



Recommendations for calculation of strengthened brick walls with perforated plates

Eray Özbek¹, Bengi Aykaç¹, Hüsnü Can², İlker Kalkan³, Sabahattin Aykaç¹

¹Department of Civil Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Turkey

²Department of Civil Engineering, KTO Karatay University, Konya, 42020, Turkey

³Department of Civil Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, 71450, Turkey

Highlights:

- Practical calculation methods have been developed for brick walls strengthened with perforated plates
- Methods include strength, stiffness and deformation limits
- The developed methods are consistent with the experimental results

Keywords:

- Perforated steel plates
- Brick infill walls
- Calculation recommendation
- Modelling

Article Info:

Research Article

Received: 23.02.2017

Accepted: 12.06.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416422

Acknowledgement:

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with the project number 113M437.

Correspondence:

Author: Eray Özbek
e-mail:
erayozbek@gazi.edu.tr
phone: +90 312 582 32 30

Graphical/Tabular Abstract

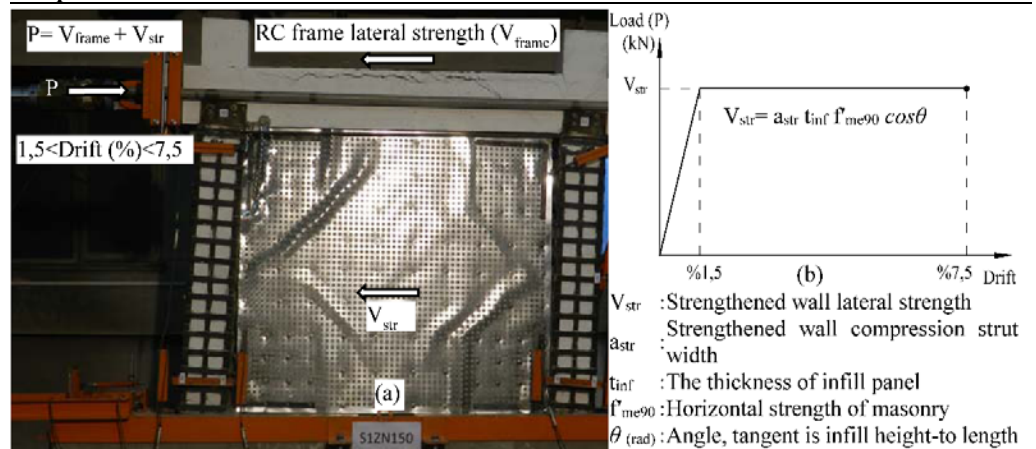


Figure A. Behavior of test specimens even after excessive drifts (a) modelling approach of strengthened infill wall (b)

Purpose: Strengthening the infill walls of the RC frame with perforated steel plates led to ductile behavior and no significant loss in strength up to 7.5% drift ratio (Fig. A. (a)). In addition to the ductile behavior, half scaled experiments indicated that increases in the strength reaching two times the reference value could be obtained. The aim of the present study is to develop calculation and modelling approaches for designers who are willing to choose this strengthening method.

Theory and Methods:

The general consensus is that an equivalent-strut approach can be successfully used for analytical studies of infilled RC frame systems. Experimental behavior pointed out that this strut could be modeled as shown in the Fig. A. (b). The equation that calculates the strength of strengthened infill wall (V_{str}) in this model was obtained by developing equation in FEMA-306 (1998). The stiffness of the strengthened infill wall was also derived according to the compression strut analogy.

Results:

Equations, developed for calculating the strength and stiffness values of the infill walls strengthened with perforated steel plates, provided analytical estimates in rather close agreement with the experimental results. The highest deviation of the calculated strength values from the experimental ones was 12% on the conservative side (smaller than the experimental result). The average of the deviations were 3% and 7% for the strength and stiffness estimations, respectively.

Conclusion:

The analytical approach developed for strengthened infill brick walls with perforated plates was consistent with the experimental values. Hence, it is concluded that derived practical equations and claimed behavior can be used for the assignment of strength, stiffness and deformation limits to the equivalent compression strut model inside the RC frames.



Delikli levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarların hesabı için öneriler

Eray Özbek^{1*}, Bengi Aykaç¹, Hüsnu Can², İlker Kalkan³, Sabahattin Aykaç¹

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06570, Türkiye

²KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, 42020, Türkiye

³Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, 71450, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Delikli levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarlar için pratik hesap yöntemleri geliştirilmiştir
- Yöntemler dayanım, rijitlik ve deformasyon sınırlarını kapsamaktadır
- Geliştirilen yöntemler deney sonuçları ile uyum içindedir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.02.2017

Kabul: 12.06.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416422

Anahtar Kelimeler:

Delikli çelik levhalar,
tuğla dolgu duvarlar,
hesap önerileri,
modelleme

ÖZET

Yapıya etki eden deprem kuvvetlerine karşı kısmen de olsa katkı sağlayan tuğla dolgu duvarların, çeşitli yöntem ve malzemelerle güçlendirilerek sünek betonarme perdeli sistem davranışına yaklaştırılabilmesi amacıyla oldukça fazla araştırma yapılmıştır. Diğer araştırmalardan farklı olarak; delikli levhalar kullanılarak yapılan çalışmalarda, dayanımın yanı sıra süneklik konusunda da davranışta iyileşme sağlanabilmiştir. Deneysel veriler %7,5' lara varan kat ötelenme oranlarında dahi, dayanımda önemli bir kayıp olmadığını göstermiştir. Mevcut çalışmanın amacı; aynı zamanda yerinde uygulaması da kolay olan bu yöntemi seçen tasarımcılar için hesap ve modelleme yaklaşımları oluşturmaktır. Dolayısıyla geçmişte yapılmış deneysel araştırmaların ışığında analitik yaklaşımlar oluşturulmuş ve bu yaklaşımların deney değişkenleri açısından uyumunu karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar; dayanım, rijitlik ve deformasyon sınırları açısından yaklaşık hesap yöntemleri önerilebileceğini göstermiştir.

Recommendations for calculation of strengthened brick walls with perforated plates

H I G H L I G H T S

- Practical calculation methods have been developed for brick walls strengthened with perforated plates
- Methods include strength, stiffness and deformation limits
- The developed methods are consistent with the experimental results

Article Info

Research Article

Received: 23.02.2017

Accepted: 12.06.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416422

Keywords:

Perforated steel plates,
brick infill walls,
calculation recommendation,
modelling

ABSTRACT

There are many studies relating to the strengthening of infill brick walls, which contribute partially to the resistance against the seismic forces, by using different methods and materials to make them behave similarly to a ductile RC walled system. Unlike other research, studies using perforated steel plates have improved behavior on ductility as well as strength. Experimental results show that there is no significant loss of strength even at relative floor drift ratios up to 7.5%. The aim of the present study is to generate calculation and modelling approaches for designers who choose this method which is also easy to apply on-site. Therefore, analytical approaches have been developed in the light of experimental research and the compatibility of these approaches in terms of experimental variables has been discussed. The obtained results indicate that approximate calculation methods can be recommended in terms of strength, stiffness and deformation limits.

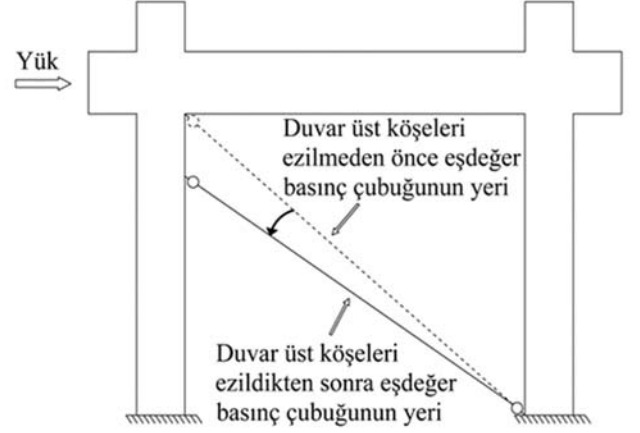
*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: erayozbek@gazi.edu.tr, baykac@gazi.edu.tr, husnucan@gazi.edu.tr, ilkerkalkan@kku.edu.tr, saykac@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 32 30

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilindiği gibi düşey yükler altında olmasa da yatay deprem yükleri altında dolgu duvarlar, betonarme çerçeve ile oldukça yoğun etkileşim içine girmekte ve sistemin davranışını yalın çerçeveye göre oldukça farklı hale getirebilmektedir [1, 2]. Davranışta oluşan bu farklılık, çoğu zaman rijitlik ve dayanımda gözlenen artış olarak özetlenmektedir [3, 4]. Bu davranışın hesaplamalarda nasıl modellenebileceği üzerine geçmişte oldukça fazla araştırma yapılmıştır. İlk kez Stafford-Smith [5] tarafından kullanılmaya başlanan eş değer basınç çubuğu modeli, elasto-plastik davranışı daha iyi yansıtabildiği için diğer yöntemlere göre daha popüler olmuştur. Bu yaklaşım FEMA 273 (Federal Emergency Management Agency) [6] tarafından da benimsenmiş, yöntemin özellikle deprem gibi tersinir yükler altındaki dolgu duvarların modellenmesinde kullanılabilirliği düşünülmüştür.

Son dönemde yapılan araştırmalar, durumu bu kadar basite indirgemenin yanlış ve tehlikeli sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir. Dolgu duvarlar, çerçevenin deprem davranışını bir anda eğilmeden tehlikeli kesme kırılmasına da dönüştürebilmektedir [7-9]. Şekil 1a'da gösterilen yalın çerçevede kolon uçlarında plastik mafsallar oluşmuş ve %5 ötelenme oranından sonra dayanım kaybı başlamıştır. Aynı çerçevenin içinde tuğla duvar oluşturulmasıyla beraber (Şekil 1b) davranış oldukça değişerek kolon üst uçlarında kesme kırılması meydana gelmiştir. Ayrıca dayanımda ani kayıp ise daha henüz %1 ötelenme oranında gerçekleşmiştir. Bu tür bir kırılmaya, genelde kolon betonlarının düşük basınç dayanımlı ve yetersiz etriyeli olmasının neden olduğu gözükmemekte ise de, asıl nedenin dolgu duvar köşe bölgelerinin deprem yükleri altında ezilip dağılması olduğu anlaşılmıştır [9]. Köşe bölgelerde boşlukların oluşmasıyla beraber kolon uçlarında, kesme gerilmeleri aşırı yoğunlaşmakta ve tasarım yüklerini aşarak kesme kırılmasına neden olabilmektedir. Bir başka deyişle kısa kolon davranışı gözlenmektedir (Şekil 2). Bu nedenle tuğla dolgu duvarın, rijitlik ve taşıma gücü açısından yapı davranışına olumlu katkı sağlayabilmesi için dışında

bulunan betonarme çerçevenin kolonlarında yeterli kesme güvenliğinin bulunması gerekmektedir.



Şekil 2. Üst köşedeki tuğlanın ezilmesiyle gözlenen davranış (Behavior after crushing of corner brick)

Bindirme boyları yeterli, sünek bir betonarme çerçevede, eğer yeterli kesme güvenliği de varsa, içerisinde bulunan dolgu duvarda oluşan hasarlarla taşıma gücüne ulaşmaktadır. Dolgu duvarda göçme, duvardaki yatay derzlerde oluşan kayma hasarıyla, çapraz çatlakların oluşmasıyla, köşelerin ezilmesiyle veya düzlem dışı hareket nedeniyle olabilir. Ancak bu durumda da tuğla dolgu duvarlar küçük yatay ötelenme değerlerinde ağır hasar görüp dağılarak çerçeveye sağladıkları olumlu katkıları büyük ölçüde yitirmektedir. Ortaya çıkan bu gevrek davranış sebebiyle yönetmelikler, dolgu duvarları çoğu zaman taşıyıcı olarak kabul etmemekte ve hesaplara katılmasını önermemektedir.

