



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

*Technical Journal
of
Turkish Chamber of Civil Engineers
Volume 30 Number 1 January 2019*

Cilt 30 Sayı 1 Ocak 2019



TMMOB

İnşaat Mühendisleri Odası

Necatibey Cad. No: 57, Kızılay 06440 Ankara

Tel: 0.312.294 30 00 - Faks: 294 30 88

E-posta: imo@imo.org.tr - www.imo.org.tr

Sahibi:

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası adına

Cemal GÖKÇE

Yazı İşleri Müdürü:

Bahaettin SARI

Cilt 30 - Sayı 1 - Ocak 2019

İki ayda bir yayınlanır, yerel süreli yayın.

Baskı tarihi: 1 Eylül 2018 / 2.000 adet basılmıştır.

Yayın Kurulu'nun yazılı onayı olmaksızın alıntı yapılamaz.

ISSN: 1300-3453

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Yayın Kurulu:

Süheyl AKMAN
Ender ARKUN
İsmail AYDIN
Özer ÇİNİCİOĞLU
Metin GER
Gürkan Emre GÜRCANLI
Alper İLKİ
Cem OĞUZ
Kutay ORAKÇAL
Günay ÖZMEN
Baki ÖZTÜRK
İsmail ŞAHİN
Özkan ŞENGÜL
Tuğrul TANKUT

Editör:

Tuğrul TANKUT

Yardımcı Editörler:

Ender ARKUN
İsmail AYDIN
Özer ÇİNİCİOĞLU
Metin GER
Gürkan Emre GÜRCANLI
Alper İLKİ
Kutay ORAKÇAL
İsmail ŞAHİN
Özkan ŞENGÜL

Yayın Sekreteri:

Cemal ÇİMEN

Teknik Dergi

- Science Citation Index Expanded
- Scopus
- Journal Citation Reports / Science Edition
- Engineering Index
- Concrete Abstracts (American Concrete Institute)
- National Technical Information Service (US NTIS)
- CITIS
- Ulrich's International Periodical's Directory
- TÜBİTAK / ULAKBİM

tarafından taranmaktadır.

Teknik Dergi, özgün bilimsel araştırmalar ile ilginç uygulama çalışmalarına yer veren ve bu niteliği ile hem araştırmacılara hem de uygulamadaki mühendislere seslenmeyi amaçlayan hakem sistemini etkin kullanan açık erişimli bir dergidir.

Danışmanlar:

Bu liste, son iki yayın yılında danışmanlık yapmış olan kişileri içerir ve her Ocak sayısında yenilenir.

Ayda Şafak AĞAR ÖZBEK	Hilmi Berk ÇELİKOĞLU	M. Rifat KAHYAĞLU	Mehmet SALTAN
Ragıp AKBAŞ	Kemal Önder ÇETİN	Volkan KALPAKÇI	Altuğ SAYGILI
Sami Oğuzhan AKBAŞ	Mecit ÇETİN	Erhan KARAESMEN	Hasan SAYGIN
Rifat AKBIYIKLI	Reha ÇETİNKAYA	Halil KARAHAN	Neslihan SEÇKİN
Özge AKBOĞA KALE	Safiye Feyza ÇİNİCİOĞLU	Himmet KARAMAN	Serdar SELAMET
Burcu AKÇAY	Erdal ÇOKÇA	Mustafa KARAŞAHİN	Serdar SOYÖZ
ALDANMAZ	Kutlu DARILMAZ	İlker KAZAZ	Ayşe Filiz SUNAR
Cihan Taylan AKDAĞ	Cem DEMİR	Cevza Melek	Erol ŞADOĞLU
Cem AKGÜNER	Ender DEMİREL	KAZEZYILMAZ ALHAN	Burak ŞENGÖZ
M. Vefa AKPINAR	Mehmet Cüneyd DEMİREL	Mustafa Kubilay	Aykut ŞENOL
Atakan AKSOY	Fatih DİKBAŞ	KELEŞOĞLU	Ali Ünal ŞORMAN
Zuhal AKYÜREK	Seyyit Ümit DİKMEN	Elçin KENTEL	Özcan TAN
Fatih ALEMDAR	İrem DİKMEN TOKER	Havvanur KILIÇ	Ali Hamza TANRIKULU
Pelin ALPKÖKİN	Ahmet Anıl DİNDAR	Ufuk KIRBAŞ	Serhan TANYEL
Sinan ALTIN	Emrah DOĞAN	Veysel Şadan Özgür KIRCA	Ergin TARI
Hilmi Doğan ALTINBİLEK	Nurhan ECEMİŞ ZEREN	Gökhan KIRKIL	Taha TAŞKIRAN
Adlen ALTUNBAŞ	Özgür EKİNCİOĞLU	Niyazi Uğur KOÇKAL	Gökmen TAYFUR
Fuat ARAS	Alper ELÇİ	Önder KOÇYİĞİT	Berrak TEYMUR
Davit ARDITI	Şebnem ELÇİ	Mete KÖKEN	H. Onur TEZCAN
Deniz ARTAN İLTER	Nilay ELGINÖZ KANAT	Ali Ümran KÖMÜŞÇÜ	Mesut TİĞDEMİR
Hakan Nuri ATAHAN	Murat Altuğ ERBERİK	Özgür KURÇ	Şahnaz TİĞREK
Shady ATTIA	E. Mete ERDEMGİL	Akif KUTLU	Vedat TOĞAN
Mustafa Tamer AYVAZ	Saffet ERDOĞAN	Semih KÜÇÜKARSLAN	Onur Behzat TOKDEMİR
Lale BALAS	Esin ERGEN PEHLEVAN	Hilmi LUŞ	Nabi Kartal TOKER
Selim BARADAN	Aysen ERGİN	Kasım MERMERTAŞ	Mustafa TOKYAY
Bekir Oğuz BARTIN	Gökmen ERGÜN	Mehmet Murat MONKUL	Ali TOPAL
Bilge BAŞ	Esra Ece ESELLER BAYAT	Yetiş Şazi MURAT	Cem TOPKAYA
Zeynep BAŞARAN	Tuğba ESKİŞAR TEFCİ	Elif OĞUZ	Ahmet TORTUM
BUNDUR	Güngör EVREN	Mehmet Hakkı OMURTAG	Gökçe TÖNÜK
Cüneyt BAYKAL	Antonio FORMISANO	Sema ONURLU	Nursu TUNALIOĞLU
Zerrin BAYRAKDAR	Nuray GEDİK	Engin ORAKDÖĞEN	Eda TURAN
İdris BEDİRHANOĞLU	Ergun GEDİZLIOĞLU	Şeref ORUÇ	Ahmet TÜRER
Serkan BEKİROĞLU	Haluk GERÇEK	Okan ÖNAL	Kaan TÜRKER
Mehmet BERİLGEN	İlgin GÖKAŞAR	Akın ÖNALP	Handan TÜRKÖĞLU
Saadet Arzu BERİLGEN	Çağlar GÖKSU	Aybike ÖNGEL	Cüneyt TÜZÜN
Niyazi Özgür BEZGİN	Burcu GÜLDÜR ERKAL	Bihret ÖNÖZ	Eren UÇKAN
Selçuk BİLDİK	Fazlı Erol GÜLER	Ali Hakan ÖREN	Berna UNUTMAZ
Senem BİLİR MAHÇİÇEK	Zeynep GÜLERCE	Murat ÖZEN	Mehmet UTKU
Barış BİNİCİ	Taylan GÜNAY	Pelin ÖZENER	Volkan Emre UZ
İlknur BOZBEY	Necmettin GÜNDÜZ	Abdullah Tolga ÖZER	Deniz ÜLGEN
Zafer BOZKUŞ	Abdurrahman GÜNER	Eren Arman ÖZGÜVEN	Ash ÜLKE KESKİN
Burcu BURAK BAKIR	Ülker GÜNER BACANLI	Hakkı Oral ÖZHAN	Alper ÜNLÜ
Erdem CANBAY	Aslı Pelin GÜRGÜN	Zeynep Huri ÖZKUL	Ahmet YAKUT
Zekai CELEP	İpek GÜRSEL DİNO	BİRGÖREN	İsmail Özgür YAMAN
Cihan CENGİZ	Gürşans GÜVEN İŞİN	Beliz ÖZORHON	A. Melih YANMAZ
Halim CEYLAN	Soner HALDENBİLEN	ORAKÇAL	Mert Yücel YARDIMCI
Ömer CİVALEK	Murat HAMDERİ	Sadık ÖZTOPRAK	Ufuk YAZGAN
Mustafa CÖMERT	Zeki HASGÜR	Turan ÖZTURAN	Anıl YAZICI
Ali Fırat ÇABALAR	Abdul HAYIR	Baki ÖZTÜRK	Emine Beyhan YEĞEN
Barlas Özden ÇAĞLAYAN	Nejan HUVAJ SARIHAN	Mustafa ÖZUYAL	İrem Zeynep YILDIRIM
Özgür ÇAKIR	Zeynep İŞİK	Tolga Yılmaz ÖZÜDOĞRU	Koray Kamil YILMAZ
Gülben ÇALIŞ	Sabriye Banu İKİZLER	Nilüfer ÖZYURT	M. Tuğrul YILMAZ
Necati ÇATBAŞ	Eren İNCİ	ZİHNİOĞLU	Mehmet YILMAZ
Erkan ÇELEBİ	Pınar İNCİ	Bekir Yılmaz PEKMEZCİ	İsmail YÜCEL
Kutay ÇELEBİOĞLU	Erdal İRTEM	Şamil Şeref POLAT	Yeliz YÜKSELEN AKSOY
Ahmet Ozan ÇELİK	Recep İYİSAN	Gül POLAT TATAR	Nabi YÜZER
Oğuz Cem ÇELİK	Nihat KABAY	Selim PUL	Ahmet Şahin ZAİMOĞLU
Osman Nuri ÇELİK		Selman SAĞLAM	

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Cilt: 30 Sayı: 1 Ocak 2019

İÇİNDEKİLER

- LEED Sertifikalı Yeşil Binalarda Enerji ve Su Tasarrufundan Sağlanan
Faydaların Taşınmaz Değerine Etkilerinin İncelenmesi..... 8753
Latif Onur UĞUR, Neşe LEBLEBİCİ
- Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile Üretilmiş Betonarme Kirişlerin
Eğilme Davranışı..... 8777
**Kaan TÜRKER, Tamer BİROL, Altuğ YAVAŞ, Umut HASGÜL,
Halit YAZICI**
- Zemin Büyütme Katsayılarının Betonarme Taşıyıcı Sistemlerin Sismik
Performans Potansiyeline ve Maliyetine Etkileri..... 8803
Peyman AZİMİ, Hatice GAZİ, Cenk ALHAN
- Yapıların Zaman-Frekans Ortamında Dalgacık Dönüşümü Metoduyla
Hasar Analizleri..... 8835
Ömer Fatih SAK, Kemal BEYEN
- Çelik Çekirdekli Burkulması Önlenmiş Çaprazların (BÖÇ) Tasarımı, Üretimi ve
Deneysel İncelenmesi..... 8861
Çiğdem AVCI KARATAŞ, Oğuz Cem ÇELİK
- U Şekilli Betonarme Perdelerin Farklı Yatay Yük Etkileri Altında Doğrusal
Olmayan Davranışı..... 8887
Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

Önsöz

İKİ DİLLİ YAYINDA İLK YIL

2017 yılı başlarında yapılan değerlendirme ve alınan karar doğrultusunda başlatılan hazırlık çalışmaları sonucunda, Teknik Dergi 2018 Ocak sayısından başlayarak iki dilli yayın düzenine girmişti. Bu karar alınırken, dönüşümün bazı güçlüklerle yol açabileceğinden kaygı duyulmuştu. Bu kaygılar gerçekleşmemiş, korkulan güçlüklerle karşılaşılmamış ve bu düzendeki ilk yayın yılı umulanın üzerinde bir başarıyla tamamlanmıştır.

Yeterli ve sürekli bir İngilizce yazı akımı sağlanıp sağlanamayacağı, duyulan kaygıların başında geliyordu. Tamamlanan yayın yılı bu kaygının gerekli olmadığını ortaya koydu. Bu yayın yılı boyunca yayımlanmak üzere Teknik Dergi'ye gönderilen yazıların üçte ikisi İngilizce oldu; bir başka deyişle, İngilizce yazılar Türkçe yazıları sayıca ikiye katladı. Bu eğilimin böylece sürüp gideceği kuşkuludur. Zira, yazarların Teknik Dergi'ye İngilizce yazı göndermeye oldukça hevesli oldukları, ancak gönderilen yazıların bilimsel içeriğine ve yazım diline gerekli özeni gösteremedikleri sezilenmektedir. Bunun sonucunda, ilk yılın İngilizce yazılarında “yayımlanamaz” kararı oranı Türkçe yazılara kıyasla oldukça yüksek olmuştur. Bütün bunların zaman içinde bir dengeye kavuşacağı, yazarların Teknik Dergi standartlarını benimseyip içselleştirecekleri, gönderilen yazı sayısının belki biraz azalacağı ama düzeyinin yükseleceği düşünülmektedir.

Bu dönem içinde, yabancı yazarlardan da epeyce yazı alınmıştır. Yabancı yazarların Teknik Dergi ilkelerini ve standartlarını yakından bilmemeleri nedeniyle, bu yazılardan bazıları bilimsel içerik bakımından iyi olmakla birlikte, birçoğu da yetersiz bulunup reddedilmektedir. Bilimsel düzeyi yüksek yazılar ise bazen özgünlük açısından bir kuşku yaratmakta, “Acaba başka yerde yayımlanmış ya da yayımlanacak olabilir mi?” diye düşündürmektedir. Teknik Dergi yazarlarının hepsinden alınan “özgünlük taahhüdü”, doğal olarak yabancı yazarlardan da alınmakta, bu belgenin gereken uyarı mesajını verdiği umulmaktadır.

İki dilli yayın düzenine geçmenin, temel amaçlarından biri de Teknik Dergi'yi uluslararası araştırma ve uygulama çevrelerine ulaştırarak Derginin etki katsayısını (impact factor) yükseltmekti. Bu kadar kısa bir süre içinde anlamlı bir gözlem yapılması beklenemezse de, bu konuda küçük bir artış gözlenmesi umut verici bir işaret olarak yorumlanmaktadır.

Öte yandan, basılı olarak dağıtılmasının yanı sıra, Teknik Dergi uzunca bir süredir elektronik ortamda da ilgilenen çevrelerin bilgisine sunulmaktaydı. Elektronik yayıncılığın giderek yaygınlaştığı göz önünde bulundurularak alınan yeni bir karar doğrultusunda, bu sayıdan başlayarak basılı dergi dağıtımını yalnızca üniversite kütüphaneleri başta olmak üzere, seçilmiş bir liste ile sınırlı olarak yapılacak, bütün İMO üyelerine ve dileyen herkese elektronik ortamda ulaştırılacaktır. Bununla birlikte, kendilerine basılı kopya gönderilmesini istediklerini yazılı olarak bildiren İMO üyeleri dağıtım listesine eklenecektir.

Değerli okurlarımızın, yazarlarımızın ve danışmanlarımızın bilgisine saygılarımızla sunarız...

Yayın Kurulu adına,
Tuğrul Tankut, Editör

LEED Sertifikalı Yeşil Binalarda Enerji ve Su Tasarrufundan Sağlanan Faydaların Taşınmaz Değerine Etkilerinin İncelenmesi

Latif Onur UĞUR¹
Neşe LEBLEBİCİ²

ÖZ

Yeşil binaların inşaat ve işletme maliyetleri ile taşınmaz değeri açısından irdelenmesi amacıyla hazırlanan ve LEED sertifika sistemine göre Türkiye’de altın ve platin sertifika düzeylerinde derecelendirilmiş iki adet bina kapsamında değerlendirilen çalışmada; ilave maliyetlerin, altın sertifikalı binada % 7,43 ve platin sertifikalı binada ise % 9,43 oranında gerçekleştiği, buna karşılık yıllık enerji ve su giderlerinde, sırasıyla % 31 ve % 40 oranında maliyet azalışı olduğu tespit edilmiştir. Diğer faydalar göz ardı edilerek sadece enerji ve su tasarruflarından sağlanan faydaların taşınmaz değeri üzerindeki etkileri incelendiğinde, sertifika sisteminden kaynaklanan ilave yeşil değer, altın sertifikalı binada 242 \$/m² ve platin sertifikalı binada ise 255 \$/m² olabileceği tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil bina, LEED sertifika sistemi, taşınmaz değerlendirme, yeşil değer.

ABSTRACT

Investigation of the Effects of Energy and Water Saving Benefits on Property Value in LEED Certified Green Buildings

In the study prepared for the purpose of evaluating green buildings in terms of construction and operating costs and property value is investigated in scope of two buildings rated at the gold and platinum certificate levels according to the LEED certification system. Additional construction costs have been found as 7,43% and 9,43% respectively, for the gold and the platinum certified buildings. According to the annual energy and water savings, it has been found that cost decrease is 31% for the gold certified building and that of the platinum certified building is 40%. Ignoring other benefits and taking into consideration only the benefits based on energy and water savings, it was predicted that additional green value

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 18 Ocak 2017 günü ulaşımıştır. 17 Nisan 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.312932

1 Düzce Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce - latifugur@duzce.edu.tr

2 Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara - nleblebici@epdk.org.tr

benefited from LEED certification could be 242 \$/m² and 255 \$/m² respectively for the gold and the platinum rated building.

