



Betonarme perde duvarların farklı yapı malzemeleri açısından değerlendirilmesi

Evaluation of RC shear walls in terms of different construction materials

Abdulkadir Cüneyt Aydın^{1,*} , Barış Bayrak¹ 

¹ Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25030, Erzurum Türkiye

Özet

Perde duvarlar yüksek yanallı rijitliklerinden dolayı deprem, rüzgâr gibi yatay kuvvetlerini karşılamada en çok tercih edilen yapı elemanlarıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte hem yapı malzemelerindeki hem de deney düzeneklerindeki gelişmeler ışığında perde duvarların farklı yöntemlerle incelenmesine olanak sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında uzun yıllar boyunca betonarme perde duvarlar için genel kabul görmüş parametreler yerine yenilikçi malzemeler ve deney koşulları bakımından ele alınmıştır. Betonarme perde duvarlar gerek lifli beton, hafif veya yüksek dayanımlı beton, FRP donatılar gibi malzemeler gerekse de donma-çözülme, korozyon, güçlendirme gibi amaçlarla irdelenmiştir. Yüksek katlı binalarda kullanımı neredeyse zorunlu hale gelen betonarme perde duvarların önümüzdeki yıllar içerisinde geleneksel çelik donatı düzeninin yerine daha yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip donatılara, geleneksel betonun yerine geleneksel betonun zayıflıklarının giderileceği özel çimento esaslı kompozitlerle üretileceği aşikârdır. Bununla birlikte tipik beton ve donatılı perde duvarlar yerine kompozit malzemelere kayacağı da beklenilmektedir. Çalışma kapsamında betonarme perde duvarların yapı malzemeleri perspektifinde davranışları ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Perde duvar, Beton, Betonarme, Tasarım

Abstract

Shear walls are the most preferred structural elements to resist the horizontal loads due to high lateral stiffness. With the advancing technology, it has allowed the shear walls to be examined with different methods in the light of developments in both building materials and experimental setups. RC shear walls have been examined in terms of both the materials such as fiber concrete, lightweight concrete, high-strength concrete, fiber-reinforced polymer (FRP) bars, freeze-thaw resistance, corrosion resistance, and strengthening. It is expected that RC shear walls will be produced with reinforcements with higher mechanical and durability characteristics in the coming years, instead of the conventional steel reinforcement arrangement. It is obvious that instead of conventional concrete, it will be produced with special type cement-based composites, where the weaknesses of conventional concrete will be eliminated. The paper presents the behavior of RC shear walls within the constructional materials perspective.

Keywords: Shear wall, Concrete, Reinforced concrete, Design

1 Giriş

Dünya genelinde son altmış yıl içerisinde yapısal hasarlara sebep olan doğal afetlerin yarından fazlasına depremlerin neden olduğu görülmektedir. Depremleri heyelanlar, seller, toprak kaymaları, yangınlar ve çığ afetleri takip etmektedir. Yerkabuğu içerisindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamı ve yeryüzünü sarsma olayına deprem denir. Depremler yer kabuğundaki ani şekil değiştirme enerjisinin açığa çıkmasının ardından plakaların bir biri üzerinde kayması ile meydana gelen doğal afetlerdir. Dünyadaki en yoğun deprem kuşakları; yeryüzündeki depremlerin %81'inin olduğu Pasifik Deprem Kuşağı, %17'sinin olduğu Alp-Himalaya Deprem Kuşağı'dır. Türkiye de Alp-Himalaya Deprem Kuşağında yer alan bir ülke olduğu için dünya genelinde depremselliği yüksek olan ülkelerden birisidir [1]. Dünya üzerinde yaşanan depremler üç ana kuşak üzerinde meydana gelmektedir (Şekil 1).

1. Pasifik Deprem Kuşağı: Şili'nin kuzeye doğru Güney Amerika kıyıları, Orta Amerika, Meksika, ABD'nin batı kıyıları ve Alaska'nın güneyinden Aleut Adaları, Japonya, Filipinler, Güney Pasifik Adalarını ve Yeni Zelanda'yı kapsayan ve dünya üzerindeki depremlerin yaklaşık %81'inin meydana geldiği deprem kuşağıdır.
2. Alp-Himalaya Deprem Kuşağı: İspanya'dan başlayıp, Fas, Cezayir, Tunus, Fransa, İtalya, Yunanistan, Türkiye,

İran, Azerbaycan, Afganistan, Pakistan' ı içine alarak Hindistan' a kadar uzanan deprem kuşağıdır.

3. Atlantik Deprem Kuşağı: Atlantik Okyanusu boyunca uzanan deprem kuşağıdır.

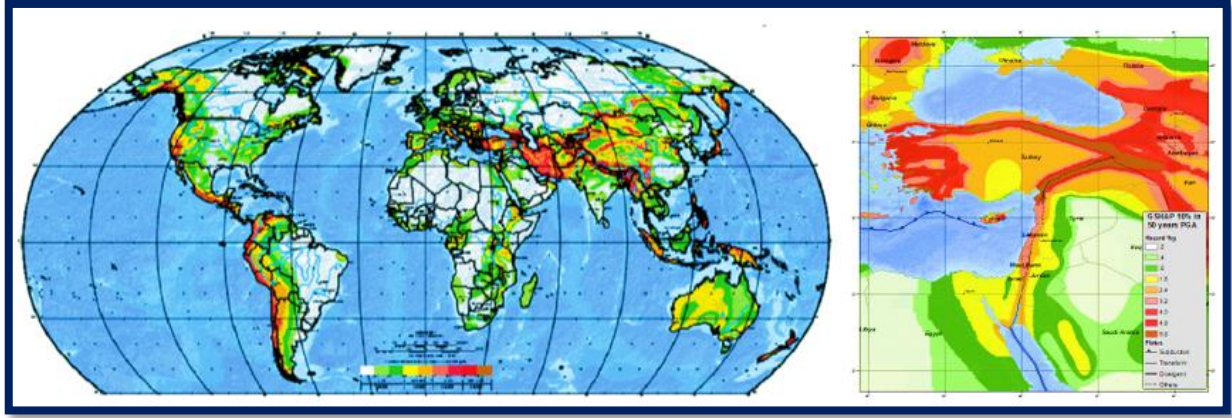
Şekil 1'den de görüldüğü gibi gerek dünya genelinde gerekse de ülkemizde deprem kaçınılmaz bir gerçektir. Ülkemizin %66'sı, nüfusun %70'i ve sanayi tesislerinin %75'i deprem riskinin fazla olduğu bölgelerinde yer almaktadır. Son yüz yılda yaşanan depremlerde yaklaşık 100000 kişi hayatını kaybetmiş, 170000 kişi yaralanmış ve 700000 konut ağır hasara uğramıştır. Ülkemizin deprem bölgesi haritası incelendiği zaman, nüfusumuzun %95'nin deprem riski olan bölgelerde yaşadığı, büyük sanayi tesislerinin %98'i ve barajların %93' ünün deprem riski olan bölgelere bulunduğu görülmektedir [1,2]. Bu bilgiler ışığında yüksek deprem riski altındaki hem ülkemizde hem de dünya genelinde yapılacak binaların depreme karşı dayanıklı olarak tasarlanması bir zorunluluktur. Fakat bütün yapının deprem sonucunda hiçbir hasar görmeden atlatması ekonomik bir çözüm olmayacaktır.

Bu amaçla tasarlanan binaların, hafif şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir olması ve şiddetli depremlerde ise can

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: acaydin@atauni.edu.tr (A. C. Aydın)

Geliş / Recieved: 11.08.2020 Kabul / Accepted: 16.09.2020 Yayımlanma / Published: 15.01.2021

doi: 10.28948/ngumuh.751562



Şekil 1. Dünya ve Türkiye deprem kuşağı haritaları

güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlandırılması amaçlanmalıdır.

Diğer bir husus da yıllar içerisinde gelişen teknoloji, iş imkânları, sosyal-ekonomik sebepler, kırsal alt yapı yetersizliği vb. sebeplerden dolayı nüfusun büyük bölümü kırsal alanlardan şehirlere göç etmiştir. Günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık %55'i şehirlerde yaşamaktadır. Hatta Birleşmiş Milletler Ekonomik ve Sosyal İşler Dairesi raporuna göre bu oranın 2050 yılına kadar %68'e kadar çıkması ön görülmektedir. Şehirlerde yoğunlaşan bu nüfusun barınma ihtiyacını giderebilmek için yüksek katlı binalara duyulan ilgi ve ihtiyaç giderek artmıştır. Bu ilgi ve ihtiyaç beraberinde yüksek katlı binaları ülkelerin simgesi ve gelişmişlik düzeyini gösteren birer faktör haline getirmiştir. Fakat bu durum beraberinde daha narin yapı elemanlarının tasarlanmasına ve bu narin yapı elemanlarına etki edecek yatay kuvvetlere karşı (özellikle deprem ve rüzgâr kuvvetler) oldukça dikkat edilmesine sebep olmuştur. Ayrıca betonarme yapılar servis ömürleri boyunca kendi ağırlıkları, deprem, rüzgâr, sabit yükler, hareketli yükler, sünme, rötre, toprak itkisi vb. iç ve dış yük etkilerine maruz kalırlar. Yapıya etki eden bu yüklerden özellikle yatay kuvvet oluşturan deprem, rüzgâr ve yanal toprak itkisinin karşılanabilmesi için yanal rijitliği fazla olan geometri yapı elemanlarına ihtiyaç vardır. Yatay yükler etkisindeki kolonlarda fazla eğilme momentinden kaynaklanan özellikle üst kat kolonlarında ikinci mertebe momentleri artmaktadır. Dolayısıyla bina üst katlarına doğru yatay yer değiştirmeler yüksek mertebelerde olabilmektedir. İkinci mertebe momentlere sebep olan bu yatay yer değiştirmelerinin sınırlandırılması gerekmektedir. Bundan dolayı kolonlara nazaran yatay rijitlikleri çok daha fazla olan perde duvarlar tercih edilmelidir [3]. Yani perde duvar kavramı karşımıza çıkmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY) [4] perde duvar tanımı "plandaki uzun kenarının kalınlığa oranı en az 6 olan düşey taşıyıcı elemanlar" olarak tanımlanır. Bu oran bazı yönetmeliklerde [5] 4 olarak karşımıza çıkabilmektedir. Hatta yaklaşık 1 yıl öncesine kadar bu oran TBDY gereği 7 olarak belirlenmesine rağmen yenilenen yönetmelik gereği 6'ya düşürülmüştür.

Deprem riski fazla bölgelerdeki orta ve yüksek katlı binalarda kullanılan perde duvarlar yapı malzemelerindeki

gelişmeler neticesinde çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Gerek akademik çalışmalarda gerekse de uygulamada en genel hali ile çelik ve betonarme perde duvarlar mevcuttur. Kesin çizgilerle ayrılmamasına rağmen; T, L ve U dikdörtgen kesitli, dolu gövdeli, boşluklu, bağ kirişli, kompozit (iki veya daha fazla farklı malzemenin birlikte kullanılması) perde duvar sınıfları karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında özellikle yapı malzemesi perspektifinde betonarme perde duvar davranışı üzerinde durulmuştur.

2 Betonarme perde duvar davranışı

Betonarme perde duvarlar sistemlerin elastik enerji tüketme kapasitesi, çerçevesi sistemlerden yüksek olmasına rağmen elastik ötesi enerji tüketme kapasitesi çerçevesi sistemlere göre daha fazladır. Dolayısıyla çerçevesi sistemler sadece perde duvarlardan oluşan sistemlere nazaran daha sünerek davranmaktadır. Etkin deprem kuşağında bulunan ülkemizde deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde hastane, itfaiye binası, yurt, okul ve müze gibi binaların perde duvarlı yapılması yapı güvenliği ve insan sağlığı için oldukça önem arz etmektedir. Hatta orta düzey deprem riskinin olduğu bölgelerde de perde duvarların kullanılması oldukça önemlidir [6].

Betonun düşük çekme dayanımından dolayı yüksek katlı binalarda çatlaklar kaçınılmaz bir olaydır. Aynı zamanda yapıya etki eden yükler, yapının deformasyonu, sünme, rötre, sıcaklık, temeldeki oturmalar gibi betonarme bir yapının çatlak oluşmasında doğrudan etkili birçok faktör vardır. Betonarmenin avantajlarından dolayı özellikle yüksek yapılarda yanal yükleri karşılaması için kullanılan perde duvarların rijitlik karakteristikleri de önemlidir. Perde duvarın rijitliğini etkileyebilecek birçok faktör vardır. Fakat bunlardan en önemlileri; betonun kesme ve elastisite modülü, atalet momenti, etkili kesme alanı, perde duvar yükseklik/uzunluk (H/L) oranı, çatlakların varlığı ve yeri, yükleme tipi, donatı oranı ve düzeni parametreleridir. Bahsedilen parametrelerin çokluğundan dolayı betonarme bir perde duvarın rijitliğini ön görmek oldukça zordur. Hatta bu konuda Amerika Beton Enstitüsü (American Concrete Institute (ACI)) şartnamesinde de kesin bir formül kullanılmamakla beraber deneysel sonuçlara dayanan formüller önerilmektedir [7].

2.1 Perde duvar dayanımını etkileyen faktörler

Betonarme perde duvarların davranışını anlamak için perde duvar davranışını etkileyen parametrelerin tanımlanıp yorumlanması gerekmektedir. Ayrıca bu parametrelerin perde duvar göçme modu ve dayanımı üzerindeki etkilerinin de anlaşılması gerekmektedir.

2.1.1 Perde duvar yükseklik/uzunluk oranı

Betonarme perde duvarların davranışını etkileyen en önemli parametrelerden birisi perde duvarın yüksekliğinin plandaki uzunluğuna oranıdır (H/L). Orta veya yüksek binalarda uzun perde duvarlar tipik mafsallı kolon-kiriş gibi davranırlar. Bu tarz perde duvarlarda eğilme momenti hâkim olduğundan dolayı düktiliteyi sağlamak nispeten kolaydır. Fakat kısa binalarda, kısa perde duvarlar kullanılacağı için düşük H/L oranı olacaktır. Yüksekliğin az olmasından dolayı yüksek orandaki kesme kuvveti perde duvar alt bölümlerinde (plastik mafsallı bölgesi diyebiliriz) büyük değerlerde eğilme momentine neden olacaktır. Bu yüzden kısa perde duvarların davranışında kesme kuvveti daha belirleyici olmakla birlikte gerekli enerji sönümlenme kapasitesini elde etmek daha zor bir problem haline gelecektir. Düşük H/L oranıyla ilişkili olan bu yüksek kesme kuvvetleri diyagonal çekmeye, basınca veya kayma gerilmelerine sebep olacaktır. Böylece kısa perde duvarlarda görülebilecek kesme göçme modunun gevrek kırılma şeklinde olacaktır. Dolayısıyla perde duvarın enerji sönümlemesi için gerekli olacak inelastik deformasyon azalacak ve bu da gevrek kırılmaya sebep olacaktır.

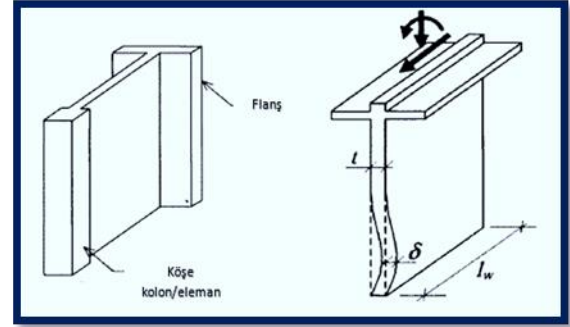
Perde duvarlar için H/L oranının yanı sıra M perde tabanındaki eğilme momentini, V kesme kuvvetini, L perde boyunu göstermek üzere $M/(VL)$ parametresi perde duvar davranışı için önemli bir parametredir. Eğer $M/(VL) \leq 1$ ise perde duvar kısa perde duvar olarak nitelendirilebilir. Bu tarz perde duvarlarda kesme göçmesi görülmektedir. Eğer $1 \leq M/(VL) \leq 2$ arasında ise bu tarz perde duvarlarda eğilme ile kesme göçmesinin beraber görülmekte ve orta yükseklikte perde duvar (intermediate shear wall) olarak değerlendirilebilir. $M/(VL) > 2$ olduğu perde duvarlar konsol perde duvar olarak adlandırılır ve bu tarz perde duvarlar da eğilme göçmesi görülmektedir.

Yanal yüklerin karşılanmasında etkili olan perde duvarlar ya düktil bir davranış ya da rijit bir davranış sergilerler. Düktil perde duvarlarda eğilme momenti hâkim iken rijit perde duvarlarda kesme yükleri hâkim olmaktadır. Orta veya alçak yükseklikteki binalarda hem etkinliğinden hem de ekonomik olmasından dolayı rijit davranış sergileyen perde duvar kullanımı uygundur. Rijit perde duvarlarda yükseklik/uzunluk oranı 2'den küçük olan kısa perde duvarlar olarak tanımlanabilir. Bu tür perde duvarlarda göçme modu üzerinde kesme kuvvetleri hâkim olmaktadır [8].

2.1.2 Perde duvar köşe kolon/eleman

Betonarme perde duvarlardaki bu köşe elemanlar, perde duvar bir/iki köşesinde gerekli durumlarda perde duvar gövde bölgesinden farklı şekilde donatılanırlan elemanlardır (Şekil 2). Perde duvarlara saplanan kirişlerin daha etkili bir şekilde ankastrelenmesine olanak

sağlamaktadırlar. Ayrıca bu köşe elemanlar eğilme donatılarının burkulmasını önleyerek ve potansiyel plastik mafsallı bölgesindeki basınç altındaki betonun daha etkili bir şekilde sargılanmasını sağlar. Köşe elemanlar başlıklı bir şekilde veya yoğun donatılı şekilde oluşturulabilirler. Perde duvarlarda sıkça kullanılan köşe elemanlar yoğun donatılı olmaktadır. Böylece plastik mafsallı bölgesinde betondaki basınç şekil değiştirmelerini ve donatıdaki akmayı engelleyerek daha düktil bir davranış elde edilmesine olanak sağlar.



Şekil 1. Perde duvar köşe elemanı

2.1.3 Betonun elastisite ve kesme modülü, atalet momenti ve etkili kesme alanı

Betonun kesme ve elastisite modülü malzeme açısından iki etkili parametre olmasının yanı sıra atalet momenti ve etkili kesme alanı da geometrik olarak etkili iki parametredir. Bu dört parametre yanal yük etkisinde bir betonarme perde duvarın rijitliğini hesaplama da kullanılabilir. Ayrıca elastisite modülü ve atalet momenti eğilme rijitliğini hesaplamak için kesme modülü ve kesme alanı kesme rijitliğini hesaplamada kullanılır.

2.1.4 Çatlakların varlığı ve yeri

Genel olarak bakıldığında zaman çatlakların hemen hemen hepsi perde duvarların rijitliğini ve dayanımını azaltır. Bu azalma oranı da çatlakların boyu, genişliği, türü ve yerine bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanı sıra agrega boyutuna, perde duvar geometrisine ve etki eden yanal kuvvetin büyüklüğüne de bağlıdır.