Yapıya etki eden deprem kuvvetlerine karşı kısmen de olsa katkı sağlayan tuğla dolgu duvarların, çeşitli yöntem ve malzemelerle güçlendirilerek sünek betonarme perdeli sistem davranışına yaklaştırılabilmesi amacıyla oldukça fazla araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaları genel olarak polimer malzemelerle, ön üretimli panellerle, çelik yapı elemanlarıyla ve lif katkılı sıva ile güçlendirme şeklinde



Şekil 1. Yalın (a) ve tuğla dolgu duvarlı (b) betonarme çerçeve (Bare (a) and brick infill wall (b) with RC frame)

gruplandırmak mümkündür. Polimer malzemeler içinde karbon lifli polimerler (CFRP) en popüler olanıdır. Bu malzemeden üretilen kumaşlar, farklı tertipler denenmiş olsa da [10, 11], dolgu duvara genellikle köşegeni boyunca [12-14] epoksi ile yapıştırılıp çevresindeki betonarme çerçeveye çeşitli yöntemlerle [15, 16] bağlantısı sağlanmaya çalışılır. CFRP ile güçlendirme, geleneksel güçlendirme yöntemleriyle de karşılaştırılmıştır [17, 18]. Sonuçlar CFRP ile güçlendirmenin nispeten kolay uygulanabilir olduğunu ancak, öte yandan, oldukça gevrek davrandığını ve yüksek maliyetli olduğunu göstermiştir [17-19]. Diğer polimer malzemeler arasında cam lifli [20-22], polyester lifli [23], polivinil alkol [24] ve kompozit [25-27] olanları sayılabilir. Ön üretimli paneller oldukça ekonomik olan beton/betonarme [28-30] veya çimento bazlı kompozit malzemeden [31] üretilebilir. Bu yöntem deney elemanlarının rijitliğini belirgin düzeyde arttırabilmiş ancak yeterli süneklik sağlanamamıştır [32]. Yapısal çeliğin üretim yelpazesinde seçeneklerin oldukça geniş olması birbirinden farklı ilkelere sahip yöntemlerin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Bunlar, çelik profillerin çapraz şekilde dolgu duvara bağlanması [33], çelik hasırın duvara yerleştirilerek sıva ile kapatılması [34], çelik şeritlerle duvarın sargılanması [35], çelik levhalarla betonarme çerçevenin kapatılması [36] olarak sayılabilir. Sıva harcının içerisine çeşitli lifler katılıp [37-39] duvar yüzeyine uygulanması da araştırılan diğer yöntemler arasındadır. Bahsi geçen çalışmaların genel özelliği, dayanım ve rijitliği önemli ölçüde arttıran yöntemler bulunmuş olsa da süneklik, düşük maliyet ve kolay uygulanabilirlik açısından sınırlı kaldığının söylenebileceği olmalıdır.

Bu alternatif güçlendirme yöntemi ihtiyacının giderilebilmesi veya en azından can güvenliğinin sağlanabilmesi için mevcut çalışmada delikli çelik levhaların kullanılması düşünülmüştür. Delikli çelik levhalar; kolay edinilebilir, deliklerinden dolayı düz çeliğe göre çok daha sünek davranabilen, epoksi kullanmadan kolay ve çabuk uygulamaya elverişli bir malzemedir. Bunların yanında malzemenin duvardaki tesisatlara zarar verilmeden uygulanabilmesi, gerektiğinde sökülüp tekrar takılabilmesi, yangın hassasiyetinin nispeten düşük olması, alçı sıvayla gizlenebilmesi, %100 geri dönüşümlü olması, kanserojen kimyasallar içermemesi, düz levhalara göre yaklaşık % 50 daha hafif olması gibi avantajlı ek özellikleri de mevcuttur.

Bu güçlendirme yönteminde tuğla duvarların her iki yüzüne delikli çelik levhalar yerleştirilmekte ve bu levhalar birbirlerine bulonlarla karşılıklı olarak bağlanmaktadır. Yöntemle ilgili başlatılan ilk deneysel çalışmada sıvalı tuğla duvarlar, delikli çelik levhalar ile takviye edilmiş ve monotonik yükler altındaki davranışları incelenmiştir. Araştırma kapsamında biri referans on ikisi güçlendirilmiş olmak üzere toplam on üç tuğla duvar test edilmiştir. Deney sonuçları dayanımın yaklaşık 1,6 kat, dönüştürülen enerjinin ise yaklaşık 14 kat arttırılabildiğini göstermiştir. Ayrıca normalde oldukça gevrek davranış gösteren tuğla duvarların, önerilen yöntem ile güçlendirildiğinde oldukça sünek davrandığı ve denge altı sünek bir kiriş ile kıyaslanabilecek

ölçüde sünekleştiği görülmüştür [40]. Bu büyük deformasyonlarda dahi güçlendirilmiş elemanların hiçbirinde tuğla duvar bütünlüğü bozulmamış, deneyin sonuna kadar duvarı çevreleyen dört köşesi mafsallı çelik çerçeveye yaslanmaya devam etmişlerdir. Çalışmanın ikinci aşamasında, delikli çelik levhalarla güçlendirilen tuğla duvarlar, bir de depremi benzeştiren tersinir-tekrarlanır yükler altında test edilmiştir [41]. Araştırma için birisi referans, onikisi güçlendirilmiş toplam on üç adet, ½ ölçekli tuğla duvardan oluşan deney serisi hazırlanmıştır. Sonuçta benzer olumlu davranışlara tersinir-tekrarlanır yükler altında da ulaşılabilmektedir. Üstelik % 10'dan büyük ötelenme oranlarına gelindiğinde dayanımda önemli bir kayıp oluşmadığı gibi, referans elemanına göre dayanım ve rijitlikte 2 kata varan artışlar gözlenmiştir. Bu çalışmalarda ortaya çıkan sünek davranış ve umut verici tablo sonraki aşamanın temellerini oluşturmuştur.

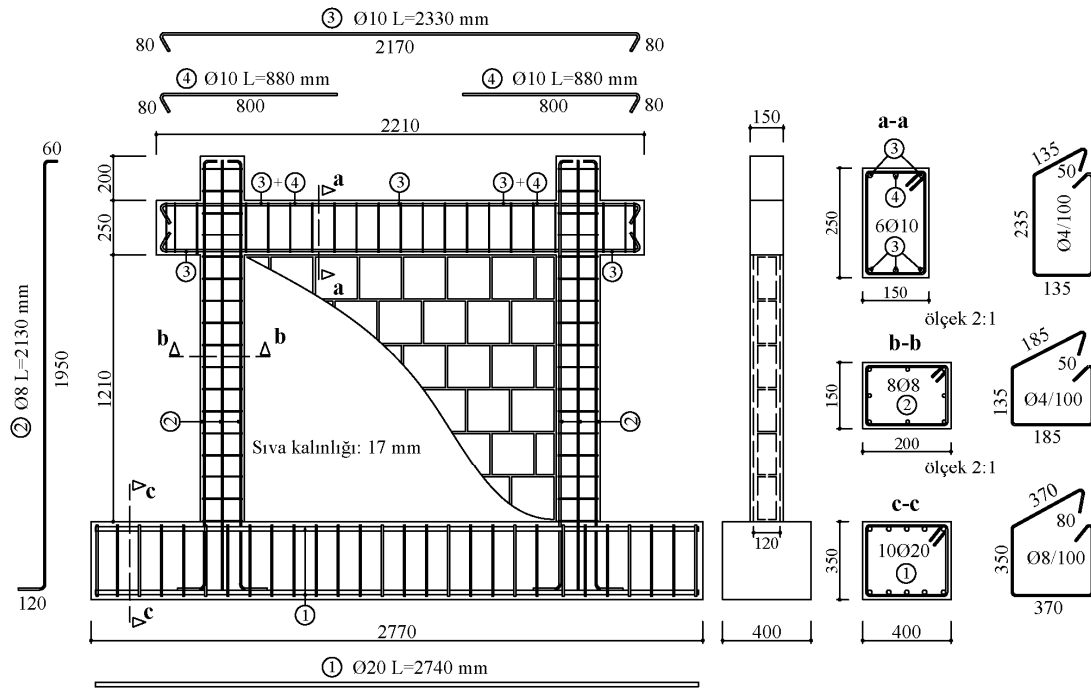
Üçüncü aşamada ise diğerlerinden farklı olarak, delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş tuğla dolgu duvarlar ile, kiriş ve kolonlardan oluşan betonarme çerçeve beraber ele alınmıştır. Böylece gerçek yapıdaki benzer şekilde, betonarme çerçeve içinde bulunan güçlendirilmiş duvarın deprem yükleri altında sistem davranışını nasıl etkilediği araştırılabilmektedir [9]. Sonuçlar, güçlendirilmiş deney elemanlarının şaşırtıcı ölçüde sünek davrandığını ve % 7,5'lara varan görel kat ötelenme oranlarında dahi, dayanımda önemli bir kayıp olmadığını göstermiştir. Elde edilen sünek davranışa ek olarak dayanımda da 2 kata varan artışlar sağlanmıştır. Dolayısıyla birçok tuğla duvarlı betonarme yapının, içinde yaşayanlara fazla rahatsızlık vermeden, uygulaması kolay bu yöntemle gelecekte depreme karşı güçlendirilebileceği veya can güvenliğinin sağlanabileceği kanaatine varılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, son çalışmadaki deneysel sonuçlarının doğrultusunda analitik yaklaşımlar oluşturmak ve bu yaklaşımların deney değişkenleri açısından uyumunu karşılaştırmaktır. Böylece yöntemi uygulamak veya modellemek isteyenlere dayanım, rijitlik ve deformasyon sınırları açısından yaklaşık hesap yöntemleri önerilebilecektir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Deney Elemanları (Test Specimens)

Çalışma kapsamında ikisi referans (biri boş çerçeve diğeri tuğla dolgu duvarlı çerçeve), 12' si güçlendirilmiş olmak üzere toplam 14 deney elemanı üretilip test edilmiştir. Deney elemanları ½ ölçekli olup kolon, kiriş ve temelden oluşan betonarme çerçevenin içine tuğla duvar örülmesiyle elde edilmiştir. Referansla birlikte güçlendirilmek üzere hazırlanan elemanların geometrisi ve detayları Şekil 3'de gösterilmiştir. Kolon kesitleri 150×200 mm, kiriş kesiti 150×250 mm olarak tasarlanmıştır. Temel üstünden kiriş altına kadar kolonların boyu 1210 mm, kolon iç yüzleri arasından ölçülen kirişin boyu ise 1410 mm'dir. Çerçeve içinde oluşan 1210 mm yüksekliğinde ve 1410 mm



Şekil 3. Deney elemanlarının geometrisi ve donatı detayları (Geometry and reinforcement details of specimens)

açıklığındaki boşluk, sıvalı tuğla dolgu duvarla kapatılmıştır. Her iki duvar yüzüne birden yapılan 17 mm kalınlığında sıva ile beraber duvar kalınlığı 120 mm'yi bulmaktadır.