Keywords: Green building, LEED certification system, real estate valuation, green value.

1. GİRİŞ

Literatürde, yeşil bina kavramına yönelik birçok tarif ve anlayışın bulunduğu ve çeşitli terimlerin birbirlerine alternatif olacak şekilde eş anlamlı kullanıldığı görülmektedir. Birleşik Devletler Yeşil Bina Konseyi (USGBC) tarafından yeşil bina; çevresel, sosyal ve ekonomik faydalar arasında sağlıklı ve dinamik bir denge kurulmasını hedefleyen, çevre ve kullanıcı üzerinde ortaya çıkabilecek her türlü olumsuz etkiyi belirgin oranda azaltan binalar olarak tanımlanmaktadır [1]. Türkiye’de 2007 yılında Dünya Yeşil Binalar Konseyi (WGBC) altında kurulan sivil toplum kuruluşu olan Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği (ÇEDBİK) ise yeşil binayı; yapının arazi seçiminden başlayarak yaşam döngüsü çerçevesinde değerlendirildiği, bütüncül bir anlayışla ve sosyal ve çevresel sorumluluk bilinciyle tasarlandığı, iklim verilerine ve yöreye özgü koşullara uygun, ihtiyacı kadar tüketen, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiş, doğal ve atık üretmeyen malzemelerin kullanıldığı, katılımı teşvik eden, ekosistemlere duyarlı ve doğayla uyumlu yapılar olarak tarif etmektedir [2]. Yeşil olmayan binalar ise geleneksel binalar, standart binalar veya kahverengi binalar şeklinde adlandırılmaktadır [1-11].

Uluslararası yeşil bina sertifikalandırma sistemlerinden biri olan ve USGBC tarafından geliştirilen Enerji ve Çevresel Tasarımda Liderlik (LEED) programının amaçları; ölçme standartları oluşturarak yeşil binayı tanımlamak, bütünsel bir bina tasarım yöntemi geliştirmek, yapı sektöründe çevresel liderlik oluşturmak, yeşil rekabeti teşvik etmek, yeşil binanın yararları konusunda tüketici bilincini artırmak ve bina pazarını dönüştürmek olarak belirtilmektedir. Uygulanmaya 2000 yılında başlayan ve sertifikalandırılan alan miktarı giderek artan LEED sistemi, gelişen koşullar ve gereksinimler doğrultusunda güncellenmiş ve yeni sürümleri çıkarılmıştır. 2009 yılında güncellenen LEED v3 sürümüne tabi projeler için 31 Ekim 2016 tarihine kadar kayıt alınmıştır. 2013 yılının sonlarında piyasaya çıkarılan LEED v4, en güncel LEED sürümü olarak yeni LEED online platformunda kayıt için açık durumdadır [1].

LEED v4’ün önceki versiyonlardan farklı olarak; iklim değişikliği gibi çevresel konularda gelişme kaydettiği, enerji ve su kullanımında optimizasyonu desteklediği, bilgi işlem merkezi, depo, dağıtım merkezi, otel/motel, mevcut okul binaları, mevcut ticari binalar ve orta yükseklikte binalar gibi proje tipleri için yeni gereksinimleri ortaya koyduğu, artan teknik kısıtlar üzerine odaklandığı, güvenli materyaller ve ürün şeffaflığına daha fazla önem verdiği, teknolojinin rolünü artıran temel yenilikler getirdiği, işlemleri kolaylaştırmak amacıyla LEED dokümantasyon sürecini daha etkin hale getirecek araçları tanıttığı ve LEED online platformunu daha kullanışlı olacak şekilde geliştirdiği gözlenmektedir [1].

Puan tabanlı bir sistem olan LEED’e göre; sertifikalar farklı bina tipleri, sektör ve proje kapsamına göre, yeni inşaat, ticari mekânlar, konutlar, alışveriş merkezleri, okullar, sağlık binaları vb. olarak çeşitlenmektedir. Sertifika alabilmek için her bir sertifika çeşidine özgü olarak belirlenen ön koşulların yerine getirilmesi ve ilgili kategoride puanların toplanması zorunlu olmaktadır. Örneğin, yeni inşa edilen binaların LEED v3 sürümüne göre sertifika

alabilmeleri amacıyla, LEED v3-Yeni İnşaat olarak sınıflandırılan sertifika çeşidi için belirlenen, beşi esas ve ikisi ekstra olmak üzere toplam yedi kategoriden oluşan kriterleri sağlamaları gerekmektedir. Sürdürülebilir arazi, su verimliliği, enerji ve atmosfer, malzeme ve kaynaklar, iç mekân yaşam kalitesi, inovasyon ve yerel önem sırası olarak sıralanan söz konusu kategorilerin her yapı tipi için bütün içindeki farklılaşan oranları, puan sistemini oluşturmaktadır. Buna göre; ödül puanlar dâhil olmak üzere toplam 110 puan üzerinden yapılan değerlendirme sonucunda, kazanılan puan 40-49 arasında ise sertifikalı, 50-59 arasında ise gümüş, 60-79 arasında ise altın ve 80 üzerinde ise platin olarak adlandırılan sertifikalar verilmektedir [1]. Sayıları giderek artan ve günümüzde geline nokta oldukça önemli bir gündem oluşturan yeşil binalar, çevresel ve sosyal etkilerinin yanı sıra ekonomik avantajları ile de ilgi çekmekte olup, maliyetleri ve sürdürülebilirlik özelliklerinin taşınmaz değeri üzerindeki etkileri bu alandaki başlıca tartışma konularını oluşturmaktadır [3-5].

Klasik-standart binalara göre yeşil binaların değerini ortaya koymak amacıyla yapılan çalışmalar kapsamında; sürdürülebilirliğin taşınmaz değerini artıran özelliklerden biri olarak değerlendirildiği ve doğrudan taşınmaz değerlendirme sürecine dâhil edildiği araştırmalar yapıldığı görülmekte ve bu çalışmaların kalitesini artırmak amacıyla sürdürülebilir verilerin nitelik ve niceliklerinin geliştirilmesine yönelik önlemler alınmasının önem taşıdığı vurgulanmaktadır [5-12].

Yeşil değerlendirme üzerine yapılan bir çalışmada, yeşil binaların değerlendirme süreci; belgeleme, yeşil bina özelliklerinin tanımlanması, emsallerin belirlenmesi, karşılaştırma unsurlarının tespiti ve prim katkılı değer belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Prim katkılı değer belirlenmesinde kullanılan teknikler, Konut Enerji Değerleme Sistemi (HERS) indekslerinin kullanılması, brüt kira çarpanları ile aylık enerji tasarruflarının çarpılması, maliyet değeri ve karşılaştırmalı satış analizi olarak belirtilmektedir [3]. Yeşil bina değerlemesine yönelik metodoloji önerilerinden biri, yeşil değer satış karşılaştırma yöntemindeki gibi analiz edilmesi yoluyla, olumsuz ve olumlu enerji verimliliğine bağlı olarak bina değerindeki azalış ve artışı için, boşa harcanan ve tasarruf edilen enerjinin hesaba katılmasını esas almaktadır. Buna göre, referans alınan bina ile incelemeye konu taşınmaz arasındaki enerji talebi farkı, boşa harcanan ve tasarruf edilen enerjiyi ortaya koymaktadır [6]. Ülkeler ve gayrimenkul tipleri karşısında yeşil değer durumunu ortaya koymak amacıyla Finlandiya, Japonya ve ABD’de yapılan örnek olay incelemeleri sonucunda; Tokyo çalışmasında, yeşil binaların satış fiyatlarının gerçek işlem fiyatlarından sadece çok az bir miktar yüksek olduğu tespit edilmiş ve sürdürülebilirlik nitelikleri için ödeme isteklilikleri ile hane halkı gelirleri arasında kuvvetli bir bağ olduğu ortaya konulmuştur. Finlandiya çalışmasında, kesin bir kanıt bulunamasa da en azından, daha enerji etkin bina ve apartman daireleri için önemli bir fiyat artışı tespit edilmiştir. Araştırmanın en geniş kapsamlı çalışması olan ABD örneğinde, yeşil özellikler, işletme masrafları ve ofis kiralari arasındaki etkileşim en iyi şekilde ortaya konulmuş, panel veriye dayalı olarak altı adet büyük ofis binasına ait işletme masrafları, kiralar ve bina özellikleri incelenmiş ve kiralar üzerinde diğer iki unsurun etkilerinin, yeşillik derecesi ile birlikte arttığı tespit edilmiştir [7]. Gelir, doluluk, işletme giderleri ve riskten oluşan değer dört unsurunun, yeşil binaların değerine de ışık tutacağını kabul eden araştırmacılar tarafından, bu kategorilerin yeşil değerlendirme için de geçerli olacağı belirtilmektedir [8].

Yeşil değere ilişkin önerilen bir diğer metodoloji ile piyasa eğilimleri de hesaba katılarak, enerji tasarruf potansiyeli maliyetinin enerji etkinliği ile oluşan ilave değer

hesaplanmasında ana unsur olarak ele alınması sağlanmaktadır. Bu yönetime göre onbeş adet örnek üzerinde uygulanan yaklaşımlar sonucunda, yeşil binalarda değer artışının % 5 - 10 oranında olabileceği hesaplanmıştır [9]. Sıkça karşılaşılan “sürdürülebilir binalar daha değerli midir” sorusunun cevabını aramak ve sürdürülebilirlikle değer ilişkisini ortaya koymak amacıyla yapılan çalışmalarda, % 28 oranında prim yapan sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür. Arada hiç sebep sonuç ilişkisi bulunmadığını savunan araştırmacıların yanı sıra, sürdürülebilir binaların kazandığı yeşil prim yerine, sürdürülebilir standartlara olan artan talebin karşılanmadığı binalardaki kahverengi indirim üzerinde konuşulması gerektiğini ileri süren araştırmacılar da bulunmaktadır [10]. Yeşil binaların ve sürdürülebilirlik etkisinin gayrimenkul değerlendirme ile ilişkisinin incelendiği bir diğer çalışmada, değerlendirme uzmanları tarafından yeşil binalar ile kahverengi binaların değerlendirilmesinde kullanılması amacıyla üç aşamalı bir sürdürülebilir değerlendirme modeli oluşturulmuştur [11].

Yeşil binaların finansal etkileri üzerine yapılan bir araştırmada, taşınmazın yalnızca ekonomik değerinin olmadığı, aynı zamanda teknik, ekonomik, çevresel, sosyal ve estetik performans kapasitelerine bağlı olarak çevresel, sosyal, kültürel ve imaj değerlerinin de taşınmaz değerine katkıda bulunduğu belirtilmiştir [12]. Türkiye’de yapılan bir çalışmada İzmir’de örnek bir konut için yapılan değerlendirme sonucunda, piyasanın sürdürülebilir odaklı olduğu kabulü ile enerji maliyetinin piyasa değerine % 2,70 etki edebildiği görülmüştür [13]. ABD’de yeşil ofis binalarının geniş bir kesitinin analiz edildiği çalışmada, enerji verimli binalarda ekonomik getirilerin önemli olduğu gösterilmiş ve yeşil binalarda sürdürülebilirliğin yanı sıra enerji kullanım etkinliğine bağlı olarak elde edilen ekonomik getirilerin, kira ve satış değerlerindeki artışa katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. [14]. Enerji verimliliğinin gelire ilişkili taşınmaz değerlendirme yaklaşımlarına entegrasyonuna odaklanan bir başka çalışmada, Alman ofis binalarının kiraları çoklu regresyon analizi uygulanarak incelendiğinde, metrekare başına 0,2 ile 2,0 Euro aralığında, enerji maliyetlerindeki artışın metrekare başına kira değerleri üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı anlamına gelen bir ilgisizlik bölgesi bulunduğu saptanmıştır [15].

Geleneksel binalara kıyasla yeşil binaların maliyetini ortaya koymak için yapılan çalışmalara bakıldığında, yeşil binaların tasarım ve yapım süreçlerinin, çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirecek verimli teknikler uygulanması, geri dönüşümlü malzemeler kullanılması ve daha az su, enerji ve kaynak harcanması gibi özelliklere bağlı olarak, çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan önem taşıdığı vurgulanmıştır [16-22]. Ayrıca, pek çok araştırmada, maliyet ve çevresel stratejiler ile süreç yönetiminin başlangıçtan itibaren proje geliştirme sürecine entegre edildiği durumlarda, tasarım ve inşaat maliyetinin yeşil olmayan binaya göre daha fazla olmadığı belirtilmektedir. Enerji ve su kullanımında elde edilen tasarruf ile uzun dönem işletme ve bakım maliyetlerinde meydana gelen azalma, yeşil binaların gelir getiren özellikleri olarak gösterilmektedir. Sadece enerji tasarrufundan elde edilen faydanın, tasarım ve inşaat maliyetinin makul bir zamanda geri kazanılmasını sağlayacağı ileri sürülmektedir [23-28]. Deneyimsiz öngörülere dayanarak 2000’li yılların başında yapılan araştırmalarda, standart binalara göre % 25’in üzerinde ilave maliyetlerden bahsedilirken, ilerleyen yıllarda daha gerçekçi veriler ile sertifikalandırma maliyetinin endişe duyulan miktardan daha az olduğu belirlenmiştir. Yeşil sertifikalı binaların yeşil sertifikalı olmayan binalarla karşılaştırıldığı birçok araştırmada, yeşil binaların yüksek kira oranları, yüksek satış fiyatları, yüksek doluluk oranları, düşük işletme giderleri, yüksek net işletme gelirleri ve düşük kapitalizasyon oranlarına sahip oldukları ortaya konulmuştur [5-9, 14, 29-34]. Yeşil elementlerin taşınmaz geliştirme sürecine uygulanmasının maliyet ve karşılaşılan zorluklar

açısından değerlendirilmesi amacıyla Çin’de yapılan bir çalışmada, ilave maliyetlerin analiz edildiği üç örnek olay incelemesi ile temel engel olarak kabul edilen yüksek maliyetlerin, geniş kapsamlı yeşil teknoloji uygulamalarını kısıtladığı ortaya konulmaktadır [35].

LEED sertifikalı binalar ile sertifikasız binalarda çevresel kalite ile ilgili olmayan faktörlerin kullanıcı memnuniyeti üzerine etkisi üzerine yapılan çalışmada ise, istatistiksel olarak önemli derecede farklı etkiler tespit edildiği, ancak çoğunlukla bu değişimin etkisinin pratik olarak ihmal edilebilir boyutta olduğu belirtilmektedir [36]. LEED sertifikalı altı adet binanın işletme harcamaları üzerinde yapılan bir diğer çalışmada, su ve enerji tüketimleri referans bina ile karşılaştırıldığında sertifikalı binaların daha iyi performans gösterdikleri ortaya konulmuştur [37].

Yeşil binaların standart binalardan daha nitelikli ve verimli binalar olmaları nedeniyle, değerlendirme açısından farklı ele alınması gerektiği kabul edilmektedir. Böylece, gayrimenkul değerlendirme sürecinde yeni bir bakış açısı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yeşil değerlendirme konusu dünya literatüründe de araştırılmaya devam edilen bir konu olup, henüz yeşil binaların değerlemesi konusunda gelişmiş ülkelerde de kabul edilmiş bir yaklaşım, sistem ve metodoloji bulunmamaktadır. Türkiye’de ise yeşil binalar sektörü henüz gelişmekte olup, bu tür binaların artması ile gayrimenkul değerlemede, yeşil binaların standart binalardan farklı olarak ele alınması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır [38].

USGBC verilerine göre 31 Ocak 2018 tarihi itibarıyla; yeni inşaat grubunda toplam 31283 adet projenin dünya genelinde LEED programına başvurduğu, 5712 adet projenin LEED altın ve 1025 adet projenin ise LEED platin seviyelerinde sertifikalandırıldığı tespit edilmiştir. Türkiye’de ise aynı grupta 241 adet projenin başvuruda bulunduğu, 81 adet projenin LEED altın ve 9 adet projenin ise LEED platin sertifika seviyelerine hak kazandığı belirlenmiştir [39].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Üstün niteliklere sahip yeşil binaları taşınmaz değerlendirme açısından ele almak ve yeşil binaların standart binalardan daha değerli olup olmadığı konusundaki tartışmalara katkı sağlamak düşüncesiyle yola çıkılan bu çalışmada, Türkiye’de iki örnek olay incelenerek, LEED sisteminin inşaat ve işletme maliyetleri ile taşınmaz değeri üzerindeki etkilerinin irdelenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda çalışmanın amaçları; inşaat maliyetlerini ve taşınmaz değerine etkilerini belirlemeye yönelik piyasa araştırması yapmak, sürdürülebilirlik özelliklerini ortaya koymak, ilave maliyetleri belirlemek, gerçekleşen inşaat maliyetlerini ve işletme giderlerini tespit etmek, karlılık analizi kapsamında fayda-maliyet oranlarını belirlemek, Türkiye yeşil bina piyasasındaki gelişmeleri irdelemek, taşınmaz değerine yönelik tahminlerde bulunmak olarak belirlenmiştir.