Bilindiği üzere betonun düşük çekme dayanımından dolayı eğilmenin hâkim olduğu bir perde duvarda eğilme çatlaklarından dolayı perde duvarın eğilme dayanımı azalmaktadır. Bununla birlikte kesme kuvveti ve eğilme momentinin birlikte etki etmesi durumunda yine betonun düşük çekme dayanımından dolayı eğilme ve kesme çatlakları oluşacaktır. Sadece kesme kuvvetinin etki etmesi durumuna bakıldığında ise, betonun homojen bir malzeme olmasından dolayı perde duvarın kesme dayanımı oldukça karmaşık bir durumdur. Birçok sebepten dolayı betonarme yapılarda kesme göçmesi betonun kesme dayanımının çekme dayanımından daha büyük olduğu için diyagonal çekme çatlaklarından kaynaklanmaktadır. Rötire ve sıcaklığın etkisi ile oluşan makro ve mikro çatlaklardan dolayı perde duvarların rijitlik ve dayanımı betonun malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur.

Perde duvarlarda çatlaklar oluştuğundan sonra bu çatlakların ara yüzeylerinde basınç veya çekme olup olmadığına bakılmaksızın perde duvar kesme dayanımının oranı agregaların mekanik kenetlenmesine bağlıdır. Bu mekanik kenetlenmeden dolayı kesme dayanımı agreganın boyutu ve yüzey pürüzlülüğüne de bağlıdır. Bunun yanı sıra çatlak genişliği de kesme dayanımı için önemli bir parametredir. Böylece küçük agrega boyutu ile üretilen betondaki eğilme, eğilme ile kesme ve hatta mikro çatlaklar büyük agrega boyutu ile üretilen betonlardan daha düşük kesme dayanımına sahip olduğu da unutulmamalıdır.

2.1.5 Bağlantı noktalar

Betonarme perde duvarlarda yatay yapı bağlantıları dayanım zincirinin en zayıf halkası olabilir. Literatürdeki çalışmalar, kayma gerilmelerinin sebep olduğu göçme perde duvarın bir unsurudur. Özellikle zayıf yapı bağlantı noktalarından dolayı büyük miktarda kesme gerilmeleri çatlaklara sebep olabilir. Ayrıca bağlantı noktaları eksenel çekme, basınç veya kesme kuvvetinden kaynaklanan eğilme momentlerine maruz kalır. Perde duvarın dayanımı ve enerji sönümlemesi üzerinde rol oynar. Bu yüzden bu bağlantı noktalarının etkinliği yeterli donatının sağlanmasıyla ilişkilidir.

2.1.6 Yükleme tipi

Perde duvarlara etki eden yanal yük kesme gerilmelerine neden olur. Bu kesme gerilmeleri de perde duvar kesiti boyunca üniform olarak dağılır. Perde duvarlardaki düşey yükler ise ölü ve/veya hareketli yüklerden oluşur. Düşey yüklerin sebep olduğu çekme veya basınç kuvvetleri eğilme momentine neden olabilir. Eğilme, kesme ve eksenel yükler perde duvarların dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir.

Betonarme perde duvarlardaki hasar genellikle betonun zayıf özelliklerine, yetersiz donatıya ve yüksek oranda eksenel yük seviyesine ve az da olsa perde kalınlığına bağlıdır. Eksenel yük seviyesi çatlak dağılımı, göçme modu ve duvarın düktilitesini etkiler [9].

2.1.7 Yatay ve düşey donatı

Perde duvardaki düşey donatı oranı ve dağılımı perde duvarların nihai dayanımı ve rijitliğinin azalmasına neden olan çatlak dağılımı ve yayılması üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yatay donatılar ise perde duvar kesme dayanımı üzerinde etkiye sahiptir.

Yatay donatıların H/L oranı özellikle 0.5 ve daha az olduğu betonarme perde duvarlarda perdenin dayanımına katkısının olmamasına rağmen ilgili yönetmeliklerde minimum yatay donatı bulundurulması şart koşulmuştur. Bunun yanı sıra perde duvarlardaki yatay ve düşey donatılar çatlak genişliğini azaltmada ve çatlak dağılımını engellemede rol oynarlar. Yatay donatı miktarının artması hem düktiliteyi hem de dayanımı arttırmaktadır.

2.1.8 Perde duvar temeli

Betonarme perde duvarların en kritik bölgesinden bir tanesi de temeldir. Temel devrilme momentine karşı koyabilmelidir. Yanal yüklerin neden olduğu devrilme momenti ve kayma gerilmelerini karşılayabilecek şekilde ankastrelenmelidir.

2.2 Perde duvar davranışı

Perde duvar davranışı kolon, kiriş ve yüksek kirişlerin davranışından farklıdır. Bu farklılık perde duvarların geometrisinden, sınır elemanlardan ve yüklemekten kaynaklanmaktadır. Perde duvarlar kolonlara göre daha narin elemanlar olmakla birlikte, kiriş ve yüksek kirişlere göre de farklı yüklemelere maruz kalabilirler.

Perde duvarlarda literatüre bakıldığı zaman genellikle dört tür kırılma şekli karşımıza çıkmaktadır. Diyagonal çekme göçmesi; beton yüzeyinde eğimli çatlaklar oluşur. Fakat beton yüzeyinde dökülme veya donatıda akmanın meydana gelmediği gevrek bir kırılma türüdür. Diyagonal basınç göçmesi; beton yüzeyinde dökülmeler gözlemlenir ve aynı zamanda bazı donatılarda akma meydana gelir. Bu tarz göçme şekli düşük dayanımlı beton kullanıldığında veya donatı oranının fazla olduğu durumlarda ortaya çıkar. Ani ve hızlı bir göçme şeklidir. Diyagonal basınç ve çekmenin birlikte görülmesi; donatıların çoğunda akmanın meydana gelmesi ve betonda ezilmenin oluşması durumudur. Diyagonal çekme ve basınç gerilmeleri birlikte etki eder. Perde duvar dönmesi; perde tabanında görülen dönme şeklinde oluşan göçme şeklidir.

2.2.1 Eğilme davranışı

Eksenel yük ve eğilme momentine maruz kalan bir perde duvar Şekil 3' de görülmektedir. Perde duvarlar donatılandırılırken donatı dağılımı kolayca öngörülemediği için, perde duvarların eğilme dayanımının hesaplanması kolon ve kirişlere göre daha zahmetlidir. Bu yüzden perde duvarların eğilme dayanımı bir bilgisayar programıyla veya ilgili çizelgelerle hesaplanabilir.

Eğilme donatısının akıp akmaması histerik davranış için güzel bir kaynak olabilir. Yüksek perde duvarlarda donatıdaki akma perde tabanındaki plastik mafsallarda sınırlı olabilir. Bu bölgede betonun gevrek bir malzeme olmasından dolayı enerji sönümlemeye katkısı çok az olacaktır. Yeterli düktiliteyi sağlamak için plastik mafsallarda bölgedeki iç kuvvetler donatı ile sağlanmaktadır.

2.2.2 Kesme davranışı

Betonarme perde duvarların kesme dayanımı devrilme momentinden kaynaklanan eksenel çekme kuvvetinin etkisiyle oldukça önemlidir. Perde duvardaki bu gerilmeler karşılanmazsa, perde düşey eksenine ile 45 derece açı yapacak şekilde diyagonal çatlaklar oluşabilir. Donatıdaki akma meydana gelmeden önce perdede diyagonal basınç göçmesi olmaması için bu kesme gerilmeleri mutlaka kontrol altına alınmalıdır. Perde duvarların kesme dayanımı (V_n), donatının kesme dayanımı (V_s) ve betonun kesme dayanımının toplamıdır.

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

Betonun kesme dayanımı

$$V_c = v_c b d \quad (2)$$

$$v_c = 0.27 \sqrt{f_c} + (N_u / 4A_g) \quad (3)$$

Burada V_c beton kesme gerilmesi, b eleman genişliği ve d anlamlı yüksekliği, f_c beton basınç dayanımını, N_u eksenel yükü ve A_g kesit alanını temsil etmektedir.

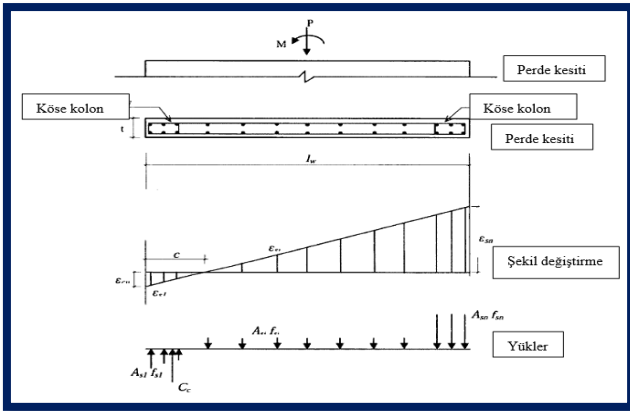
Donatının kesme dayanımı

$$V_s = A_s f_y \left(\frac{d}{s} \right) \quad (4)$$

burada A_s donatı alanını, f_y donatı akma dayanımını, s iki donatı arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Eğilme çatlakları ve diyagonal çatlaklar düşey donatının da akması ile artan diyagonal çatlak genişliği ile birleşir. Daha sonra bu çatlaklar beton içerisinde veya agrega fazında ilerlemeye devam edecektir. Sonuç olarak yatay donatılardaki kesme gerilmeleri artarak perde duvar kesme dayanımına ulaştığında, perde tabanında plastik mafsallar oluşacaktır. Eksenel çekme ve eğilmenin birlikte etkimesi ile perde duvar eğilme donatılarında (düşey donatılar) akmanın artması ile daha yüksek deplasmanlar oluşacaktır. Dolayısıyla perde duvardaki kesmenin olumsuz etkisi kesme gerilmelerinin artması ile doğru orantı, eksenel basınç kuvveti ve perde duvar H/L oranı ile ters orantılıdır.

Giriş bölümü ve diğer bölümlerin ana metinleri, "Times New Roman" yazı tipi ve 10 punto ile hazırlanmalıdır. Paragraf başlarına 0.50 cm girinti bırakılarak başlanmalıdır. Paragraflar arasında satır aralığı veya paragraf boşluğu kullanılmamalıdır.

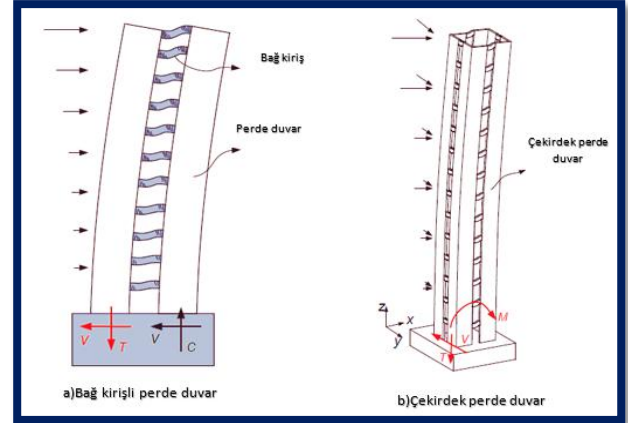


Şekil 3. Eğilme ve eksenel yük altında perde duvar

2.2.3 Çekme kuvveti

Betonarme perde duvarların özellikle yüksek katlı binalarda yanal yüklerin hemen hemen hepsini karşıladığı bilindik bir gerçektir. Dolayısıyla perde duvar kesme kuvveti, eğilme momenti ve az da olsa eksenel basınç kuvveti karşılamaktadırlar. Yukarıda bahsedilen kuvvetlerden başka perde duvarlar güçlü zemin hareketleri altında eksenel çekme kuvveti ve kesme kuvveti kombinasyonuna da maruz kalabilirler. 2010 yılındaki Şili depreminde çekme ve kesme kuvveti kombinasyonunun betonarme perde duvarların göçmesinde kritik bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Bu olaya örnek vermek gerekirse; yüksek bağ kiriş oranına sahip bağ kirişli bir perde duvarda perde parçalarından bir tanesi yanal yük nedeniyle çekme

kuvvetine maruz kalmaktadır (Şekil 4.a). Diğer bir örnek ise çekirdek perde duvarlar çift yönlü zemin hareketlerine maruz kaldıklarından perde duvar yan parçaları X doğrultusundaki yanal yükten dolayı yüksek oranda devrilme momenti ve bu devrilme momentinden kaynaklı çekme gerilmeleri oluşabilmektedir. Ayrıca Y doğrultusundaki yanal yükten dolayı da kesme kuvvetine maruz kalacaklardır (Şekil 4.b).



Şekil 4. Perde duvarlarda çekme kuvveti

Geçmiş yıllarda betonarme perde duvarlar üzerinde yapılan çalışmalar [10,11] göstermiştir ki, eksenel çekme kuvveti perde duvar dayanımını azaltmakta ve de yanal kuvvetler perde yüksekliği boyunca tekrar dağılmaktadır. Bundan dolayı yüksek katlı binalarda sismik dizayn yapılırken bağ kirişli perde duvarların çekme gerilmelerine maruz kalabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Perde duvara etki edecek eksenel çekme oranı (EÇÖ), eksenel basınç oranından (EBO=Eksenel basınç kuvveti/($f_c A_g$)) farklı olmaktadır. Eksenel basınç oranı sadece perde duvar kesit alanı ve beton basınç dayanımına bağlı tek bir formülle ifade edilirken, eksenel çekme oranı hem beton hem de donatı için ifade edilmektedir.

$$EÇÖ_{\text{beton}} = \frac{T_n}{\left(A_c + \frac{A_s E_s}{E_c} \right) f_t} \quad (5)$$

$$EÇÖ_{\text{donatı}} = \frac{T_n}{A_s f_y}$$

Burada T_n eksenel çekme kuvvetini, A_c ve A_s sırasıyla perde duvar beton kesit ve düşey donatı (köşe kolon düşey donatıları da dâhil) alanını, E_s ve E_c sırasıyla beton ve donatı elastisite modülünü, f_y ve f_t sırasıyla donatı akma ve beton çekme dayanımını göstermektedir.

Betonarme perde duvarlarda çekme kuvveti hesaplanırken çatlak oluşmadan önceki ve çatlak oluşuktan sonraki olmak üzere iki durum göz önünde bulundurulmalıdır. Birinci durumda çatlak oluşmadan önce çekme kuvveti hem beton hem de düşey donatı tarafından karşılanmaktadır. Yani perde duvar çekme kapasitesi ($T_{\text{çekme}}$) kritik çekme kuvveti (T_{cr}) değerinden küçüktür ($T_{\text{çekme}} < T_{\text{cr}}$). Bu durumda perde duvar çekme kapasitesi aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$T = (E_s A_s + E_c A_c) \varepsilon_{sm} \quad (6)$$

$$T_{cr} = \left(\frac{f_t}{E_c} - \varepsilon_{t,sh} \right) (E_s A_s + E_c A_c) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{t,sh} = \frac{\rho n}{1 + (n - 1) \rho} \varepsilon_{sh} \quad (8)$$

Burada E_s ve E_c sırasıyla çelik ve betonun elastisite modülünü, A_s düşey donatı kesit alanını, A_c perde duvar beton kesit alanını, ε_{sm} eksenel çekme kuvvetine karşılık gelen şekil değiştirmeyi, $\varepsilon_{t,sh}$ betondaki büzülmeden dolayı donatıda oluşan ve betonla donatı arasındaki şekil değiştirmeyi, ρ düşey donatı oranını, $n=E_s/E_c$, ε_{sh} 0.0004 ile 0.0008 arasında değişen katsayıyı göstermektedir.

İkinci durumda çatlak oluşuktan sonra perde duvarda çatlak oluşan ve oluşmayan bölgelere ayrılmaktadır. T_y düşey donatının akma noktasına karşılık gelen çekme kuvvetini göstermek üzere $T_{cr} < T < T_y$ durumudur. Çatlak oluşan bölgelerde çekme kuvvetleri düşey donatılar tarafından karşılanırken çatlak olmayan bölgelerde beton ile donatı arasındaki adreransın da etkisiyle oluşan matris tarafından karşılanır. Bu durumda perde duvar çekme kapasitesi çatlak olmayan ve çatlak oluşan bölge olmak üzere iki şekilde hesaplanır. Çatlak olmayan bölgedeki çekme kuvveti:

$$T = (E_s A_s + E_c^{cr} A_c) \varepsilon_{sm} \quad (9)$$

$$E_c^{cr} = \frac{\sigma_{ct}}{\varepsilon_{sm}} = \frac{f(\varepsilon_{sm})}{\varepsilon_{sm}} \quad (10)$$

formülleri ile hesaplanır. Burada E_c^{cr} betonun sekant elastisite modülünü, σ_{ct} betonun ortalama çekme gerilmesini, ε_{sm} betonun ortalama çekme şekil değiştirmesini göstermektedir.

Çatlak oluşan bölgedeki çekme kuvveti ise aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$T = A_s \sigma_s = A_s f(\varepsilon_{sm}) \quad (11)$$

Burada σ_s çatlak oluşan bölgedeki donatıda oluşan çekme gerilmelerini göstermektedir.

2.2.4 Düktilite

Bir yapıdaki hasarı minimum seviyeye indirmek için yapı elastik ötesi deformasyon yapabilme kapasitesine sahip olmalıdır. Başka bir deyişle düktilite elemanın yük altındaki büyük deformasyonlar yapabilme kabiliyeti veya enerji sönmülme yeteneği olarak da tanımlanabilir. Yapı elemanın düktilitesi karşımıza şekil değiştirme, dönme veya deplasman olarak çıkabilir.

2.2.4.1 Şekil değiştirme düktilitesi

Şekil değiştirme dayanımında önemli bir azalma olmaksızın malzeme veya elemanın inelastik davranmasıdır. Şekil değiştirme düktilitesini aşağıdaki formülle tanımlamışlardır.

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \quad (12)$$

ε toplam şekil değiştirmeyi, ε_y donatının aktığı andaki şekil değiştirmeyi göstermektedir.

Buradan da anlaşılacağı üzere donatılandırılmamış betonun basınç altında şekil değiştirme düktilitesi oldukça sınırlıdır. Bu yüzden şekil değiştirme betonun düktilitesinin artırılması için uygun bir şekilde donatılandırılmalıdır.

2.2.4.2 Dönme düktilitesi

İnelastik yapı deformasyonunun en önemli unsurlarından bir tanesi de plastik mafsallardaki dönmedir. Dönme (eğrilik) aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\mu_\theta = \frac{\theta_m}{\theta_y} \quad (13)$$

θ_m maksimum dönmeyi θ_y akma anındaki dönmeyi göstermektedir.

2.3 Betonarme perde duvarların plastik mafsallarda yaklaşımı ile değerlendirilmesi

Perde duvarların davranışı üzerinde plastik mafsallardaki bölgesinin oldukça belirleyici bir etkisi vardır. Plastik mafsallardaki eğilme etkisindeki taşıyıcı elemanlarda deformasyon ve yük taşıma kapasitesini belirleyen plastik deformasyonların yığıldığı bölge olarak tanımlanır. Yığılmalı plastik mafsallarda kabulünde ise perde duvarların inelastik davranışı plastik mafsallardaki boyuna değil de plastik mafsallardaki uzunluğuna diye tabir edilen bölgede yoğunlaştığı yaklaşımı ile değerlendirilmektedir. Plastik mafsallardaki betonda meydana gelecek çatlaklar perde duvarın göçme mekanizması üzerinde etkili olmaktadır.

Perde duvarlarda plastik mafsallarda yaklaşımı ile değerlendirilmesi için perde duvar davranışında belirleyici rol oynayan plastik mafsallardaki davranış oldukça önemlidir. Dolayısıyla perde duvarlarda plastik mafsallardaki bölgesinin tanımlanması oldukça önemli fakat bir o kadar da zor bir iştir. Fakat gerek literatürde gerekse de ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde perde duvarların plastik mafsallardaki uzunluğuna hakkındaki formüller arasında farklılıklar mevcuttur. Bununla birlikte geçmiş yıllarda yürütülen deney programları ışığında araştırmacılar kendi deney sonuçlarını baz alarak formülasyonlar üretmişlerdir.