Betonarme çerçevenin, güçlendirme ihtiyacı doğan yapılarda sık rastlanan kusurları (düşük beton dayanımı, eksik etriye, sarılma bölgesinin oluşturulmaması) içermesine çalışılmıştır. Çalışma kapsamındaki bütün deney elemanlarının üretiminde Şekil 3'deki donatı planı kullanılmıştır. Kolonlarda 8Ø8 boyuna ve Ø4/100 enine donatı kullanılmıştır. Kirişlerde ise alt yüzde kiriş boyunca devam eden 3Ø10 donatı, üst yüzde ise yine kiriş boyunca devam eden 2Ø10 donatı ile beraber kiriş mesnet bölgelerinde 880 mm uzunluğunda 1Ø10 donatılar kullanılmıştır. Kiriş etriyeleri ise Ø4/100 şeklinde bağlanmıştır. Temelde ise 10Ø20 boyuna donatı ve temel boyunca devam eden Ø8/100 etriyeler kullanılmıştır. Kolon ve kirişlerdeki bütün yüzlerde net 7,5 mm pas payı bırakılmıştır.

Duvar 85×190×190 mm ebatlarındaki delikli tuğlalardan imal edilmiştir. Bu tuğla dolgu duvar tuğlası olup, duvar imalatı esnasında gerçekteki ve TS EN 771-1 (2005) Türk Standardına uygun olarak delikleri yatay yöne gelecek şekilde kullanılmıştır [42]. Tuğlalar arasındaki bütün derzler yaklaşık 10 mm açıklığında olup sıva harcı ile doldurulmuştur. Elemanlar hazırlandıktan sonra çeşitli parametreler kullanılarak deney elemanları delikli çelik levhalarla takviye edilmiştir. İki adet referans elemanı ile birlikte toplam 14 deney elemanı hazırlanmış ve test edilmiştir. Birinci referans elemanı (R1) sadece betonarme çerçeveden, ikinci referans elemanı (R2) ise içi tuğla dolgu duvarla kapatılmış yalın betonarme çerçeveden

oluşturulmuştur. Diğer 12 elemanda deney parametrelerini; kullanılacak delikli levha kalınlıkları (1; 1,5; 2 mm), levhaların karşılıklı bulonlanmasında kullanılan aralıklar (150, 200 mm) ve delikli levhanın kolonlara bağlantısının olup olmaması belirlemiştir. Bahsedilen parametrelerin her seferinde biri değiştirilerek sistematik bir çalışma yapılmıştır. Deney elemanlarına ait özellikler ise Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Deney elemanları (Test specimens)

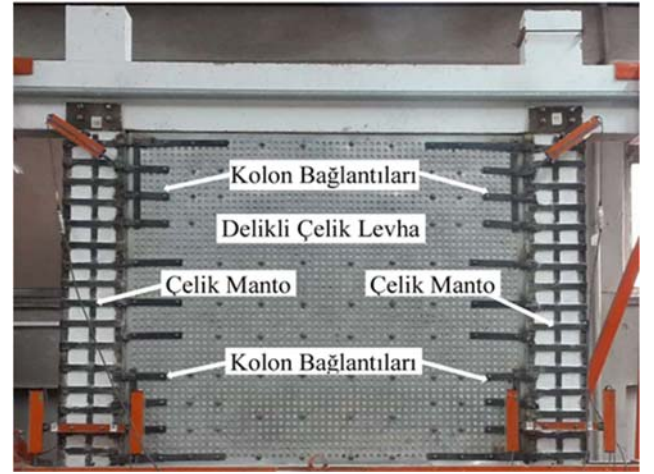
Deney Elemanı	Delikli levha kalınlığı (t) mm	Bulon aralıkları (s) mm	Kolona bağlantı
R1	----	----	----
R2	----	----	----
S1ZN200	1,0	200	Yok
S1ZN150	1,0	150	Yok
S1ZY200	1,0	200	Var
S1ZY150	1,0	150	Var
S1.5ZN200	1,5	200	Yok
S1.5ZN150	1,5	150	Yok
S1.5ZY200	1,5	200	Var
S1.5ZY150	1,5	150	Var
S2ZN200	2,0	200	Yok
S2ZN150	2,0	150	Yok
S2ZY200	2,0	200	Var
S2ZY150	2,0	150	Var

Deney elemanlarının isimleri, deney parametrelerinin İngilizce karşılıklarının baş harfinden ve sayılardan türetilerek oluşturulmuştur. "S" harfi deney elemanını simgeleyen "Specimen" kelimesinden gelmektedir. "S" den sonra gelen sayı (1; 1,5; 2) delikli levhanın kalınlığını

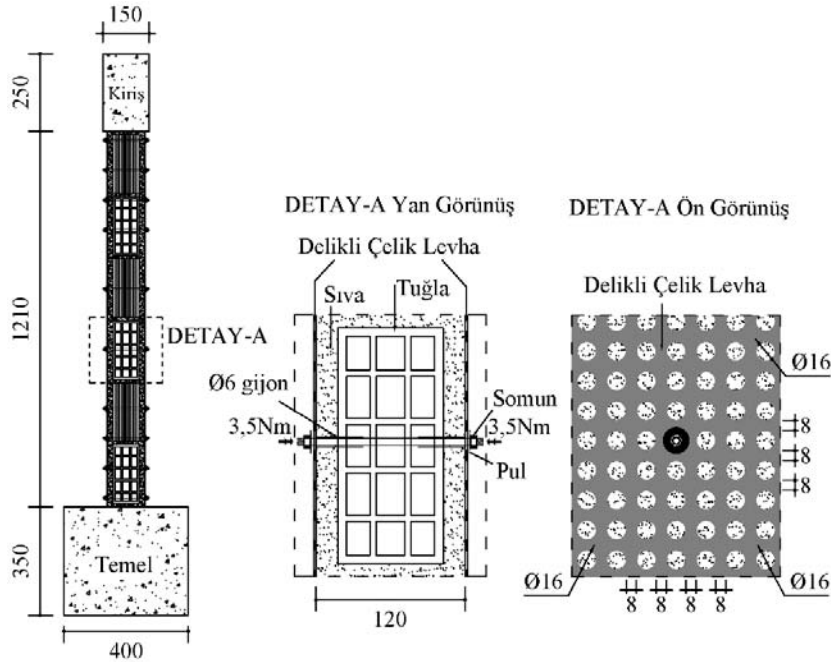
göstermektedir. Sayıdan sonra gelen “Z” harfi, kolonlara verilen aksel yükün sıfır “Zero” olduğu belirtmektedir. “Z” harfinden sonra gelen ikinci harf delikli levhanın kolonlara bağlantısının yapıp yapılmadığını gösteren “Yes, No” kelimelerin baş harfidir. İsim sonundaki sayılar ise (150, 200) delikli çelik levhanın duvara bağlandığı bulon aralığını göstermektedir (Tablo 1). Bu çalışmada araştırılan değişkenlerden levha kalınlıkları (1; 1,5; 2 mm) ve bulon aralıkları (150, 200 mm) daha önce yapılmış ön çalışmaların ışığında belirlenmiştir [40, 41]. Bulon aralıkları tasarlanırken, gerçekte iki komşu tuğlanın en az birinde bulon olması istendiğinden 200 mm üzerine çıkılmamış ve çok da pratik olmayacağı düşünülerek 150 mm altına inilmemiştir. Deney elemanlarının bir yarısında delikli levhalar sadece dolgu tuğla duvara, diğer yarısında ise hem kolonlara hem de tuğla duvarlara bağlanmıştır. Bunların dışında, güçlendirilmiş deney elemanlarından oluşan serinin birinci deneyinde (S1ZN200) kolonlarda kesme kırılması olmuş, güçlendirilmiş duvar köşelerinde ise sınırlı ezilmeler haricinde neredeyse hiç hasar ortaya çıkmamıştır. Bu nedenle, delikli levha ile güçlendirilmiş tuğla duvarın yeterince test edilemediği görülerek sonraki deney elemanlarının kolonlarında kesmeye karşı önlem alınmasına karar verilmiştir. Bunun için kolonlar Şekil 4’deki gibi çelik profillerle mantolanmıştır. Mantolamada sadece kolonlar sargılanmış, hiçbir betonarme elemana ankrajla bağlantı yapılmamıştır. Böylece kolonların eğilmeye karşı güçlenmesinin önüne geçilmiştir. Mantolama ile ilgili detaylara [9]’ da ulaşılabilir.

Güçlendirme yönteminde tuğla duvarın her iki yüzüne Şekil 5’de detayları gösterilen delikli çelik levhalar yerleştirilmiş ve delinecek noktalar işaretlenerek karşılıklı 7 mm çapında delikler açılmıştır. Daha sonra 160 mm uzunluğundaki Ø6

metrik bulonlar delikten geçirilmiş, iki ucuna pullar ve somunlar takılarak levhalar yerine sabitlenmiştir. Ardından bulonların üzerindeki somunlar 3,5 Nm torkla sıkıştırılarak delikli levhalarla güçlendirme işi tamamlanmıştır (Şekil 5). Sıkıştırma torku, duvarda hasar oluşturmayacak şekilde ayarlanmış optimum bir değerdir. Verilen 3,5 Nm torkla 6 mm çapındaki bulona, akma dayanımının %75’i kadar çekme gerilmesi uygulanmıştır. Yatay yükler altında duvarda oluşacak basınç gerilmeleri sonucunda duvar, bilindiği gibi düzlemine dik yönde de şekil değiştirmeye çalışmaktadır. Kalan %25’lik dayanım payı, işte bu şekil değiştirmelerden sonra bulonlarda oluşabilecek ilave çekme gerilmelerini karşılamak ve böylece düşük ötelenme oranlarında bulonların koparak o bölgede sargılama basıncının yitirilmesini önlemek için bırakılmıştır.

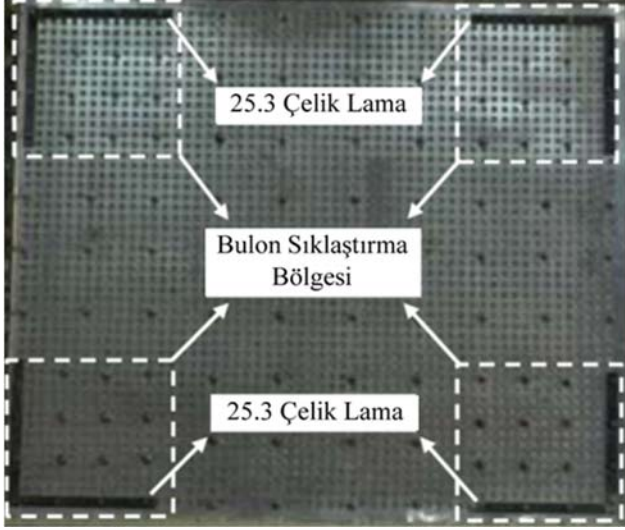


Şekil 4. Delikli levhalarla güçlendirilmiş deney elemanı (Specimens strengthened with perforated steel plates)



Şekil 5. Delikli levhalarla güçlendirme yöntemi (Strengthening method with perforated plates)

Yüksek basınç gerilmelerinin olduğu duvar köşelerinde ezilmeyi sınırlamak için ek önlemlerin alınması gerektiği daha önce yapılan araştırmalarda bahsedilmiştir [8, 33, 41]. Bu araştırmada ise duvar köşelerinde alınan ek önlem, Babayani çalışmasında test edilen yöntemlerden en olumlu deprem davranışını sergileyendir [41]. Buna göre duvar köşelerindeki 300×300 mm'lik bölgelerde, bulonlar sıklaştırılarak aralığı 100 mm' ye düşürülmüş ayrıca kenar bulonların altında L-şeklinde, 25×3 mm kesitli, çelik lamalar kullanılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Köşe bölgelerde ezilmeye karşı alınan önlem
(Precautions taken on the corners against crushing)

Güçlendirilmiş duvarın kolonlara bağlanacağı elemanlarda bağlantı 25×3 mm kesitli lamalarla sağlanmıştır. Bu lamalar, duvar üzerinde kolon kenarlarına en yakın mevcut iki bulonla tutturulduktan sonra lamaların boşta kalan ucu, kolonlarda kesmeye karşı önlem olarak yapılmış olan çelik mantonun köşebentleri üzerine alttan ve üstten 30 mm

boyunca kaynaklanmıştır (Şekil 4). Uygulama duvarın her iki yüzünde ve her bulon sırasında yapılmıştır.