Çalışma materyali, konu ile ilgili literatür verileri ve saha çalışması olarak örnek alınan binalardan elde edilen verileri kapsamaktadır. Bölüm 1’de yer verilen literatür bilgileri, yerli ve yabancı kurum kaynaklarından detaylı tarama ile araştırılmış, konuyla ilgili olarak yapılan önceki bilimsel araştırmalardan ulaşılabilenler ile süreli yayın, elektronik kaynak, kitap, makale, bildiri, dönem projesi, tez, kanun, yönetmelik, rapor, plan ve yetkili danışmanların kişisel görüşleri çalışma materyalleri olarak belirlenmiş, Ankara’da bulunan ve LEED

sistemine göre altın ve platin kategorilerinde sertifikalandırılmış iki adet bina, çalışmanın ana materyali olarak kabul edilmiştir.

Çalışmanın temel yöntemi ise, veri toplama, alan etüd-analiz çalışmaları, bireysel görüşmeler ve gözleme dayalı örnek olay incelemesi oluşturmaktadır. Bu kapsamda; her iki binaya ilişkin LEED sertifikaları, projeler, yapı ruhsatları, enerji modelleme raporları, erozyon kontrol ve sedimentasyon raporları, muhasebe kayıtları, ödeme faturaları ve benzeri belgeler incelenmiş, binaların yeşil özellikleri yani LEED sertifika sistemlerinde belirtilen gerekli kriterlerin uygulanma şekli ve miktarı yerinde gözlemlenmiş ve bu özellikleri belgeleyen yazılı ve görsel belgeler irdelenmiş, yetkili kişilerle bireysel görüşmeler yapılmış, toplam proje maliyetleri, inşaat maliyetleri ve enerji harcamalarına ilişkin gerçekleşen rakamsal veriler ilgili kayıt sistemlerinden derlenerek, hesaplanmıştır.

Yeşil bina özelliği veren unsurların ayrıştırılması amacıyla, proje geliştirme, sertifikalandırma ve yapım süreçlerinde uygulanan özellikli yatırımların maliyetlerine ilişkin gerçekleşen tutarların, toplam yatırım ve inşaat maliyetleri içindeki payları hesaplanmıştır. Söz konusu ayrıştırmanın yapılmasında duplikasyon yaratmamaya özen gösterilerek, yeşil binaların yeşil olmayan binalara göre ek olarak getireceği maliyet unsurları olabildiğince titiz belirlenmeye çalışılmıştır. Maliyetlerin analizinde, karlılık oranı ve geri ödeme süresi gibi statik yöntemler kullanılmıştır.

Binaların yıllık elektrik, doğal gaz ve su harcamalarına ilişkin veriler, ödeme faturalarından ve kayıt sistemlerinden taranarak, çizelgeler halinde düzenlenmiştir. Her iki binanın enerji modelleme programlarına ilişkin sonuç raporları incelenmiş ve referans alınan bina ile tasarlanan bina verileri elde edilmiştir. Gerçekleşen, tasarlanan ve referans binaya ilişkin elektrik, doğal gaz ve su tüketim miktarları ve maliyetleri karşılaştırmalı olarak çizelgelerle ortaya konulmuştur.

Taşınmaz değerine ilişkin tahminlerde bulunabilmek amacıyla yapılan piyasa araştırması kapsamında; binaların bulunduğu mahalle, cadde ve sokaklarda değerlendirme için emsal teşkil edebilecek taşınmazlar araştırılmış olup, yerel emlak alım-satımı yapan emlak ofisleri, yap-satçılar ve inşaat yüklenicileri ile karşılıklı görüşmeler yapılmıştır. Konu taşınmazların üstün nitelikli binalar olması nedeni ile birebir emsal binaların olmayacağı açıktır. Bu nedenle, konu taşınmazların üstün nitelikleri göz ardı edilerek, yeşil bina özelliği taşımayan, ancak enerji etkinliğine yönelik basit uygulamaların bulunduğu lüks inşaat kalitesindeki taşınmazlar arasından, yakın konum ve benzer yüzölçümleri aranarak, yeni inşa edilmiş komple binaların satış ve kira değerleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, platin sertifikalı bina için üç adet ve altın sertifikalı bina için ise dört adet komple satılık ve/veya kiralık binanın satış ve kira değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, konu taşınmazların yeşil özelliklerine yönelik piyasa algısının ölçülmesi amacıyla, semt sakinleri, emlak ofisleri ve inşaat yüklenicileri ile görüşmeler yapılarak, yorum ve önerileri dikkate alınmış ve böylece yeşil binaların piyasa değerlerine yönelik etkiler genel olarak irdelenmiştir. Diğer yandan, binalarda enerji ve su tasarruflarından sağlanan faydaların etkileri incelenmiş, gelir indirgeme ve maliyet yöntemleri uygulanarak, öngörülerde bulunulmuştur.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde; örnek olay incelemesi kapsamında ele alınan iki adet yeşil binaya ait genel bilgiler, teknik ve mimari özellikler, sürdürülebilirlik kriterleri ile yapım ve kullanım maliyetlerine ilişkin veriler tespit edilerek, taşınmaz değeri üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.

3.1. Genel Özellikler ve Sertifikalandırma Kriterleri Açısından İnceleme

İncelenen her iki binanın da, taşınmaz maliklerinin kendi kullanımları için ve LEED sertifikası hedefine yönelik olarak planlandığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda ihtiyaca özgü proje geliştirildiği, kar amacı düşünülmeden, kullanım rahatlığı, konfor, kalite, sağlık, estetik gibi özellikler gözetilerek ve ihtiyaca maksimum oranda cevap verecek, kurumsal kimlikleri yansıtacak, iyi bir vizyon desteği, imaj ve prestij sağlayacak şekilde, enerji etkin binalar olarak inşa edildiği gözlenmiştir. Proje geliştirme, planlama, inşaat ve sertifikalandırma süreleri paralellik gösteren ve hemen hemen aynı zaman diliminde gerçekleştirilen her iki binanın, kullanım amacı yönünden de benzer özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Her iki bina da, planlama çalışmalarından itibaren ekonomik ve çevresel stratejilerin dikkate alındığı bütüncül bir proje yönetimi ile gerçekleştirilmiş, inşaatları tamamlandıktan hemen sonra kullanılmaya başlanmış ve 2014 yılının Mayıs ayında sertifikalandırılmıştır. Bu amaçla, LEED danışmanlık ve devreye alma hizmetleri alınarak, binaların sertifika şartlarını sağlaması için gerekli planlama, yönlendirme, kontrol ve izlemeler yapılmıştır.

Altın sertifikalı bina; özel bir firmanın bölge idare ve servis binası olarak kullanılması amacıyla planlanmış olup, proje çalışmaları 2011 yılının Ekim ayında, yapımı ise 2012 yılının Temmuz ayında başlamıştır. Bina inşaatının tamamlanması, 2013 yılının Eylül ayında gerçekleşmiştir. Toplam inşaat alanı 4.131 m² olan ve 3.764 m² arsa alanı üzerinde inşa edilen binanın ofis bölümü, zemin altı bir kat olmak üzere toplam 4 katlıdır. Atölye olarak da adlandırılan ve 670 m² üzerine inşa edilen servis alanında ise iş makinalarının satış, bakım ve onarım hizmetleri yapılmaktadır. Sanayi bölgesinde yer alan ve bulunduğu çevrede genel görünümü, boyutları ve yeşil özellikleri ile farklılığı göze çarpan binanın iç mekânında da rahatlık, estetik, kalite ve konfora yönelik uygulamalara yer verildiği gözlenmiştir.

Binanın öne çıkan ve sürdürülebilirlik kriterleri ile LEED altın sertifika standartlarını sağlayan özellikleri; trombe duvarı, yağmur suyu toplama sistemi ve yeşil çatı sistemi olarak sıralanmaktadır. Binanın güney cephesinde trombe duvarı olarak adlandırılan, duvar boyu ve yüksekliğince inşa edilen dar bir camcan sera bulunmaktadır. Doğal havalandırma yoluyla enerji ekonomisi sağlanması amaçlanarak planlanan trombe duvarı, cam sera ile arkasında bulunan ve ısı kütlesi oluşturan beton duvar arasında ısınan havanın, duvarın yukarısında bırakılan deliklerden içeri alınması ve duvarın aşağısında bırakılan deliklerden de binanın içinden soğuk hava akımının sağlanması esasına dayanmaktadır (Şekil 3.1).

Altın sertifikalı binada yağmur suyu yönetimi kapsamında, yeraltı su kaynaklarını ve kalitesini korumak için araziye düşen yağmur suyunun toprağa geçmesini ve toprak tarafından emilmesini sağlamak için, otoparkta delikli taşlar kullanılmıştır. Çatıda depolanan yağmur suyunun, bina içerisinde yeniden kullanılmasına imkan veren depolama ve dağıtım sistemi ile binadaki su kullanımında tasarruf sağlanmaktadır. Peyzajda çevreye uygun ve az

su tüketecek bitkiler seçilmesi ve su tüketimini azaltmak için damla sulama sistemi kullanılması da su tasarrufunu sağlayan özelliklerdir. Yeşil alan kullanımını artırmak amacıyla yapılan yeşil çatı uygulaması ile doğayla bağlantının kurulduğu bir tasarım örneği ortaya konulmaktadır. Görsel estetik, görsel mahremiyet, akustik, gölgeleme, ısı düzenleme, soğutan rüzgarı azaltma, ilave yalıtım, çevre ve hava kalitesini iyileştirme gibi etkilerinin yanı sıra, çatı bahçesinde yaratılan rekreasyon alanının insan sağlığı üzerinde olumlu etkilere neden olduğu ve doğa bilinci oluşmasına katkı sağladığı görülmektedir. Yağmur suyunun yarattığı sorunlara yenilikçi çözümler sunmak amacıyla da hizmet eden yeşil çatı uygulaması ile yoğun yağışlarda yağmur suyu tutularak kanalizasyon ve tahliye sistemlerine binen yükün azaltılması sağlanmaktadır.

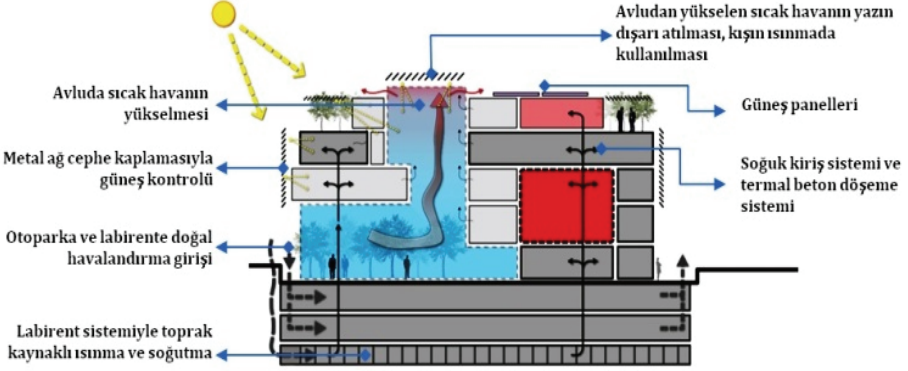


Şekil 3.1 - LEED altın sertifikalı binada trombe duvarı görünümü

Platin sertifikalı bina; bir derneğin yeni ofis ihtiyacı kapsamında geliştirilmiş olup, 2011 yılının Eylül ayında proje çalışmalarına başlanmıştır. Yapımına 2012 yılının Ağustos ayında başlanılan bina, 2013 yılının Ekim ayında tamamlanmıştır. Toplam inşaat alanı 5.397 m² olan ve 1.295 m² arsa alanı üzerinde inşa edilen bina zemin altı üç kat olmak üzere toplam 7 katlıdır. Binanın bulunduğu yerde ve yakın çevresinde, alım-satım bedelleri nispeten yüksek olan konut, işyeri, spor tesisleri ve alışveriş merkezleri gibi lüks yerleşim alanları bulunmaktadır.

Özgün mimari ve tasarımsal yaklaşım özelliği nedeniyle çeşitli ödüllere layık görülen binanın, öne çıkan ve sürdürülebilirlik kriterleri ile LEED platin sertifika standartlarını sağlayan özellikleri; termal labirent sistemi, termal beton döşeme ve soğutma sistemi, soğuk giriş sistemi, iç mekân hava kalitesini artıran havalandırma sistemi ve metal ağ cephe giydirme olarak sıralanmaktadır. Pasif ısıtma ve soğutma teknikleri açısından Türkiye’de ilk kez kullanılan bir sistem olarak ilgi çeken termal labirent sistemi, iç mekân termal konforunun temin edilmesine olanak vermektedir (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3).

Ankara'daki tipik karasal iklim koşullarının göstergesi olan gündüz ve gece arasındaki sıcaklık farkını kullanarak, ısıtma ve soğutmadaki enerji sarfiyatını minimize etmek üzere, üçüncü bir bodrum katı olarak yerleştirilen betonarme labirent, binaya en belirgin sürdürülebilirlik özelliği kazandırmaktadır. Bodrum kattaki taze hava girişlerinden alınan hava, labirent içerisinden geçirilerek, şartlandırıldıktan sonra klima santrallerine iletilmektedir.



Şekil 3.2 - LEED platin sertifikalı binada labirent sistem işleyişinin şematik gösterimi



Şekil 3.3 - LEED platin sertifikalı bina bodrum katının labirent sistemi görünümü

Binanın soğuk giriş sistemi, klima santrallerinden gelen havayı mekâna yaymakta ve ısı konforunu sağlamak için son iklimlendirme kontrollerini yapmaktadır. Metal ağ cephe giydirme özelliği ise, binanın şeffaf bir kabuğa sahip olmasına rağmen enerji modelleri ile test edilerek tasarlanan ve ikinci katman vazifesi gören paslanmaz çelik metal ağ ile çevrilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Mesh olarak adlandırılan sistem, LEED sertifikasyonunda iklimlendirme için büyük avantajlar sağlamaktadır. Mesh sistemi ile güneş yansımaya etkisine ve ışık durumuna bağlı olarak mimari etki çevresel faktörler ile birleştirilmekte ve gün içinde güneşin etkisi azaltılarak iç mekân atmosferi

düzenlenmektedir. Gölgeleme ve güneş kontrolü sağlanarak güneş kaynaklı ısı kazanımının önüne geçilmektedir. Dış etkenlere karşı son derece dayanıklı ve uzun ömürlü olup, hiçbir bakım ve yenileme gerektirmeyen bu sistem, yeni ve farklı bir görsel etki yaratmasının yanı sıra güvenlik konusunda da büyük bir katkı sağlamaktadır.

İncelenen binaların sürdürülebilirlik özelliklerini derecelendiren LEED sertifika sistemine göre alınan puanlar, kategoriler açısından karşılaştırılarak aşağıda özetlenmektedir (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 - Sürdürülebilirlik kriterlerinin niceliksel değerlerinin karşılaştırılması

Sertifika Kategorileri	Puanlama	Aldığı Puan	
		Yeni İnşaat LEEDv3- Altın	Yeni İnşaat LEEDv3-Platin
Sürdürülebilir Arazi	26	22	22
Su Tasarrufu	10	6	10
Enerji ve Atmosfer	35	21	19
Malzeme ve Kaynaklar	14	6	8
İç Mekân Yaşam Kalitesi	15	7	13
İnovasyon	6	4	5
Bölgesel Öncelik	4	4	4
Toplam Puan	110	70	81

LEED sertifika sistemine göre, platin sertifikalı binanın su tasarrufu kategorisinde tam puan alması ile öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca, yenilikçi tasarım örneği uygulamaları ile gerek iç mekân yaşam kalitesi açısından kazandığı puanlar, gerekse tasarımda inovasyon ödül puanları açısından kazandığı ilave puanlar ile platin sertifika seviyesine ulaşmayı başarmıştır. Malzeme ve kaynaklar kriteri de altın sertifikalı binaya göre fark yaratacak şekilde yüksek puan alınan kriter olmuştur. Altın sertifikalı binanın ise en yüksek puanı sürdürülebilir arazi kriterinden aldığı görülmektedir. Arazinin organize sanayi bölgesi içinde olması hem doğal olarak yeşil alanların ve tarım arazilerinin korunmasını ve hem de binanın doğal yaşamı koruma ve yenileme kredisinden tam puan almasını sağlayan bir avantaj olmuştur. Öte yandan, enerji ve atmosfer kriterinden aldığı puanlar ile de öne çıkan binanın ödül puanlarının platin sertifikalı binaya göre düşük olduğu görülmektedir.

3.2. Maliyetler ve İşletme Harcamaları Yönünden İnceleme

İncelenen binaların yeşil bina olarak inşa edilmelerinden kaynaklanan maliyet artışlarının değerlendirilmesi ve enerji etkinlik oranları ile işletme maliyetlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, projeler, keşif özetleri, hak edişler, enerji modelleme programları ve işletme giderlerine yönelik faturalar gibi belgeler incelenmiş ve bina sahibi, proje müdürü, bina işletme sorumlusu, LEED danışmanı, sistem devreye alma ve kontrol uzmanı gibi ilgili kişilerle karşılıklı görüşmeler yapılmıştır. İlave yeşil maliyetlerin belirlenmesi amacıyla, gerçekleşmiş harcamalar esas alınarak binaların yeşil özelliklerinden kaynaklanan maliyetler ayrıştırılmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda, yeşil bina sertifikasını almaya hak kazandıracak

yatırım kalemlerinin neler olduğunun doğru belirlenmesine dikkat edilmiş, ancak bu ayrımı yapmanın kolay olmadığı tespit edilmiştir. Proje geliştirme, yapım ve kullanım maliyetlerine ilişkin verilere erişimde zorluklar bulunduğu, veri paylaşımı konusunda isteksizlik ve çekinceler olduğu da gözlenmiştir. Ayrıca, elektrik, su ve doğal gaz tüketimleri için gerçekleşen yıllık işletme harcamaları tespit edilmiş, ancak bakım, onarım, personel, hizmet tasarruf oranları değerlendirmeye alınmamıştır. Gerçekleşen yıllık işletme harcamaları, enerji modelleme programları kapsamında karşılaştırılmıştır. Enerji modelleme programlarına göre, tasarlanan bina için ASHRAE 90.1 2007 standartları ve referans bina için TSE standardı TS825 esas alınmıştır. Buna göre belirlenen enerji tasarruf oranları, tasarlanan, gerçekleşen ve referans bina bazında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve böylece, enerji etkinliğinin öngörülen ve gerçekleşen oranları tespit edilmiştir.

