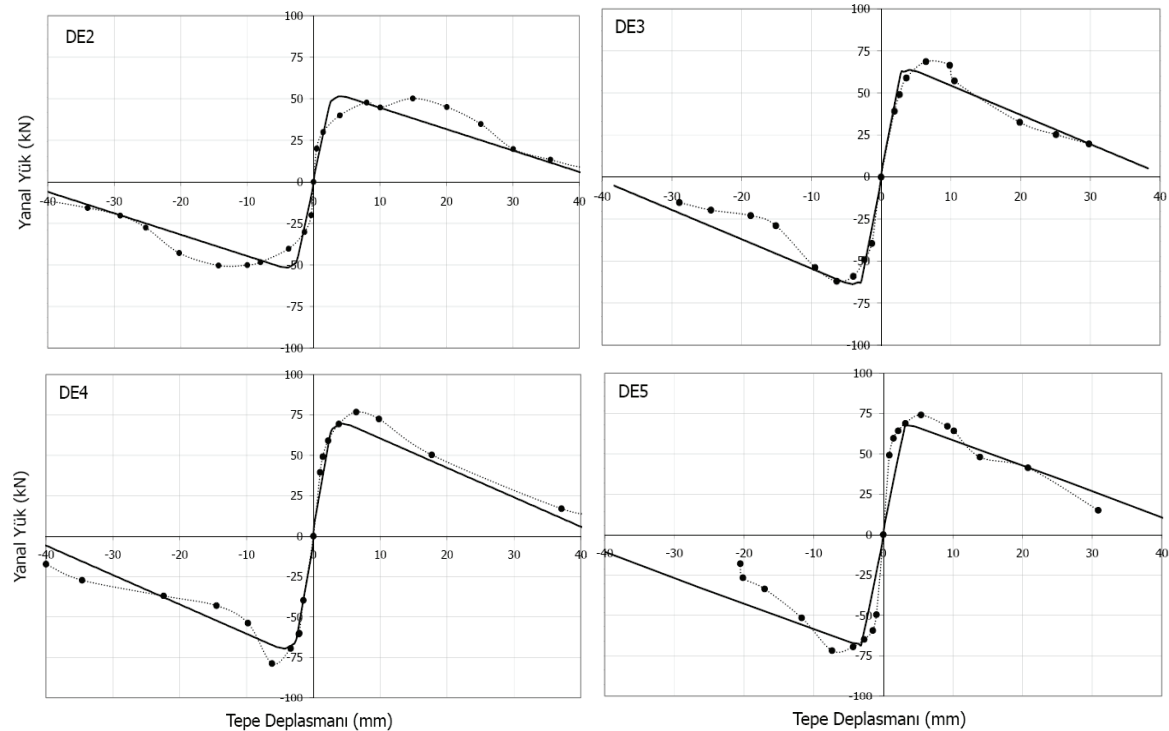
5.3. Deneysel ve Kuramsal Sonuçların Karşılaştırılması (Comparison of Experimental and Analytical Results)

Deney Elemanları DE2, DE3, DE4 ve DE5 için bu çalışmada önerilen yöntemle elde edilen İtme analizlerinin sonuçları Tablo 3'de, grafikleri Şekil 11'de sunulmuştur. Grafikler ve tablodaki değerler incelendiğinde, deney çerçevelerinin kuramsal olarak elde edilen yanıl yük taşıma kapasiteleri yaklaşık \pm %10 hata payıyla hesaplanabilmiştir. Ayrıca, deney elemanlarının tepe ötesi davranışları da tatmin edici bir yaklaşıklıkla simüle edilebilmiştir.

Tablo 3. Deneysel Verilerin Kuramsal Çalışma Verileriyle Karşılaştırılması (Comparison of Experimental Data with the Analytical Data)

Deney Elemanı	Yanal Yük Kapasitesi (kN)			İlk Rijitlik (kN/mm)		
	Deneysel	Kuramsal	Oran ⁽¹⁾	Deneysel	Kuramsal	Oran ⁽¹⁾
DE2	50,3	55,4	0,91	60,0	31,0	1,94
DE3	66,6	69,0	0,97	31,5	36,0	0,88
DE4	76,8	79,0	0,97	43,5	58,4	0,74
DE5	74,2	84,2	0,88	59,1	39,8	1,48

⁽¹⁾Deneysel verinin kuramsal veriye olan oranı



Şekil 11. Kuramsal ve Deneysel Yük-Tepe Deplasmanı Grafikleri Karşılaştırılması (Comparison of Analytical and Experimental Load-Displacement Curves)