Betonarme perde duvarlarda sık donatı düzeninden dolayı problemlerle karşılaşmaktadır. Bu problemin önüne geçebilmek için birkaç yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlardan biri Rad ve Adebar [12] tarafından önerilen düktil duvar yaklaşımıdır. Düktil duvar yaklaşımında perdenin yüksekliği boyunca herhangi bir noktada donatının akmasının olabileceği yaklaşımıdır. Fakat bu yaklaşımda perde yüksekliği boyunca donatıların düktil bir şekilde detaylandırılmaları gerektiği için ekonomik değildir. Diğer bir yaklaşım ise perde tabanında plastik mafsallardaki bölgeye ilaveten, perde orta bölgesinde de plastik mafsallardaki oluşmasına izin verilen yaklaşımdır [13]. Bu yaklaşımla perde duvar orta noktasında ikinci mertebe momentlerin sebep olabileceği

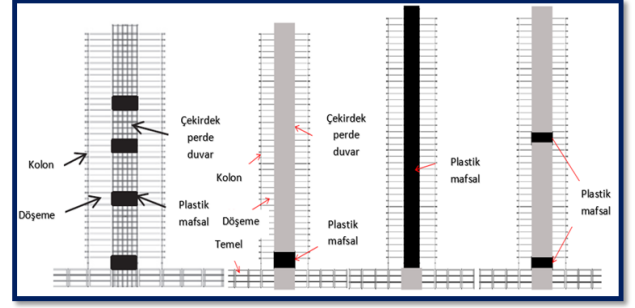
hasar önlenabilir. Bir diğer yaklaşım ise plastik mafsalların perde tabanında olduğu geleneksel plastik mafsallı yaklaşımdır.

Dazio vd. [14] çalışmalarında donatı oranının, kullanılan boyuna donatının düktilite özelliklerinin betonarme perde duvarların deformasyon kapasitesine ve göçme mekanizmasına etkisini incelemişlerdir. Bununla birlikte betonarme perde duvarların plastik mafsallı analizini yapmışlardır. Boyuna donatı oranının azalması ile perde duvarlarda eğilme-kesme çatlakları da azalmıştır. Boyuna donatı düktilite özelliklerinin çatlak oluşumu ve çatlak dağılımı üzerinde etkisi mevcuttur. Ayrıca donatı oranının azalması ile perde duvarın deformasyon kapasitesinin azaldığını belirtmişlerdir. Hatta bu olay donatının düktilite özelliklerinin azalması ile perde duvarın deformasyon kapasiteleri daha da azalmıştır.

Ahmed [15] perde duvarlarda plastik mafsallı üzerine yapmış olduğu çalışmada 40 katlı, ortası çekirdek perde duvarlı model binada dört farklı plastik mafsallı yaklaşımı ile perde duvar davranışını değerlendirmiştir. Birinci yaklaşımda 120 m yüksekliğindeki model binada klasik mafsallı yaklaşımı ile plastik mafsalların perde tabanında oluşmasına izin verecek şekilde modellemiştir (SPH (single plastic hinge model)). Model binada bu yaklaşım ile plastik mafsalları temel seviyesinden sonra birinci ve ikinci kat seviyelerine yerleştirmiştir. İkinci yaklaşımda plastik mafsalların tüm perde yüksekliği boyunca modellemiştir (DW (ductile wall)). Üçüncü yaklaşımda plastik mafsalların perde orta noktasında (20 ve 21. katın arasına) ve de perde tabanında oluşmasına izin verecek şekilde modellemiştir (DPH (dual plastic hinge)). Dördüncü yaklaşımda ise yazarın önerdiği çoklu plastik mafsallı yaklaşımını (MPH (multi plastic hinge)) modellemiştir. Bu yaklaşımda periyoda ve frekansı farklı dört moda göre maksimum momentin olduğu perde duvar boyunca dört farklı bölgeye (1-2, 12-13, 21-22 ve 28-29 kat seviyesi orta noktaları) plastik mafsallı tanımlamıştır (Şekil 5). Plastik mafsallı yerleştirmeden kasıt bu bölgelerin inelastik, diğer bölgelerin elastik davranış sergileyecek şekilde modellenmesidir. Dört farklı plastik mafsallı yaklaşımı zaman tanım alanında yöntemle sismik kuvvetler altında denenmiştir. Deplasman, plastik mafsallı dönme açısı, kesme deformasyon açısı, eğilme momenti kapasitesi ve kesme kuvveti kapasitesi incelenmiştir. Çalışma sonucunda önerilen çoklu plastik mafsallı yaklaşımının kesme ve eğilme momenti hasarı daha az olmuştur. MPH yaklaşımı ile hesaplanan eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri SPH yaklaşımı ile hesaplanan değerlerle karşılaştırıldığında sırasıyla %33 ve %17 daha düşük çıkmıştır. Ayrıca MPH yaklaşımı ile DPH yaklaşımı karşılaştırıldığı zaman perde yüksekliğinin 1/3 ve 2/3 seviyesinde eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri sırasıyla %40 ve %25 daha düşük çıkmıştır.

2.4 Betonarme perde duvarlarda lifli beton uygulamaları

Betonarme perde duvarlarda yürütülen çalışmaların bir bölümü de kullanılan malzeme (beton) üzerine yoğunlaşmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton [16], yüksek dayanımlı beton, yüksek performanslı beton, lifli beton vb. ve bu özel beton türlerinin birlikte kullanılması karşımıza



Şekil 5. Perde duvar plastik mafsallı yaklaşımları

çıkılmaktadır. Özellikle geçtiğimiz yıllarda lifli betonların artan bir trendi vardır. Çelik, karbon, cam, polipropilen vb. malzemelerin yüksek çekme dayanımı, enerji sönümleme kapasitesinden ve düktilitesinden dolayı tercih edilen malzemelerdir. Ganesan ve Indira [17] perde yükseklik/uzunluk oranı 3 olan yüksek performanslı ve çelik lifli yüksek performanslı betondan ürettikleri perde duvarların tekrarlı tersinir yüklemeler altında davranışını incelemişlerdir. Çelik lif oranının hacimce %0.25 ve %0.5 olarak tercih etmişlerdir. Yüksek performanslı betona %0.25 ve %0.5 oranında çelik lif eklenmesinin referans numunesine göre (lif katkısız numune) ilk çatlak oluşumu için gereken yükü sırasıyla 1.84 ve 1.76 kat artmıştır. Dolayısıyla çelik lif eklenmesi perde duvarların yük taşıma kapasitesini artırdığı yorumunu yapabiliriz. Bununla birlikte lifli yüksek performanslı perde duvarlar referans numunesine göre daha fazla enerji sönümleme kapasitesine sahip olmuşlardır. Fakat çelik lif oranını arttırmak enerji sönümleme kapasitesini düşürmüştür. Yani %0.25 lif eklenen numune referans numunesine göre %48 daha fazla enerji sönümlemesine karşın lif oranının %0.5' e çıkarılması bu oranı %41 seviyesine düşürmüştür. Ayrıca çelik lif eklenmesi maksimum çatlak genişliğini de azaltmıştır.

Carrillo vd. [18] çalışmalarında hafif betonlar ürettikleri düşük beton dayanımına sahip betonarme perde duvarların sismik davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Bununla birlikte yazarlar perde duvar kalınlığını seçerken özellikle Latin Amerika ülkelerinde bir veya iki katlı binalarda tercih edilen 100 mm perde kalınlığını seçmişlerdir. Hafif betonlu perde duvarların rijitlik, enerji sönümleme kapasiteleri, kesme dayanımları ve deformasyon kapasiteleri gibi performanslarını belirleyen parametreleri normal dayanımlı perde duvarlarla kıyaslamışlardır. Bunun için on adet normal dayanımlı (beton basınç dayanımı ortalama 20 MPa) ve on adet düşük dayanımlı (beton basınç dayanımı ortalama 15 ile 20 MPa arasında) perde duvar ürettirmişlerdir. Perde duvarlar sarsma tablası üzerinde test edilmiştir. Ayrıca boyuna donatı oranının (%0.125 ve %0.250), boyut etkisinin (0.5 ve 1.0 ve 2.0) ve yükleme tipinin (sarsma tablası, monolitik artan ve tekrarlı tersinir yükleme) normal ve hafif betonlu perde duvar davranışına etkisini incelemişlerdir. Hem normal hem de düşük dayanımlı betonlu perde duvarların hemen hemen hepsinde diyagonal basınç kırılmaları gözlemlenmiştir. Normal betonun hafif betona nazaran mekanik özelliklerinin daha fazla olmasına rağmen (örneğin elastisite modülü %11, basınç dayanımı genel olarak 38 MPa' dan fazla) kesme

dayanımı, rijitlik, enerji sönümlleme kapasitesi, deformasyon kapasitesi parametreleri hafif betonlu perde duvarlarda daha yüksek çıkmıştır.

Zhao vd. [19] çalışmalarında lifli betonla ürettiği bağ kirişli betonarme perde duvarların sismik davranışını deneysel olarak incelemiştir. Perde duvarların üretiminde hacimce %1 ve %2 oranında çelik lif kullanılmıştır. Geleneksel betonla lifsiz üretilen kontrol numunesinin yanı sıra donatı oranı değiştirilmeden hacimce %1 ve %2 çelik lifli beton kullanılan bağ kirişli perde duvarlar üretilmiştir. Perde duvarların dayanım, deformasyon ve rijitlik azalması, enerji sönümlmesi ve çatlak dağılımı parametreleri incelenmiştir. Çelik lif kullanımı bağ kirişli perde duvarlarda çatlak dağılımı üzerinde oldukça olumlu bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte lif oranının artırılması çatlak dağılımını azaltmıştır. Çelik lif kullanılması deformasyon ve yanal rijitlik kapasitesini arttırmıştır.

Lu vd. [20] çelik lifli yüksek dayanımlı betondan ürettikleri perde duvarların tekrarlı tersinir yükleme altında davranışını incelemiştir. Perde duvarların üretiminde ayrıca köşe kolon bölgelerine I profiller kullanmışlardır. Yüksek dayanımlı betonda çelik lif oranının (hacimce %1,%1.5 ve %2) perde duvar davranışına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Lif kullanımı perde duvarlardaki çatlak dağılımı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Çatlak dağılımı üzerinde en etkili lif oranının hacimce %1.5 olduğu perde duvarda elde edilmiştir. Çelik lif kullanımı ilk çatlağın görüldüğü yük seviyesini arttırmıştır. Ayrıca lif oranının %1 ve %1.5 oranında kullanılması nihai yük dayanımını pek fazla etkilememesine rağmen %2 oranına çıkarılması taşıma kapasitesini arttırmıştır. Benzer şekilde lif kullanılması düktilite üzerinde artırıcı bir etkiye neden olmuştur. En fazla artış %2 lif oranının kullanıldığı perde duvarda elde edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonda hacimce %2 oranında çelik lif kullanılması en iyi sonuçların elde edilmesine neden olmuştur.

Hung ve Hsieh [21] ultra yüksek performanslı betondan imal edilen perde duvarların tekrarlı tersinir yükleme altında davranışlarını incelemiştir. Ultra yüksek performanslı betona hacimce %0.75 ve %1.5 oranında çelik lif eklenmesi ile üretilen betonarme perde duvarların davranışını değerlendirmişlerdir. %0.75 oranında çelik lif eklenmesi enerji sönümlleme kapasitesi, deformasyon kapasitesini arttırmıştır. Fakat çelik lif eklenmesi özellikle kesme dayanımını arttırmıştır. Çelik lif oranının %1.5 oranına çıkarılması söz konusu değerlerin azalmasına neden olmuştur.

2.5 Betonarme perde duvarların kompozit malzeme açısından değerlendirilmesi

Çelik plakalı perde duvarlar genellikle deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde iyi bir yanal yük taşıma performansı sergilediği için tercih edilebilir. Bu tür perde duvarlar bu avantajının yanı sıra düşük bir yangın dayanımının olması önemli bir dezavantajdır. Artan sıcaklık ile perde duvar içerisindeki çelik plakanın burkulma dayanımı gittikçe azalacaktır [22]. Bu da yanal rijitliğin ve dayanımın düşmesine sebep olacaktır. Bu sorunun önüne geçebilmek için yani çelik plakanın gerek yangından korumak gerekse

de burkulmasını önlemek için kompozit perde duvar sistemi fikri ortaya çıkmaktadır.

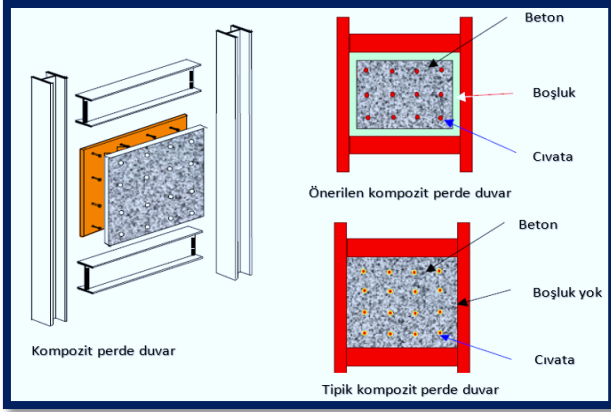
Artık günümüzde ülkelerde gelişen teknoloji, artan nüfus, şehrin simgesi vb. sebeplerden dolayı ultra yüksek binaların yapımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ultra yüksek binalarda perde duvarlar özellikle sismik kuvvetlerin karşılanması için çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu tarz binalarda ise perde duvarlar klasik dolu gövdeli perde duvarların yanı sıra bina merkezinde konumlandırılan çekirdek perde duvar (core wall) uygulaması yapılabilmektedir.

California Berkeley Üniversitesi'nde Astaneh-Asl [23] çelik ve beton kompozit perde duvarlarda yenilikçi bir yaklaşımla bir çalışma yürütmüştür. Geleneksel beton ve çelikten oluşturulan kompozit perde duvarların yanı sıra beton ile çelik plaka arasına boşluk bırakılarak oluşturulan perde duvar sistemin sismik davranışını incelemiştir. Perde duvar kalınlığı, çelik plaka kalınlığı, yatay ve düşey donatı oranı ve kolon kiriş boyutlarının aynı olduğu geleneksel ve yenilikçi perde duvarların davranış karşılaştırılmıştır (Şekil 6). Sismik yükler altında Astaneh-Asl tarafından önerilen kompozit perde duvarın geleneksel kompozit perde duvara göre daha düktil davranış sergilemiştir. Fakat perde duvarın dayanımına baktığımız zaman geleneksel kompozit perde duvarın dayanımı daha fazla değere ulaşmıştır. Geleneksel ve önerilen kompozit perde duvarların rijitlikleri hemen hemen aynı değere ulaşmıştır. Her iki perde duvar sisteminde de çelik plakaların akmadan önce burkulması önlenmiştir. Bu iki tip perde duvar sistemi arasındaki en önemli fark beton bölümünde gözlemlenmiştir. Geleneksel kompozit perde duvardaki beton tam anlamıyla moloz yığınının dönmüştür. Hemen hemen beton bölümünün her yerinden donatılar görülebilmektedir. Önerilen perde duvar sisteminde betondaki zarara sınırlı ölçüde olmuştur. Sonuç olarak yazar bu iki kompozit perde sisteminin dayanımda ciddi bir azalma olmadan yanal yük kapasitesinde oldukça iyi olduğu belirtilmiştir.

Park ve Yun [24] çalışmalarında çelik bağ kirişli hibrid perde duvarların enerji sönümlleme kapasitelerini, göçme mekanizmalarını, dayanımlarını, histeristik tepkilerini ve etkili ankraj boylarını incelemiştir. Çalışmalarında bağ kirişlerin serbest açıklıklarını 300, 400, 600 mm ve bağ kiriş yüksekliklerini de 350 ve 244 mm olarak tasarlamışlardır (Şekil 7). Serbest açıklığı en kısa olan numunenin diğer iki numuneye nazaran daha yüksek bir enerji yutma kapasitesine eriştiğini bildirmişlerdir. Çelik bağ kirişli perde duvarlar dizayn edilirken hem kesme kuvveti hem de eğilme momentine karşılık serbest açıklık boyunun kısa tutulması gerektiğini vurgulamışlardır.

Çelik ve beton kompozit perde duvarlar genellikle duvar kesitinin üst kısmına yapı çeliğinin ilave edilmesi şeklinde donatılandırılırlar. Bu perde duvarlar özellikle deprem gibi yanal yükler altında düşük deplasman seviyelerinde yanal yüklere karşı koyan yapı elemanları olarak bilinirler. Bu tarz kompozit perde duvarların dizayn ilkeleri için özel uygulamaların ve şartnamelerin gerektiği unutulmamalıdır. Bu şartnamelerde sismik yükler altındaki perde duvarların köşe elemanları saran etriyelere gereksinimleri ve eksenel yük seviyeleri gibi limitler belirtilir. Bununla birlikte

Eurocode-8’de üç tip kompozit perde duvar tanımlanmıştır (Şekil 8). Çelik ve beton kompozit perde duvarların, beton ve çelik arasındaki birleşim, kesme çivisi (shear stud) ve beton ile çeliğin non-lineer davranışından dolayı perde duvarın da davranışı non-lineerdir [25].



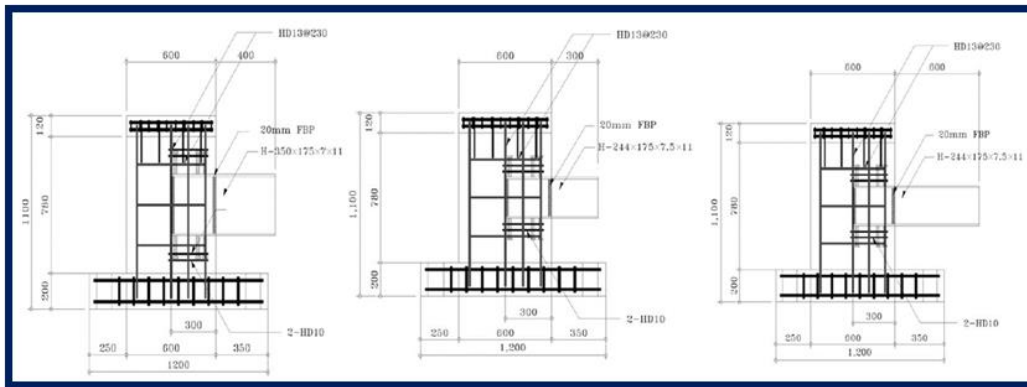
Şekil 6. Astaneh-Asl [23] deney numuneleri

Dan vd. [25] deneysel çalışmalarında kompozit perde duvar elemanlarının doğrusal olmayan (non-lineer) davranışının analizi ve çelik profiller ile beton arasındaki bağlantıya odaklanarak farklı şekillerde çelik profillerin duvarların davranışına (çatlak oluşuncaya kadar ki perde duvar performansı, maksimum yük, deformasyon kapasitesi, enerji sönümleme kapasitesi) etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla bir adet referans numune olmak üzere altı adet 1/3 ölçekli çelik + beton kompozit perde duvar üretmişlerdir. Perde duvarların köşe kolon bölgelerinde; birinci perde duvarda iki adet kutu profil, ikinci perde duvarda I profil, üçüncü perde duvarda iki adet I profile ek olarak bir adet de orta bölgede I profil, dördüncü perde duvarda iki adet H profil ve beşinci perde duvarın dış yüzeyine iki adet I profil yerleştirilmek üzere üretilmişlerdir. Çalışma sonucunda

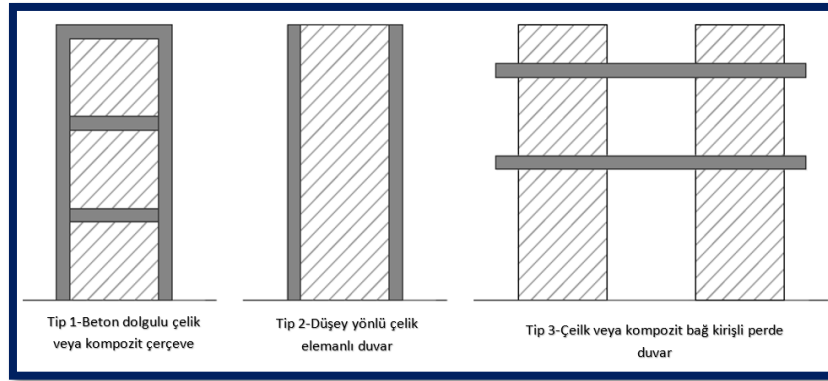
çelik profilin şekli, kesit alanındaki pozisyonu perde davranışı üzerinde etkili olmuştur. Perde duvarlarda çelik profil eklenmesi duvarların daha düktil davranmasına neden olmuştur. Bununla birlikte köşe kolon bölgelerine kutu profil yerleştirmenin diğer numunelere nazaran yük taşıma kapasitesini daha fazla arttırmıştır. Bunun yanı sıra beşinci numunenin daha fazla enerji sönümlediği belirtilmiştir.