Binalara yapılan yatırımın toplam maliyetini ortaya koymak için, arazi, tasarım, inşaat, çevre düzenleme, mobilya ve demirbaşlar ile izin-onay bedellerinin toplamından oluşan değer tespit edilmiştir. İnşaat maliyetleri ise, arazi, tasarım, demirbaşlar ve izinler hariç sadece binanın tasarım özelliklerine göre inşa edilmesi için yapılan harcamalar dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.2 - Yeşil maliyetlerin karşılaştırılması

	Altın Sertifikalı Bina	Platin Sertifikalı Bina
Toplam Yatırım Maliyeti (\$)	4.477.609	12.096.553
Toplam İnşaat Maliyeti (\$)	2.877.423	10.257.574
Birim İnşaat Maliyeti (\$/m ²)	697	1.901
Birim Yatırım Maliyeti (\$/m ²)	1.084	2.241
LEED Başvuru ve Sertifika Bedeli (\$)	3.016	3.712
LEED Danışmanlık ve Devreye Alma Bedeli (\$)	10.019	64.476
İlave Tasarım Maliyeti (\$)	11.146	66.222
İlave İnşaat Maliyeti (\$)	189.647	832.998
Toplam Yeşil Bina Sertifikalandırma Bedeli (\$)	213.827	967.408
Birim Yeşil Bina Sertifikalandırma Bedeli (\$/m ²)	51,76	179,25
Toplam Yatırım Maliyeti Oranı (%)	4,78	8
Toplam İnşaat Maliyet Oranı (%)	7,43	9,43

Altın sertifikalı binanın, 2012 yılının Haziran ayında 1.500.000 \$ bedelle satın alınan 3.764 m² yüzölçümündeki arsa üzerinde inşa edildiği ve toplam inşaat alanı 4.131 m² olan binanın toplam yatırım bedelinin, inşaat tamamlanma tarihi fiyatları ile 4.477.609 \$ olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Binanın toplam inşaat alanı üzerinden birim yatırım maliyeti 1.084 \$/m² ve birim inşaat maliyeti ise 697 \$/m² olarak hesaplanmıştır. Altın sertifikalı bina için, değişen maliyetlere ilaveten, trombe duvarı, yeşil çatı sistemi, fotovoltaik panel sistemi, gün ışığı bacaları, güneş kollektörleri, yağmur suyu toplama sistemi, aydınlatma ve

havalandırma otomasyonu gibi LEED sertifika sisteminde puan kazandıran bütün yatırım kalemlerinin maliyeti hesaba dâhil edilmiştir. Buna göre, birim yeşil maliyet 51,76 \$/m² olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.2).

Platin sertifikalı binanın, 2012 yılının Mayıs ayında 1.500.000 \$ bedelle satın alınan 1.295 m² yüzölçümündeki arsa üzerinde, toplam inşaat alanı 5.397 m² olacak şekilde inşa edildiği ve toplam yatırım bedelinin, inşaat tamamlanma tarihi fiyatları ile 12.096.553 \$ olarak gerçekleştiği saptanmıştır. Binanın toplam inşaat alanı üzerinden birim yatırım maliyeti 2.241 \$/m² ve birim inşaat maliyeti ise 1.901 \$/m² olarak hesaplanmıştır. Platin sertifikalı bina için, değişen maliyetlere ilave olarak, termal labirent sistemi, çelik ağ cephe sistemi, soğuk giriş sistemi, yeşil çatı sistemi, fotovoltaiik panel sistemi, gri su arıtma sistemi, güneş kolektörleri, yağmur suyu toplama sistemi, aydınlatma ve havalandırma otomasyonu gibi LEED sisteminde puan kazandıran bütün yatırım kalemlerinin maliyeti hesaba dâhil edilmiştir. Buna göre, toplam inşaat alanı birimine düşen ilave maliyetin bedeli 179,25 \$/m² olarak bulunmuştur (Çizelge 3.2).

Altın sertifikalı binaya ait, bir yıllık gerçekleşen elektrik, doğal gaz ve su tüketim miktar ve tutarlarının belirlenmesi için, ödeme faturaları esas alınarak, 2014 yılı Şubat ayı ile 2015 yılı Ocak ayı arasında gerçekleşen 12 aylık değerlerin dökümü çıkarılmış ve yıllık toplam tüketim miktarları ve toplam tutarları belirlenmiştir. Ayrıca, toplam 1.875 m² iklimlendirme alanı için, HAP v4.5 programı kullanılarak enerji modellemesinin yapıldığı tespit edilmiştir. Söz konusu modelleme verileri kullanılarak yapılan analiz sonucunda, referans bina ile tasarlanan binanın elektrik, doğalgaz ve su harcamalarına ilişkin maliyetleri arasındaki tasarruf oranının % 29, referans bina ile gerçekleşen bina arasındaki tasarruf oranının ise % 31 olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleşen yıllık elektrik, doğal gaz ve su kullanımına ilişkin maliyetlerin, referans binaya göre % 31 oranında daha tasarruflu olduğu ve bu tasarruf değerinin toplam 15.398 \$/yıl olduğu ortaya konulmuştur. Elektrik tüketim miktarı referans binaya göre % 46 azalırken, maliyetinde de % 46 azalma olduğu tespit edilmiştir. Su ve doğalgaz değerleri, modellemedeki sapma nedeniyle, tasarruf oranını negatif vermektedir. Bu nedenle, elektrik ve doğal gazın tüketim değerleri birlikte değerlendirildiğinde, toplam % 30 tasarruf oranı hesaplanmaktadır. Elektrik ve doğal gaz maliyetlerinin toplamında ise % 38 tasarruf sağlanmıştır. Dolayısıyla bu binada doğal gaz ve su kullanımına ilişkin sistemlerde kalibrasyon gerektiği değerlendirilerek, bu haliyle elektrik, doğal gaz ve su kullanımlarından kaynaklanan toplam tüketim değerlerinin referans binaya göre % 12 oranında tasarruf sağladığı belirlenmiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3 - Altın sertifikalı binanın yıllık işletme harcamaları karşılaştırması

	Gerçekleşen		Tasarlanan		Referans Bina	
	Tüketim	Tutar (\$)	Tüketim	Tutar (\$)	Tüketim	Tutar (\$)
Elektrik	161.346 kWh/yıl	18.969	177.000 kWh/yıl	20.809	300.000 kWh/yıl	35.271
Doğal Gaz	135.462 kWh/yıl	6.212	131.000 kWh/yıl	6.007	127.000 kWh/yıl	5.559
Su	1.943 m ³ /yıl	9.186	1.750 m ³ /yıl	8.274	1.890 m ³ /yıl	8.935
Toplam		34.367		35.090		49.765

Platin sertifikalı binaya ait bir yıllık gerçekleşen elektrik, doğal gaz ve su tüketim miktar ve tutarlarının belirlenmesi için, bilgisayar kayıtları esas alınmıştır. Bu amaçla, 2014 yılı Şubat ayı ile 2015 yılı Ocak ayı arasında gerçekleşen 12 aylık değerlerin dökümü çıkarılmış ve yıllık toplam tüketim miktarları ve toplam tutarları belirlenmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi amacıyla, gerçekleşen, tasarlanan ve referans binaya ilişkin elektrik ve doğal gaz tüketim miktarları ve maliyetleri karşılaştırılmıştır. Öte yandan, toplam 3.194 m² iklimlendirme alanı için, Design Builder programı kullanılarak enerji modellemesinin yapıldığı tespit edilmiştir. Buna göre, referans bina ile tasarlanan binanın elektrik, doğalgaz ve su harcamalarına ilişkin maliyetleri arasındaki tasarruf oranı % 40 iken, referans bina ile gerçekleşen bina arasındaki tasarruf oranının % 38 olduğu ortaya konulmuştur. Doğal gaz tüketimine ilişkin gerçekleşen değerlerin tasarlanan binaya göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak sapmanın fazla olmadığı ve gerçekleşen değerlerin referans alınan bina değerlerinden düşük olduğu dikkate alındığında, bu farkın işletme yönetiminden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Binada kullanılan yıllık elektrik, doğal gaz ve su maliyetlerinde referans binaya göre % 40 azalma olduğu tespit edilmiştir. Buna göre; binada elektrik, doğal gaz ve su kullanımından toplam 27.715 \$/yıl'lık bir tasarruf elde edildiği ortaya konulmuştur. Binada kullanılan yıllık elektrik ve doğal gaz miktarları toplamı, referans binaya göre % 37 azalırken, maliyetlerinde de % 39 azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, binada kullanılan yıllık su miktarı toplamı referans binaya göre % 50 azalırken, maliyetlerinde de % 50 azalma olduğu belirlenmiştir. Böylece, binanın LEED sertifikalandırma sisteminde su tasarrufu kriterinden tam puan almasını sağlayan özellikleri gerçekleştirdiği gözlenmiş ve labirent ve soğuk giriş sistemi gibi fark yaratan özellikleri sayesinde enerji tasarrufuna yönelik iyileştirmelerin hayata geçirildiği tespit edilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 - Platin sertifikalı binada yıllık işletme harcamaları karşılaştırması

	Gerçekleşen		Tasarlanan		Referans Bina	
	Tüketim	Tutar (\$)	Tüketim	Tutar (\$)	Tüketim	Tutar (\$)
Elektrik	185.237 kWh/yıl	28.351	214.000 kWh/yıl	32.753	310.000 kWh/yıl	47.446
Doğal Gaz	244.199 kWh/yıl	10.722	145.000 kWh/yıl	6.367	373.000 kWh/yıl	16.378
Su	636 m ³ /yıl	3.007	842 m ³ /yıl	3.981	1.263 m ³ /yıl	5.971
Toplam		42.080		43.101		69.795

Özetle; gerçekleşen maliyetler kapsamında yapılan değerlendirme sonucunda, LEED altın sertifikası alan binada toplam inşaat maliyetlerinin % 7,43'ü oranında ilave maliyet artışı olduğu ortaya konulmuştur. LEED platin sertifikalı binada ise bu oran % 9,43 olarak belirlenmiştir. Literatürde belirtilen oranlarla karşılaştırıldığında ve Türkiye'nin henüz gelişmiş bir yeşil bina piyasasına sahip olmadığı da göz önünde bulundurulduğunda, belirlenen bu oranların makul ölçülerde olduğu kabul edilmektedir. Birim maliyetler karşılaştırıldığında, platin sertifikalı binada yeşil unsurların birim maliyetinin altın sertifikalı binaya göre 3,46 kat fazla olduğu belirlenmiştir. Böylece, sertifika derecesinin maliyet artışına sebep olduğu da ortaya konulmuştur. İşletme giderleri kapsamında yapılan

değerlendirme sonucunda ise, birim kullanım alanına düşen yıllık işletme masrafları tasarruf tutarında altın sertifikalı bina ile platin sertifikalı bina arasında 1,38 kat fark olduğu tespit edilmiştir. Böylece, yüksek sertifika derecesine sahip olmanın, işletme masraflarından daha fazla tasarruf sağlanmasında etkili olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Taşınmaz Değeri Açısından İnceleme

Bu bölümde, örnek alınan binaların sürdürülebilirlik özelliklerinin taşınmaz değerine katkısını ortaya koyabilmek amacıyla, doğrudan ölçülemeyen ve değeri etkileyen dolaylı, gizli veya ek yararlar göz ardı edilerek, sadece enerji etkinliğine ilişkin mevcut sayısallaştırılabilen sürdürülebilirlik verilerinden en önemli kalemi oluşturan yıllık elektrik, doğal gaz ve su maliyetlerinin taşınmaz değerine etkisi incelenmiştir.

Literatür verilerinin derlenmesi çalışmaları kapsamında, sürdürülebilirliğin değeri olarak ifade edilen yeşil değer, yeşil/enerji etkin bina tarafından piyasada elde edilebilir net ek değer olarak tanımlandığı görülmektedir. Sürdürülebilir özelliklerin değerlemeye katılması fikrinin temelinde, gayrimenkul değerlemesinde genellikle göz ardı edilen işletme maliyetinin yer aldığı ortaya konulmaktadır [5]. Buna göre, mal sahibi veya proje geliştirici ile görüşmeler yapılarak, bina planı ve teknik özellikleri, harcama faturaları veya enerji modelleme sonuçları, yeşil bina sertifika raporları, işletme ve bakım planları, yeşil özelliklerin zarar riski gibi bilgilerin derlenmesi gerektiği belirtilmektedir [11].

Binalara yeşil niteliği kazandıran yatırımların taşınmaz değerinde meydana getirmesi beklenen artışı ortaya koymak için kullanılan teknikler; yapım sürecinde ortaya çıkan ilave tasarım ve inşaat maliyetlerinin ayrıştırılması, enerji tasarruf maliyetlerinin kapitalize edilmesi ve enerji tasarruf maliyetlerinin brüt gelir çarpanı ile çarpılması olarak belirlenmiştir [3, 9, 13]. İlave maliyetlerin ayrıştırılması Bölüm 3.2'de yapıldığı için, bu bölümde diğer yöntemlerle elde edilen değerlere yer verilmiştir.

3.3.1. Enerji Tasarruf Maliyetlerinin Kapitalize Edilmesi Tekniği

İlave tasarım ve inşaat maliyetlerinin kapitalize edilmiş enerji tasarruf maliyetleri ile karşılaştırılması tekniği kullanılarak, yapım sürecinde ortaya çıkan ilave maliyetlerin binaların kullanım süreçlerinde elde edilen tasarruf miktarları ile karşılaştırılması ve böylece elde edilen faydaların maliyetlere yansıtılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, enerji tasarruflarının kapitalizasyonu için [9]'a benzer şekilde bugünkü değer formülü kullanılmıştır.

$$BD = A \times [(1+f)^n - 1] / [(1+f)^n \times f] \quad (1)$$

Formülde;

BD: Bugünkü Değer (\$)

A: Yıllık Tasarruf Maliyeti (\$/Yıl)

f: Yıllık İndirgeme Oranı (%)

n: Ekonomik Ömür (Yıl)

Kapitalize edilmiş tasarrufların değerinin belirlenmesinde; doğal gaz, elektrik ve su birim fiyatlarındaki artış oranları göz ardı edilmiş, indirgeme oranı % 8 olarak alınmış, ekonomik ömür 20 yıl kabul edilmiştir. Buna göre, altın sertifikalı bina için 15.398 \$ olarak bulunan yıllık enerji tasarruf tutarının bugünkü değeri;

$$BD = 15.398 \times [(1,08)^{20}-1] / [(1,08)^{20} \times 0,08] = 15.398 \times 9,818 = 151.177,56 \$ \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Altın sertifikalı bina için, yıllık enerji tasarruf tutarının birim inşaat alanına düşen değeri 3,73 \$/m² ve bu değer 20 yıllık bugünkü değeri 36,60 \$/m² olarak hesaplanmıştır. Enerji tasarruflarının bugünkü değeri ile bütün ilave yatırımları kapsayan maliyetlerin birim değeri olan 51,76 \$/m² karşılaştırıldığında, geri ödeme süresi 0,41 yıl olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, altın sertifikalı binada sürdürülebilirlik özelliklerini sağlamak için yapılan ilave maliyetlerin sadece enerji ve su tasarrufundan sağlanan fayda ile 0,41 yılda geri kazanıldığı ortaya konulmuştur. Enerji tasarruflarından sağlanan fayda hesaba katıldığında, ilave harcamalara ait ilk yatırım bedelinin birim net bugünkü değerinin 15,16 \$/m²'ye düştüğü tespit edilmiştir (Çizelge 3.5).