2.2. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

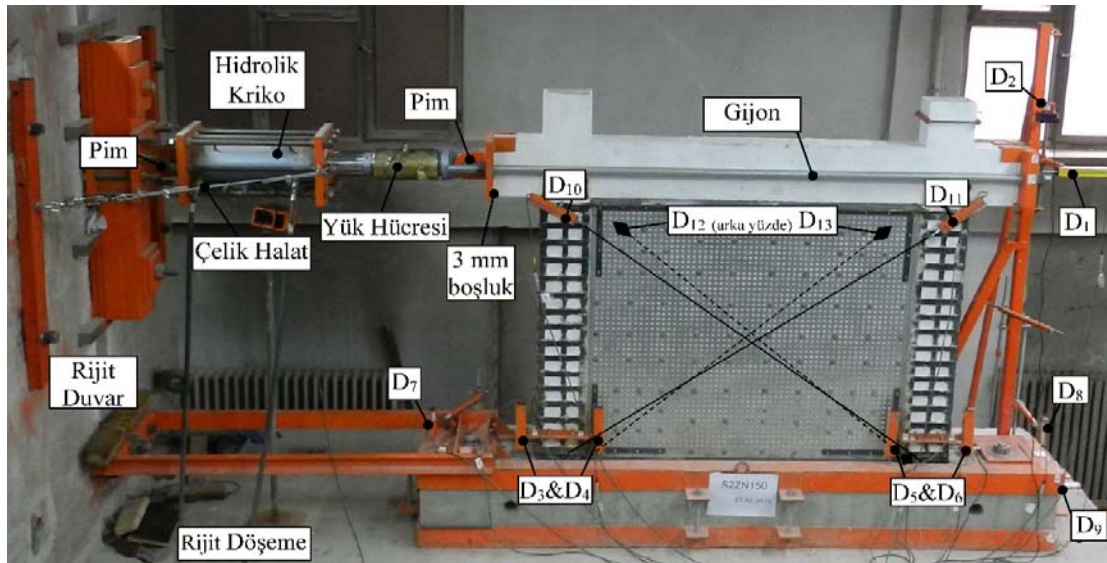
Çalışmada kullanılan Ø4, Ø8, Ø10 çaplarındaki donatıların akma dayanımları (f_y) sırasıyla 270 MPa, 460 MPa, 500 MPa; kopma dayanımları (f_u) ise sırasıyla 390 MPa, 600 MPa, 680 MPa çıkmıştır. Betonarme çerçevelerin ortalama beton basınç dayanımı 10 MPa' dır.

Duvar imalatında 85×190×190 mm ebatlarında, yatay delikli, TS EN 771-1 [42] Türk Standardına uygun ve bir tanesinin ağırlığı 20 N gelen tuğlalar kullanılmıştır. Tuğlanın basınç dayanımı, yükün uygulama yönüne bağlı olarak değiştiğinden her üç eksenli doğrultusunda en az on numune için ayrı ayrı test edilmiştir. Buna göre çalışmada kullanılan tuğlanın ortalama basınç dayanımı, delikleri doğrultusunda 20 MPa, boşluklara dik kısa kenar doğrultusunda 5,2 MPa ve boşluklara dik uzun kenar doğrultusunda 8,8 MPa olarak hesaplanmıştır. Duvar örmekte ve sıva yapmakta kullanılan harç sırasıyla kum, kireç, çimento ve suyun hacimce 8:2:1:1,5 oranında karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Bu karışımdan alınan tüm standart küp numunelerin basınç dayanımları birbirine oldukça yakın ve ortalaması 2,5 MPa çıkmıştır.

Çalışmada kullanılan delikli levhanın akma dayanımı (f_{yp}) 350 MPa, kopma dayanımı ise (f_{up}) 410 MPa olarak belirlenmiştir. Delikli levhaları tuğla duvara bağlamak için kullanılan bulonlar ile kolonları mantolamada kullanılan çelik profiller St37 kalitesindedir.

2.3. Deneysel Düzenek (Experimental Setup)

Deneysel elemanları Şekil 7'de gösterilen düzenek ile tersinir tekrarları yatay yükler altında test edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde kolonlara aksel yük verilmemiştir. Deneysel elemanına yatay yükleme, çift etkili hidrolik kriko aracılığıyla



Şekil 7. Deneysel Düzenek (Test set-up)

ile kiriş aks hizasından yapılmıştır. Krikonun bir ucu rijit duvara, diğer ucu ise yük hücreğine bağlanmış, kullanılan mafisallar aracılığı ile yük deney elemanına aktarılmıştır. Bu şekilde kriko ve yük hücreğinde eksene dik yönde kuvvet oluşması önlenmiştir. Yatay yükü deney elemanına aktarmak için kiriş uçlarına rijit plakalar takılmış ve plakalar birbirine iki kenarından kiriş boyunca uzanan bulonlar ile tutturulmuştur. Kiriş boyunca uzanan bu bulonlara somunlar yaklaşık 3 mm boşluklu takılarak ard germe verilmemiştir. Böylece kirişte oluşturulabilecek ekstenel kuvvetler ile deney elemanı davranışının etkilenmesi engellenmiştir (Şekil 7).

Deneysel çalışmanın başında düzlem dışı ötelenme için herhangi bir düzenek tasarlanmamıştır. Ancak S1.5ZY200 elemanı testinde düzlem dışı ötelenme sorunu ortaya çıkmıştır. Bu hareketi kısıtlamak amacıyla mevcut sisteme yeni bir düzenek ilave edilmiştir. Bu düzenek, krikonun yalnızca düşey ve yatay yönlerde hareket etmesini sağlayarak düzlem dışı hareketi engelleyen iki adet manşonlu çelik halattan meydana gelmektedir (Şekil 7).

Deplasman ölçümlerinde LVDT (Linear variable differential transformer) ve potansiyometreler kullanılmıştır. Kullanılan her ölçüm cihazı "D" harfi ve alt indisine gelen bir sayı ile isimlendirilmiştir (Şekil 7). Deneyler dayanımda büyük kayıp (%15) ya da D_1 ölçüm cihazının kapasitesi (± 100 mm) dolunca sonlandırılmıştır.

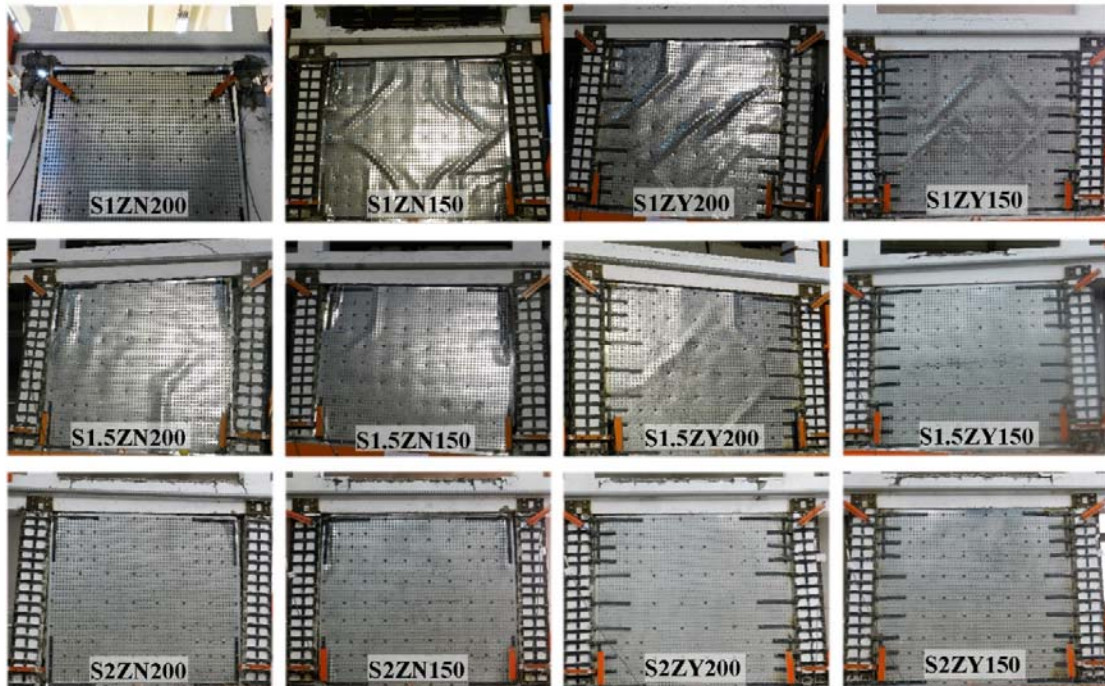
2.4. Deneysel Süreç ve Davranış (Experimental Process and Behavior)

R1 elemanı, kolon alt uçlarında oluşan dört adet plastik mafsal sonucu göçmeye ulaşmıştır. Ayrıca beton dayanımının da düşük olması sebebiyle kiriş alt ve üst

yüzleri ile kolon yüzlerinde aderans çatlakları oluşmuştur (Şekil 1a). R2' de ise kolon üst uçlarında kesme çatlaklarının gelişmesiyle beraber duvar köşelerinin ezilerek dağıldığı, hemen ardından kolon üst uçlarında kesme kırılması gerçekleşerek dayanımda ani kayıp olduğu görülmüştür (Şekil 1b).

S1ZN200 deneyinde, güçlendirilmiş duvardaki hasarlar yok denecek kadar sınırlı kalmış ancak bunun dışındaki davranış R2 ile oldukça benzer olmuştur. Bu sonuç, duvar güçlendirme işleminin başarılı olabilmesi için kolonlarda ortaya çıkabilecek kesme kırılmasının önlenmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Dolayısı ile sonraki deney elemanlarının kolonları Şekil 4'deki gibi çelik profillerle mantolanmıştır. Bu işlem, 1 ile 1,5 mm delikli levha kalınlığına sahip deney elemanlarında, tuğla duvar ve betonarme çerçevenin beraber etkin bir şekilde çalışmasını sağlamıştır. Söz konusu elemanlarda sistemin davranışını betonarme çerçeve belirlemiştir. Elemanlar taşıma gücüne kolon uçlarında oluşan eğilme hasarları ile ulaşmıştır. Dolgu duvarın takviyesinde 2 mm kalınlığındaki delikli levhalar kullanılmaya başlandığında, duvar biraz daha rijit olmuş, ancak bu durum kolon uçlarında eğilme hasarlarıyla beraber kesme hasarları da meydana getirmiştir. Yalnız bu kesme hasarı S1ZN200'deki gibi çok tehlikeli ve ani olandan değil, kolon-temel birleşim ara kesitinde kısa konsollardakine benzer ötelenme hasarı şeklinde gerçekleşmiştir (Şekil 8). Sonuçta, sistem davranışını birleşik göçme modu ile betonarme çerçeve ve güçlendirilmiş duvar beraber belirlemiştir.