Nie vd. [26] çelik ve beton kompozit perde duvar alışmalarında yeni bir uygulama üzerinde durmuşlardır. İki çelik plaka arasında betonla doldurulmuş ve perde duvar köşelerinde çelik tüplerden köşe kolonlar oluşturmuşlardır. Beton ile çelik plakaları çivilerle (stud) bağlamışlardır. Ayrıca perde duvar gövdesinde bölmeler oluşturmak için düşey berkitmeler ve bu berkitmeleri de bir birine bağlayan birleşim levhaları kullanmışlardır. Önerilen kompozit perde duvarda çelik plakaların kesit alanı, beton basınç dayanımı, köşe kolonlardaki çelik plakanın kalınlığı, perde duvar kenarlarındaki çelik plaka kalınlığı ve kesme açıklığı oranı parametrelerinin yüksek eksenel yük altında sismik davranışları incelenmiştir. Önerilen perde duvar sistemindeki bütün numuneler oldukça iyi bir enerji sönümleme kapasitesi ve ötelenme oranı performansı sergilemişlerdir. Önerilen perde duvar sisteminde yüksek dayanımlı beton kullanılması da davranış üzerinde olumlu bir etkiye neden olmuştur.

Beton ve çelik kompozit perde duvarların avantajlarından bir kaç da özellikle Japonya ve Çin gibi deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde yüksek rijitlik ve düktilitesidir. Bu tarz perde duvarlara uygulanan yeni bir yaklaşım ise kompozit perde duvarların iç bölgelerine yerleştirilen diagonal destekleyici aparatlardır. Bu aparat sayesinde Astaneh ve Zhao’ nun [27] deneysel çalışmalarına göre çelik donatının burkulması, betonun ezilmesi ve çekme çatlaklarının sayısı azalmaktadır. Çelik ve beton kompozit perde duvarların yaygın bir şekilde kullanılmasına rağmen çelik ve beton kombinasyonunun karmaşıklığı bu tip perde duvarların davranışının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır



Şekil 7. Park an Yun [24] çalışmalarındaki perde duvar numuneleri



Şekil 8. Eurocode 8'e göre beton çelik kompozit perde duvarlar

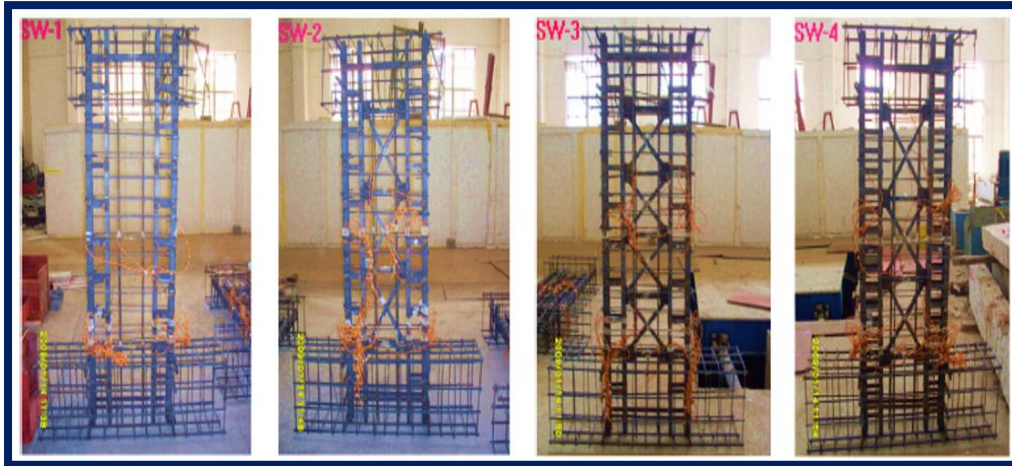
Lan vd. [28] çelik ve beton kompozit perde duvar sistemine farklı bir şekilde yaklaşmışlardır. Perde geometrisi ve yatay ile düşey donatıların sabit kalmak koşuluyla imal ettikleri dört adet kompozit perde duvarın tekrarlı-tersinir yükler altında denenmiştir.

Kompozit perde duvarlar sağ ve sol köşelerine karşılıklı U profillerden oluşturmuşlardır. Dört adet perde duvardan bir tanesi kontrol numunesi olarak imal edilmiştir. Diğer iki perde duvar sırasıyla üç ve dört tane “X” çelik profil kullanmışlardır. Dördüncü perde duvar ise ikinci perde duvarla aynı sayıda “X” çelik profil kullanılmasının yanı sıra köşe kolonlarda kullanılan çelik profil oranı azaltılmıştır (Şekil 9). Kompozit perde duvarlarda “X” çelik profillerin eklenmesi gerek maksimum yatay kuvvet kapasitesinde gerekse de maksimum yatay kuvvete karşılık gelen deplasman değerlerinde artışa sebep olmuştur. Böylece “X” çelik profillerin eklenmesi perde duvarların daha duktıl bir davranış sergilemesine neden olmuştur. “X” çelik profillerin sayısının artırılması (SW2 numunesinde 3 adet, SW3 numunesinde 4 adet) yatay kuvvet kapasitesinde ve deplasmanda fazla bir etkiye sahip olmamasına rağmen rijitlik azalmasında oldukça etkili olmuştur. Dört adet “X” çelik profil kullanılan perde duvar üç adet “X” çelik profil kullanılan numuneye göre rijitliğinin azalması daha düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca köşe kolonlardaki çelik profillerin azaltılmasının benzer şekilde rijitlik azalması

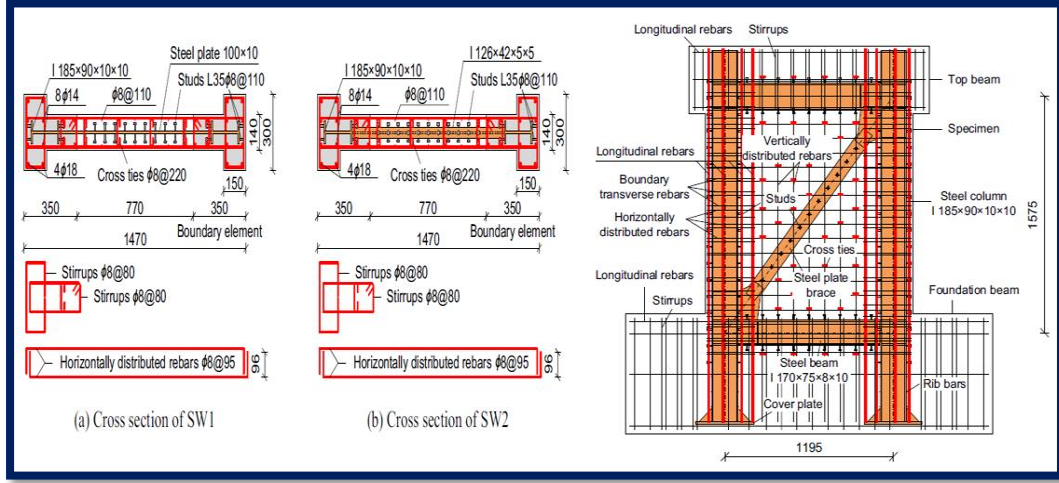
üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte kompozit perde duvarların çatlak dağılımları incelendiğinde “X” çelik profilin eklenmesi perde duvardaki göçme şeklini eğilme ile kesme formunda göçmesine neden olmuştur

Ji vd. [29] Çin’ in Beijing kentinde 528 m yüksekliğindeki ultra yüksek bir binayı modellemişlerdir. Çalışmalarında aynı geometri ve donatıya sahip fakat tek çelik çapraz levhalı ve I profil gömülü iki farklı perde duvar durumunu modellemişlerdir (Şekil 10). İki numunede de göçme hasarının benzer şekilde geliştiğini bildirmişlerdir. Tekrarlı-tersinir yüke maruz kalan her iki numunedeki çelik çaprazlarda akma olduktan sonra burkulma meydana gelmiştir. Fakat çelik çaprazlı numunede burkulma üst kısımlarda oluşurken diğer numunede burkulma orta kısımda oluşmuştur. İki yönteminde uygulamaya yönelik olarak bir birinin alternatifi olarak kullanılabileceği bildirilmiştir.

Perde duvarların kullanım alanlarına farklı bir pencereden bakacak olursak; nükleer santraller gibi güvenliğin çok önemli olduğu yapılar karşımıza çıkmaktadır. Geçmiş yıllarda yapılan bazı çalışmalar perde duvarların nükleer santral yapılarında nükleer koruma veya sismik performansını arttırmak için kullanılması gerektiğini bildirmişlerdir. Bu amaçla Li ve Li [30] çelik ve betonarme



Şekil 9. Lan vd. [24] deney numuneleri



Şekil 10. Ji vd. [29] çalışmalarındaki perde duvarı

kompozit perde duvarların nükleer santrallerde çelik levha kalınlığının, düşey yük ve beton sınıfının sismik davranış performansını deneysel olarak ele almışlardır. Deney numuneleri artan yanal yük altında elastik bölgede benzer davranış sergilemişlerdir. Elastik davranışın sona erdiği andan itibaren perde duvar taban bölgelerinde başlayan çatlaklar perde duvar boyunca yayılmıştır. Bu aşamada en iyi çatlak performansını betonarme perde duvar numunesi göstermiştir. Yük-deplasman eğrisinde maksimum yük aşıldıktan sonra çelik plakalarda yerel burkulmalar ve akmalar meydana gelmiştir. Göçme esnasında çelik ve betonarme kompozit perde duvarlarda eğilme kapasitesi keskin bir şekilde düşüş göstermiştir. Artan düşey yük ise numunelerde nihai dayanımı artırmıştır. Bununla birlikte levha kalınlığının artırılmasının rijitlik ve nihai dayanım üzerinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir. Levha kalınlığı daha fazla olan kompozit perde duvar daha iyi bir sismik performans sergilemiştir. Diğer yandan beton dayanımının artırılması rijitlik üzerinde etkili bir parametre olmadığı belirtilmiştir. Beton dayanımının artırılması nihai dayanımı artırmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında kompozit perde duvarlarda (çelik ve betonarme) ilk çatlağa sebep olan kritik eğilme momenti (M_{cr}) değerinin teorik hesaplanabilmesi için ampirik bir bağıntı önerilmiştir. Teorik olarak hesaplanan M_{cr} değeri deneysel M_{cr} değeri ile karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar oldukça yakındır.

Son yıllarda perde duvar sistemlerinde gelişen teknoloji ile kompozit perde duvarların kullanımı da gündeme gelmiştir. Bu kompozit perde duvarların bir örneği de perde duvar sisteminin orta bölgesine yerleştirilen çelik plaka ve bu plağın bir veya iki tarafının beton ile kapatıldığı sistemlerdir. Hatta 2005 yılından beri Amerika Birleşik Devletleri yönetmeliğinde yer bulan bu perde duvar sistemi geleneksel perde duvarlara göre daha hafif, perde kalınlığı daha küçük ve daha pratik yapım aşamasına sahiptir. Çelik plakanın burkulması önlediği takdirde yanal yük ve rijitlik seviyesinde önemli bir artış elde edilecektir. Fakat dezavantaj olarak yapıda bazı sebeplerden dolayı (mimari vb.) boşluk bırakılması gerekmektedir. Meghdadian ve

Ghalehnovi [31] boşlukların perde duvar sismik davranışına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla kompozit perde duvarlarda bırakılan boşluğun etrafında bir numunede 45 derecelik ek donatılar yerleştirilerek kesme kapasitesini arttırmaya çalışılmıştır. Diğer numunede ise boşluğun etrafına çelik plaklar yerleştirilmiştir. Son numunede ise bu iki yöntem beraber kullanılmıştır. Numunelerde çelik plaka eklenmesi enerji sönmüleme kapasitesini ve yanal deplasman kapasitesini sırasıyla %20 ve %25 artırmıştır.

2.6 Betonarme perde duvarlarda FRP uygulamaları

Perde duvarların davranışlarının deneysel olarak incelenmesi 1970'lerde başlamış ve devam eden süreçte iyice yaygınlaşmıştır [32-37]. Geçtiğimiz son on yılda betonarme perde duvarlar üzerinde yürütülen çalışmalara odaklandığımız zaman, sadece perde duvarların yeni yapılarındaki düzenine değil aynı zamanda eski yapılarındaki perde duvarların da onarım ve/veya güçlendirilmesi üzerinde de durulmuştur [38].

Lifli polimer (FRP-fiber reinforced polymer) donatılar beton teknolojisindeki yenilikçi ve önümüzdeki yıllarda kullanımının artmasının beklendiği yapı malzemeleridir. FRP çubukları anizotropik ve akma göstermeksizin yüksek çekme dayanımına sahip malzemelerdir. FRP donatılarının birçok avantajlarından dolayı inşaat sektöründe kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. FRP çubuklarının en büyük avantajlarından bir kaçısı sahip oldukları yüksek yorulma direnci, yüksek duktilitedir. Aramid, karbon, cam vb. FRP çubukların betonarme perde duvarlarda kullanılması ile FRP çubukların göstermiş oldukları lineer gerilme-şekil değiştirme özelliğinden dolayı perde duvarların dayanım ve deformasyon kapasiteleri artmaktadır. FRP çubuklar boyuna veya enine donatı şeklinde kullanılarak özellikle perde duvarların çekme, basınç, kesme ve deformasyon kapasitelerini artırmaktadır.

FRP çubuklar çekme altında akma göstermedikleri için dolayısıyla akma şekil değiştirmesi değeri de olmamaktadır. Tablo 1' de çelik, aramid, karbon ve cam FRP çubukların çekme kuvvetleri altındaki genel karakteristik özellikleri

gösterilmektedir. FRP çubukların çekme dayanımlarının çubuk çapı ile doğru orantılı olduğu da unutulmamalıdır. Kesme gecikmesinden dolayı bir kesitte merkezdeki FRP çubukları ile kenar bölgelerdeki FRP çubuklar aynı oranda çekme gerilmesine maruz kalmazlar. Literatürde FRP (GFRP, CFRP vb.) donatı düzeni perde duvarlarda kullanımı için herhangi bir yönetmeliğe rastlanılamamıştır.

Tablo 1. FRP çubukların mekanik özellikleri [39]

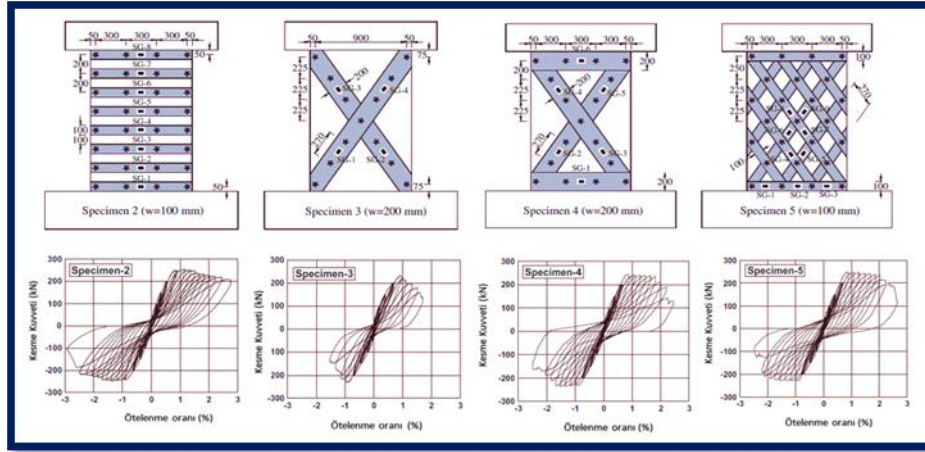
Özellik	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Akma Dayanımı (MPa)	276-517	-	-	-
Çekme Dayanımı (MPa)	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Elastisite Modülü (GPa)	200	35-51	120-580	41-125
Akma Şekil Değiştirmesi (%)	0.14-0.25	-	-	-
Göçme Şekil Değiştirmesi (%)	6-12	1.2-3.1	0.5-1.7	1.9-4.4

FRP çubukların basınç dayanımları ise çekme dayanımlarının yaklaşık %55'i kadardır. Bu husustaki bilgiler daha çok deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında yorum yapılabilmektedir. Basınç altında elastisite modülleri, çekme kuvvetleri altındaki elastisite modülünün yaklaşık %80'i kadardır.