Benzer şekilde platin sertifikalı bina için yapılan analizde, 27.715 \$ olarak bulunan yıllık enerji tasarruf tutarının bugünkü değeri;

$$BD = 27.715 \times [(1,08)^{20}-1] / [(1,08)^{20} \times 0,08] = 27.715 \times 9,818 = 272.105,87 \$ \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Platin sertifikalı bina için, yıllık enerji tasarruf tutarının birim inşaat alanına düşen değeri 5,14 \$/m² ve bu değer 20 yıllık bugünkü değeri 50,42 \$/m² olarak hesaplanmıştır. Enerji tasarruflarının bugünkü değeri ile bütün ilave yatırımları kapsayan maliyetlerin birim değeri olan 179,25 \$/m² karşılaştırıldığında, geri ödeme süresi 2,56 yıl olarak belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, platin sertifikalı binada sürdürülebilirlik özelliklerini sağlamak için yapılan ilave maliyetlerin sadece enerji tasarrufundan sağlanan fayda ile 2,56 yılda geri kazanıldığı ortaya konulmuştur. Enerji tasarruflarından sağlanan fayda hesaba katıldığında, ilave harcamalara ait ilk yatırım bedelinin birim net bugünkü değerinin 128,83 \$/m²'ye düştüğü tespit edilmiştir (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 - İncelenen binalar için fayda-maliyet analizi

	Altın Sertifikalı Bina		Platin Sertifikalı Bina	
	\$	\$/m ²	\$	\$/m ²
İlave Maliyet Tutarı	213.828	51,76	967.408,29	179,25
Yıllık Tasarruf Tutarı	15.398	3,73	27.715	5,14
Yıllık Tasarrufun Bugünkü Değeri	151.177,56	36,6	272.105,87	50,42
İlave Maliyetin Net Bugünkü Değeri	62.650,44	15,16	695.302,42	128,83
Fayda/Maliyet Oranı	2,41		0,39	
Geri Ödeme Süresi (Yıl)	0,41		2,56	

Platin sertifikalı binada toplam inşaat alanı birimine düşen yıllık işletme masrafları tasarruf tutarının, altın sertifikalı binadan 1,38 kat fazla olduğu görülmektedir. Sadece enerji ve su tasarruflarının hesaba katıldığı, verimlilik ve sağlık gibi ölçülemeyen faydaların yanı sıra işletme ve bakım hizmetlerinden sağlanacak faydaların etkisinin daha da yüksek olduğu dikkate alınır, hesaplanan geri ödeme sürelerinin kısılacağı ve fayda/maliyet oranlarının yükseleceği değerlendirilmektedir. Böylece, altın sertifikalı bina inşa etmenin platin sertifikalı binaya göre daha az ilave maliyet gerektirdiği ve tasarruf tutarlarının bugünkü değeri dikkate alındığında söz konusu ilave maliyetlerin altın sertifikalı binada daha kısa sürede geri kazanıldığı, dolayısıyla altın sertifikalı bina inşa etmenin daha karlı bir yatırım olduğu sonucuna varılmaktadır. Dünyadaki ve Türkiye'deki altın sertifikalı bina sayılarının daha fazla olmasının da bu sonucu desteklediği düşünülmektedir (Çizelge 3.5).

Konuyla ilgili olarak daha önce yapılmış çalışmalarda belirlenen oranlarla karşılaştırıldığında ve Türkiye'nin henüz gelişmemiş bir yeşil bina piyasasına sahip olduğu da göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada elde edilen bulguların makul ölçülerde olduğu düşünülmektedir.

3.3.2. Brüt Kira Çarpanı Tekniği

Bu yöntemde, yeşil özelliklerin sağladığı faydaların bina değerlerine katkısının belirlenmesi amacıyla, piyasanın sürdürülebilirliğe ilişkin farkındalığının belirlenmesi hedeflenerek, öncelikle piyasa araştırması yapılmıştır. Bu kapsamda, incelenen taşınmazların bulunduğu bölgede taşınmaz piyasasında sürdürülebilirlik ve enerji etkinliği farkındalığının oluşmadığı gözlenmiştir. Binaların yeşil özelliklerinin piyasaya uyum sağlayabilme yeteneğinin henüz gelişmediği tespit edilmiştir. Söz konusu taşınmazların bulunduğu yakın çevrede potansiyel alıcıların yeşil özelliklere ilişkin bir talebinin olmadığı, çoğu binalarda enerji etkinliğine yönelik basit uygulamaların dahi bulunmadığı tespit edilmiştir. Böylece piyasanın yeşile prim vermeyen piyasa olduğu belirlenmiştir. Ancak, yine de yaklaşık bir çıkarımda bulunabilmek amacıyla standart binaların satış ve kira değerlerine yönelik incelemeler yapılarak tespit edilecek brüt kira çarpanının düzeltilerek kullanılması hedeflenmiştir.

Platin sertifikalı bina için yapılan piyasa araştırmasında, öncelikle komple satılık ofis binaları olup olmadığı incelenmiş, halen satışta olan üç adet binanın talep edilen satış ve kira değerleri tespit edilmiştir. Diğer yandan, kıyasen kullanmak üzere lüks konut satışlarına ilişkin veriler de incelenmiştir. İncelenen taşınmaz ile yaş ve konum gibi özelliklerin yanı sıra ısıtma enerjisi etkinliği gibi basit enerji tasarrufu amaçlı özellikler açısından benzer gayrimenkuller araştırılmıştır. Duvar, pencere ve çatı yalıtımı bulunan, sıcak su kollektörleri olan, tasarruflu armatürler gibi malzemeler kullanılan ve lüks inşaat niteliği taşıyan binaların satış ve kira değerleri belirlenmiştir. Bu araştırmalar sonucunda elde edilen piyasa verilerine göre, ortalama birim satış değerinin 1.929,16 \$/m² ve ortalama yıllık birim kira değerinin ise 68,29 \$/m² olduğu tespit edilmiştir. Buna göre brüt kira çarpanı, [9]'a benzer şekilde;

$$\text{Brüt Kira çarpanı} = \text{Satış Fiyatı (\$)} / \text{Brüt Kira (\$)} \quad (2)$$

formülü kullanılarak 28,25 olarak hesaplanmıştır. Ancak, yeşile odaklı piyasa yapısının oluşmamış olması nedeniyle, bulunan bu değerlerde düzeltme yapılması amacıyla bazı katsayıların kullanılması gerektiği değerlendirilmiştir. [9]'a göre, piyasa eğilimlerini de

hesaba katarak enerji tasarruf potansiyeli maliyetinin, enerji etkinliği ile oluşan ilave değer in hesaplanmasında ana unsur olarak ele alınması sağlamak amacıyla, Ağırlıklandırılmış Düzeltme Faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Buna göre, Ağırlıklandırılmış Düzeltme Faktörü;

$$WAF = MAR \times ECSP \times VEA \quad (3)$$

olarak formüle edilmiştir.

Formülde;

WAF: Ağırlıklandırılmış Düzeltme Faktörü

MAR: Piyasa Düzeltme Oranı

ECSP: Enerji Maliyeti Tasarruf Potansiyeli

VEA: Değerleme Tahmin Düzeltmesi

Enerji maliyeti tasarruf potansiyeli ise yine [9]'a benzer şekilde;

$$ECSP = \text{Yıllık Enerji Tasarruf Maliyeti (\$)} / \text{Yıllık Piyasa Kirası (\$)} \quad (4)$$

olarak formüle edilmiştir.

Sürdürülebilir odaklı bir piyasa olmamasına rağmen, [13]'e benzer şekilde, enerji maliyetinin değere olan etkisinin net olarak ortaya konulabilmesi için MAR ve VEA değerleri % 100 olarak alınmıştır. Buna göre; LEED platin sertifikalı bina için piyasa araştırması ile 68,29 \$/m² olarak tespit edilen yıllık ortalama birim kira emsal alınarak, ECSP = 27.715 / 218.528 = 0,1268 olarak bulunmuştur.

Ağırlıklandırılmış düzeltme faktörü olarak aylık ortalama piyasa kirasına artırıcı etki olarak yansıtıldığında ise tespit edilen ortalama birim kiranın 76,95 \$/m² olarak düzeltilmesi gerekeceği değerlendirilmiştir. Bu durumda, LEED platin sertifikalı binanın kira priminin % 12,68 olduğu da söylenebilecektir.

Diğer yandan; piyasa verilerine göre elde edilen ortalama birim satış değerlerinde de düzeltme yapılması gerektiği düşünülmektedir. Bu amaçla; [13]'de belirtilen, yeşil binaların daha düşük sürdürülebilirlik riskine maruz kalmaya eğilim göstermesi nedeniyle kapitalizasyon oranının düşürülmesi gerektiği esası dikkate alınarak, benzer şekilde bu etki brüt kira çarpanının yükseltilmesi olarak yansıtılmıştır. Ancak, inceleme yapılan piyasanın sürdürülebilir odaklı olmaması yani yeterli sayıda yeşil bina bulunmaması, piyasa kanıtlarının yetersiz olması, brüt kira çarpanının düzeltilmesinde temkinli davranılması gerektiği bilinciyile tamamen tahmine dayalı olarak düzeltme oranları kullanılmıştır.

Buna göre brüt kira çarpanı, sertifika seviyesinin yüksek olması da göz önünde bulundurularak yapılan tahminle, 1,25 puan artırılmasının uygun olacağı öngörülmüş ve 29,50 olarak kabul edilmiştir.

[3]'e göre, yıllık enerji tasarruf tutarlarının brüt kira çarpanı ile çarpılması ile yeşil değer elde edilebilecektir. Buna göre, LEED platin sertifikalı bina için 27.715 \$ olarak bulunan yıllık enerji tasarruf tutarının brüt kira çarpanı ile çarpılması sonucunda yeşil değer, 817.593 \$ olarak bulunmuştur. Diğer bir deyişle, LEED platin sertifikalı binanın toplam kullanım alanı

için birim yeşil değer 255 \$/m² olarak hesaplanmıştır. Bulunan yeşil değer, standart bina ile yeşil bina arasındaki enerji ve su tasarrufundan sağlanan faydaların yarattığı değer farkıdır. Diğer faydalardan sağlanan kazanç ile birim yeşil değer daha da artacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, gerçekleşen ve standart bina işletme giderlerine ilişkin veriler kullanılarak, potansiyel net gelir üzerinden hesaplandığında ise birim yeşil değer 1.802 - 1.313 = 489 \$/m² olabileceği tahmin edilmiştir (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6 - LEED platin sertifikalı binaya ilişkin piyasa değeri tahmini

	Standart Bina	Yeşil Bina
Toplam Kiralanabilir Alan (m ²)	3.200	3.200
Birim Kira (\$/m ²)	68,29	76,95
Yıllık Brüt Kira (\$)	218.528	246.243
Yıllık İşletme Masrafları (\$)	69.795	42.080
Yıllık Potansiyel Net Gelir (\$)	148.733	204.163
Brüt Kira Çarpanı	28,25	28,25
Piyasa Değeri (\$)	4.201.707	5.767.605
Piyasa Değeri (\$/m ²)	1.313	1.802

Çizelge 3.7 - LEED altın sertifikalı binaya ilişkin piyasa değeri tahmini

	Standart Bina	Yeşil Bina
Toplam Kiralanabilir Alan (m ²)	1.875	1.875
Birim Kira (\$/m ²)	46,3	54,51
Yıllık Brüt Kira (\$)	86.813	102.204
Yıllık İşletme Masrafları (\$)	49.765	34.367
Yıllık Potansiyel Net Gelir (\$)	37.048	67.837
Brüt Kira Çarpanı	29	29
Piyasa Değeri (\$)	1.074.378	1.967.283
Piyasa Değeri (\$/m ²)	573	1.049

Benzer şekilde, LEED altın sertifikalı bina için piyasa araştırması ile 46,30 \$/m² olarak tespit edilen yıllık ortalama birim kira emsal alınarak, $ECSP = 15.398 / 86.813 = 0,1774$ olarak bulunmuştur. Ağırlıklandırılmış düzeltme faktörü olarak aylık ortalama piyasa kirasına artırıcı etki olarak yansıtıldığında ise tespit edilen ortalama birim kiranın 54,51 \$/m² olarak düzeltilmesi gerekeceği değerlendirilmiştir. Bu durumda, altın sertifikalı binanın kira priminin % 17,74 olduğu da söylenebilir. Diğer yandan, araştırılan birim satış ve kira değerlerine göre brüt kira çarpanı 29 olarak bulunmuş, sertifika seviyesi de dikkate alınarak düzeltilmiş brüt kira çarpanı yarım puan artırılarak 29,50 olarak kabul edilmiştir. Yeşil değer;

15.398 \$ olarak tespit edilen yıllık enerji tasarruf tutarının düzeltilmiş brüt kira çarpanı ile çarpılması sonucunda, 454.241 \$ veya 242 \$/m² olarak hesaplanmıştır. Gerçekleşen ve standart bina işletme giderlerine ilişkin veriler kullanılarak, potansiyel net gelir üzerinden hesaplandığında ise, altın sertifikalı bina için birim yeşil değerin 1.049 - 573 = 476 \$/m² olabileceği tahmin edilmiştir (Çizelge 3.7).

Sonuç olarak, örnek alınan binaların maliyetlerinin taşınmaz değeri üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla karşılaştırıldığında, birim inşaat alanı için tespit edilen ilave maliyetin birim kullanım alanı için tahmin edilen yeşil değere oranının; altın sertifikalı binada 1:4,68 ve platin sertifikalı binada ise 1:1,42 olabileceği kanaatine ulaşılmıştır.

3.3.3. Maliyet Yaklaşımı

Taşınmazların maliyet yaklaşımı ile değerlemesinde, mevcut yıpranma payı tabloları yeşil binaları yansıtmadığı için, efektif yaşın ekonomik ömre bölünmesi ile bulunan yıpranma payı kullanılmıştır. Daha dayanıklı malzemeler, özel tasarım ilkeleri ve inşaat teknikleri uygulanan yeşil binaların standart binalardan daha uzun ekonomik ömrü olduğu dikkate alınarak ekonomik ömür 60 yıl olarak belirlenmiştir. Her iki bina da yeni inşa edilmiş olduğu için efektif yaşları 1 ve yıpranma payları 1/60 olarak alınmıştır.

Toplam inşaat alanları dikkate alınarak hesaplanan maliyet değerleri incelendiğinde, LEED platin sertifikalı bina ile LEED altın sertifikalı binanın maliyet değerleri arasında 2,68 kat fark bulunduğu görülmektedir (Çizelge 3.8). Maliyet değerlerinin piyasa değerlerinden az olması yaygın durum iken, maliyet değerlerinin yukarıda tahmin edilen piyasa değerlerinden yüksek olmasının, tahminlere yansıtılan sürdürülebilirlik etkisinin artırılmasını gerektirebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, enerji etkinliğinin maliyet yöntemi yaklaşımıyla bütünleşmesini sağlamak amacıyla piyasa etkisini yansıtan düzeltmeler yapılması gerektiği değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.8 - İncelenen Binaların Maliyet Değeri

	LEED Altın Sertifikalı Bina		LEED Platin Sertifikalı Bina	
	\$	\$/m ²	\$	\$/m ²
Toplam İnşaat Maliyeti	2.877.423	697	10.257.574	1.901
Yıpranma Miktarı	47.957	12	170.960	32
Binanın Maliyet Değeri	2.829.466	685	10.086.614	1.869
Arsa Değeri	1.500.000	399	1.500.000	1.158
Taşınmazın Maliyet Değeri	4.329.466	1.083	11.586.614	3.027

Ancak, incelenen taşınmazların bulunduğu piyasada yeşil bina özelliklerine ilişkin algı oluşmadığı için piyasanın belirlediği bir etki gözlenememiştir. Sadece, emlak komisyoncuları ve inşaat yüklenicilerinden edinilen spekülasyon bilgileriyle piyasa etkisi değerlendirilmiştir. Sürdürülebilir odaklı olmayan piyasa yapısı nedeniyle, yeşil bina

özelliklerinin maliyetinin değere ne derece yansıtacağı konusunda belirsizlikler bulunduğu, piyasa talebi oluşmadığı ve ödeme istekliliği ölçülemediği için, maliyet değerinin piyasa değerinin üzerinde olması durumu, piyasanın değerlendiremediği gereksiz veya aşırı unsurlar anlamına gelen süperyeterlik etkisi olarak açıklanmıştır.

Yeşil binalarda maliyet yaklaşımı kullanmanın en büyük dezavantajı, yeşil özelliklerin yararlarının ve bu yararların bina değeri üzerindeki etkilerinin göz ardı edilebilmesidir. Bu nedenle, yeşil bina değerlendirme uzmanları tarafından bu yaklaşım kullanılırken, süperyeterlik ihtimali dikkate alınmalıdır [11].

4. SONUÇ

Günümüzde gelinen noktada, yeşil bina piyasaları olgunlaşmış olan ülkelerde yapılan çalışmalar ile yeşil binaların standart binalardan daha pahalı olmadığına ortaya konulduğu, öte yandan giderek önem kazanan enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik kriterlerinin bina değerini belirleyen ve tanımlayan temel kriterler arasında yer almaya başladığı ve yeşil binaların piyasa değerinin daha açık ve net bir şekilde tarif edilebildiği görülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalara katkı sağlamak amacıyla ve yeşil binaların taşınmaz değeri açısından ele alınması hedeflenerek hazırlanan bu çalışmada, LEED sertifikalandırma sistemi kapsamında altın ve platin derecelerinde sertifika almış iki örnek bina incelenmiş ve aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Çalışma sonucunda;

- LEED yeşil bina sertifikalandırma sisteminin, toplam inşaat maliyetleri üzerinde, altın sertifikalı binada % 7,43 oranında ve platin sertifikalı binada ise % 9,43 oranında ilave maliyet getirdiği, buna rağmen enerji ve su tasarrufu sayesinde, altın sertifikalı binada yılda % 31 ve platin sertifikalı binada ise % 40 oranında maliyet azalışı olduğu belirlenmiştir.
- LEED sertifika sisteminin öngördüğü sürdürülebilirlik özelliklerinin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi hedefine yönelik önlemler ve adımların, binaların toplam proje maliyetlerinin yükselmesine neden olduğu, buna rağmen işletme masraflarından sağlanan faydanın da arttığı gözlenmiştir. Sertifika derecesine göre proje maliyetlerinin arttığı açıkça görülmüş, platin sertifikalı binanın toplam proje maliyetinin önemli derecede yüksek olduğu belirlenmiş ve altın sertifikalı bina ile platin sertifikalı binanın birim inşaat maliyetleri arasında 2,73 kat fark olduğu saptanmıştır. Altın sertifikalı bina ile kıyaslandığında, platin sertifikalı binada birim ilave maliyet 3,46 kat artarken, birim kullanım alanına düşen yıllık işletme masraflarından sağlanan tasarruf miktarının da 1,38 kat arttığı tespit edilmiştir.
- Verimlilik ve sağlık, iç mekân kalitesinde artış, çevrenin korunması gibi ölçülmesi zor faydalar da dâhil diğer faydalar hesaba katılmadan sadece, işletme dönemindeki enerji ve su kullanımlarından elde edilen tasarrufların bugünkü değeri dikkate alındığında ve ilave yeşil maliyetler üzerinden değerlendirildiğinde, birim fayda maliyet oranlarının altın sertifika alan binada 2,41 ve platin sertifika alan binada ise 0,39 olduğu ortaya konulmuştur.