Deney sonuçları, güçlendirilmiş deney elemanlarının şartırtıcı ölçüde sünek davrandığını ve % 7,5' lara varan ötelenme oranlarında dahi, dayanımda önemli bir kayıp



Şekil 8. Deney elemanlarının göçme modları (Failure modes of specimens)

olmadığını göstermiştir. Elde edilen sünek davranışa ek olarak dayanımda da 2 kata varan artışlar sağlanmıştır.

3. DENEY SONUÇLARININ ANALİTİK YAKLAŞIMLARLA DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE EXPERIMENTAL RESULTS WITH ANALYTIC APPROACHES)

Bu çalışmanın amacı; delikli levhalarla güçlendirilmiş dolgu duvarın sistem davranışını belirlediği durumlar için hesap yöntemleri geliştirmektir. Eğer dolgu duvarı kuşatan betonarme çerçevede kesmeye karşı yetersizlik tespit edilirse güçlendirme yöntemlerinden biriyle zaten gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Bir başka deyişle, önerilen hesap yöntemleri, betonarme çerçevenin eğilmeden kapasitesine ulaşacağı öngörülen durumları kapsayacaktır. Bu nedenle, deney sonuçları ile daha sağlıklı karşılaştırma yapabilmek amacıyla S1ZN200 ve 2 mm delikli levhalarla güçlendirilmiş deney elemanları (S2ZN200, S2ZN150, S2ZY200, S2ZY150) araştırmanın bu kısmında çoğu zaman değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Hesaplarda, eş değer basınç çubuğu modeli kullanılmıştır. Bu çubuk betonarme çerçevenin içine köşegen boyunca iki ucu mafsallı şekilde yerleştirilmektedir. Bilindiği gibi modelleme esnasında bu çubuğa dayanım, rijitlik ve deformasyon sınırları tanımlamak gerekmektedir. Çalışmada deneylerden faydalanarak basınç çubuğuna işte bu değerleri tanımlamak için gerekli hesap yöntemleri ve yaklaşımlar geliştirilmiştir. Ayrıca geliştirilen hesap yöntemleri ve yaklaşımların deney parametreleri açısından değişimi, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Dayanım (Strength)

FEMA-306 [43] dolgu duvarın dayanımı belirlenirken göçme moduna göre analiz yapmanın daha doğru bir yaklaşım olabileceğini belirtmiştir. Burada köşelerin ezilmesiyle gerçekleşen davranış için, dolgu duvarın yatay yük doğrultusundaki ezilme dayanımı (V_{cinf}) hesabında, Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3 önerilmiştir.

$$V_{cinf} = a_{inf} t_{inf} f_{me90} \cos\theta \quad (1)$$

$$a_{inf} = 0,175 (\lambda h_{col})^{-0,4} r_{inf} \quad (2)$$

$$\lambda = [(E_{me} t_{inf} \sin 2\theta) / (4 E_{fe} I_{col} h_{inf})]^{1/4} \quad (3)$$

Eşitliklerde, a_{inf} basınç çubuğunun eşdeğer genişliğini; t_{inf} dolgu duvar kalınlığını; f_{me90} duvarın yatay doğrultudaki dayanımı (tuğla dayanımının (f_{me}) 50%' si alınabilir.); θ duvar köşegeninin yatayla yaptığı açığı (radyan); h_{col} kolonun giriş eksenleri arasındaki yüksekliğini; r_{inf} duvarın köşegen uzunluğunu; E_{me} duvarın elastisite modülünü; E_{fe} betonarme çerçevenin elastisite modülünü; I_{col} kolonun atalet momentini ve h_{inf} duvarın yüksekliğini göstermektedir.

Bütün güçlendirilmiş duvarların deneylerinde çapraz çatlaklar oluşsa da delikli levhalar, üzerine aldıkları çekme kuvvetleriyle bu çatlakların genişlemesini ve ilerlemesini

engellemiştir. İlerleyen aşamalarda köşelerdeki hasarlar daha baskın olmuş ve elemanların maksimum yüke ulaşmasını sağlamıştır. Bu davranış nedeniyle, güçlendirilmiş duvar hesap dayanımı (V_{str}) için oluşturulan yaklaşımda Eş. 1 geliştirilerek Eş. 4 oluşturulmuştur.

$$V_{str} = a_{str} t_{inf} f_{me90} \cos\theta \quad (4)$$

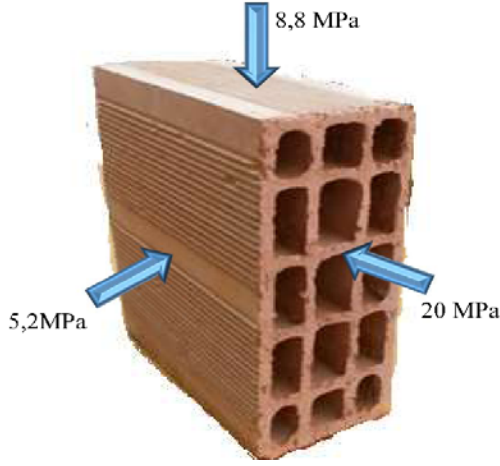
Eş. 4'ün Eş. 1'den farkı, a_{inf} yerine, güçlendirilmiş duvar eş değer basınç çubuğu genişliğinin (a_{str}) kullanılmasıdır. Dolgu duvarın delikli levhalarla takviyesiyle beraber sistem dayanımının artmasının ana sebebi, eş değer basınç çubuğu genişliğinin artması olmuştur. Delikli levhalar, duvarı sargılamış ve üzerine aldıkları çekme kuvvetleriyle çatlakların gelişmesini önlemiştir. Böylece daha fazla diyagonal lifin yük aktarımına katılmasını sağlanmıştır. Sonuçta yatay yükler altında, betonarme çerçevenin düğüm bölgesinde duvarla temas eden yüzeyle beraber sistem dayanımı da artmıştır. Güçlendirilen duvarın a_{str} değeri, ampirik olarak belirlenmiş ve Eş. 5' de gösterilmiştir.

$$a_{str} = a_{inf} [1 + (2 \omega s t_p f_{yp}) / (t_{inf} f_{me90})] \quad (5)$$

Eş. 5'de " ω " delikli levhanın kolonlara bağlantı durumuna göre değişen katsayıdır. Çelik levhanın kolonlara bağlandığı elemanlarda, delikli levha aynı zamanda diğer köşegen yönünde çekme gerilmeleri de taşımaktadır. Ancak bu katkının miktarı duvarda oluşan çatlakların konumuna ve miktarına, levhalar ile bulonlar arasında kalan boşlukların rassal pozisyonuna göre değişmektedir. Bu karmaşık davranış nedeniyle ilave dayanımın, deneysel veriler de göz önüne alındığında levhanın basınç doğrultusu boyunca taşıdığı kuvvetin %20'si kadar alınabileceği kanaatine varılmıştır. Bu nedenle levhanın kolonlara bağlandığı durumlarda Eş. 5' deki ω katsayısının 1,2 alınması önerilmektedir. Kolonlara bağlantının yapılmadığı elemanlarda ise böyle bir katkı olmayacağından bu katsayı 1,0 alınacaktır. Delikli levha net alanın brüt alanına oranı " s " olup bu çalışmada 0,66'dır. t_p ve f_{yp} sırasıyla kullanılan delikli levhanın kalınlığı ve akma dayanımıdır.

f_{me90} değeri duvarın yatay doğrultudaki dayanımı olup FEMA-306 [43]' daki öneriyle tuğla dayanımının 50%' si olarak alınabilir. Burada bahsedilen tuğla dayanımı, tuğlanın delikleri doğrultusundaki dayanımı olup betonarme çerçeve içine delikleri düşey doğrultuda yerleştirildiği ve sıvanın yapılmadığı varsayımını içermektedir. Bu çalışmada, tuğlanın her üç doğrultudaki dayanımı zaten deneysel olarak tespit edildiğinden (Şekil 9), FEMA' daki yaklaşık hesap önerisi kullanılmamıştır. Öte yandan bu çalışmadaki duvar yapımı sırasında tuğlalar delikleri yatay yönlü olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ancak tam bir tuğlanın sığmadığı kenar ve köşe bölgelerde gerçekte olduğu gibi tuğla ikiye kırılıp delikleri düşey olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3). Bir başka ifadeyle yatay yük altında çerçevenin duvarla temas ettiği köşe bölgelerde delikleri düşey ve yatay doğrultuda olan tuğlalar beraber bulunmaktadır. Tuğlanın delikleri doğrultusundaki dayanımı 20 MPa iken deliklere dik uzun doğrultusundaki dayanımı 8,8 MPa' dır (Şekil 9). Dolayısı

ile hesaplarda yükün geldiği yöndeki kritik dayanım olan 8,8 MPa'ın kullanılması gerçeğe daha yakın sonuçlar verecektir.



Şekil 9. Tuğla üç doğrultudaki dayanımı
(Strengths of brick in 3-axis)

Ancak bu çalışmadaki duvarlar sadece tuğladan oluşmamaktadır. Duvarlardaki tuğlaların iki yüzünde sıvası ve arasında derzleri de vardır. Bu nedenle f'_{me90} değeri için bir eşdeğer dayanıma, t_{inf} değeri içinse bir eşdeğer kalınlığa ihtiyaç vardır. Tuğla başına düşen sıva+derz alanları ve oluşturduğu tuğla modülü Şekil 10'da gösterilmiştir. Dolayısıyla bir tuğla modülünün taşıyabileceği yük, tuğlanın taşıdığı yük (tuğla alanı×8,8 MPa) ile çevresindeki sıva ve derzin taşıyabileceği yükün (sıva+derz alanı×2,5MPa) toplamına eşit, yani 161,7 kN olacaktır. Bu yük değerinin, tuğla modülü toplam alanına bölünmesiyle Eş. 4' teki f'_{me90} değeri yerine yerleştirilebilecek eş değer dayanım olan 6,73 MPa hesaplanmıştır. Eş değer duvar kalınlığı olan t_{inf} değerini hesaplamak için sıva kalınlığı eş değer tuğla kalınlığına dönüştürülmüştür. Bunun için derzler hariç sıvanın taşıdığı yük (sıva alanı×2,5MPa) olan 17 kN bulunmuş, modül eş değer dayanımı (6,73 MPa) ve yüksekliğine (200 mm) bölünerek 13 mm kalınlık hesaplanmıştır. Bu durumda t_{inf} değeri, tuğla kalınlığı olan 85 mm ile 13 mm' nin toplamı olan 98 mm alınmıştır. Güçlendirilmiş duvarda a_{inf} değeri hesaplanırken Eş. 2 aynen alınmış, gerekli olan Eş. 3 ise aşağıdaki gibi geliştirilerek Eş. 6 elde edilmiştir. Yani Eş. 6'da farklı olarak güçlendirilmiş duvarın elastik modülü (E_{stime}) gereklidir.