Perde duvarlarda çelik donatı yerine tercih edilebilecek alternatif bir donatı cam lif esaslı polimer (GFRP) çubuklardır. GFRP çubuklar düşük fiyat, yüksek çekme dayanımı, yüksek kimyasal direnç ve iyi bir yalıtım özelliği göstermektedirler. Fakat bu avantajlarının yanı sıra düşük aşınma direnci, basınç altında düşük darbe dayanımı ve düşük çekme elastisite modülü, alkalite gibi dezavantajları da mevcuttur. GFRP çubuklar özellikle korozyonun perde duvarlar için sorun teşkil edebileceği yapılarda kullanımı daha fazla avantaj sağlayacaktır. Mohamed [39] doktora çalışmasında çelik donatıya ilave olarak cam lif polimer esaslı donatı kullanarak betonarme perde duvarların davranışını (ötenleme oranı, enerji sönümleme kapasitesi, göçme modu, eğilmenin hâkim olduğu perde duvardaki eğilme ve kesme deformasyonu) incelemişlerdir. Çalışmanın ana parametresi olarak perdelerin dayanımı ve deplasman kapasitesi olarak belirlenmiştir. Ayrıca perde duvarın kesme ve eğilme deformasyonları arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için elde edilen deneysel sonuçlar faydalı olmaktadır. Cam polimer esaslı donatılı perde duvarların tekrarlı-tersinir yükler altındaki davranışını değerlendirmek için oldukça faydalı bir çalışmadır. Ayrıca cam polimer donatılı perde duvarların nihai dayanımları ve davranışlarını etkileyen anahtar faktörlerin tanımlanması ve değerlendirilmesi açısından deneysel veriler elde edilmiştir. Çalışma kapsamında üç tanesi farklı yükseklik/uzunluk oranında (2.3-2.9 ve 3.5) perde duvar ile bir adet geleneksel çelik donatılı perde duvar olmak üzere 1/1 oranında dört adet perde duvar imal edilmiştir. Çalışmanın ana parametrelerinden birini oluşturan cam donatılar perde duvarların temeli ile perde tabanı arasında konumlandırılmıştır. Bununla birlikte 12.7 mm çapında cam

polimer esaslı donatılar perde duvar köşe kolonlarında da kullanılmıştır. Cam polimer esaslı donatıların, geleneksel çelik donatılara göre daha düşük elastisite modülü olmasına rağmen çekme dayanımı ve nihai şekil değiştirme kapasiteleri oldukça fazladır ($E_{\text{çelik}}=200$ GPa, $E_{\text{camFRP}}=76$ GPa; $f_{u-\text{çelik}}=400$ MPa, $f_{u-\text{camFRP}}=1400$ MPa; $\epsilon_{u-\text{çelik}}=\%0.2$, $\epsilon_{u-\text{FRP}}=\%2.11$). Cam polimer esaslı perde duvarlar (CPPD) eğilme kapasitesinden önemli bir azalma olmaksızın kesme ve kayma dayanımı üzerinde çelik donatılı perde duvarlar göre artırıcı bir etkiye sahip olmuştur. Ayrıca ötenleme oranının limit değerler arasında kalmasında oldukça etkili olmuşlardır. Cam polimer esaslı perde duvarlar çelik donatılı perde duvarlara göre daha fazla ötenleme oranına ulaşmışlardır. Ayrıca ilk çatlağın görüldüğü yük üzerinde cam donatıların pek fazla bir etkisi olmamıştır. Bununla birlikte cam donatılı perde duvarlarda yükseklik/uzunluk oranı azaldıkça ilk çatlağın oluştuğu yük değeri de azalmaktadır. Eğilme ile kesme çatlağının oluştuğu yük değerine bakıldığında, cam lifli perde duvarlar ile çelik donatılı perde duvarlar arasında pek bir fark olmamıştır. Fakat ötenleme oranında cam donatıların daha fazla etkisi olmaktadır. Hatta yükseklik/uzunluk oranı azaldıkça ötenleme oranı artmıştır. Cam polimer esaslı donatılar perde duvarlarda yük taşıma kapasitesine nazaran ötenleme oranında daha fazla etkili olmuştur.

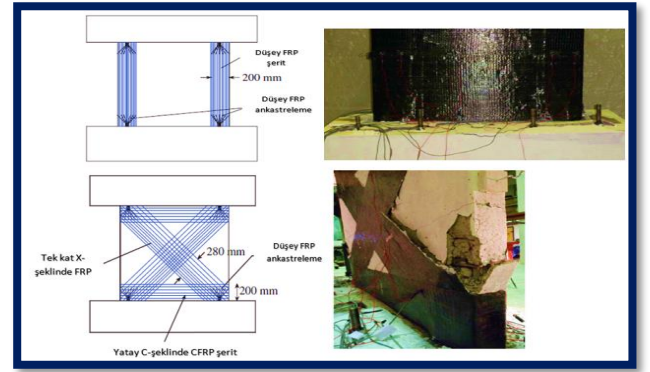
Betonarme perde duvarlarda karşımıza çıkan bir diğer çalışma alanı ise güçlendirme veya onarımdır. Özellikle büyük veya orta hasarlı depremlerden sonra betonarme perde duvarların onarım veya güçlendirilmesi önemli bir konudur. Özellikle diyagonal kesme çatlaklarının görüldüğü perde duvarlarda depremden sonra etkili bir şekilde onarım veya güçlendirme oldukça önemlidir. Karşımıza çıkan zayıflıklardan birkaç tanesi; köşe kolonların yeterli yatay donatı ile sargılanmaması, yeterli yatay donatının olmaması, donatı ile beton arasındaki aderansın zayıf olmasıdır. Bu tip perde duvarlarda depremden sonra kesme kuvveti kapasitelerinin artırılması yapı güvenliği için oldukça önem arz etmektedir. Perde duvarların güçlendirilmesi ile ilgili geçmiş yirmi yıldaki literatüre baktığımız zaman özellikle lif takviyeli polimerler (FRP) oldukça revaçtadır. Özellikle bu malzemelerin kolay uygulanabilirliği, korozyona karşı yüksek direnç ve hafif olmalarından dolayı tercih edilmektedirler. FRP malzemeler perde duvarlarda şeritler halinde sargılama şeklinde uygulanmaktadır. Bu alanda yapılan ilk çalışmalardan biri [40] FRP şeritlerin düşey şekilde sargılanması ile perde duvarların sismik davranışının incelemesidir. Bir diğer çalışmada Altin vd. [41] dört farklı (yatay, X şeklinde, X ile yatay ve X ile paralel kombinasyon) şekilde perde duvarları CFRP ile sargılayarak sismik davranışlarını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. CFRP ile güçlendirilmiş perde duvarlar hem yanal deplasman ve yük hem de enerji sönümleme kapasitesini arttırmıştır. Ayrıca güçlendirme yapılmayan numunede kesme göçmesi görülmeye karşın yatay şerit halinde CFRP uygulaması eğilme göçmesinin görülmeye neden olmuştur. Fakat X şeklinde CFRP uygulaması kesme göçmesine neden olmuştur.



Şekil 11. Altin vd. [41] perde duvar güçlendirme şekilleri ve kesme kuvveti-ötelenme oranı grafikleri

X ile yatay ve X ile paralel uygulama da ise eğilme ve kesme göçmesi beraber gözlemlenmiştir. Dolayısıyla güçlendirme yapılmayan ve X şeklinde güçlendirme yapılan perde duvarlar düktil olmayan bir davranış sergilemekle beraber, diyagonal kesme çatlakları perde tabanında yoğunlaşmıştır. Diğer numuneler ise oldukça düktil bir davranış sergilemişlerdir. Yatay şeritler halinde CFRP uygulanan perde duvar en düktil davranışı sergilemiştir. X ile paralel şerit uygulamasının kesme kuvveti kapasitesi üzerinde bir artış göstermemesi ile birlikte ötelenme oranında da oldukça az bir (yaklaşık %5) artışa neden olmuştur. Fakat düktilitenin azalmasına (%12) sebep olmuştur.

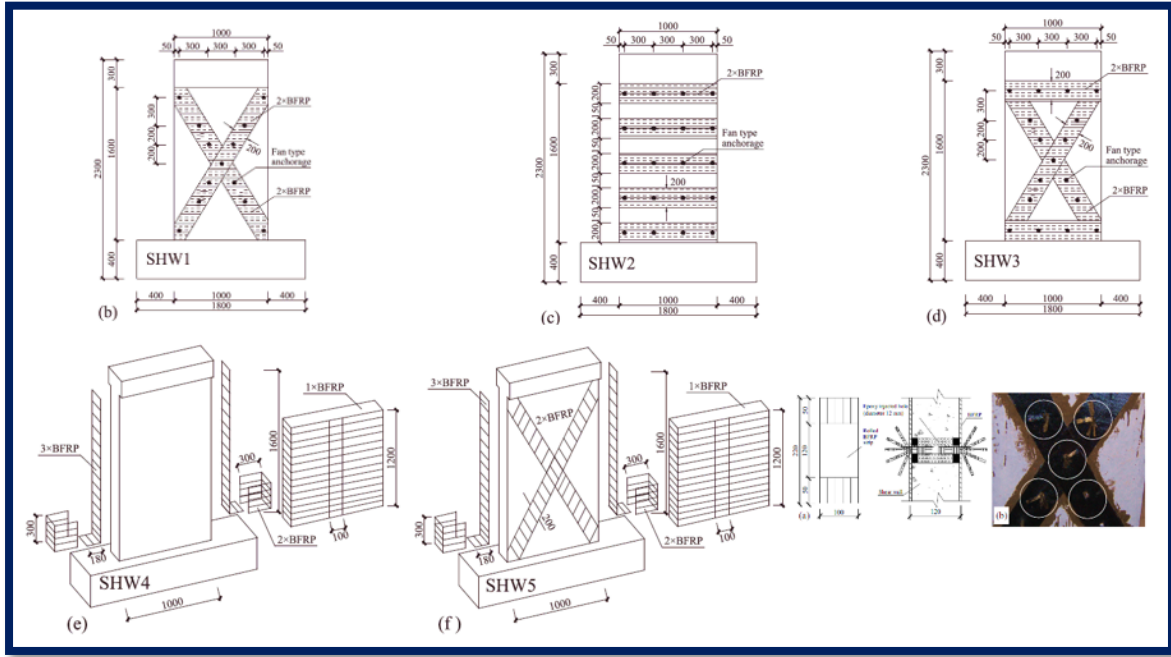
Günümüzdeki binalar büyük bir kısmı eski yönetmeliklere göre dizayn edilmiştir. Dolayısıyla perde duvarlarda bu eski yönetmeliklere göre boyutlandırılıp, donatılandırılmıştır. Fakat günümüze kadar yönetmelikler belli periyotlar halinde yenilenmişlerdir. Buna rağmen eski yönetmeliklere göre dizayn edilen perde duvarlar sismik kuvvetlere karşı koymaya devam etmektedirler. Perde duvarları güçlendirmenin yanı sıra onarımı da oldukça önem arz etmektedir. Bu amaçla çelik, beton, lif takviyeli polimerler gibi malzemeler onarım için kullanılmaktadır. Güçlendirmede olduğu gibi onarım çalışmalarının da amacı perde duvar dayanım, rijitlik, düktilite gibi karakteristik özelliklerini arttırmaktır. El-Sokkary ve Galal [42] perde duvarların onarımı için karbon FRP kullanmışlardır. Onarım çalışması olduğu için aynı geometri ve donatı oranı ile ürettikleri perde duvarların önce tekrarlı tersinir yüklemeye maruz bırakılmışlardır. İkinci aşamada perde duvarlar köşe kolonların olduğu bölge düşey şeritler halinde (RW1) ve X ile yatay şeklin beraber kullanılması (RW2) ile CFRP şeritler halinde sargılanmıştır. Onarım yapılan perde duvarların yanal yük taşıma kapasitesi yaklaşık iki kat artmıştır. Fakat deplasman kapasitesi azalmıştır. Dolayısıyla CFRP ile onarım perde duvarların daha rijit davranmasına neden olmuştur. Köşe kolon bölgelerinin CFRP ile sargılandığı perde duvar RW2 numunesinden daha fazla yanal yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Fakat dikkat edilmesi gereken nokta perde duvarların CFRP ile sargılanarak onarım dayanımı arttırmasına rağmen düktiliteyi önemli ölçüde azaltmıştır.



Şekil 12. El-Sokkary ve Galal [42] deney numunesi ve deney sonrası çatlak dağılımı

Mohamed vd. [43] cam lif esaslı polimer (GFRP) donatılı perde duvarlarda perde yükseklik/uzunluk oranının ve yatay donatı oranının perde duvar davranışına etkisini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında 100 mm çapında GFRP donatı kullanılmıştır. GFRP donatılı perde duvarlarda geleneksel çelik donatılı perde duvarlara göre dayanımda önemli bir azalma olmaksızın düktil bir davranış sergilemiştir. GFRP donatılı betonarme perdelerde çatlak dağılımı benzer gelişmiştir. Yükseklik/uzunluk oranının fazla olduğu numunede diyagonal çatlakların sayısı daha az gözlemlenmiştir.

Perde duvarların davranışını etkileyen faktörlerin boyut etkisini, yatay ve düşey donatı oranı ve uygulanan yük olduğu literatüre baktığımız zaman karşımıza çıkan en yaygın faktörlerdir. Boyut etkisinde literatürde genel kabul gören oran 2'dir. Perde yüksekliğinin perde uzunluğuna oranı 2'den küçük olan olanlar kısa perde duvar, 2'den büyük olanlar narin perde duvar olarak adlandırılmaktadır. Kısa perde duvarların davranışını kesme kuvvetinin hâkim olduğu derin kirişlerin davranışına benzetebiliriz. Narin perde duvarların davranışı ise klasik kiriş davranışındaki gibi yaklaşılabılır. Burada dikkat edilmesi gereken H/L oranı için TBDY' de bu tarz bir sınıflandırma olmamasıdır. Bunun yer ine perde kritik bölgesi tanımlanmaktadır. Bir diğer parametre olan donatı oranı ise perde duvar dayanımı ve



Şekil 13. Shen vd. [46] deney numuneleri

deformasyon kapasitesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Perde duvarlar etkiyen eksenel yükün kesme ve eğilme dayanımını artırması, deplasmanları azaltması gibi avantajları vardır. Literatüre baktığımız zaman perde duvarlarla ilgili deneysel çalışmaların bir bölümünde eksenel yük uygulanırken bir bölümünde uygulanmamaktadır.

Mostofinejad ve Anaei [44] narin perde duvarların köşe kolonlarının FRP ile güçlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Köşe kolonlarda plastik mafsallık bölgesinde FRP' nin sargı sayısının artırılması yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Ayrıca köşe kolonlarda FRP' nin genişliğinin azaltılması rijitliği de azaltmıştır.

Delnavaz ve Hamidnia [45] perde duvarların CFRP ile güçlendirilmesi üzerinde analitik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmanın ana parametrelerini perde duvar geometrisi ve donatıları sabit tutmak koşuluyla beton sınıfı, CFRP sargılama şekli ve sargı sayısı olarak belirlenmiştir. Beton sınıfı olarak 15.5 MPa, 25 MPa ve 45 MPa olarak seçmişlerdir. 1.2 ve 3 kat sargılama yapmışlardır. Ayrıca bir adet perde duvar sargısız olmak üzere altı farklı sargılama tekniği kullanmışlardır. CFRP ile güçlendirmenin etkinliği beton dayanımı azaldıkça artmaktadır. Sargı sayısının etkinliği ise beton dayanımının artması ile artmıştır. Çalışma kapsamında en ideal sargılama şekli olarak ise diyagonal sargılama olduğu belirtilmiştir. En düşük değerlere ise düşey şekilde paralel sargılanan perde duvarda elde edilmiştir.

Perde duvarların FRP ile güçlendirilmesinde X, U, yatay veya dikey şeritler veya bunların birbirleri ile kombinasyonları şeklinde uygulamalar literatürde mevcuttur [41,46-49].Yapılan bu çalışmalarda hem yanal yük kapasitesi hem de yanal deplasmanların üzerinde yatay şeritler halinde FRP uygulamasının en iyi yöntem olduğu belirtilmiştir. Shen vd. [50] perde duvarların güçlendirilmesi üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmanın

ana konusu bazalt FRP' lerin perde duvarlar uygulanmasıdır. Altı adet perde duvar imal etmişlerdir. İlk numune güçlendirme yapılmadan referans numunesi olarak imal edilmiştir. Bazalt FRP' nin uygulama şekli X şeklinde, yatay, X ile yatay uygulamanın birlikte kullanılması, perde gövdesinin yatay ve yan tarafların L şeklinde sargılanması ve yine perde gövdesinin X ve t kalınlığının L şeklinde sargılanmasıdır (Şekil 13). Çalışmayı literatürdeki güçlendirme çalışmalarından ayıran bir husus da FRP' lerin perde duvarlara ankrajlama şeklidir. Yatay şeritler ile sargılamanın hem yanal yük taşıma kapasitesi hem de deformasyon kapasitesi üzerinde en olumlu etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. Yatay ve X şeklinde sargılamanın birlikte kullanılması düktilitenin referans numunesine göre azalmasına sebep olmuştur. Fakat genel olarak bazalt FRP ile sargılama betonarme perde duvarların sismik karakteristik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.

Tolou-Kian ve Cruz-Nogues [51] betonarme perde duvarların sismik davranışını iyileştirmek için yenilikçi bir yaklaşım önermişlerdir. Üç farklı metotla imal ettikleri perde duvarların tekrarlı-tersinir yükler altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Perde duvarlardaki bu yenilikçi yaklaşım ile geleneksel çelik donatılı perde duvarların davranışında anahtar faktör olan iki unsurun (birincisi betonda ezilme ile kendini gösteren hasar düzeyi ikincisi ötelenme oranı) azaltılması amaçlanmıştır. Bir adet geleneksel betonarme perde duvarla birlikte, üç adet yenilikçi bir yaklaşım olarak önerdikleri (bir tanesi şekil hafızalı alaşım (shape-memory alloy (SMA)) donatılı, bir tanesi cam lifli polimer esaslı donatılı (GFRP), bir tanesi de yüksek dayanımlı çelik donatılı) perde duvarların davranışını incelenmiştir. 5 mm çapında GFRP çubuklar, 4 mm çapında nikel titanyum donatı (SMA donatı) kullanılmıştır. SMA donatılı perde duvarlar diğerlerine göre daha düktil

davranmıştır. Ayrıca ötelenme oranının en fazla olduğu numune GFRP donatılı perde duvar olmuştur. Yanal yük kapasitesine bakıldığı zaman ise SMA donatılı perde duvar en küçük değerde kalmıştır. SMA donatılı, GFRP ve yüksek dayanımlı çelik donatılı perde duvarlar geleneksel donatılı perde duvara göre sırasıyla %67, %62 ve %73 daha fazla enerji sönmüştür. Üç farklı donatılı perde duvarda da referans numunesine göre çatlak sayısının daha az fakat çatlak derinliğinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. GFRP donatılı perde duvarda çatlaklar diğerlerine göre daha sınırlı olmuştur.