- İşletme dönemi kazançlarının bugünkü değeri dikkate alındığında ve maliyetlerin değer üzerindeki etkileri kapsamında değerlendirildiğinde yeşil değer, altın sertifikalı bina için 242 \$/m² ve platin sertifikalı bina için ise 255 \$/m² olabileceği tahmin edilmiştir. Birim kullanım alanı için tespit edilen ilave maliyetin birim kullanım alanı için tahmin edilen yeşil değere oranının; altın sertifikalı binada 1:4,68 ve platin sertifikalı binada ise 1:1,42 olabileceği kanaatine ulaşılmıştır.
- Bu şekilde öngörülen yeşil değer, diğer faydalar göz ardı edilerek sadece enerji ve su tasarruflarına dayalı faydaların dikkate alındığı bir tahmin olduğu vurgulanarak, diğer fonksiyonel, çevresel, sosyal ve estetik performanslardan kaynaklanan faydaları da yansıtacak gerçek piyasa değerini, ödeme istekliliği ve piyasa talebinin belirleyeceği ve tahmin edilen bu değerlerin daha da yükselebileceği değerlendirilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar, dönem projesi olarak kabul edilen çalışma kapsamında geliştirilen bu makalenin gerçekleştirilmesinde katkılarından dolayı, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gayrimenkul Geliştirme ve Yönetimi Anabilim Dalına ve incelenen binalara ilişkin verilerin temin edilmesinde yardım ve desteklerini esirgemeyen yetkili kişilere (bina sahipleri, LEED danışmanları, inşaat yapımcıları, sistem devreye alma ve kontrol uzmanları gibi) teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] LEED | U.S. Green Building Council, Web Sitesi: <http://www.usgbc.org/leed>
- [2] ÇEDBİK | Çevre Dostu Yeşil Binalar Derneği, Web Sitesi: <http://www.cedbik.org/>
- [3] Adomatis, S. K., Valuing High Performance Houses, The Appraisal Journal, 78, 2, 195-201, 2010.
- [4] Bullier, A., Sanchez, T., Teno, J.F., Carassus, J., Ernest, D. ve Pancrazio, L., Assessing Green Value: A Key to Investment in Sustainable Buildings, European Council for An Energy Efficient Economy, Summer Study, 2011.
- [5] Fuerst, F. ve Mcallister, P., Green Noise or Green Value? Measuring the Effects Environmental Certification on Office Values, Real Estate Economics, 1, 39, 45-69, 2011.
- [6] Popescu, D., Mladin, E.C, Bozau, R. ve Bienert, S., Methodology For Real Estate Appraisal of Green Value, Environmental Engineering and Management Journal, 3, 8, 601-606, 2009.
- [7] Fuerst, F., Measuring Green Value: An International Perspective, Report for RICS, 2014. Web Sitesi: <http://www.landecon.cam.ac.uk/pdf-files/news/RICReport.pdf>
- [8] Miller, J., Green Building and Property Value, Appraisal Institute, 2013. Web Sitesi: <http://www.imt.org/resources/detail/green-building-and-property-value>

- [9] Bienert, S., Schutzenhofer C., Leopoldsberger, G., Bobsin, K., Leutgob, K., Huttler, W., Popescu, D., Mladin, E., Boazu, R., Koch, D. ve Edvardsen D.F., Integration of Energy Performance and Life-Cycle Costing into Property Valuation Practice, Report Summary, 2011. Web Sitesi: http://immvalue.e-sieben.at/pdf/immvalue_result_oriented_report.pdf/
- [10] Ratcliffe, S., Sustainability and value-dig deep, Web Blog Post, UK Green Building Council, 2012. Web Sitesi: <http://www.ukgbc.org/resources/blog/sustainability-and-value-dig-deep>
- [11] Runde, T. ve Thoyre, S., Integrating Sustainability and Green Building into the Appraisal Process, The Journal of Sustainable Real Estate, 1, 2, 221-248, 2010.
- [12] Lorenz, D., Lutzendorf, T., Next Generation Decision Support Instruments For the Property Industry-Understanding The Financial Implications of Sustainable Building, World Sustainable Building Conference, Melbourne, Australia, 2008
- [13] Ünsal, B., Enerji Etkin Tasarımın Gayrimenkul Değerleme Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye, 2011.
- [14] Eichholtz, P., Kok, N. ve Quigley, J.M., The Economics of Green Building, The Review of Economics and Statistics, 95(1), 50-63, 2013.
- [15] Leopoldsberger, G., Bienert, S., Brunauer, W., Bobsin, K. ve Schutzenhofer, C., Energising Property Valuation: Putting a Value on Energy-Efficient Buildings, The Appraisal Journal, 79(2), 115, 2011.
- [16] Zuo, J. ve Zhao, Z., Green building research current status and future agenda: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 271-281, 2014.
- [17] Olubunmi, O.A., Xia, P.B. ve Skitmore, M., Green Building Incentives: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 1611-1621, 2016.
- [18] Wolff, G., Beyond Payback: a Comparison of Financial Methods for Investments in Green Building, Journal of Green Building, 1, 80-91, 2006.
- [19] Hussin, J.M., Rahman, I.A. ve Memon, A.H., The Way Forward in Sustainable Construction: Issues and Challenges, International Journal of Advances in Applied Sciences, 2(1), 15-24, 2013.
- [20] Weeks, J.A., Understanding the Issues of Project Cost and Time in Sustainable Construction From a General Contractor's Perspective: Case Study, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2010.
- [21] Kubba, S. Handbook of Green Building Design and Construction: Leeds, Breeam, and Green Globes, Butterworth-Heinemann, Virginia, USA, 2012.
- [22] Zhao, D.X., He, B.J., Johnson, C. ve Mou, B., Social Problems of Green Buildings: From the Humanistic Needs to Social Acceptance, Renewable and Sustainable Energy Reviews, (51), 1594-1609, 2015.

- [23] The Business Case for Green Building, Report for 2013, Web Sitesi: http://www.worldgbc.org/files/1513/6608/0674/Business_Case_For_Green_Building_Report_WEB_2013-04-11.pdf
- [24] Health, Wellbeing and Productivity in Offices, Report for 2015, Web Sitesi: <http://www.worldgbc.org/activities/health-wellbeing-productivity-offices/>
- [25] Yong, H.A., Chan, W. J., Minjae, S. ve Myung, H.J., Integrated Construction Process for Green Building, *Procedia Engineering*, 145, 670-676, 2016.
- [26] Mehta, H.S. ve Porwal, V., Green Building Construction for Sustainable Future, *Civil and Environmental Research*, 3(6), 7-13, 2013.
- [27] Liu, H., Evaluating Construction Cost of Green Building Based on Lifecycle Cost Analysis: An Empirical Analysis From Nanjing, China, *International Journal of Smart Home*, 9(12), 299-306, 2015.
- [28] Latha, R. ve Senthamilkumar, S., Role of Construction Management in Sustainable Building Design and Concept, *Indian Journal of Applied Research*, 4(4), 27-30, 2014.
- [29] Matthiessen, L.F., Morris, P., Costing Green: A Comprehensive Cost Database and Budgeting Methodology, Davis Langdon Management Consulting, 2004.
- [30] Matthiessen, L.F. ve Morris, P., Cost of Green Revisited: Reexamining the Feasibility and Cost Impact of Sustainable Design in the Light of Increased Market Adoption, Davis Langdon Management Consulting, 2007.
- [31] Mapp, C., Nobe, M. ve Dunbar, B., The Cost of LEED-An Analysis of the Construction Costs of LEED and Non-LEED Banks, *Journal of Sustainable Real Estate*, (3), 254–273, 2011.
- [32] Luay, N.D. ve Kherun, N.A., Green Buildings Cost Premium: A review of empirical evidence, *Energy and Building*, 110, 396-403, 2016.
- [33] Miller, N., Spivey, J. ve Florance, A., Does Green Pay Off, *Journal of Real Estate Portfolio Management*, 14(4), 385-400, 2008.
- [34] Wiley, J., Benefield, J. ve Johnson, K., Green Design and the Market for Commercial Office Space, *Journal of Real Estate Financial Economics*, 41, 228-243, 2010.
- [35] Zhang, X., Platten A. ve Shen L., Green Property Development Practice in China: Costs and Barriers, *Building and Environment*, 46, 2153-2160, 2011.
- [36] Schiavon, S. ve Altomonte, S., Influence of factors unrelated to environmental quality on occupant satisfaction in LEED and non-LEED certified buildings, *Building and Environment*, 77, 148-159, 2014.
- [37] Dobias, J. ve Macek, D., Leadersip in Energy and Environmental and It's Impact on Building Operational Expenditures, *Procedia Engineering*, 85, 132 – 139, 2014.

- [38] Bir değerlendirme yaklaşımı: Yeşil Bina Sistemlerinin Gayrimenkul Değerine Etkisi, Gayrimenkul ve Gayrimenkul Yatırım Ortaklığı Derneği Raporu, İstanbul, Türkiye, 2014. Web Sitesi: <http://www.cevredostu.com/wp-content/uploads/2014/07/GYODER-Yesil-Bina-Sistemlerinin-Gayrimenkul-Değerine-Etkisi.pdf/>
- [39] Web Sitesi: <https://www.usgbc.org/projects/new-construction>

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile Üretilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışı

Kaan TÜRKER¹
Tamer BİROL²
Altuğ YAVAŞ³
Umut HASGÜL⁴
Halit YAZICI⁵

ÖZ

Çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının betonarme kirişlerin sünekliği, taşıma kapasitesi, eğilme rijitliği, kırılma şekli ve çatlak davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için dikdörtgen enkesitli 150x250x2500mm boyutlarında test kirişleri kullanılmıştır. Beton içeriğinde düz mikro ve kancalı makro boyutta çelik lifler karma olarak kullanılmış ve ortalama 163 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir. Dört farklı çekme donatısı oranına sahip lifli ve lifsiz toplam dokuz adet betonarme test kirişi üzerinde dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve salt eğilme davranışları incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kirişlerde UYPLB kullanımının incelenen parametreler bakımından önemli avantajlar sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek performanslı lifli beton, betonarme kiriş, eğilme davranışı, karma çelik lif.

ABSTRACT

Flexural Behavior of Beams with Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete

In this study, the effects of using Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) on ductility, load bearing capacity, flexural stiffness, failure mode and cracking behavior of reinforced concrete (RC) beams were experimentally investigated. 150x250x2500 mm test beams with rectangular cross sections were used. Straight micro and hooked macro steel fibers were used together in the concrete and average compressive

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 24 Ocak 2017 günü ulaşmıştır. 16 Mart 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.287116

1 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - kturker@balikesir.edu.tr

2 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - tbirol@balikesir.edu.tr

3 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - ayavas@balikesir.edu.tr

4 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - hasgul@balikesir.edu.tr

5 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - halit.yazici@deu.edu.tr

strength of 163 MPa was achieved. A total of nine RC test beams, with and without fibers, consisting of four different tensile reinforcement ratios were tested under four point bending and their flexural behaviors were investigated. The results of the study showed that the use of UHPFRC in the beams provided significant advantages in terms of investigated parameters.

Keywords: Ultra high performance fiber reinforced concrete, reinforced concrete beam, flexural behavior, hybrid steel fiber.

1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek binalara, büyük açıklıklı ve özel yapı türlerine olan gereksinimlerin artması beraberinde çok yüksek dayanımlı betonlara olan talebi de arttırmaktadır. Bu bağlamda, beton teknolojisinin son yıllarda ortaya koyduğu önemli ürünlerden birisi de ultra yüksek dayanımlı ve çelik lif takviyeli betonlardır. Bir tür kompozit yapı malzemesi olan bu betonlar, maksimum sıklıkta içyapı, ince ve yüksek mukavemetli agrega ve çok düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilerek 100-150 MPa basınç dayanımlarına sahip olabilmektedir [1-4]. Yüksek enerjili karıştırıcılar ve özel kür koşulları (ısı, basınç vb.) uygulanarak çok daha yüksek dayanımlara (200 MPa ve üzeri) ulaşılabilir [5-8]. Bu betonlar içeriğindeki çelik, karbon, sentetik vb. lifler sayesinde basınç, çekme ve eğilme etkisi altında oldukça sünek bir davranış göstermektedir. Üstün mekanik özellikleri ile beraber, sıkı iç yapı ve liflerin çatlakları sınırlaması sayesinde çevre koşullarına karşı durabilitesi de çok yüksek olan bu betonlar için *Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)*, *Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Çimento Kompoziti* gibi tanımlar kullanılmaktadır [9-15].

UYPLB'un üstün mekanik özellikleri, yapı elemanlarında dayanım, rijitlik ve süneklik bakımından önemli avantajlar sağlayarak geleneksel betonlara göre daha ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapılara imkan verecek potansiyele sahiptir. Günümüzde UYPLB, özel üretim koşullarına gereksinim duyması nedeniyle daha çok prefabrik sektöründe büyük açıklıklı köprü kirişlerinde, plaklarda, özel geometriye sahip narin enkesitli yapısal elemanlarda ve dış cephe kaplama malzemesi kullanılmaktadır (Şekil 1). Yüksek süneklik ve durabilite özellikleri, prefabrik elemanların ıslak birleşimlerinde ve çevre koşullarına maruz betonarme köprü, viyadük, iskele, liman, baraj vb. yapıların onarım ve takviyesinde UYPLB'un tercih edilmesini sağlamaktadır (Şekil 1) [10,12,16-19]. Ülkemizde ise UYPLB'nun pratikteki kullanımı henüz rögar kapağı, mazgal gibi yapısal olmayan elemanlarla ve durabilite amaçlı bazı uygulamalarla sınırlıdır. Bununla birlikte UYPLB'un yapısal eleman güçlendirmesinde kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır [20-22].

UYPLB'un içeriğindeki lifler, betona üstün mekanik özellikler kazandırmakta ve betonarme elemanların yapısal davranışını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Kullanılan liflerin geometrik özellikleri, miktarı (hacimsel oranı), beton içindeki doğrultusu, kullanıldığı yapısal elemanın enkesit geometrisi/boyutları vb. parametreler yapısal davranışta farklılıklara yol açabilmektedir. Mevcut betonarme standartları bu betonu içeren yapı elemanlarının tasarımı için yetersiz kaldığından, farklı ülkelerdeki araştırma grupları ve kuruluşlar tarafından UYPLB için tasarım önerileri niteliğinde çeşitli dokümanlar yayınlanmıştır [9-13]. UYPLB ile ilgili mevcut dokümanlar, genellikle ait oldukları ülkenin köprü şartnamelerine bağlı olarak hazırlanmıştır. Bu dokümanlarda bazı tasarım esasları ortaya koyulmasına karşın lif içeriği, kesit özellikleri vb. bakımından kısıtlamalar

bulunmakta ve özel malzeme testleri gerekmektedir. Bu nedenle, UYPLB daha çok özel projelerde ve bu projelere özgün yapısal testler ile birlikte kullanılabilir. UYPLB'un yapısal elemanlarda kullanımının yaygınlaşması için mevcut dokümanlara ait kapsamın genişletilmesi ve ayrıca, üretim prosedürlerini, test metodlarını ve tasarım esaslarını içeren yöntemlerin standartlaşması gerekmektedir. Bunun için de farklı yapısal elemanlar üzerinde lif içeriği etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1 - UYPLB'un Bazı Kullanım Alanlarına Örnekler

Önemli avantajlar sağlaması nedeniyle UYPLB çalışmalarının yoğunlaştığı yapısal elemanlardan birisi kirişlerdir. Kirişlerde UYPLB'un kullanılması durumunda, çok yüksek beton basınç dayanımı nedeniyle dengeli kırılma donatı oranları da yükselmekte ve buna bağlı olarak yüksek çekme donatısı oranlarında dahi sünek kırılmalar (denge altı kırılma) elde edilebilmektedir [23-24]. Ayrıca, çelik liflerin sağladığı şekildeğiştirme kapasitesi sayesinde basınç bölgesinde yüksek dayanımlı betonlarda gözlenen gevrek davranış da

önlenmektedir. Çekme bölgesindeki lifler ise, çatlak genişliklerini sınırlayarak sehimi azaltıcı yönde etki yapmakta ve betonun çekme dayanımını önemli ölçüde arttırarak kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır [25-28]. Bu tür betonlarda basınç dayanımlarına bağlı olarak elastisite modülleri yüksek olmakta bu da kirişin eğilme rijitliğini arttırmaktadır [29-30]. Bununla birlikte çelik lifler betondaki asal çekme çatlaklarını sınırlayarak kesmeye karşı dayanımı da arttırmaktadır [31-33]. Bu bağlamda, ABD tasarım şartnamesinde (ACI 318-14) belirli düzeydeki kesme kuvvetlerinin sadece çelik lifler ile karşılanmasına izin verilmektedir [34].