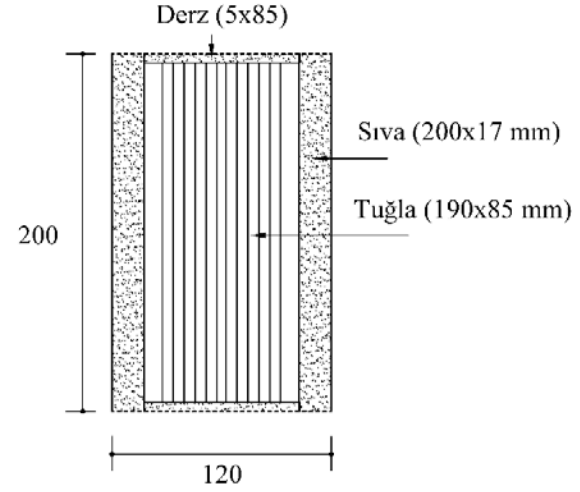
$$\lambda = [(E_{stime} t_{inf} \sin 2\theta) / (4 E_{fe} I_{col} h_{inf})]^{1/4} \quad (6)$$

Güçlendirilmiş duvarın E_{stime} değeri ise, Eş. 7 ile hesaplanabilir.

$$E_{stime} = E_m [1 + (2s E_{st} t_p) / (E_m t_{inf})] \quad (7)$$

E_m değeri FEMA-306 [43]'daki yaklaşımla duvar dayanımının 550 katı (3700 MPa) olarak kabul edilmiştir. Delikli levhannın elastisite modülü (E_{st}) ise 2×10^5 MPa alınmıştır. E_{fe} ise ACI-318 [44]'deki yaklaşımla 10 MPa

basınç dayanımına sahip beton için 15000 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 10. Tuğla modülü (Brick module)

Dolgu duvarı delikli levhalarla güçlendirilen ve kolonlarında kesmeye karşı yeterli önlem alınan bütün deney elemanları sünek davranmış ve ancak kolon uçlarında oluşan plastik mafsalların dönme kapasitesi dolunca dayanımda önemli bir kayıp olmuştur. Bir başka ifadeyle, kolon boy demirleri kopmadığı sürece yükte önemli bir kayıp (%15) olmadan güçlendirilmiş duvar ve betonarme çerçeve beraber etkin bir şekilde çalışmıştır. Dolayısıyla bu elemanların hesap dayanımları (P_{hes}), V_{str} ile yalın betonarme çerçevenin taşıma gücü (V_{frame}) değerlerinin toplanmasıyla bulunmuştur. Şekil 8'de görüldüğü gibi deney elemanları, kolon uçlarında oluşan dört adet plastik mafsalları taşıma gücüne ulaşmıştır. Dolayısıyla V_{frame} , bu plastik mafsalların moment kapasitesi toplamının, kolon yüksekliğine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Hesaplanan 48 kN' luk V_{frame} değeri, ileri ve geri çevrimde sırasıyla 50 kN ve 47 kN taşıma gücüne ulaşan R1 elemanı ile de beklendiği gibi uyum içerisindedir [9]. Deneylerin ileri (P_{itme}) ve geri ($P_{çekme}$) çevrimlerinde ulaşılan maksimum yükler ile bahsedilen analitik yaklaşımlarla elde edilen P_{hes} değerleri oranlarıyla birlikte Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2 incelenecek olursa, güçlendirilmiş duvarların hesap dayanımları için geliştirilen Eş. 4' ün, deneysel dayanımlara oldukça yakın sonuçlar elde edilmesini sağladığı görülmektedir. Bu elemanlarda sapma güvenli yönde en fazla %12 olmuştur. Dolgu duvarlar çoğu zaman hesaplarda taşıyıcı olarak kabul edilmedikleri için yapıldığı tuğlaların dayanım açısından standart sapması oldukça yüksek çıkmaktadır. Bu durum tuğla duvarın yatay yükler altındaki davranışına da yansımaktadır. Bundan dolayı güçlendirilmiş elemanlarda elde edilen % 12 sapmanın oldukça makul düzeyde olduğu düşünülebilir. Bu güçlendirilmiş yedi elemanda oluşan sapmaların aritmetik ortalaması alındığında çıkan sonuç sadece %3 düzeyindedir. Buradan güçlendirme yönteminin oldukça iyi bir kompozit davranış da sergileyebildiği düşünülebilir.

Tablo 2. Deneysel ve hesap dayanım değerlerinin karşılaştırılması
(Comparison of experimental and analytical strengths)

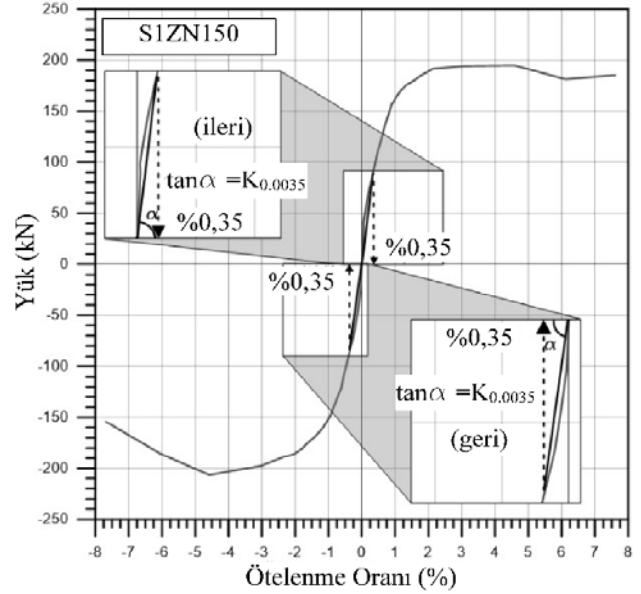
Deneysel Elemanı	Dayanım (kN)			Oran	
	Deneysel		Hesap	$\frac{P_{itme}}{P_{hes}}$	$\frac{P_{çekme}}{P_{hes}}$
	P_{itme}	$P_{çekme}$	P_{hes}		
S1ZN150	194	204	198	0,98	1,03
S1ZY200	230	234	210	1,10	1,11
S1ZY150	235	231	210	1,12	1,10
S1.5ZN200	229	227	226	1,01	1,00
S1.5ZN150	225	238	226	1,00	1,05
S1.5ZY200	238	244	242	0,98	1,01
S1.5ZY150	236	230	242	0,98	0,95

3.2. Rijitlik (stiffness)

Betonarme elemanların ve tuğla duvarların, doğrusal ve izotropik olmayan, ayrıca yüke bağlı davranışından ötürü rijitliğini tespit etmek oldukça güçtür. Üstelik tersinir-tekrarlanır yükler altında, betonarme çerçeve ve tuğla duvarın birbirleri ile farklı etkileşimler içerisinde olması ve çatlakların gelişmesi rijitlik analizini çok daha karmaşık hale getirmektedir. Dolayısıyla kolondan alınan eğrilik ölçümlerinin sistemin gerçek rijitliğini yansıtmasında yetersiz kalacağı görülmüştür. Bu nedenle deney elemanlarının genel davranışını yansıtan yük-yatay deplasman eğrileri kullanılarak ötelenme rijitlikleri hesaplanmaya ve analiz edilmeye çalışılmıştır. Öte yandan, yük-yatay deplasman grafiğinde çevrim sayısı artıktıkça eğriler doğrusallıktan uzaklaşmaktadır. Her noktası ve bölgesi için ayrı bir rijitlik tanımlanabilen bu eğrilerin neresinden rijitlik hesaplanacağı ve tüm elemanlar için nasıl bir standart yöntem oluşturulabileceği oldukça tartışmalıdır.

Bu nedenle, elemanlar arasında daha adil bir karşılaştırma yapabilmek için iki farklı rijitlik değeri kullanılmıştır. Bunlardan birincisi; yük deplasman zarf eğrisinde başlangıç teğetinin eğiminden bulunan başlangıç rijitliği (K_{in}), ikincisi ise orijinden başlayıp zarf eğrisinde %0,35 ötelenme oranında ulaşılan yük değerine çekilen doğrunun eğiminden sekant modülü şeklinde hesaplanan rijitlik ($K_{0,0035}$) olmuştur.

$K_{0,0035}$ ' in bulunuşu S1ZN150 elemanı zarf eğrisinde şematik olarak gösterilmiştir (Şekil 11). Bilindiği gibi %0,35 ötelenme oranı, Deprem Yönetmeliğinde [45] güçlendirilmiş dolgu duvarlar için güvenlik sınırını tanımlamakta olduğu için bu noktadaki rijitlik değerlerinin hesaplanması uygun görülmüştür. Tablo 3’de, K_{in} ve $K_{0,0035}$ için itme ve çekme yönünde ayrı ayrı hesaplanan değerlerin her eleman için aritmetik ortalaması verilmiştir. Ayrıca elemanlar arasında daha anlaşılır karşılaştırmalar ve yorumlar yapabilmek amacıyla R2’ ye göre oranlar da hesaplanmıştır.



Şekil 11. $K_{0,0035}$ ' in bulunuşu ($K_{0,0035}$ value)

R2 elemanının başlangıç rijitliği, R1’e göre 10 kat fazla olmuştur. Bir başka ifadeyle betonarme çerçeve içinin tuğla duvarla kapatılması rijitliği 10 kat arttırmıştır. Hali hazırdaki tuğla duvar varlığının zaten bu şekilde rijitliği önemli ölçüde arttırabileceği bilindiğinden, delikli çelik levhalarla takviyenin asıl amacı, sistemin rijitliğini arttırmak olmamıştır. Buna rağmen K_{in} değeri için 1,3 ile 2,4, $K_{0,0035}$ değeri için ise 1,2 ile 1,7 kat arasında R2 elemanına göre artış

Tablo 3. Rijitlik değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of stiffness values)

Deneysel Elemanı	Deneysel		Hesap		Oran		
	Ortalama K_{in} (kN/mm)	Ortalama $K_{0,0035}$ (kN/mm)	R2’ye göre ortalama K_{in}	R2’ye göre ortalama $K_{0,0035}$	R2’ ye göre rijitlik K_{hesap}	Göreceli $\frac{K_{in}}{K_{hesap}}$	Göreceli $\frac{K_{0,0035}}{K_{hesap}}$
R1	4,5	3,6	0,1	0,2	---	---	---
R2	42,0	16,1	1,0	1,0	1,00	1,00	1,00
S1ZN150	55,0	18,8	1,3	1,2	1,36	0,96	0,88
S1ZY200	100,0	27,8	2,4	1,7	1,36	1,76	1,25
S1ZY150	100,0	26,6	2,4	1,7	1,36	1,76	1,25
S1.5ZN200	83,5	24,6	2,0	1,6	1,54	1,30	1,04
S1.5ZN150	83,5	25,9	2,0	1,6	1,54	1,30	1,04
S1.5ZY200	83,5	24,8	2,0	1,5	1,54	1,30	0,97
S1.5ZY150	78,5	26,8	1,9	1,7	1,54	1,23	1,10

sağlanabilmiştir. Ancak rijitlikteki bu artışların deney değişkenleri açısından davranışta önemli bir değişikliğe neden olmadığı anlaşılmıştır. Bu küçük performans farklılıklarının, tuğla duvar deneysel çalışmalarına özgü rassal nedenlerden kaynaklandığı kanaatine varılmıştır.