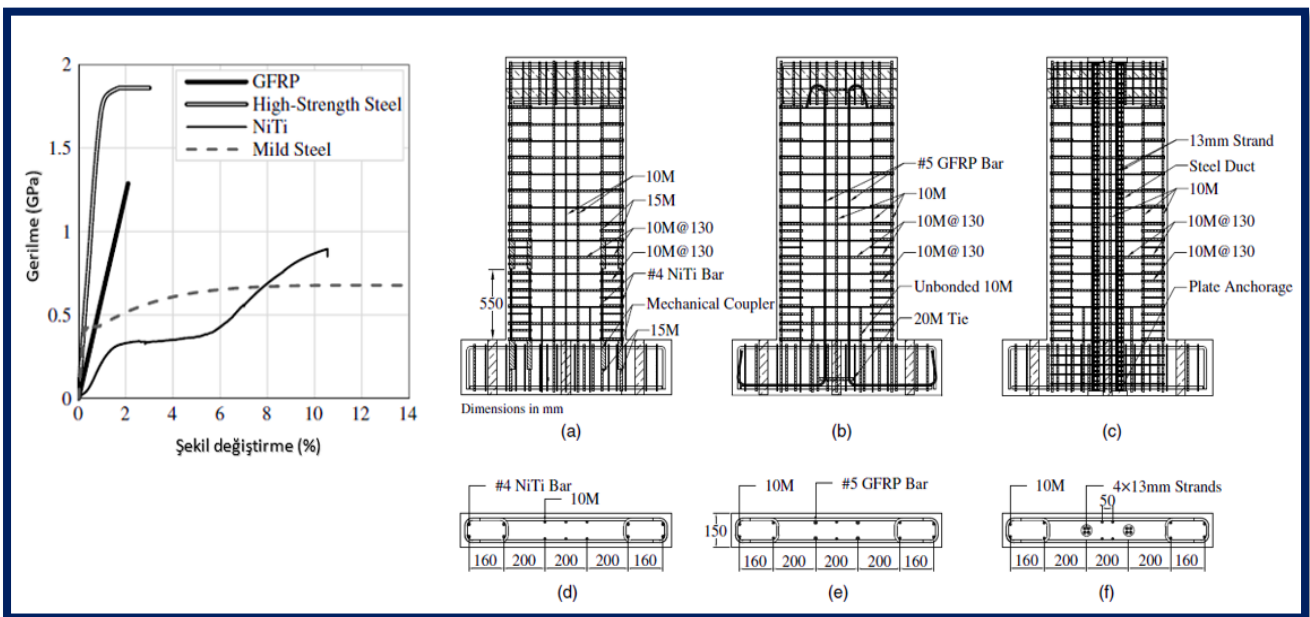
Yeh vd. [52] tarafından literatüre sunulan çalışma kapsamında boşluklu perde duvarların tekrarlı-tersinir yükler altındaki davranışı deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla bir tanesi açıklık olmayan geleneksel betonarme perde duvar, bir tanesi perde orta noktasında açıklık bulunan ve boşluk etrafında özel bir donatı düzeni bulunmayan perde duvar üretmişlerdir. Üçüncü perde duvarda boşluk etrafında özel yatay donatı düzeni (yatay donatılar 90 derece kanca yapılarak, 150 mm perde kenarına uzatılmak üzere) kullanılarak, bir adet perde duvar ise 250 mm kalınlığında karbon fiber polimer ile sarılarak imal edilmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığı zaman özel yatay donatı kullanmak ve FRP ile sarılamak perde duvardaki maksimum çatlak genişliğini ve çatlak dağılımını azaltmıştır. Yine bu iki uygulamanın kullanılması kesme dayanımı üzerinde artırıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Karbon fiber polimer ile sarılan perde duvar numunesi diğerlerine göre daha sünek davranış, daha fazla ötelenme oranı ve aynı zamanda daha fazla kesme kuvveti kapasitesine sahip olmuştur. Bununla birlikte beklenen bir şekilde perde duvar elemanlarında pencere, kapı gibi boşluklar bırakmak ötelenme oranını ve kesme kuvveti kapasitesini azaltmıştır. Fakat özel yatay donatı kullanmak veya FRP ile sarılamak ötelenme oranını ve kesme kuvveti kapasitesini artırmıştır. Hatta bu iki özel uygulama ötelenme oranı ve kesme kuvveti

kapasitesini bir hayli (sırasıyla yaklaşık olarak %70 ve %76) artırmıştır. Deneysel çalışmanın yanı sıra analitik bir çalışma da yürütülmüştür. Boşluklu perde duvarlarda ACI318-14 yönetmeliğinin düşey perde duvar parçasındaki yüksekliğin kullanılarak bulunan kesme dayanımı ile deneysel sonuçların örtüşmediğini belirtmişlerdir. Bu yüksekliğin tahmin edilebilmesi için bir algoritma önermişlerdir. Önerilen bu algoritma ile hesaplanan yükseklik parçası ve kesme kuvveti dayanımının deneysel sonuçlarla daha iyi bir şekilde örtüştüğü belirtilmiştir. Deng vd. [53] betonarme perde duvarlar üzerinde yenilikçi ve farklı bir yaklaşımla ele almışlardır.

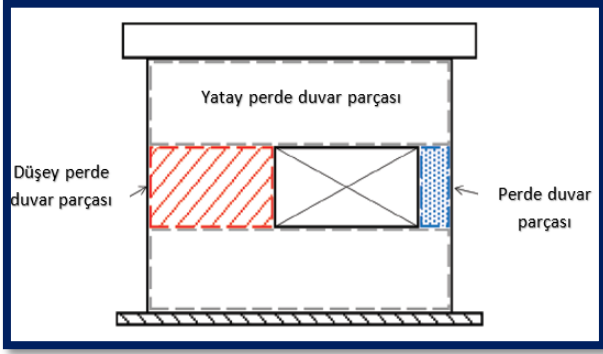
Perde duvar gövdesinde 150 mm kanal boşlukları bırakmışlardır. Daha sonra karbon ve cam FRP şeritler güçlendirdikleri bu perde duvarların sismik davranışlarını incelemişlerdir. Perde duvar gövdesinde bırakılan bu kanal boşlukları ile üç adet kolon oluşturmuşlardır. İki kenar kolon ve bir orta kolon oluşturmuşlardır. FRP sarılgamanın geleneksel betonarme perde duvarların düktilite ve enerji sönmüleme kapasitesini artırmıştır. Bununla birlikte FRP ile onarım perde duvarların deformasyon kapasitesi üzerinde önemli bir katkısı olmuştur. Cam FRP ile sarılgamanın numunede basınç hasarının oluşmadığı bildirilmiştir.

Arafa [54] perde duvarlarda çelik donatı düzenine alternatif olarak cam lif esaslı polimer (GFRP) donatı kullanmışlardır. GFRP donatı düzeninde yatay donatı oranının perde duvar sismik davranışına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. GFRP donatı kullanılması yanal deformasyon ve yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Çatlak genişliği GFRP donatı kullanılarak azaltılmıştır. Bununla birlikte çatlakların sınırlandırılması (çatlak genişliği, çatlak yoğunluğu vb.) için düşey donatı düzeninden ziyade yatay donatı düzenine bağlı olarak değişmektedir.

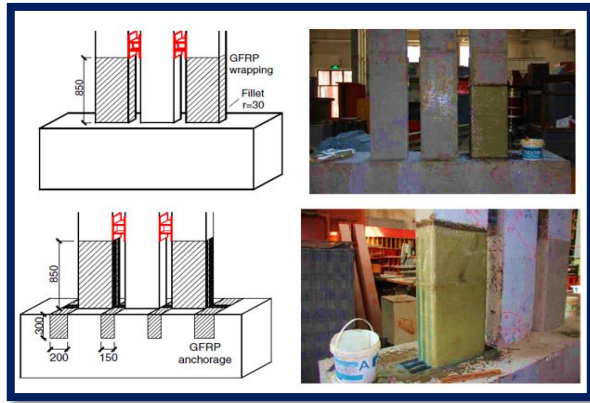
Geleneksel çelik donatılı betonarme perde duvarların yanal yük taşıma kapasiteleri oldukça yüksektir.



Şekil 14. Tolou-Kian ve Cruz-Nogues [51] deney numuneleri



Şekil 15. Boşluklu perde duvar yatay ve düşey parçaları



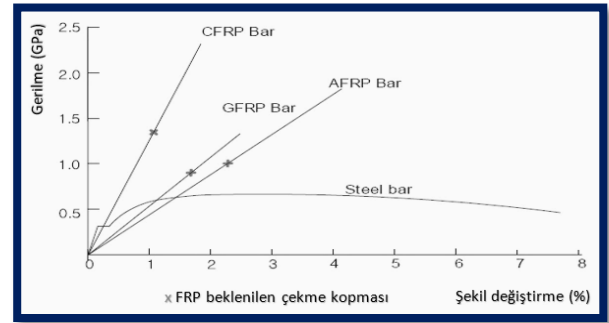
Şekil 16. Perde duvar numuneleri [53]

Fakat burada önem arz eden bir başka husus ise perde duvarların yanal yük taşıma kapasitelerinin yanında deformasyon yapabilme kapasitelerinin de yüksek olması özellikle deprem gibi yanal kuvvetlerin karşılanması için oldukça önemlidir.

Bu da enerji sönümleme kapasitesi ile bağlantılıdır. Yanal kuvvetlerin (özellikle aktif deprem bölgelerindeki deprem kuvvetleri) binalarda perde duvarlar tarafından karşılandığı bilinmektedir. Dolayısıyla perde duvarların deprem anındaki davranışı tüm taşıyıcı sistemin davranışını doğrudan etkilemektedir. Çelik donatının büyük deformasyonlar yaptıktan sonra (özellikle depremden sonra) tekrar eski haline geri dönmesi oldukça zordur. Bundan dolayı beton içerisine yerleştirilen donatıların büyük deformasyonlardan sonra tekrar eski haline gelebilmesi önemli bir konudur. Araştırmacılar bu sorunun üstesinden gelebilmek için çelik donatının yerine alternatif malzemeler arayışına girmişlerdir. Bunlardan yaygın olan birkaç tanesi karbon, çelik ve bazalt lif takviyeli polimer (CFRP, GFRP, BFRP) çubuklardır. 1000 MPa' dan daha büyük değerlere çıkabilen çekme dayanımları (çelik donatı ile karşılaştırıldığında iki kattan daha fazla olduğu görülmektedir) ve çekme gerilmeleri altında kopuncaya kadar akma göstermeden elastik davranış sergilemeleri bu malzemeleri oldukça ideal kılmaktadır (Şekil 17). Fakat bu malzemelerin de birkaç dezavantajı vardır. Çekme dayanımlarının yüksek olmasına karşın bu FRP çubuklar gevrek bir davranış sergilemektedirler. Ayrıca beton

içerisinde gömülmeleri ile donatı sıyrılması sorunu ile karşılaşılabilir. Araştırmacılar başta bahsettiğimiz perde duvar enerji sönümleme kapasitesini arttırmak için çekme dayanımı yüksek ve lineer elastik davranış sergileyen FRP çubuklarla çözüme yoluna gitmişlerdir. Fakat FRP' lerin dezavantajlarından dolayı dizayn aşamasında oldukça dikkatli olmak gerekmektedir. Zhao vd. [55] CFRP çubukları donatı olarak kullanmışlardır. Bunu iki şekilde uygulamışlardır. Birinci metotta perde duvar köşe kolonlarının da düşey yönde çelik donatı, diğer düşey donatılar ise CFRP çubuklar kullanmışlardır. İkinci metotta hem köşe kolon hem de diğer düşey donatıları CFRP çubuklar kullanmışlardır. CFRP çubukların avantajı özellikle çelik donatı aktıktan sonra ortaya çıkmıştır. Bu da perde duvarlarda oluşan çatlaklar üzerinde oldukça etkili olmuştur. İlk çatlakın görüldüğü yük seviyesi en fazla bütün düşey donatıların CFRP çubuklar olduğu numunede elde edilmiştir. Ayrıca CFRP çubuklu perde duvarlarda daha fazla sayıda çatlak oluşmuştur.

Malzeme olarak tek başlarına iyi bir çekme gerilmesi, lineer elastik davranış sergilemelerine rağmen CFRP çubuklar beton içerisine gömülmesiyle aynı verim elde edilememiştir.



Şekil 17. FRP ve çelik donatıların gerilme şekil değiştirme grafiği

Qazi vd. [56] perde duvarların CFRP ile güçlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Bir adet paralel CFRP şerit ile bir adet de çapraz CFRP şerit düzeni ile güçlendirdikleri perde duvarların davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. CFRP ile güçlendirilen perde duvarların dayanım ve rijitliği artmıştır. Paralel şeritlerle güçlendirilen perde duvarların dayanımı kontrol numunesine (güçlendirme yapılmayan numune) göre %23 dayanım artmıştır. Çapraz şeritlerle güçlendirilen perde duvar ise kontrol numunesine göre %30 daha fazla dayanım göstermiştir. Ayrıca CFRP ile güçlendirilen perde duvarlarda çatlak dağılımı da sınırlandırılmıştır.

Husain vd. [57] boşluklu perde duvarların Karbon FRP ile güçlendirilmesi üzerinde durmuşlardır. Özellikle deneysel veriler ile yapmış oldukları sayısal modellerin doğruluğunu kontrol etmişlerdir. Tolere edilebilir farklar elde ettikten sonra boşluklu perde duvarlarda sargılama şekli, sargı sayısı ve beton basınç dayanımının etkilerini incelemişlerdir. Literatürden seçilen iki tane betonarme boşluklu perde duvar öncelikle farklı bölgelerde ve farklı

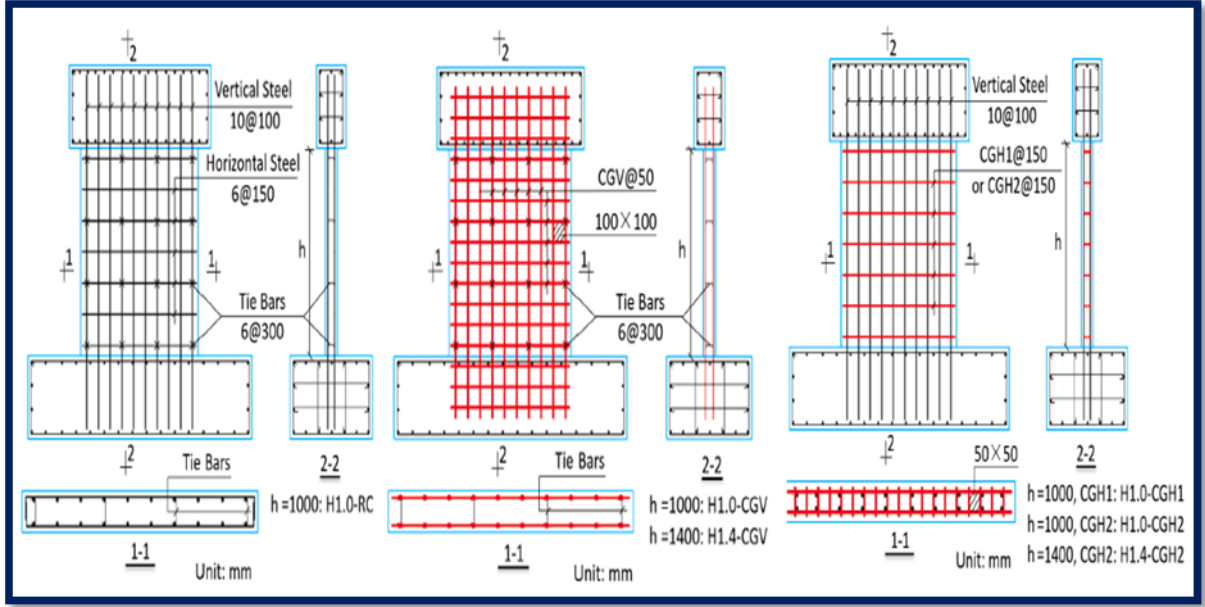
doğrultularda olmak üzere sargılama şekilleri değiştirilmiştir. İkinci olarak yine aynı perde duvarlarda iki ve üç kat sargılamanın perde davranışını nasıl etkilediği üzerinde durmuşlardır. Son olarak 30, 40 ve 50 MPa beton basınç dayanımlı perde duvarlarda sargılamanın etkisini ele almışlardır. Öncelikle boşluklu perde duvarların CFRP ile sargılanması yanal yük kapasitesini ve deplasman kapasitesini arttırmıştır. Ayrıca CFRP' lerin boşluklar etrafında ve/veya perde genelinde uygulama şeklinin de perde dayanımı üzerinde oldukça etkili olmuştur. Sargılama sayısının artırılması ile enerji sönümleme kapasitesi, düktilite ve dayanım doğru orantılı olarak artmıştır. Bununla birlikte beton basınç dayanımının artırılması yanal yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. Çalışma kapsamında dikkat çeken bir diğer faktör ise perde duvarlardaki boşlukların yerleridir. Düzgün simetrik boşluk perde duvarlarda kesme kuvvetlerinden kaynaklanan bağ kirişlerde gevrek kırılmalar oluşmuştur. Bunu bağ kirişlerdeki donatıların akması takip etmiştir. Asimetrik boşluklu perde duvarlarda ise perde tabanında düşey donatıların akması ve bunu betondaki çatlamlar ve dökülmelerin takip etmesi ile sünek bir kırılma meydana gelmiştir.

Betonarme perde duvarların karşılaştığı bir diğer zararlı çevresel etken de korozyondur. Betona gömülü donatının korozyona uğraması geçmiş yıllardan beri karşılaşılan temel problemlerden birisidir. Gerek inşaat mühendisliği gerekse de malzeme mühendisliğinde çalışan araştırmacılar donatı çeliğinin korozyona uğramasını engellemek için çalışmalar yürütmektedirler. Fakat korozyon olayı günümüzde halen daha tam olarak çözümlenmemiş bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte malzeme alanında da ciddi ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu alanda çalışan araştırmacıların bir kısmı beton içerisindeki donatıyı korozyondan korumak yerine çelik donatının alternatifi olarak kullanılabilecek malzemelere yönelmişlerdir. Bu çerçevede karşımızda inşaat mühendisliğinde son yıllarda popüleritesi artan lif katkılı polimerler (FRP) çıkmaktadır. Dayanım, ağırlık, korozyona karşı diren, elastisite modülü gibi farklı parametrelere iyi özellikler gösteren FRP' ler son yıllarda beton teknolojisinde takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. FRP esaslı malzemeleri katkısı olmaktan çıkıp perde duvar gibi yapı elemanlarında enine ve boyuna donatı olarak da kullanılmaya başlanılmıştır [43, 58]. Huang vd. [59] perde duvarlarda geleneksel çelik donatının yerine karbon FRP (CFRP) kullanmışlardır. Çelik donatı yerine CFRP çubuklarını farklı konfigürasyonlarda (yatay ve dikey) yerleştirmişlerdir. Ayrıca yatay donatı oranı ve boyut etkisi (H/L) parametrelerinin de perde duvar sismik davranışına etkisini incelemişlerdir. Çelik donatının yerine CFRP donatısının kullanılması ötelenme oranını arttırdığı çalışma sonunda belirtilmiştir. Hatta CFRP donatı düzeninin yatay şekilde kullanılması yanal deformasyonu ve taşıma gücü kapasitesini önemli ölçüde arttırmıştır. Boyut etkisinin çelik donatılı betonarme perde duvarın sismik davranışını etkilediği literatürdeki birçok çalışmada belirtilmiştir. Benzer şekilde CFRP donatılı perde duvarlarda da boyut etkisi perde duvar davranışını etkilemiştir. H/L oranının

arttırılması (%40 arttırılması) kesme göçmesinin görülmesine sebep olmuştur. Ayrıca CFRP donatılı düzeninin kullanılması çatlak genişliği ve çatlak yoğunluğunu da azaltmıştır. CFRP donatı düzeninin bir diğer avantajı da karbonun yüksek deformasyonlar altında dayanım ve elastik davranış sergilemesinden dolayı çatlak genişliği fazla olmamıştır. Yatay CFRP donatı düzeninin perde duvar davranışını (yanal yük kapasitesi, yanal deformasyon kapasitesi) arttırmasının yanı sıra yatay donatı oranının da bu parametreler üzerinde oldukça belirleyici bir etkisi vardır. Yatay donatı oranının arttırılması yanal deformasyon ve yük taşıma kapasitesini arttırmıştır.