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Gerçekleştirilen 6 adet betonarme çerçeve testlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Çerçevede tuğla dolgu duvar bulunması çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesini boş çerçeveye oranla yaklaşık 3.5 kat artırmıştır.
- Sıvanmış tuğla dolgu duvarlar çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesini boş çerçeveye oranla yaklaşık 4.5 kat artırmıştır.
- Tuğla dolgu duvar üzerine sıva uygulaması, sıvanın daha gevrek yapısından dolayı, çerçevenin yük taşıma kapasitesini artırmakla birlikte sünekliğini azaltmıştır. Sıvanmış tuğla dolgu duvar, sıvanmamış dolguya oranla daha etkili bir şekilde deformasyonları azaltmıştır.
- Kolon aksenal yük seviyesinin artması dolgu duvarı daha rijit hale getirerek çerçeve yanal yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca, yük seviyesinin artışı kolon donatılarındaki bindirmeli eklerden kaynaklanan aderans problemlerini de azaltmaktadır.
- Kat ötelenme değerlerindeki artış, sıvanmış boşluklu tuğla dolgu duvarlarda hasara ve böylece etkilerini hızla kaybetmelerine neden olmaktadır. Bu durumda, dolgu çerçeve yanal yük taşıma kapasitesi yalın çerçevenin değerine düşmektedir. Ayrıca, bu durumda dolgu duvarlar deprem anında düzlemleri dışında devriliş insanlar için risk oluşturabileceklerdir.

Gerçekleştirilen kuramsal çalışmalar ve elde edilen bulguların test bulguları ile karşılaştırılmasından aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Boşluklu tuğla dolgu duvarların eşdeğer basınç çubukları ile modellendiği yapısal çözümlenmenin sonuçları düşük hata paylı olacaktır.
- Çalışmada önerilen kuramsal yöntem yapıların modellenmelerine kolaylıkla adapte edilebilecek ve böylelikle analizlerde daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilecektir.

7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar**, Ankara, Türkiye, 2007.
2. Kaplan, S., A., **Dolgu Duvarların Betonarme Taşıyıcı Sistem Performansına Etkisi**, Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı:452 – 2008/6, 49-62.
3. Baran, M. ve Sevil, T., “Analytical and Experimental Studies on Infilled RC Frames”, **International Journal of the Physical Sciences**, Cilt 5, No 13, 1981-1998, Ekim 2010.
4. T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, **Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik**, Ankara, Türkiye, 1997.

5. Polyakov, S. V., **Masonry in Framed Buildings; An Investigation into the Strength and Stiffness of Masonry Infilling (English Translation)**, Moscow, 1957.
6. Smith, B.S., “Lateral Stiffness of Infilled Frames”, **ASCE Journal of Structural Division**, Cilt 88, No 6, 183-199, 1962.
7. Smith, B.S. ve Carter, C., “A Method of Analysis for Infilled Frames”, **Proc. ICE**, Cilt 44, 31-48, Eylül 1969.
8. Mainstone, R. J. ve Weeks, G. A., “The influence of Bounding Frame on the Racking Stiffness and Strength of Brick Walls”, **2nd International BrickMasonry Conference**, Watford, England, 165-171, 12-15 April 1970,
9. Mainstone, R. J., **Supplementary Note on the Stiffness and Strengths of Infilled Frames**, Current Paper 13/74, Building Research Station, UK, 1974.
10. Klingner, R.E. ve Bertero, V., “Earthquake Resistance of Infilled Frames”, **Journal of the Structural Division, ASCE**, Cilt 104, 1978.
11. Paulay, T. ve Priestley, M.J.N., **Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings**, John Wiley, New York, A.B.D., 1992.
12. Angel, R., Abrams, D.P., Shapiro, D., Uzarski, J., ve Webster, M., **Behavior of Reinforced Concrete Frames with Masonry Infills**, Civil Eng. Studies SRS-589, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.
13. Ghassan Al-Chaar, **Evaluating Strength and Stiffness of Unreinforced Masonry Infill Structures**, Engineer Research and Development Center Champaign Il Construction Engineering Research Laboratory, January 2002.
14. Saneinejad, A. ve Hobbs, B., “Inelastic Design of Infilled Frames”, **Journal of Structural Eng.**, **ASCE**, Cilt 121, No 4, 634-650, 1995.
15. El-Dakhkhni, W.W., Elgaaly, M. ve Hamid, A.A., “Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames”, **Journal of Structural Eng.**, **ASCE**, Cilt 129, No 2, 177-185, 2003.
16. Federal Emergency Management Agency, **Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings**, FEMA 306, 1998.
17. Binici, B. ve Özcebe, G., “Seismic Evaluation of Infilled Reinforced Concrete Frames Strengthened with FRPS”, **Proceedings of the 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering**, San Francisco, California, USA, Paper No. 1717, 2006.
18. Hamid, A.A. ve Drysdale, R.G., “Concrete Masonry under Combined Shear and Compression Along the Mortar Joints”, **ACI Journal**, Cilt 77, No 5, 314-320, 1980.
19. Seah, C.K., **Universal Approach for the Analysis and Design of Masonry-Infilled Frame Structures**, Doktora Tezi, New Brunswick Üniversitesi, Kanada, 1998.