Delikli levhalarla güçlendirilmiş dolgu duvarların rijitliği (k_{str}) hesabında kullanılabileceği düşünülen Eş. 8, FEMA-306'da [43] dolgu duvarların rijitliği için önerilen yöntemlerden faydalanarak türetilmiştir. Bu eşitlikte E_{stme} değeri yerine E_{mc} değeri yazıldığı zaman yalın dolgu duvarın rijitliği de bulunabilir. Eş. 8'de yer alan değişkenler, güçlendirilmiş duvarın dayanım hesabı bölümünde bahsedilen aynı yaklaşımlar kullanılarak belirlenmelidir.

$$k_{str} = (t_{inf} a_{str} E_{stme}) / r_{inf} \quad (8)$$

Bu çalışmada kullanılan betonarme çerçeve bilgisayar programında modellenmiş ardından uçları mafsallı, çapraz basınç çubuğu şeklinde modellenen güçlendirilmiş duvara da, Eş. 8' den elde edilen rijitlik değerleri tanımlanmıştır. Sisteme uygulanan yatay yük neticesinde oluşan kat ötelenmeleri hesaplatılmıştır. Ardından oluşan kat ötelenmeleri, R2 modeli kat ötelenmesine oranlanarak K_{hesap} değerleri elde edilmiştir. Böylece deneysel yöntemle benzer olarak analitik yöntemle de rijitlik analizi yapılabilmektedir. K_{hesap} değerleri ile bu değerlerin deneysel rijitliklere oranı Tablo 3' de verilmiştir. Sonuçlar deneysel K_{in} değerlerine güvenli yönde ortalama % 37, $K_{0,0035}$ değerlerine ise yine güvenli yönde %7 yaklaşıklıkla ulaşılabildiğini göstermiştir. Sadece S1ZN150 elemanının K_{hesap} değeri $K_{0,0035}$ değerinden %12 düşük çıkmıştır. Bunun belirli bir sebebi olmayıp tuğla duvar deneysel çalışmalarına özgü rassal nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenlerden dolayı Eş. 8'in delikli levhalarla güçlendirilmiş dolgu duvarların rijitlik hesabında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

3.3. Deformasyon Kapasitesi (Deformation Capacity),

Geçmişte yapılan deneysel çalışmalar, dolgu duvarın % 0,25 ötelenme oranında çatlamaya başladığını, köşelerin ezilmeye başlaması ve köşegen boyunca oluşan ana çatlağın gelişmesi ise yaklaşık % 0,5 ötelenme oranında gerçekleştiğini göstermiştir [43]. Fema-306 [43] tuğla dolgu duvarın ötelenme limitini % 2,5 olarak belirlemiştir.

Delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş elemanlarda, yük-deplasman zarf eğrilerinde maksimum yükte %15 kaybın yaşandığı noktaya karşılık gelen kat ötelenme oranı en yüksek ötelenme oranı olarak alınmış ve bu değerler sünekliğin bir ölçüsü olarak Tablo 4' de özetlenmiştir. Tablo 4'de gösterilmiş olan ortalama en yüksek ötelenme oranı değerleri, ileri ve geri yöndeki çevrimlerde elde edilmiş maksimum iki ötelenme değerinin aritmetik ortalamasıdır. Bazı değerlerin önüne büyüktür ">" işareti yerleştirilmiştir. Bu işaret deneyin sonuna gelindiğinde maksimum yükte henüz %15'lik bir kaybın oluşmadığını belirtmek için kullanılmıştır. En yüksek ötelenme oranı %>7,5 olarak tanımlanmış deneylerde, ölçüm cihazlarının kapasitesi

dolduğu için test sonlandırılmıştır. S1.5ZY200 elemanında ileri düzeyde düzlem dışı ötelenme meydana geldiği için deneye devam edilememiş ve bu noktaya kadar da yükte herhangi bir kayıp olmamıştır. Kolonları mantolanmamış S1ZN200 deneyinde ise hatırlanacağı gibi kolon üst uçlarında kesme kırılması gerçekleşmiştir. Buna rağmen bu iki elemanda da %5' den büyük ötelenme oranlarına ulaşılabilmektedir. Diğer bütün ">" işareti konan deney elemanlarında kolon alt uçlarından birinin temelle birleşen kesitindeki donatılar koptuğu için yükte önemli kayıp olmadığı halde diğer yönde teste devam edilememiştir.

Delikli levhalar, kolonlarında kesmeye karşı takviyesiyle beraber gevrek davranış gösteren bir sistemi oldukça sünek duruma getirmiştir. Hiçbir deney elemanı delikli levhalarla takviye edilmiş tuğla duvarda oluşan hasarlardan ötürü göçmeye ulaşmamıştır (Şekil 8). Deneyler ya ölçüm cihazlarının kapasitesinin dolmasıyla ya da betonarme çerçeve kolonlarının temelle birleşen ara kesitindeki boy donatılarının kopmasıyla oluşan yük kaybından ötürü sonlandırılmıştır. Bir başka ifadeyle betonarme çerçevenin boy demirleri kopmadığı sürece % 7,5' den büyük ötelenme oranlarına ulaşılabilmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Deney elemanlarının ötelenme oranları (Drift ratios of specimens)

Deney Elemanı	En Yüksek Ötelenme Oranı (%)		
	İtme	Çekme	Ortalama
R1	6,2	5,6	5,9
R2	1,1	2,2	1,6
S1ZN200	>6	4,0	>5,0
S1ZN150	>7,5	6,6	>7,0
S1ZY200	7,1	>7,5	>7,3
S1ZY150	6,3	>6,0	>6,1
S1.5ZN200	>7,5	>7,5	>7,5
S1.5ZN150	>7,5	6,2	>6,8
S1.5ZY200	>4,4	>6,0	>5,2
S1.5ZY150	>5,5	6,2	>5,8
S2ZN200	7,0	>7,5	>7,2
S2ZN150	>7,5	>7,5	>7,5
S2ZY200	>7,5	>7,5	>7,5
S2ZY150	>7,5	>7,5	>7,5

Sonuç olarak tuğla dolgu duvarlar delikli levhalarla güçlendirilince %2,5 olan ötelenme sınırını % 7,5'dan büyük değerlere taşıyabilmektedir. Bu büyük ötelenme oranlarında dahi tuğla duvarlar bütünlüğünü tamamen korumuş, betonarme çerçeveye desteğini sürdürerek sistemin taşıdığı yükte önemli bir kayıp olmasını engellemiştir.

Güçlendirilmiş duvarların bu şekilde sünek davranması, duvardaki görelî kat ötelenme oranı için bir sınır koyma gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Ancak deneylerde % 7,5'dan büyük ötelenme oranına gidilemediğinden dolayısıyla bu noktadan sonraki dolgu duvar davranışı gözlemlenemediğinden %7,5 ötelenme değeri en yüksek ötelenme değeri (deformasyon limiti) olarak kabul edilmiştir.

4. MODELLEME ESASLARI (FEATURES OF MODELING)

Delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş tuğla dolgu duvarların yapı modelinde temsil edilmesi için gerekli dayanım, rijitlik ve deformasyon özellikleri bu bölümde özetlenerek tanımlanacaktır.

Modellemede eş değer basınç çubuğu kullanılmalı ve bu çubuk betonarme çerçevenin içine köşegen boyunca iki ucu mafsallı şekilde yerleştirilmelidir. Eş değer basınç çubuğunun Şekil 12'deki gibi elasto-plastik davranış gösterecek şekilde tanımlanması gerçek davranışın yansıtılabilmesi açısından daha uygun ve pratik olacaktır. Basınç çubuğuna aktarılan yatay yük değeri, kapasiteye ulaşmaya kadar doğrusal davranış göstermeli, bu noktadan sonra ise sabit yük altında deformasyonlara izin verebilmelidir. V_{str} değeri hesabında Eş. 4 kullanılabilir. Araştırmadaki deneylerde rijitlikte büyük değişim yaklaşık %1,5 ötelenme oranında gözlenmiştir. Dolayısıyla modelleme grafiğinde çıkış kolunun yataya döndüğü noktada ötelenme değerinin %1,5 olduğu kabul edilebilir. İzin verilen en yüksek ötelenme değeri (deformasyon limiti) güvenle %7,5 alınabilir. Eş değer basınç çubuğuna atanacak rijitlik değeri Eş. 8 ile hesaplanabilir.



Şekil 12. Basınç çubuğu davranış tanımlaması
(Characterization of compression strut behavior)

Modellemeden sonra duvarın çevresinde bulunan betonarme çerçevede kesme ve sürtünme-kesmesi kontrolleri yapılmalıdır. Eğer betonarme çerçevede yetersizlik tespit edilirse mutlaka kolonlar ve gerekirse kirişlerde başarısını kanıtlamış bir yöntemle güçlendirilmelidir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

- a_{inf} : basınç çubuğunun eşdeğer genişliği
- a_{str} : güçlendirilmiş duvar basınç çubuğunun eşdeğer genişliği
- E_{fe} : betonarme çerçevenin elastisite modülü
- E_{me} : duvarın elastisite modülü
- E_{st} : delikli levhanın elastik modülü
- E_{sme} : güçlendirilmiş duvarın elastisite modülü
- f_y : donatıların akma dayanımları
- f_u : donatıların kopma dayanımları
- f_{yp} : delikli levhanın akma dayanımı
- f_{up} : delikli levhanın kopma dayanımı
- f_{me} : tuğla dayanımı

- f_{me90} : duvarın yatay doğrultudaki dayanımı
- h_{col} : kolonun giriş eksenleri arasındaki yüksekliği
- h_{inf} : duvarın yüksekliği
- I_{col} : kolonun atalet momenti
- $K_{0,0035}$: zarf eğrisinde % 0,35 ötelenmedeki yük değerine çekilen doğrunun eğiminden hesaplanan rijitlik
- K_{hesap} : hesaplanan rijitlik
- K_{in} : deney elemanının başlangıç rijitliği
- K_{str} : güçlendirilmiş dolgu duvarların rijitliği
- $P_{çekme}$: geri çevrimlerinde ulaşılan maksimum yükler
- P_{hes} : güçlendirilmiş deney elemanlarının hesap dayanımları
- P_{ime} : ileri çevrimlerinde ulaşılan maksimum yükler
- r_{inf} : duvarın köşegen uzunluğu
- s : delikli levha net alanın brüt alanına oranı
- t_{inf} : dolgu duvar kalınlığını
- t_p : delikli levhanın kalınlığı
- V_{cinf} : dolgu duvarın yatay yük doğrultusundaki ezilme dayanımı
- V_{frame} : yalın betonarme çerçevenin taşıma gücü
- V_{str} : güçlendirilmiş duvar hesap dayanımı
- θ : duvar köşegeninin yatayla yaptığı açı (radyan)
- ω : delikli levhanın kolonlara bağlantı durumuna göre değişen katsayı

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Tuğla dolgu duvarlar, mimari nedenlerden ötürü yapıldığından ve tasarımda taşıyıcı olarak kabul edilmediğinden denetimden oldukça uzak inşa edilmektedir. Bu durum tuğla dolgu duvarı oluşturan malzeme (tuğla, sıva, harç) özelliklerinin oldukça değişken ve standart sapmasının yüksek olmasına neden olmaktadır. Zaten homojen ve izotropik özellik göstermeyen kompozitin, bir de yük altında doğrusal olmayan davranış göstermesi, malzeme özelliklerinden özellikle elastisite modülünün tespitini oldukça zorlaştırmaktadır. Bununla beraber her dolgu duvarın yapımı, duvarcı ustanın inisiyatifine bırakıldığı için aynı duvarın farklı bölümlerinde bile malzeme özelliklerinin kuvvetle muhtemel değişik çıkmasına sebebiyet verilmektedir. Zaten davranışı oldukça karmaşık olan sisteme birde malzeme özelliklerindeki belirsizliklerin eklenmesi, analitik yaklaşımların ve modellemelerin gerçeği yansıtmadaki yeteneğinin oldukça sınırlı kalmasına neden olabilmektedir.