2.7 Betonarme perde duvarların yüklemeye şekillerine göre değerlendirilmesi

Yüksek oranda asimetrik bir yapıya sahip sistemin sismik davranışı her bir tekil yapı elemanın burulma davranışı yorumlanmadan gerçek bir şekilde anlaşılamaz. Bu yüzden geçtiğimiz yıllar boyunca betonarme elemanların burulma davranışı gerek deneysel gerekse de analitik olarak irdelenmiştir. Bu çalışmalar ise çoğunlukla kiriş elemanlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Yapı elemanlarının burulma davranışı ile ilgili ilk çalışmalar 1900'li yılların başlarına dayanmaktadır. Konu ile ilgili ilk çalışmalar 1935 ve 1937 yıllarında Pavel Andersen [60,61] daha sonra ise 1951 yılında Henry J. Cowan [62] tarafından yapılmıştır. Daha sonra dairesel veya dikdörtgen kesitli kirişlerin burulma davranışı üzerine yapılan çalışmalar 1960'lı yıllarda artmıştır. Marti vd. [63] duvar tipi elemanların burulma davranışının incelendiği ilk çalışmalardan bir tanesidir. Literatürde perde duvarların burulma davranışının incelendiği az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bir tanesi de, Peng' in [64] perde duvarların sadece burulma momenti ve burulma momentinin diğer yüklerle (eğilme, eksenel yük) birlikte etki etmesi durumuna göre göçme mekanizmalarını incelediği çalışmasıdır. Çalışmanın ilk etabında, perde duvarlara sadece burulma momenti uygulanarak perde boyutu ve donatı oranının burulma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Perde duvarların rijitliğini betonda çatlak oluşumundan önce ve sonra olmak üzere ikiye ayırmıştır. Çatlak oluşmadan önceki rijitlik üzerinde perde en kesitinin etkili olduğunu donatı oranının belirleyici etken olmadığını belirtmiştir. Fakat ilk çatlak oluşuktan sonra elemanın rijitliğini belirleyen faktörün donatı oranı olduğunu bildirmektedir. Çatlama burulma momenti değerinin daha çok beton sınıfı ve perde kesitine bağlı olduğunu, bunun yanı sıra donatı oranının fazla bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Perde duvarların burulma dayanımı, beton sınıfı, kesit alanı ve donatı miktarı ile doğru orantılı olarak arttığını vurgulamıştır. Çalışmanın ikinci etabında burulma momenti ile birlikte eğilme ve kesme kuvvetinin etki ettirildiği perde duvarların çatlak gelişimini, hasar mekanizmasını ve burulma rijitliğini incelemiştir. Aynı boyutlara, donatı oranına ve malzeme özelliklerine sahip perde duvarlarda burulma momenti/eğilme momenti oranının (T/M) perde davranışına etkilerini incelemiştir. Deney sonucunda, burulma momenti varlığının perde duvar



Şekil 19. Huang vd. [59] perde duvar donatılardırılma şekli

daki plastik mafsallı boyunu etkilediğini belirtmiştir. T/M oranının artması plastik mafsallı perde tabanından yukarı doğru kaymasına neden olmaktadır.

Carillo ve Alcocer [65] perde duvarların davranışını sarsma tablası üzerinde dinamik yükleme yaparak değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamında klasik dikdörtgen kesitli perde duvar yerine Latin Amerika ülkelerinde yaygın bir şekilde kullanılan bina türü üzerinde durmuşlardır. Bu amaçla boşluklu ve boşluksuz perde duvar ve bu perde duvarları da kendi arasında klasik çelik donatılı ve hasır donatılı olarak üretmişlerdir. Çalışmanın bir diğer parametresi de beton türü (normal ve hafif beton) ve boyuna donatı oranı (%0.125 ve %0.25) olarak belirlemişlerdir. Hasır donatı veya klasik donatı düzeni deformasyon kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hasır donatının uzama kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı gevrek kırılmaya sebep olmuştur.

Öztürk [66] doktora tez çalışması kapsamında fay hattına yakın bölgelerdeki yapıların ötelenme kapasitelerini incelemiştir. Dünyada en aktif fay hattının birisi üzerinde bulunan Türkiye’de meydana gelen depremler esas alınarak on farklı zemin hareketinin perde duvar davranışına etkisini incelemiştir. Zemin hareket ivmesinin artması non-lineer deplasman hasarını arttırmıştır. Kesme kuvvetinden kaynaklı deplasman hasarını önlemek için perde duvar kesme dayanımının artırılması yapı güvenliği için faydalı olacaktır.

Carillo ve Alcocer [67] perde duvarlara uygulanan dinamik yüklerin üzerinde durmuşlardır. Yüksek yanallı rijitliklerinden dolayı deprem kuvvetlerinin karşılanmasında en etkili yapı elemanı olan betonarme perde duvarlar deneysel çalışmalarında deprem kuvvetlerinin simüle eden yüklerle yüklenmesi oldukça önemlidir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında zaman bu yüklemeler genellikle tekrarlı tersinir şekilde perde üst noktasında

uygulanmaktadır. Bir diğer yöntem ise sarsma tablası deney metodudur. Bu yöntemle perde duvarlar sarsma tablası üzerinde deprem kuvvetleri benzeri yüklere maruz bırakılmışlardır. Her iki yöntemin de avantaj ve dezavantajları vardır. İki deney yöntemi bir biri ile kıyaslandığında zaman; sarsma tablası yönteminde tablanın taşıyabileceği yük bakımından perde duvarların ağırlığı sınırlandırılmaktadır. Bu da büyük ölçeklerde çalışmalara imkân vermeyecektir. Fakat bunun yanı sıra deprem kuvvetlerinin gerçeğe daha yakın şekilde elde edildiği yöntem sarsma tablasıdır. Tekrarlı tersinir yükleme metodunda ise deney esnasında çatlakların gözlemlenmesi, deplasmanların kontrolü vb. olayların takibi daha kolaydır. Carillo ve Alcocer [67] sarsma tablası yöntemi ile tekrarlı tersinir yüklem deney yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Bu iki yükleme yönteminin perde duvar göçme modu, çatlak oluşumu ve dağılımı, dayanım ve enerji sönümlenme kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca perde geometrisi (boşluklu ve dolu gövdeli), beton türü (normal ve hafif beton), donatı oranı (%0.125 ve %0.250), donatı tipi (sargılı donatı ve hasır donatı) parametreleri belirlenmiştir. Hasır donatı ile üretilen perde duvarlarda diyagonal çekme göçmesi (gevrek bir kırılma), sargılı donatılı perde duvarlarda ise diyagonal çekme ve basınç (sünek göçme) gözlemlendiği belirtilmiştir. Tekrarlı tersinir yüklemede çatlakların sayısı ve boyu sarsma tablasındakilere göre daha fazla olmuştur. Tekrarlı tersinir yüklenen perde duvarlarda maksimum kesme kuvveti daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Deformasyon kapasitesi sarsma tablasındaki perde duvarlarda daha yüksek oranlarda elde edilmiştir.

Ji vd. [69] perde duvarların az da olsa maruz kalabileceği çekme kuvveti üzerinde durmuşlardır. Çalışmanın odak noktasını aksenal çekme kuvveti ile birlikte etki eden kesme kuvvetinin betonarme perde duvarların dayanım ve rijitliğini nasıl etkilediği olarak belirlemişlerdir. Bu amaçla altı adet

bağ kirişli perde duvarın tekrarlı-tersinir yüklemeye maruz bırakmışlardır. Çekme kuvvetinin etki etmediği numune diyagonal çekme göçmesi, çekme kuvvetinin artması ile de kayma-kesme göçmesinden kayma göçmesine doğru gidilmiştir. Ayrıca eksenel çekme kuvvetinin artması ile kesme dayanımı lineer olarak azalmıştır. Bununla birlikte yanal rijitlik eksenel çekme kuvvetinin artması ile artış göstermiştir. Hatta çekme kuvvetinin en fazla olduğu numune referans numunesine (çekme kuvvetinin olmadığı numune) göre %20 oranında artmıştır.

Öztürk [70] klasik bir çerçeve ve perde duvarlı sistemde perde duvarların taban kesme kuvveti kapasitesini arttırmak ve deplasman hasarlarını azaltmayı amaçlamıştır. İki farklı taban kesme sabitine sahip perde duvarın çerçeve sistemde davranışa etkisini irdelemiştir. Taban kesme kuvveti sabitinin artması maksimum non-lineer deplasmanlarını azaltmıştır.

Bağ kirişli perde duvarların sismik yükler altında davranış genellikle perde üst noktasından yatay olarak uygulanan tekrarlı-tersinir yükler altında değerlendirilmiştir. Fakat perde duvarların sismik performansının değerlendirilmesi için sarsma tablası yöntemi uygulanmıştır. Zhang vd. [71] bağ kirişli perde duvarların sismik davranışını değerlendirmek için sarsma tablası deney yöntemini uygulamışlardır. Donatı düzeni ve boşluk oranının perde davranışına etkisini incelemişlerdir. Boşluk oranının artması özellikle çatlak dağılımı üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olmuştur. Donatı düzeni olarak tek ve çift sıralı çapraz donatı düzeni kullanılmıştır. Çift donatı düzeni uygulanan bağ kirişli perde duvarın kesme deformasyon kapasitesi daha fazla olmuştur.

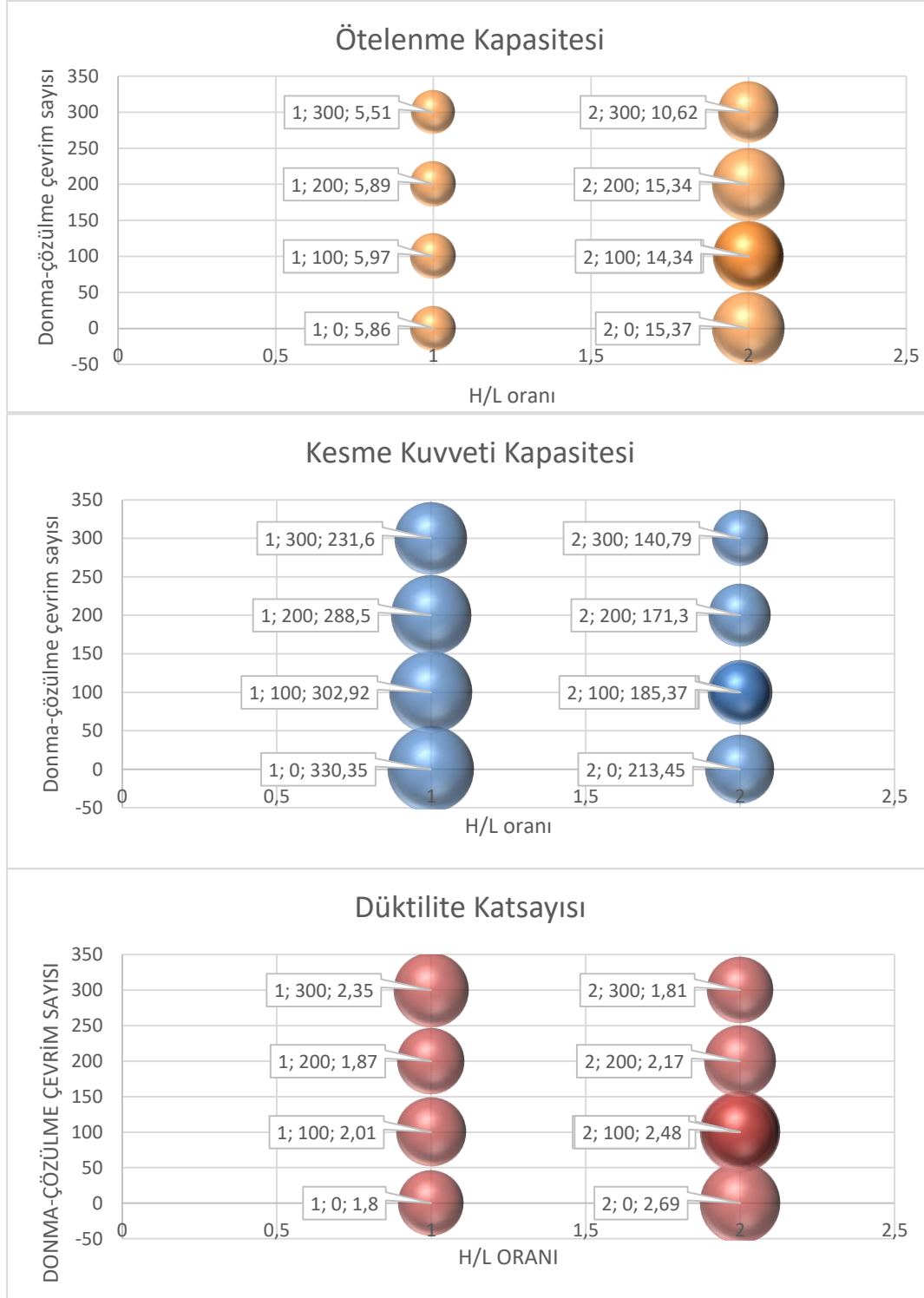
2.8 Betonarme perde duvarların durabilite açısından değerlendirilmesi

Yang vd. [72] perde duvarları sismik yükleme yapmadan önce donma çözölmeye maruz bırakmışlardır. Betonarme perde duvarları çevre koşullarının da etkisini sismik davranış etkileyeceğini dikkate almışlardır. Diğer bir ifadeyle geçmiş yıllarda mekanik parametreleri incelenen perde duvarlar durabilite açısından ele alınmıştır. Gerek dünya genelinde gerekse de ülkemizin bazı bölgelerinde gece ve gündüz sıcaklık farkı oldukça fazla olabilmektedir. Ayrıca bu sıcaklık farkları periyodik olarak da devam edebilmektedir. Bu bölgelerdeki betonarme binaların özellikle dış cephelerindeki başta perde duvarlar olmak üzere taşıyıcı yapı elemanları bu sıcaklık değişimlerinden doğrudan etkilenenlerdir. Beton içerisindeki mevcut nemli suyun donduğu ve beton boşluklarına artan bir basınç uyguladığı Power [73] tarafından daha önce belirtilmiştir. Bu basıncın betonun çekme gerilmelerinden büyük olması durumunda da boşluklar daha da genişleyecek ve betonda hasara neden olacaktır. Bu etkiler beton içerisindeki suyu özellikle donma çözölmeye maruz olduğu bölgelerde anahtar parametre haline getirmektedir. Yang vd. [72] betonarme perde duvarlarda mekanik yüklerle birlikte çevresel koşulları da göz önünde bulundurarak deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Diğer perde duvar parametreleri (beton sınıfı, donatı oranı vb.) sabit olmak şartıyla donma çözölmeye çevrim sayısının perde duvar sismik davranış üzerindeki

etkisini incelemişlerdir. Donma-çözölmeye çevrim sayısının artırılması kısa perde duvarlarda yanal yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Diyagonal çekme kırılması gözlemlenen perde duvarlarda çevrim sayısının artması basınç kırılmalarına sebep olmuştur.

Shen vd. [74] perde duvarların korozyonu konusunu ele almışlardır. Korozyona maruz bıraktıkları betonarme perde duvarların yenilikçi bir inorganik malzeme olan bazalt FRP ile sargılayıp güçlendirmişlerdir. Bazalt esaslı bir malzeme tercih etmelerinin nedeni, karbon FRP' ye nispeten daha ekonomik, daha yüksek mukavemet ve fiziksel (hafiflik) özelliği, daha yüksek çekme dayanımı ve daha kolay uygulanabilirliğidir. Bunların yanı sıra VFRP daha düktil bir malzeme olması da (deprem anında daha iyi aderans özelliği göstermesi ve cam FRP' ye göre daha iyi asidik direnç göstermesi) tercih edilme sebebidir. Deprem sonrası yapı elemanlarında onarım ve güçlendirme aşamasında da diğer FRP malzemelerine göre daha ekonomik bir olanak sağlamaktadır. Deneysel program kapsamında yedi adet H/L oranı 1.6 olan betonarme perde duvar imal edilmiştir. Üretilen perde duvarların bir tanesi referans numunesi, üç tanesi de farklı (%3-%9-%15) korozyona maruz bırakılmıştır. Diğer üç adet perde duvar ise önce korozyona maruz bırakılıp daha sonra BFRP ile güçlendirilmiştir. Eksenel yüklerle birlikte tekrarlı tersinir yüklemeye maruz bırakılan perde duvarların göçme modları, histeresik davranışları, rijitlik karakteristikleri, düktiliteleri, enerji sönümlenme kapasiteleri, dayanımları ve de FRP sargılama uygulamasının etkinliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Korozyon seviyesindeki artış doğal olarak perde kesme dayanımını azaltmıştır. BFRP ile perde duvarların güçlendirilmesi dayanımları bütün numunelerde arttırmıştır. Fakat korozyon seviyesindeki artış onarılan perde duvarların kesme dayanımındaki artışı azaltmıştır. Benzer şekilde korozyon seviyesindeki artış ötelenme oranını, düktiliteyi ve enerji sönümlenme kapasitesini azaltmıştır.

Bilindiği üzere perde duvarlar özellikle yüksek katlı binalarda veya deprem riskinin fazla olduğu bölgelerde yanal rijitlikleri, dayanım ve enerji sönümlenme kapasitelerinden dolayı tercih edilmektedirler. Geçmişten günümüze kadar araştırmacılar birçok parametrenin perde duvar davranışına etkisini incelemişlerdir. Burada dikkat çekilmek istenen nokta sismik kuvvetlere maruz kalan betonarme perde duvarlar Rusya, Kuzey Amerika ülkeleri, Kuzeybatı Çin gibi gölgelerde çok düşük sıcaklıklara maruz kalabilmektedir. Ayrıca bu gibi bölgelerde gündüz ve gece arasında sıcaklık farkı oldukça fazla olabilmektedir. Böylece donma çözölmeye maruz kalan perde duvarlara ayrıca deprem kuvvetleri de etki etmektedir. Rong vd. [75] donma çözölmeye maruz kalan perde duvarların davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel program kapsamında donma çözölmeye çevrim sayısı, basınç dayanımı, eksenel yük seviyesi parametreleri ele alınmıştır. Farklı çevrim sayısında donma çözölmeye maruz bırakılan perde duvarlar daha sonra tekrarlı tersinir yükler altında deneye tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma ışığında donma çözölmeye çevrim sayısının artması ilk yatay çatlak ve düşey yöndeki donatı sıyrılması daha erken ortaya çıkmıştır. Beton dayanımının artması ise tam tersi yönde etki etmiştir. İlk



Şekil 20. Yang vd. [72] ve Rong vd. [75] deney sonuçlarının karşılaştırılması

yatay çatlak ve donatı sıyrılması daha geç meydana gelmiştir. Eksenel yük seviyesindeki artış ve donma çözülme çevrim sayısının artması perde duvarların düktilitesini azaltmıştır. Çevrim sayısının iki ve üç kat artırılması (diğer parametreler sabit tutulmak kaydıyla) düktilite indeksini

sırasıyla %12.5 ve %27 oranında azaltmıştır. Eksenel yük seviyesinin artırılması çevrim sayısındakine benzer etki yaratmıştır. Dolayısıyla düktilitenin azalması perde duvarların daha gevrek bir davranış sergilemelerine sebep olmuştur.

Şekil 20' de iki farklı deneysel program çerçevesinde yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney numunelerinde yatay ve düşey donatı oranı, eksenel yük seviyesi ve beton sınıfı aynı veya bir birine sonucu etkilemeyecek kadar yakındır. H/L oranı 2 olan perde duvarlarda donma çözülme çevrim sayısı arttıkça kesme kuvveti kapasitesi azalmıştır. Benzer şekilde H/L oranı 2 olan perde duvarlarda da çevrim sayısının artırılması kesme kuvveti kapasitesini azaltmıştır. Farklı H/L oranlarındaki perde duvarlardaki azalış bir birine oldukça yakındır. H/L=1 ve H/L=2 maksimum çevrim sayılı (300 çevrim) perde duvarların kesme kuvveti kapasitesi referans numunesine göre (donma çözülme çevrim sayısı sıfır olan numune) sırasıyla %30 ve %34'lük bir azalış göstermiştir. Ayrıca H/L oranının iki katına çıkarılması perde kesme kuvveti kapasitesini azaltmıştır. H/L=1 perde duvarlarda çevrim sayısının artması ötelenme kapasitesi üzerinde etkili olmuştur. Fakat bu etki kesin bir artış ya da azalış şeklinde olmamıştır. Çevrim sayısının 100 ve 200'e çıkarılması ötelenme kapasitesini referans numunesine göre sırasıyla %1.87 ve %0.51 oranında arttırmasına rağmen 300 çevrimde %5.97 oranında azaltmıştır. H/L=2 perde duvar grubunda çevrim sayısının artırılması ötelenme kapasitesini azaltmıştır. Çevrim sayısının artırılması 100, 200 ve 300'e çıkarılması ötelenme kapasitesinin sırasıyla %6.70, %0.2 ve %30 oranında azalmasına sebep olmuştur. Betonarme perde duvarların nihai dayanımındaki ötelenme miktarının akma dayanımı anındaki ötelenme miktarına oranlanması ile düktilite katsayısı hesaplanmıştır. H/L=1 perde duvar grubunda çevrim sayısının artması düktilite katsayısını sırasıyla %11.67, %3.89 ve %30.56 oranında arttırmıştır. H/L=2 perde duvar grubunda ise çevrim sayısının artması düktilite katsayısının azalmasına neden olmuştur.