Betonarme kirişler üzerinde yapılan çalışmalarda, çelik lifin taşıma kapasitesi, rijitlik ve çatlak davranışı üzerindeki katkılarının lif miktarı ile orantılı değiştiği, süneklik üzerindeki etkisinin ise büyük ölçüde donatı oranına bağlı olduğu görülmektedir. Geleneksel betonarme kirişlerden farklı olarak, düşük donatı oranları için lifler çatlak davranışını değiştirerek kiriş sünekliklerini azaltabilmekte, yüksek donatı oranlarında ise arttırabilmektedir. Ayrıca, sünekliğin değişiminde lif oranı da etkili olmaktadır. Kirişlerin eğilme davranışında maksimum performans elde edebilmek için lif içeriğinin (tipi, oranı) ve kirişteki çekme donatısı oranının uyumlu olması gerekmektedir. Bunun için de farklı lif içerikleri ve farklı donatı oranlarına sahip kirişlerde süneklik, taşıma kapasitesi ve rijitlik parametrelerinin birlikte değerlendirildiği çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışmada, UYPLB kullanımının kiriş taşıma kapasitesi, yerdeğiştirme ve eğrilik sünekliği, eğilme rijitliği, kırılma şekilleri ve çatlak davranışı üzerindeki etkilerinin düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarına sahip betonarme kirişler için incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada üretilen UYPLB'da mikro ve makro boyutta iki farklı lif tipi birlikte (karma) kullanılmıştır. Böylece, beton özelliklerine çalışmalarda daha iyi performans gösterdiği rapor edilen karma lif uygulamasının betonarme kirişlerdeki performansı değerlendirilmiştir. İncelenen bazı test numunelerinde, geleneksel betonarmedeki maksimum donatı sınırının üzerine çıkılarak UYPLB'un yüksek basınç kapasitesinin ve sünekliğinin kirişlerde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, çelik lifli betonun ve bu beton içerisindeki çelik donatının şekildeğiştirme davranışı da değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA PROGRAMI

Kirişlerde Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının eğilme davranışına olan etkilerini incelemek amacıyla, çelik lifli ve lifsiz beton kullanılarak betonarme kirişler üretilmiş ve eğilme davranışları deneysel verilere dayanarak değerlendirilmiştir. Bunun için, düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarını temsilen dört farklı donatı oranına sahip sekiz adet kiriş ve ayrıca salt UYPLB'un eğilme davranışını karşılaştırmak amacıyla aynı geometrik özelliklerde donatısız bir kiriş test edilmiştir. Kirişlerde salt eğilme davranışının elde edilebilmesi için dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda yük-sehim (düşey yerdeğiştirme) davranışları, kırılma şekilleri, yerdeğiştirme süneklikleri, eğrilik süneklikleri, yük/moment taşıma kapasiteleri, eğilme rijitlikleri, belirli sehim değerlerinde maksimum çatlak genişlikleri ve çatlak dağılımları incelenmiştir. Ayrıca betonun ve donatı çeliğinin şekildeğiştirme davranışları incelenmiştir.

2.1. Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Lifli Betonun Özellikleri

İncelenen test kirişlerinde kullanılmak üzere 28 günlük basınç dayanımı en az 120 MPa olan UYPLB üretilmesi hedeflenmiştir. Betonun bağlayıcı kısmı CEM I 42.5 R sınıfı portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufundan oluşmaktadır. Çimentonun yoğunluğu 3.10-3.15 g/cm³, özgül yüzeyi 3500-3700 cm²/g ve tane çapı 3-100 µm arasındadır. Kullanılan sili dumanı ve yüksek fırın cürufunun yoğunlukları sırasıyla 2.20 ve 2.75 g/cm³ tür. Agregata olarak iki farklı boyutta yüksek dayanımlı kuvars kullanılmıştır. Tane çapı 0 ile 0.8 mm arasında olan agreganın özgül ağırlığı 2.68 g/cm³, 1 ile 3 mm arasında olanın ise 2.66 g/cm³ olarak belirlenmiştir. UYPLB çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip olduğundan, betonun işlenebilirliğinin sağlanması amacıyla polikarboksilat eter esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı (özgül ağırlığı 1.08-1.14 kg/litre) katkı kullanılmıştır.

Çizelge 1 - Betonu Oluşturan Bileşenlerin Oranları (kg/m³)

Karışım	Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu	Süper Akışk.	0-0.8 mm Kuvars	1-3 mm Kuvars	Su/ Bağlayıcı	Çelik Lif
Lifsiz	690	138	276	17.25	542	542	0.18	--
Lifli	690	138	276	17.25	525	525	0.18	117

Çizelge 2 - Çelik Liflerin Boyutları ve Mekanik Özellikleri

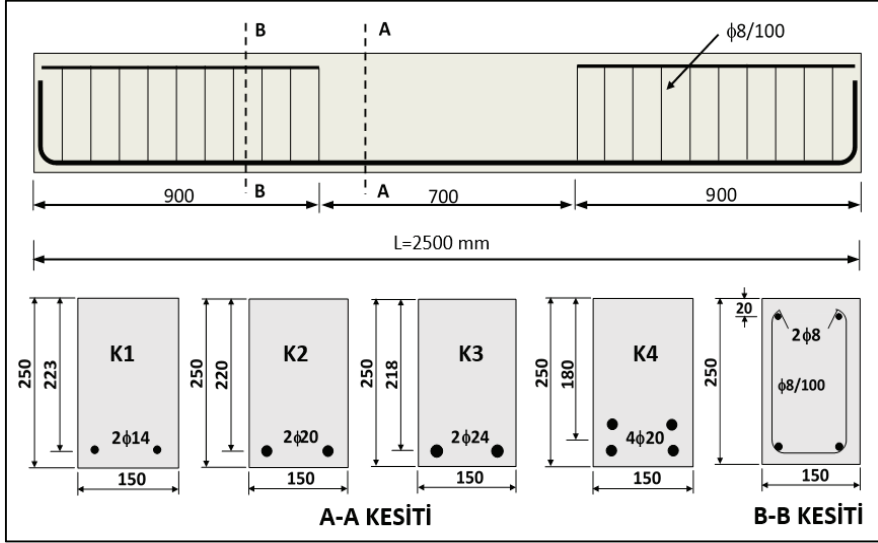
Çelik lif tipi	Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik (Boy/En)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Düz Mikro Lif	0.16	13	81	7.8	2500	210000
Kancalı Makro Lif	0.75	60	80	7.8	1225	210000

UYPLB'da kullanılan lif miktarı (hacimsel oranı) ve tipi betonun mekanik özelliklerini ve işlenebilirliğini etkileyen en önemli parametrelerdir. Hem mekanik özellikler hem de işlenebilirlik bakımından iyi performans elde edilebilmek için genellikle hacimsel olarak % 1.0-%2.5 oranında lif kullanılmaktadır. Daha yüksek oranlara çıkıldığında işlenebilirlik azalmakta, daha düşük oranlarda lif kullanılması halinde ise mekanik özelliklerdeki katkılar düşük düzeyde kalmaktadır [35,36]. Yapısal elemanlarda işlenebilirliğin yüksek olması nedeniyle daha çok mikro boyutta düz lifler tercih edilmektedir. Beton özelliklerine yönelik çalışmalarda mikro düz liflerin çatlakları sınırlama bakımından elastik bölgede etkili olduğu, ileri şekildeğiştirmelerin olduğu plastik bölgede ise kancalı makro liflerin daha etkili olarak betonun sünekliğini artırdığı belirlenmiştir. Bu nedenle, eğilme davranışı genelinde daha iyi bir performans elde etmek için karma lif kullanımı önerilmektedir [37-39]. Buna bağlı olarak çalışmada, işlenebilirlik parametresi de gözönünde bulundurularak %1.0 oranında düz mikro lif ve %0.5 oranında kancalı makro lif içeren karma lif uygulaması gerçekleştirilmiştir. UYPLB'ü oluşturan bileşenlerin karışım oranları Çizelge 1'de, çelik liflerin geometrik ve mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Üretilen beton ile ilgili daha detaylı bilgi [40]'da bulunabilir.

2.2. Test Kirişlerinin Özellikleri

Çalışmada, düşük ve yüksek donatı oranlarını temsil eden dört farklı çekme donatısı için dikdörtgen enkesitli 150x250x2500mm boyutlarında test kirişleri üretilmiştir. Her bir donatı oranı için UYPLB ve lifsiz beton kullanılarak iki ayrı grup kiriş hazırlanmıştır. Lifsiz beton içeren test kirişleri çelik lifin etkisini belirlemek amacıyla yapılan karşılaştırmalarda referans olarak kullanılmıştır. Ayrıca, salt çelik lifli kirişin eğilme davranışını karşılaştırmak amacıyla UYPLB içeren donatısız bir kiriş (K0-F) üretilmiştir. Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimleri Şekil 2’de verilmiştir. Test kirişlerinde basınç donatısı bulunmamaktadır. Kesme kırılmasını önlemek amacıyla salt eğilme bölgesi dışında $\phi 8/100$ etriye kullanılmıştır. Test kirişlerinin çekme donatıları ve mekanik özellikleri Çizelge 3’de verilmiştir. K1 kirişi düşük çekme donatısı oranını ($\rho = 0.009$) temsil etmektedir. K2 kirişi yaklaşık olarak TS 500’de [41] verilen maksimum çekme donatısı oranına sahiptir. K3 ve K4 kirişlerinde ise, TS 500’deki maksimum oran aşılarak yüksek donatı oranlı kirişler elde edilmiştir. Kirişlerdeki çekme donatısı oranları çekme kırılması oluşması amaçlanarak dengeli donatı oranının (ρ_b) altında tutulmuştur. Dengeli donatı oranı ρ_b hesabında geleneksel betonarmedeki kabuller kullanılmış, çekme bölgesindeki liflerin etkisi gözönüne alınmamıştır. Dengeli donatı oranları, ortalama beton ve donatı dayanımları kullanılarak lifsiz kirişler için $\rho_b = 0.10$, lifli kirişler için ise $\rho_b = 0.12$ olarak hesaplanmıştır. Test kirişlerindeki çekme donatılarının dengeli donatıya oranları Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelge 3’den görüldüğü gibi, beton basınç dayanımları çok yüksek olduğu için kirişlerdeki dengeli donatı oranları da geleneksel betonarme kirişlere göre çok daha yüksek elde edilmiş ve en yüksek donatı oranına sahip K4 kirişinde dahi $\rho/\rho_b = 0.43$ ’ü aşmamıştır.

Çalışmada kullanılan UYPLB, 125 dm³ kapasiteli standart bir panmikserde üretilmiştir. (Şekil 3). Öncelikle çimento, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve agregalar kuru olarak 3 dakika karıştırılmıştır. Kuru karışıma önce su ve akışkanlaştırıcı katkının yarısı katılarak 5 dakika karıştırılmış ardından akışkanlaştırıcının geri kalan kısmı da eklenerek 5 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Lifli karışımlarda bu aşamadan sonra çelik lifler eklenmiş ve homojen bir dağılım sağlanana kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. Hem lifsiz karışım hem de lifli karışım için kendiliğinden yerleşebilir bir kıvam elde edilmiştir. Beton içindeki çelik liflerin kiriş boyuna doğrultusunda yönlendirilmesini sağlamak amacıyla döküm, kalıbın bir ucundan diğer ucuna doğru hareket ettirilerek birkaç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunun için özel olarak tasarlanmış bir beton arabası kullanılmıştır (Şekil 3). Lifli ve lifsiz üretilen test kirişlerine ait 100x100x100 mm’lik küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiş ve bunlara ait ortalama değerler Çizelge 4’te verilmiştir. Beton dökümü tamamlanan kirişler plastik bir örtü ile kaplanarak yaklaşık 20°C sıcaklıkta bir hafta kürlenmiş, daha sonra kalıptan çıkarılarak laboratuvar ortamında test gününe kadar bekletilmiştir.



Şekil 2 - Kirişlerin Geometrik Özellikleri ve Donatı Yerleşimleri

Çizelge 3 - Test Kirişlerinin Çekme Donatısı Özellikleri ve Lif İçeriği

Kiriş Adı	Çekme Donatısı		f_y (MPa)	f_u (MPa)	ρ/ρ_b	Çelik Lif
	Miktarı	Oranı (ρ)				
K1-R	2φ14	0.009	469	590	0.090	Yok
K2-R	2φ20	0.019	462	654	0.190	
K3-R	2φ24	0.028	491	606	0.280	
K4-R	4φ20	0.043	468	661	0.430	
K0-F	--	--	--	--	--	%1.0 Mikro + %0.5 Makro
K1-F	2φ14	0.009	445	564	0.075	
K2-F	2φ20	0.019	471	651	0.158	
K3-F	2φ24	0.028	460	586	0.233	
K4-F	4φ20	0.043	471	651	0.358	

ρ : Çekme donatısı oranı, ρ_b : Dengeli donatı oranı, f_y : Akma dayanımı, f_u : Çekme dayanımı

Çizelge 4 - Test Kirişlerine Ait Beton Basınç Dayanımları

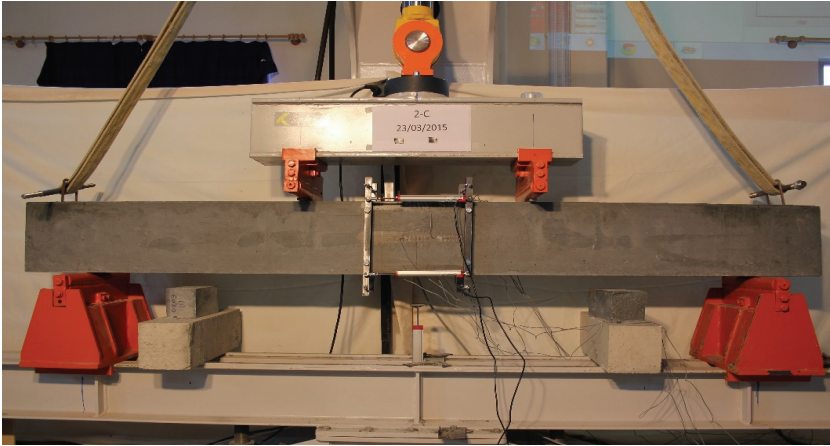
Kiriş Adı	K1-R	K2-R	K3-R	K4-R	K0-F	K1-F	K2-F	K3-F	K4-F
28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	137	133	135	146	154	169	150	164	167
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)			138				163		



Şekil 3 - UYDB'nun Hazırlanması ve Kalıplara Yerleştirilmesi Aşamaları

2.3. Test Düzeneği ve Yapılan Ölçümler

Kirişlerin eğilme testleri Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dört noktalı test düzeneği ile yapılmıştır (Şekil 4). Düzenekte 500kN kapasiteli ve yerdeğiştirme kontrollü bir düşey hidrolik yük veren bulunmaktadır. Numunenin sehimini (Δ) ölçmek üzere açıklık ortasına bir potansiyometrik cetvel ve yükü (P) ölçmek üzere yük verenin altına bir yük hücresi yerleştirilmiştir (Şekil 4, 5).

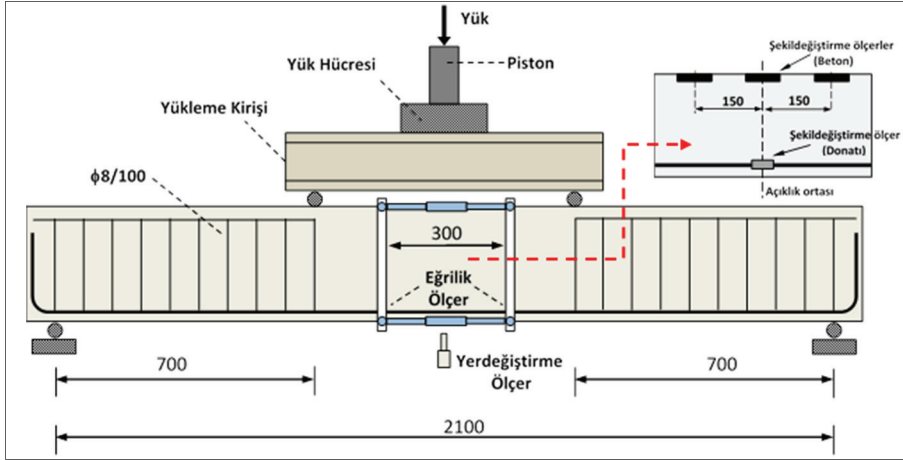


Şekil 4 - Dört Noktalı Eğilme Testi Düzeneği

Yük rijit bir çelik profil vasıtasıyla aralarında 700 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmaktadır. Kiriş orta bölgesindeki eğriliği (birim dönmeyi) belirlemek amacıyla basınç ve çekme bölgesine iki adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Bunlar en üst ve

en alt beton liflerindeki yerdeğiştirmeleri ölçecek şekilde ve 300 mm'lik aralıkla yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile elde edilen kısılma ve uzamalardan yararlanarak salt eğilme bölgesindeki 300 mm'lik bölümün ortalama eğriliği belirlenmiştir (Şekil 4, 5).