Bu durum göz önünde bulundurularak bu çalışmadaki deneysel sonuçlar, analitik yaklaşımlar kullanılarak analiz edilmeye çalışılmış ve uygulamacı için pratik hesap önerileri sunulmaya çalışılmıştır. Sunulan önerilerde her ne kadar güvenli yönde yaklaşımlar oluşturulmaya çalışılmışsa da, bunların sınırlı sayıdaki deneyden elde edilen sonuçlar doğrultusunda ön görüldüğü unutulmamalıdır.

Çalışmada delikli levhalarla güçlendirilmiş eleman dayanımları için önerilen analitik hesabın, deney sonuçlarına oldukça yakınsayabildiği gözlenmiştir. Deneysel sonuçlara yakınsama, güvenli tarafta kalacak şekilde olup en fazla % 12, ortalama ise %3 sapmayla gerçekleşmiştir. Delikli

levhalarla güçlendirilmiş dolgu duvarların rijitlik hesabı için önerilen eşitliğin güvenle kullanılabilmesi düşünülmüştür. Bu eşitlik, güçlendirilmiş dolgu duvarlar için Deprem Yönetmeliğinde güvenlik sınırı olan %0,35 ötelenme oranında bile güvenli yönde sonuç verebilmektedir. Güçlendirilmiş duvarların deneylerde şaşırtıcı ölçüde sünek davranması, duvardaki görelî kat ötelenme oranı için bir sınır koyma gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Buna rağmen izin verilen en yüksek ötelenme değerinin (deformasyon limiti) güvenle %7,5 alınabileceği kanaatine varılmıştır.

Delikli levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarın modellemesinde eş değer basınç çubuğu kullanılmalı ve bu çubuk betonarme çerçevenin içine köşegen boyunca iki ucu mafsallı şekilde yerleştirilmelidir. Eş değer basınç çubuğunun elasto-plastik davranış gösterecek şekilde tanımlanması gerçek davranışın yansıtılabilmesi açısından daha uygun ve pratik olmaktadır. Delikli dolgu tuğlalarının, her üç eksenî doğrultusundaki dayanımlarının birbirinden oldukça farklı olduğu bilinciyle modelleme yapılmalıdır. Bu nedenle tuğlaların sadece delikleri doğrultusundaki dayanımı değil deliklere dik doğrultusundaki dayanımı da bilinmelidir. Tuğlaların dayanım değerleri deneysel olarak saptanmalı ve betonarme çerçeve içine yerleştirildikleri doğrultu oldukça iyi tespit edilmelidir. Özellikle köşe bölgeler incelenmeli eğer ikiye kırılmış yarım tuğla içeriyorsa dayanım değerlendirmesinde bu çalışmadaki yaklaşım kullanılmalıdır. Eğer dolgu tuğlasında dayanım değerleri deneysel olarak tespit edilemiyorsa üretici firma kataloglarından bu değerler alınabilir. Ancak bu kataloglarda tuğlaların genelde sadece delikleri doğrultusundaki dayanımı verilmektedir. Deliklere dik doğrultudaki dayanım için ise, FEMA-306 da ki yaklaşımla bu değerlerin yarısının güvenle kullanılabilmesi görülmüştür.

Delikli çelik levhalarla güçlendirilen tuğla dolgu duvarın, yapı davranışına olumlu katkı sağlayabilmesi için dışımda bulunan betonarme çerçevenin kolonlarında yeterli kesme güvenliğinin bulunması gerekmektedir. Eğer yeterli kesme güvenliği yoksa bu çalışmada kullanılan yöntemle veya geçerliliğini kanıtlamış başka bir yöntemle kolonların kesme kapasitesi de mutlaka artırılmalıdır. Etkin bir kompozit davranış için kolon uçlarında sürtünme kesmesi kontrolü de yapılmalıdır. Bu durumda duvardan aktarılan maksimum kesme kuvveti çalışmada önerilen yaklaşımla hesaplanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırma 113M437 kodlu, TÜBİTAK 1001 projesinin desteği ile yapılmıştır. Ülkemizin bilime destek veren saygın kurumu TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Al-Chaar G., Issa M., Sweeney S., Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames, J. Struct. Eng., 128 (8),1055-1063, 2002.

2. Mehrabi A.B., Shing P.B., Schuller M.P., Noland J.L., Experimental evaluation of masonry infilled RC frames, J. Struct. Eng., 122 (3), 228-237, 1996.
3. Hashemi A., Mosalam K.M., Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 35 (14), 1827-1852, 2006.
4. Kurt E., Binici B., Kurc O., Canbay E., Akpınar U., Ozcebe G., Seismic performance of a reinforced concrete test frame with infill walls, Earthquake Spectra., 27 (3), 817-834, 2011.
5. Stafford-Smith B.S., Behavior of square infilled frames, J. Struct. Div., ASCE, 92 (1), 381-403, 1966.
6. FEMA 273, Nehr p guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency, ABD, 1997.
7. Asteris, P.G., Kakaletsis D.J., Chrysostomou C.Z., Smyrou E.E., Failure modes of in-filled frames, Electronic Journal of Structural Engineering, 11 (1), 11-20, 2011.
8. Halidar P., Singh Y., Paul D.K., Identification of seismic failure modes of URM infilled RC frame buildings. Eng. Fail. Anal., 33, 97-118, 2013.
9. Özbek E., Delikli çelik levhalarla güçlendirilmiş tuğla duvarların çerçeve davranışları üzerindeki etkisi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
10. Yuksel E., Ozkaynak H., Buyukozturk O., Yalcin C., Dindar A.A., Surmeli M., Tastan D., Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames. Constr. Build. Mater., 24 (4), 596-609, 2010
11. Ozkaynak H., Yuksel E., Buyukozturk O., Yalcin C., Dindar A.A., Quasi-static and pseudo-dynamic testing of infilled RC frames retrofitted with CFRP material. Composites Part B, 42 (2), 238-263, 2011.
12. Erol G., Karadogan H.F., Seismic strengthening of infilled reinforced concrete frames by CFRP, Composites Part B, 91, 473-491, 2016.
13. Coza H., Strengthening of infilled RC frames with carbon fiber composites. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
14. Altin S., Anil Ö., Kara M.E., Kaya M., An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips, Composites Part B, 39 (4), 680-693, 2008.
15. Akın E., Strengthening of brick infilled RC frames with CFRP reinforcement-general principles. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
16. Binici B., Ozcebe G., Ozcelik R., Analysis and design of FRP composites for seismic retrofit of infill walls in reinforced concrete frames Composites Part B, 38 (5-6), 575-583, 2007.
17. Erdem I., Akyuz U., Ersoy U., Ozcebe G., An experimental study on two different strengthening techniques for RC frame, Eng. Struct., 28 (13),1843-1851, 2006.

18. Kakaletsis, D., Comparison of CFRP and alternative seismic retrofitting techniques for bare and infilled RC frames. *J. Compos. Constr.*, 15 (4), 565-577, 2010.
19. Tateishi Y., Jinno Y., Kimoto Y., Hattori A., Seismic behavior of reinforced concrete frame with new CFRP units infilled wall, *Proceedings of improving the seismic performance of existing buildings and other structures*, 1105-1116, 2009.
20. Lunn D., Rizkalla S., Strengthening of infill masonry walls with FRP materials, *ASCE J. Compos. Constr.*, 15, 206-214, 2011.
21. Shrive N.G., The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry. *Constr. Build. Mater.*, 20 (4), 269-277, 2006.
22. Almusallam T.H., Al-Salloum Y.A., Behavior of FRP strengthened infilled walls under in-plane seismic loading, *ASCE J. Compos. Constr.*, 11 (3), 308-318, 2007.
23. Papanicolaou C., Triantafillou T., Lekka M., Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2), 504-514, 2011.
24. Valluzzi M.R., Tinazzi D., Modena C., Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Constr. Build. Mater.*, 16 (7), 409-416, 2002.
25. Aref A.J., Jung W.Y., Energy-dissipating polymer matrix composite-infill wall system for seismic retrofitting, *J. Struct. Eng.*, 129 (4), 440-448, 2003.
26. Koutromanos I., Kyriakides M., Stavridis A., Billington S., et al, Shake-table tests of a 3-story masonry-infilled RC frame retrofitted with composite materials, *J. Struct. Eng.*, 139 (8), 1340-1351, 2013.
27. Kyriakides M., Billington S., Cyclic response of nonductile reinforced concrete frames with unreinforced masonry infills retrofitted with engineered cementitious composites, *J. Struct. Eng.*, 140 (2), 1-14, 2014.
28. Baran M., Tankut T., Experimental study on seismic strengthening of reinforced concrete frames by precast concrete panels. *ACI Struct. J.*, 108 (2), 227-237, 2011.
29. Baran M., Canbay E., Tankut T., Beton Panellerle Güçlendirme – Kuramsal Yaklaşım, *Teknik Dergi*, 21 (1), 4959-4978, 2010.
30. Frosch R.J., Li W., Jirsa J.O., Kreger M.E., Retrofit of non-ductile moment-resisting frames using precast infill wall panels, *Earthq. Spectra*, 12 (4), 741-760, 1996.
31. Kesner K., Billington S., Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit, *J. Struct. Eng.*, 131 (11), 1712-1720, 2005.
32. Baran M., Aktaş M., Aykaç S., Strengthening of plastered hollow brick infill walls using strip concrete/reinforced concrete panels, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (1), 23-33, 2014.
33. Özbek E., Can H., Strengthening of infill brick walls using steel profiles, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (4), 921-929, 2012.
34. Belgin Ç., Altın S., Anıl Ö., Koprman Y., Strengthening masonry infill walls with reinforced plaster, *Proc ICE - Struct Build.*, 163 (5), 331-342, 2010.
35. Taghdi M., Bruneau M., Saatcioglu M. Seismic retrofitting of low-rise masonry and concrete walls using steel strips. *J. Struct. Eng.*, 126 (9), 1017-1025, 2000.
36. Choi I-R., Park H-G., Cyclic loading test for reinforced concrete frame with thin steel infill plate, *J. Struct. Eng.*, 137 (6), 654-664, 2011.
37. Sevil T, Baran M, Bilir T, Canbay E., Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening, *Constr. Build. Mater.*, 25 (2), 892-899, 2011.
38. Baloević G., Radnić J., Grgić N., Matešan D., The application of a reinforced plaster mortar for seismic strengthening of masonry structures, *Composites Part B*, 93, 190-202, 2016.
39. Koutas L., Bousias S.N., Triantafillou T.C., Seismic strengthening of masonry-infilled RC frames with TRM: experimental study, *J. Compos. Constr.*, 19 (2), 401-408 (1-12), 2015.
40. Aykaç S., Kalkan İ., Seydanlioglu M., Strengthening of hollow brick infill walls with perforated steel plates. *Earthquakes and Structures*, 6 (2), 181-199, 2014.
41. Aykaç B., Özbek E., Babayani R., Baran M., Aykaç S., Seismic strengthening of infill walls with perforated steel plates, *Eng. Struct.*, 152, 168-179, 2017.
42. TS EN 771-1, Kâgir birimler - özellikler bölüm 1: kil kâgir birimler (tuğlalar), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2005.
43. FEMA 306, Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings, *Federal Emergency Management Agency*, ABD, 1998.
44. ACI 440.2R-08, Guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures, *American Concrete Institute*, Michigan, ABD, 2008.
45. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, Ankara, 2007.