3 Sonuç

Betonarme perde duvarlarla ilgili sunulan literatür özetine bakıldığında zaman; betonarme perde duvarlar 1940'lardan beri araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Gelişen gerek beton teknolojisi gerekse de deney düzeneği teçhizatları ile perde duvarlar farklı malzemeler (lifli beton, kendiliğinden yerleşen beton, kompozit perde duvarlar) ile farklı yüklemeler (eksenel basınç, eksenel çekme, tekrarlı-tersinir yükleme, sarsma tablası) altında deneylere tabi tutulmuşlardır. Boşluksuz perde duvarlarla başlayan akademik çalışmalar zamanla betonarme bağ kirişli perde duvarlar ve boşluklu perde duvarlara kaymıştır. Daha sonradan kompozit ve çelik perde duvarlar araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Günümüzde beton teknolojisi ise lifli ve hibrid lifli ve atık malzemelerin (plastik atık, elektronik atıklar vb.) beton üretiminde değerlendirilmesine kaymaktadır. Beton teknolojisindeki bu gelişmelerin bundan sonraki akademik çalışmalarda perde duvar gibi yapı elemanlarında kullanılacağı yazarlar tarafından öngörülmektedir.

Betonarme perde duvar davranışının yenilikçi malzemeler ile modellenenebilmesi için kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerinin de (basınç, çekme, eğilme dayanımı, elastisite modülü vb.) ele alınacağı kapsamlı bir deney planı ile mümkün olacaktır. Özellikle

sayısal modellemeler muhtemel parçalı denklemler ile düzenlenerek etkinliği belirsiz parametrelerin maksimum kesme kuvveti, düktilite indeksi gibi değerlere katkısı irdelenmelidir. Yüzey işlemleri yapılmış, geleneksel çelik donatıya göre farklı karakteristik özellikler sergileyen GFRP, CFRP vb. donatılar veya betonarme donatısının zamanla değişen aderans özellikleri üzerine ve bu değişimin düktil davranışa etkisi üzerine çalışmalar yapılması gerekmektedir.

Ayrıca betonarme perde duvarların tipik beton ile donatının kullanılmasının yerine gerek beton açısından; geleneksel beton yerine tabakalı kompozit kavramının bağlayıcı esaslı kompozit (cement based composite), kendi kendini kontrol edebilen veya başlangıçtaki şekline geri dönebilen kompozit tabakalı yaklaşıma bırakması veya birleştirilmesi, gerekse de donatı açısından; çelik profiller, bağ kirişli perde duvarlarda kullanılan metalik, viskoz gibi sönümleyicilere bırakması düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %2

Kaynaklar

- [1] A. Ünal, TDY 2007'ye göre tasarlanmamış betonarme çerçevelerin düzlem dışı perde duvarla güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2012.
- [2] E. Baş, FRP sargılı perde duvarın yükler altındaki davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2015.
- [3] H. Şahin, K.E. Alyamaç, and A.S. Erdoğan, Perde çerçeveli yapılarda zemin sınıfı ve kat adedi dikkate alınarak gerekli perde oranının tespiti, SDU International Journal of Technological Science, 5, 1, 2013.
- [4] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2019
- [5] ISO/DIS 15673, Standart for the simplified design of structural reinforced concrete for buildings, International Organization for Standardization, Santa Fe de Bogota, Columbia, pp 220, 1998.
- [6] M. S. Döndüren, and A. Karaduman, Deprem bölgelerindeki yüksek katlı betonarme yapılarda taşıyıcı sistem seçiminin kesit tesirlerine etkisi, Selçuk-Teknik Dergisi, 9, 2, 131-43, 2010.
- [7] C.M. Chan, F. Ning, and N.C. Mickleborough, Lateral stiffness characteristics of tall reinforced concrete buildings under service loads, The Structural Design of Tall Buildings, 9, 5, 365-83, 2000. [https://doi.org/10.1002/10991794\(200012\)9:5<365::AID-TAL158>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/10991794(200012)9:5<365::AID-TAL158>3.0.CO;2-B)
- [8] I. Bali, and S.J. Hwang, Strength and deflection prediction of double-curvature reinforced concrete squat walls, Structural Engineering and Mechanics, 27, 4, 501-521, 2007. <https://doi.org/10.12989/sem.2007.27.4.501>

- [9] Y. R. Dong, Z.D Xu, K. Zeng, Y. Cheng, and C. Xu, Seismic behavior and cross-scale refinement model of damage evolution for RC shear walls, *Engineering Structures*, 167, 13-25, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.096>
- [10] T. Paulay, and A.R. Santhakumar, Ductile behavior of coupled shear walls, *Journal of the Structural Division*, 102, 1, 93-108, 1976.
- [11] A. E. Aktan, and V. V. Bertero, Seismic response of R/C frame-wall structures, *Journal of Structural Engineering*, 110, 8, 1803-21, 1984.
- [12] B.R. Rad, and P. Adebare, Dynamics shear amplification in high-rise concrete walls: effect of multiple flexural hinges and shear cracking, *Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake*, Beijing, China, 2008.
- [13] M. Panagiotou, and J. I. Restrepo, Dual-plastic hinge design concept for reducing higher-mode effects on high rise cantilever wall buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 12, 1359-80, 2009. <https://doi.org/10.1002/eqe.905>
- [14] A. Dazio, K. Beyer, and H. Bachmann, Quasi-static cyclic tests and plastic hinge analysis of RC structural walls, *Engineering Structures*, 31, 7, 1556-71, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.018>
- [15] M. Ahmed, Multiple plastic hinge concept for high-rise reinforced-concrete core wall buildings, *Proceeding of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 169, 6, 688-701, 2016.
- [16] M. Kurt, T. Kotan, M. S. Gül, R. Gül, and A. C. Aydın, The effect of blast furnace slag on the self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete, *Sadhana*, 41, 2, 253-64, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0462-2>
- [17] N. Ganesan, and P. V. Indira, High performance fibre reinforced cement concrete slender structural walls, *Advances in Concrete Construction*, 2, 4, 309, 2014. <http://dx.doi.org/10.12989/2014.2.4.309>
- [18] J. Carrillo, J. M. Lizarazo, and R. Bonett, Effect of lightweight and low-strength concrete on seismic performance of thin lightly-reinforced shear walls, *Engineering Structures*, 93, 61-69, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.022>
- [19] J. Zhao, G. Cai, A. S. Larbi, Y. Zhang, H. Dun, H. Degée, and B. Vandoren, Hysteretic behaviour of steel fibre RC coupled shear walls under cyclic loads: Experimental study and modelling, *Engineering Structures*, 156, 92-104, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.11.006>
- [20] X. Lu, Y. Zhang, H. Zhang, H. Zhang, and R. Xiao, Experimental study on seismic performance of steel fiber reinforced high strength concrete composite shear walls with different steel fiber volume fractions, *Engineering Structures*, 171, 247-59, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.068>
- [21] C. C. Hung, and P. L. Hsieh, Comparative study on shear failure behavior of squat high-strength steel reinforced concrete shear walls with various high-strength concrete materials, In *Structures*, 23, 56-68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.11.002>
- [22] M. Maali, M. Kılıç and A. C. Aydın, Experimental model of the behaviour of bolted angles connections with stiffeners, *International Journal of Steel Structures*, 16, 3, 719-33, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13296-015-0183-0>
- [23] A. Astaneh-Asl, Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls, Moraga (CA): Structural Steel Educational Council, 2002.
- [24] W. S. Park, and H. D. Yun, Seismic behaviour and design of steel coupling beams in a hybrid coupled shear wall systems, *Nuclear Engineering and Design*, 236, 23, 2474-84, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.03.008>
- [25] D. Dan, A. Fabian, and V. Stoian, Theoretical and experimental study on composite steel-concrete shear walls with vertical steel encased profiles, *Journal of constructional steel research*, 67, 5, 800-13, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.013>
- [26] J. G. Nie, H. S. Hu, J. S. Fan, M. X. Tao, S. Y. Li, and J. Liu, Experimental study on seismic behavior of high-strength concrete filled double-steel-plate composite walls, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 88, 206-219, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.05.001>
- [27] A. Astaneh-Asl, and Q. Zhao, Cyclic behavior of steel shear wall systems, In *Proceedings, Annual Stability Conference*, Structural Stability Research Council, 2002.
- [28] W. Lan, J. Ma, and B. Li, Seismic performance of steel-concrete composite structural walls with internal bracings, *Journal of Constructional Steel Research*, 110, 76-89, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.02.015>
- [29] X. Ji, T. Leong, J. Qian, W. Qi, and W. Yang, Cyclic shear behavior of composite walls with encased steel braces, *Engineering Structures*, 127, 117-28, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.041>
- [30] X. Li, and X. Li, Steel plates and concrete filled composite shear walls related nuclear structural engineering: Experimental study for out-of-plane cyclic loading, *Nuclear Engineering and Design*, 315, 144-54, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.019>
- [31] M. Meghdadaian, and M. Ghalehnovi, Improving seismic performance of composite steel plate shear walls containing openings, *Journal of Building Engineering*, 21, 336-42, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.11.001>
- [32] A. E. Cardenas, and D. D. Magura, Strength of high-rise shear walls-rectangular cross section, *Special Publication*, 36, 119-50, 1972.
- [33] F. Barda, J. M. Hanson, and W. G. Corley, Shear strength of low-rise walls with boundary elements, *Special Publication*, 53, 149-202, 1977.
- [34] A. E. Cardenas, H. G. Russell, and W. G. Corley, Strength of low-rise structural walls, *Special Publication*, 63, 221-42, 1980.

- [35] R. G. Oesterle, A. E. Fiorato, J. D. Aristizabal-Ochoa, and W. G. Corley, Hysteretic response of reinforced concrete structural walls, ACI Special Publication, 63, 243-73, 1980.
- [36] T. Paulay, M. J. N. Priestley, and A. J. Synge, Ductility in earthquake resisting squat shear walls, In Journal Proceedings, 79, 4, 257-69, 1982.
- [37] R. G. Oesterle, J. D. Aristizabal-Ochoa, K. N. Shiu, and W. G. Corley, Web crushing of reinforced concrete structural walls, In Journal Proceedings, 81, 3, 231-41, 1984.
- [38] K. I. Christidis, and K. G. Trezos, Experimental investigation of existing non-conforming RC shear walls, Engineering Structures, 140, 26-38, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.063>
- [39] N. A. A. R. Mohamed, Strength and drift capacity of GFRP-reinforced concrete shear walls, Doktora Tezi, Université de Sherbrooke, Kanada, 2013.
- [40] J. Lombard, D. T. Lau, J. L. Humar, S. Foo, and M. S. Cheung, Seismic strengthening and repair of reinforced concrete shear walls, In Proc., 12th World Conf. on Earthquake Engineering, pp. 1-8, 2000.
- [41] S. Altin, Ö. Anil, Y. Koprman, and M. E. Kara, Hysteretic behavior of RC shear walls strengthened with CFRP strips, Composites Part B: Engineering, 44, 1, 321-29, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.009>
- [42] H. El-Sokkary, K. Galal, I. Ghorbanirenani, P. Léger, and R. Tremblay, Shake table tests on FRP-rehabilitated RC shear walls, Journal of Composites for Construction, 17, 1, 79-90, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000312)
- [43] N. Mohamed, A. S. Farghaly, B. Benmokrane, and K. W. Neale, Experimental investigation of concrete shear walls reinforced with glass fiber-reinforced bars under lateral cyclic loading, Journal of Composites for Construction, 18, 3, A4014001, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000393)
- [44] D. Mostofinejad, and M. Mohamadi Anaei, Strengthening of slender RC shear wall with FRP sheets, Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering, 39, C2, 385-94, 2015.
- [45] A. Delnavaz, and M. Hamidnia, Analytical investigation on shape configuration of CFRP strips on lateral loading capacity of strengthened RC shear wall, Structural Concrete, 17, 6, 1059-70, 2016. <https://doi.org/10.1002/suco.201500196>
- [46] K. K. Antoniadis, T. N. Salonikios, and A. J. Kappos, Tests on seismically damaged reinforced concrete walls repaired and strengthened using fiber-reinforced polymers, Journal of Composites for Construction, 9, 3, 236-46, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900268\(2005\)9:3\(236\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2005)9:3(236))
- [47] K. K. Antoniadis, T. N. Salonikios, and A. J. Kappos, Evaluation of hysteretic response and strength of repaired R/C walls strengthened with FRPs., Engineering structures, 29, 9, 2158-71, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.021>
- [48] H. Ko, and Y. Sato, Bond stress-slip relationship between FRP sheet and concrete under cyclic load, Journal of Composites for Construction, 11, 4, 419-26, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10900268\(2007\)11:4\(419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2007)11:4(419))
- [49] B. Li, and C. L. Lim, Tests on seismically damaged reinforced concrete structural walls repaired using fiber-reinforced polymers, Journal of composites for construction, 14, 5, 597-608, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000110](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000110)
- [50] D. Shen, Q. Yang, Y. Jiao, Z. Cui, and J. Zhang, Experimental investigations on reinforced concrete shear walls strengthened with basalt fiber-reinforced polymers under cyclic load, Construction and Building Materials, 136, 217-229, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.102>
- [51] M. J. Tolou Kian, and C. Cruz-Noguez, Reinforced Concrete Shear Walls Detailed with Innovative Materials: Seismic Performance, Journal of Composites for Construction, 22, 6, 04018052, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000893](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000893)
- [52] R. L. Yeh, C. C. Tseng, and S. J. Hwang, Shear strength of reinforced concrete vertical wall segments under seismic loading, ACI Structural Journal, 2018. <https://doi.org/10.14359/51702377>
- [53] K. Deng, P. Pan, S. Shen, H. Wang, and P. Feng, Experimental study of FRP-reinforced slotted RC shear walls under cyclic loading, Journal of Composites for Construction, 22, 4, 04018017, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000855](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000855)
- [54] A. Arafa, A. S. Farghaly, and B. Benmokrane, Effect of web reinforcement on the seismic response of concrete squat walls reinforced with glass-FRP bars, Engineering Structures, 174, 712-23, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.092>
- [55] Q. Zhao, J. Zhao, J. T. Dang, J. W. Chen, and F. Q. Shen, Experimental investigation of shear walls using carbon fiber reinforced polymer bars under cyclic lateral loading, Engineering Structures, 191, 82-91, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.052>
- [56] S. Qazi, L. Michel, and E. Ferrier, Seismic behaviour of RC short shear wall strengthened with externally bonded CFRP strips, Composite Structures, 211, 390-400, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.038>
- [57] M. Husain, A. S. Eisa, and M. M. Hegazy, Strengthening of reinforced concrete shear walls with openings using carbon fiber-reinforced polymers, International Journal of Advanced Structural Engineering, 11, 2, 129-50, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40091-019-0216-6>
- [58] S. Ghazizadeh, and C. A. Cruz-Noguez, Damage-resistant reinforced concrete low-rise walls with hybrid GFRP-steel reinforcement and steel fibers, Journal of Composites for Construction, 22, 2, 04018002, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000834](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000834)

- [59] Z. Huang, J. Shen, H. Lin, X. Song, and Y. Yao, Shear behavior of concrete shear walls with CFRP grids under lateral cyclic loading, *Engineering Structures*, 211, 110422, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110422>
- [60] P. Andersen, Experiments with concrete in torsion, In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 60, 5, 641-52, 1935.
- [61] P. Andersen, Rectangular concrete sections under torsion, In *Journal Proceedings*, 34, 9, 1-12, 1937.
- [62] H. J. Cowan, Test of the torsional strength and deformation capacity of rectangular reinforced concrete beams. *Concrete and Constructional Engineering*, 46, 2, 51-5, 1951.
- [63] P. Marti, P. Leesti, and W. U. Khalifa, Torsion tests on reinforced concrete slab elements, *Journal of Structural Engineering*, 113, 5, 994-1010, 1987. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1987\)113:5\(994\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1987)113:5(994))
- [64] X. N. Peng, Study of torsional behaviour of reinforced concrete shear walls, *Doktora Tezi*, Hong Kong Polytecnic University, Hong Kong, 2012.
- [65] J. Carrillo, and S. M. Alcocer, Seismic performance of concrete walls for housing subjected to shaking table excitations, *Engineering structures*, 41, 98-107, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.025>
- [66] B. Öztürk, Seismic drift response of building structures in seismically active and near-fault regions, PhD Dissertation, Purdue University, W. Lafayette, Indiana, USA
- [67] J. Carrillo, and S. M. Alcocer, Experimental investigation on dynamic and quasi-static behavior of low-rise reinforced concrete walls, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42, 5, 635-52, 2013. <https://doi.org/10.1002/eqe.2234>
- [68] H. El-Sokkary, and K. Galal, Seismic behavior of RC shear walls strengthened with fiber-reinforced polymer, *Journal of Composites for Construction*, vol. 17, 5, 603-613, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.19435614.0000364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.19435614.0000364)
- [69] X. Ji, X. Cheng, and M. Xu, Coupled axial tension-shear behavior of reinforced concrete walls, *Engineering Structures*, 167, 132-42, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.015>
- [70] B. Öztürk, Investigation of seismic behavior of reinforced concrete shearwall building frames subjected to ground motions from the 1999 Turkish Earthquakes, 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China, 2008.
- [71] J. Zhang, W. Zheng, C. Yu, and W. Cao, Shaking table test of reinforced concrete coupled shear walls with single layer of web reinforcement and inclined steel bars, *Advances in Structural Engineering*, 21, 15, 2282-98, 2018. <https://doi.org/10.1177/1369433218772350>
- [72] W. Yang, S. S. Zheng, D. Y. Zhang, L. F. Sun, and C. L. Gan, Seismic behaviors of squat reinforced concrete shear walls under freeze-thaw cycles: a pilot experimental study, *Engineering Structures*, 124, 49-63, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.013>
- [73] T. C. Powers, A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete, *American Concrete Institute*, 16, 4, 245-72, 1945
- [74] D. Shen, Q: Yang, C. Huang, Z. Cui, and J. Zhang, Tests on seismic performance of corroded reinforced concrete shear walls repaired with basalt fiber-reinforced polymers, *Construction and Building Materials*, 209, 508-21, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.109>
- [75] X. L. Rong, S. S. Zheng, Y. X. Zhang, X. Y. Zhang, and L. G. Dong, Experimental study on the seismic behavior of RC shear walls after freeze-thaw damage, *Engineering Structures*, 206, 110101, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110101>