Salt eğilme bölgesindeki betonun basınç altındaki şekildeğiştirme davranışını gözlemek amacıyla en dış beton yüzeyine şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 5). Çelik lifli betonun içindeki donatı davranışını gözlemek amacıyla kirişin salt eğilme bölgesinde donatılara da şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 5). Test süresince belirli sehim değerlerinde yüklemeyi durdurularak, oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve çatlak mikroskobu ile maksimum çatlak genişlikleri ölçülmüştür.



Şekil 5 - Şematik Yükleme ve Ölçüm Düzenekleri

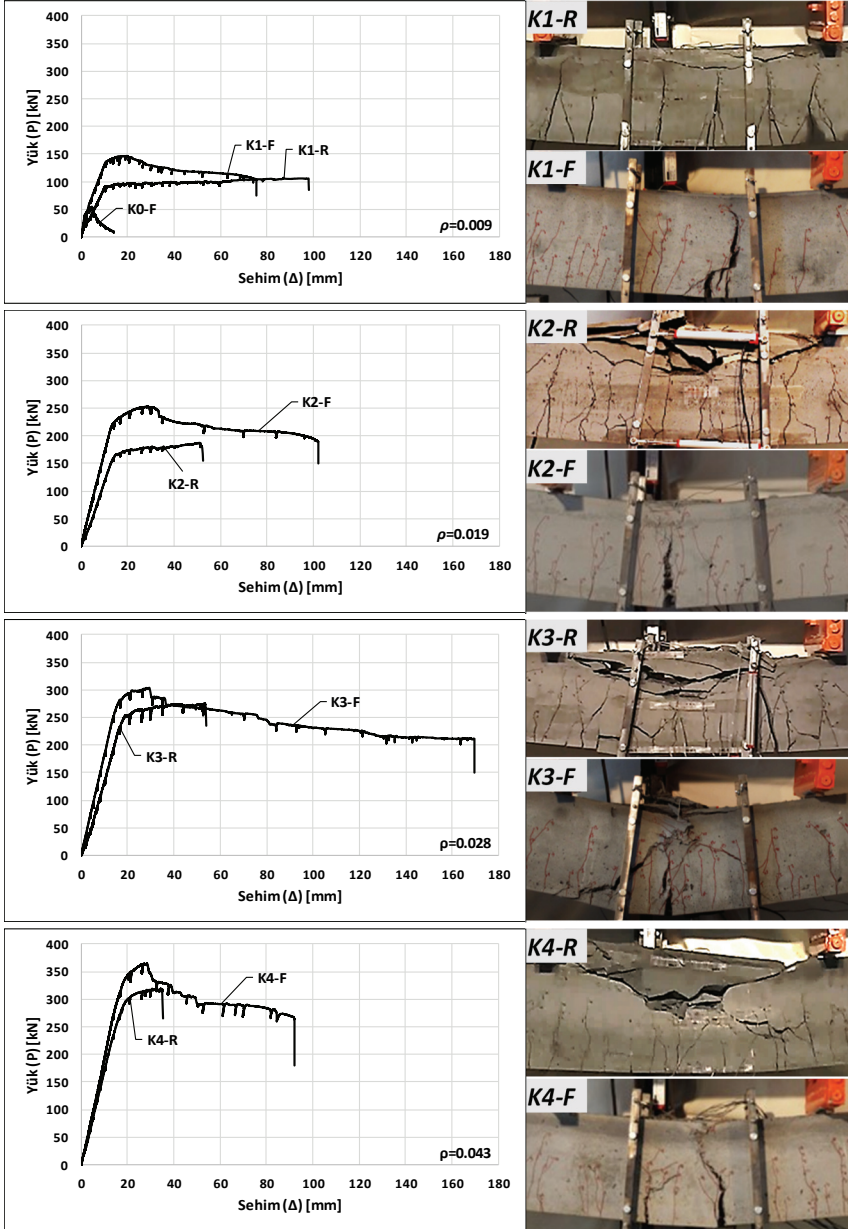
2.4. Deneysel Çalışmanın Sonuçları

Çalışma kapsamında hazırlanan test kirişleri, göçme yüküne kadar yüklemeye yapılarak yük-sehim davranışları ve kırılma mekanizmaları belirlenmiştir (Şekil 6). Çekme donatısı oranları denge altı olduğu için beklendiği gibi lifli ve lifsiz tüm kirişlerde sünek kırılma gerçekteşmiştir.

Ultra yüksek dayanımlı beton içeren lifsiz referans kirişlerinde donatıda akma sonrası rijitlik azalmakta ve hafif düzeyde pekleşme etkisi ile maksimum yüke ulaşılmaktadır (Şekil 6a). Maksimum yük sonrası tüm lifsiz kirişlerde beton ezilmesi ile kırılma (göçme) gerçekteşmiştir (Şekil 6b). Beklendiği gibi lifsiz kirişlerin davranışı geleneksel betonarme elemanlara benzer olmuştur. Salt UYPLB içeren donatısız kirişte, çelik lifler sayesinde belirli bir yük taşıma kapasitesi elde edilmekle birlikte, çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması sonucunda kiriş yük taşıma kapasitesini kaybettiğinden, süneklik oranları donatılı kirişlere göre çok daha düşük seviyede kalmıştır (Şekil 6a).

UYPLB içeren kirişlerde, çekme bölgesindeki lifler ilave donatı etkisi yaparak başlangıç yerdeğiştirme rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini lifsiz duruma göre belirgin şekilde arttırmıştır. Bununla birlikte, çekme bölgesindeki lifler küçük çatlakları sınırlamakta ve uzama şekildeğiştirmelerinin en büyük olduğu bölgede çatlakların birleşerek bir veya birkaç

adet büyük çatlak oluşturmasına sebep olmaktadır. Bu da yüksek donatı oranlarına sahip kirişlerde dahi kırılmanın (göçmenin) donatı kopması ile gerçekleşmesine sebep olmuştur (Şekil 6b).



a)

b)

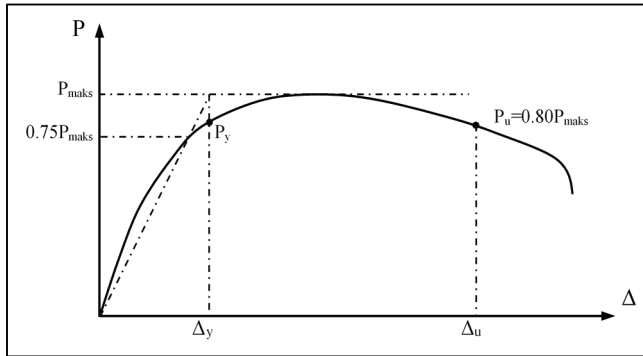
Şekil 6 - a) Kirişlerin Yük-Sehim Bağlılıları, b) Kirişlerin Kırılma Şekilleri

UYPLB'lu kirişlerin tümünde çekme donatılarının akmasından sonraki aşamada çelik liflerin sebep olduğu bir pekleşme davranışı gözlenmektedir. Kirişlerdeki donatı oranı arttıkça bu pekleşme bölgesi uzunluğu azalmıştır. Pikleşme davranışı çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması veya basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile sonlanmakta ve bu noktadan sonra dayanım azalmaları gözlenmektedir. Ancak dayanım azalmalarına rağmen lifsiz kirişlerin yük taşıma kapasitelerinden daha yüksek değerler elde edilmektedir. UYPLB'un basınç altındaki sünekliği sayesinde kirişlerde oldukça sünek bir davranış elde edilmiştir. Ayrıca, lifsiz kirişlerde beton ezilmesi büyük bir bölgede ve ani olurken, lifli kirişlerde çok küçük bir bölgede ve hafif dayanım azalmaları şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 6).

2.4.1. Yerdeğiştirme Süneklikleri

Çelik lif içeriğinin yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, lifli ve lifsiz referans kirişlerine ait yerdeğiştirme süneklikleri (μ_{Δ}) karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle *Yük-sehim* bağıntıları kullanılarak akma yükü (P_y), maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi (P_u), akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) ve maksimum yerdeğiştirme (Δ_u) değerleri elde edilmiştir. Akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesinde, azaltılmış rijitlik ile *ideal elasto-plastik* davranışı esas alan yaklaşım kullanılmıştır (Şekil 7) [42]. Bu yaklaşımda akma yerdeğiştirmesi (Δ_y), kirişin maksimum yük taşıma kapasitesinin (P_{maks}) %75'ine karşılık gelen nokta ile eğrinin başlangıcını birleştiren bir kiriş yardımıyla geometrik olarak belirlenmektedir (Şekil 7).

Lifsiz kirişlerden farklı olarak, lifli kirişlerde maksimum yük sonrası dayanım azalmaları oluşmasına rağmen lifler sayesinde yük taşıma kapasitesi büyük ölçüde korunarak kirişler kırılma (göçme) yüküne kadar büyük yerdeğiştirme yapabilmektedir. Çalışmada bu dayanım azalmalarını sınırlamak amacıyla Şekil 7'de gösterildiği gibi en fazla %20'lik yük düşüşü göz önüne alınmış ve maksimum yerdeğiştirmeler buna bağlı olarak belirlenmiştir [42]. Kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri ve ilgili diğer karakteristik değerler Çizelge 5'de verilmiştir.

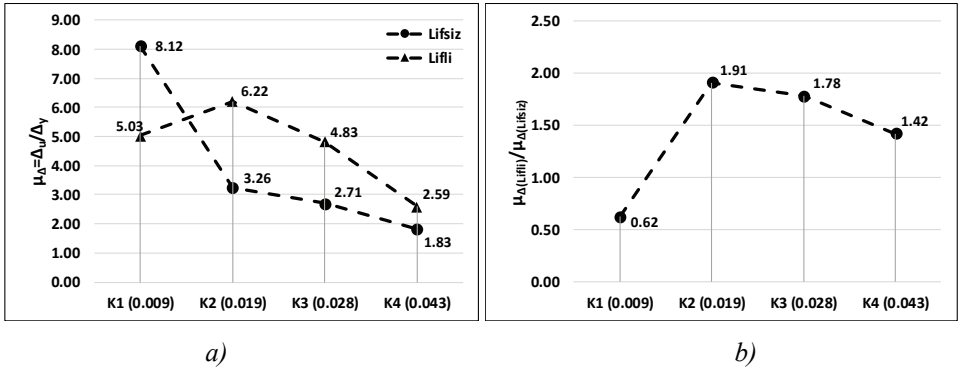


Şekil 7 - Yük- Sehim Bağıntısına Ait Karakteristik Değerler [42]

Çizelge 5 - Yerdeğiştirme Süneklikleri ile İlgili Karakteristik Değerler

Kiriş Adı	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	P_{maks} (kN)	$\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$	P_u/P_{maks}
K1-R	12.05	105.81	97.87	107.13	8.12	0.99
K2-R	16.00	177.49	52.13	187.19	3.26	0.95
K3-R	19.80	273.33	53.65	275.32	2.71	0.99
K4-R	19.10	309.91	35.01	318.88	1.83	0.97
K1-F	10.74	117.28	54.00	146.59	5.03	0.80
K2-F	15.00	202.50	93.30	253.16	6.22	0.80
K3-F	16.68	242.90	80.50	303.68	4.83	0.80
K4-F	18.88	303.69	48.96	364.55	2.59	0.83

Kirişler için elde edilen yerdeğiştirme sünekliklerinin donatı oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 8a’da verilmiştir. Ayrıca her bir donatı oranı için elde edilen süneklikler lifsiz kiriş sünekliklerine oranlanarak çelik lifin süneklik üzerindeki etkisi belirlenmiştir (Şekil 8b).

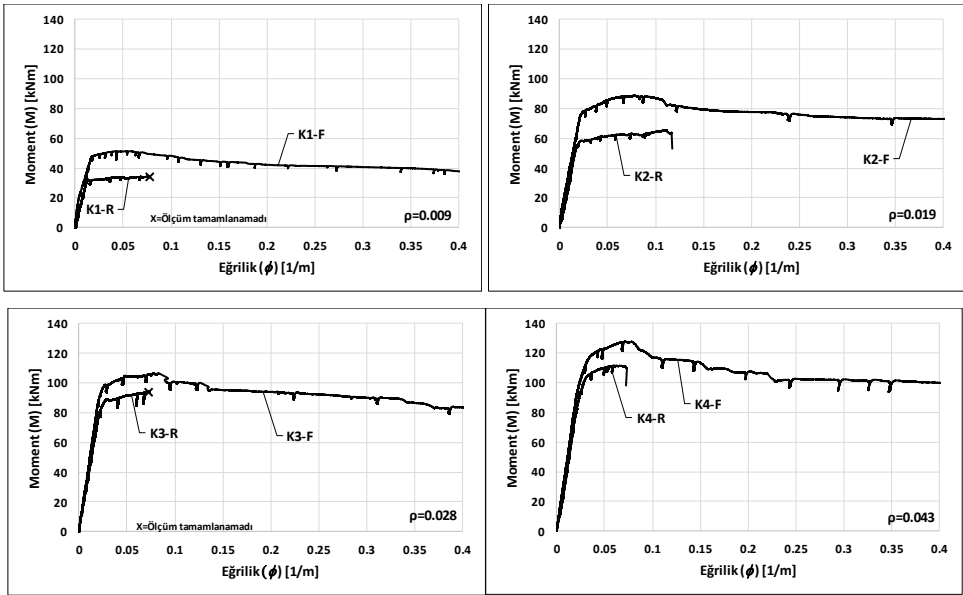


Şekil 8 - a) Kiriş Yerdeğiştirme Sünekliklerinin Donatı Oranı ile Değişimi,
b) Çelik Lifin Süneklik Üzerindeki Etkisinin Donatı Oranı ile Değişimi

Lifsiz kirişlerde beklendiği gibi çekme donatısı oranı arttıkça yerdeğiştirme sünekliği azalım yönünde bir eğilim göstermiş ve süneklik oranları 1.83-8.12 arasında elde edilmiştir (Şekil 8a). Lifli kirişlerde ise, en yüksek süneklik $\rho=0.019$ 'luk donatı oranına sahip K2-F kirişinde elde edilmiş, bundan daha düşük ve daha yüksek donatı oranları için süneklik değerleri azalım göstermiştir. Lif kullanımı ile en düşük donatı oranına ($\rho=0.009$) sahip K1 kirişinde yerdeğiştirme sünekliği lifsiz duruma göre %38 azalmış, yüksek donatı oranları için %42-%91 artmıştır. Düşük donatı oranları için yapılan benzer çalışmalarda da çelik lif kullanımının sünekliği azaltıcı yönde etki yaptığı, donatı oranı arttıkça sünekliğe katkının arttığı rapor edilmiştir [27,43-44].

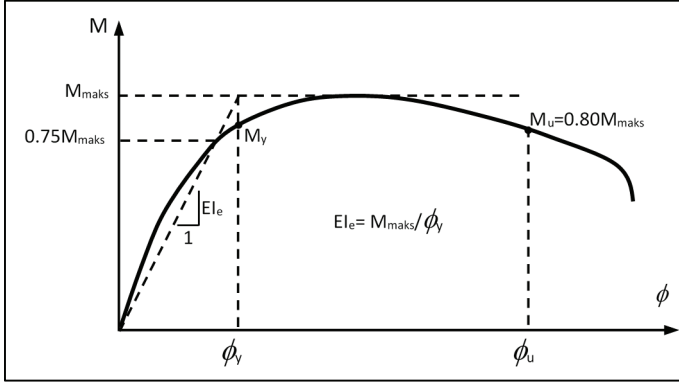
2.4.2. Eğrilik Süneklikleri ve Etkin Eğilme Rijitlikleri

Çelik lif içeriğinin betonarme kirişlerde eğrilik (birim dönme) sünekliğine (μ_ϕ) ve eğilme rijitliğine olan etkilerini belirlemek amacıyla, lifli ve lifsiz kirişlere ait deneysel *moment-eğrilik* bağıntıları kullanılmıştır (Şekil 9). Bunun için öncelikle kiriş orta bölgesine ait *moment-eğrilik* bağıntılarından akma momenti (M_y), maksimum eğriliğe karşılık gelen moment taşıma kapasitesi (M_u), akma eğriliği (ϕ_y) ve maksimum eğrilik (ϕ_u) değerleri belirlenmiştir (Şekil 10). Bu karakteristik değerlerin belirlenmesinde yerdeğiştirme sünekliklerinde esas alınan yaklaşım kullanılmıştır [42]. Kirişlerde etkin eğilme rijitlikleri (EI_e) olarak, ideal-elastoplastik idealleştirmeden elde edilen, maksimum momentin akma eğriliğine oranı esas alınmıştır (Şekil 10). İlgili karakteristik değerler Çizelge 6’da verilmiştir. K1-R ve K3-R kirişlerine ait *moment-eğrilik* bağıntıları, deneyin sonlarına doğru büyük plastik şekildeğiştirmelerin ve çatlakların ölçüm düzeneğine zarar vermesi nedeniyle erken sonlanmıştır (Şekil 9). Bu nedenle bu kirişlerde eğrilik süneklikleri belirlenememiştir.



Şekil 9 - Kirişlerden Elde Edilen Deneysel Moment-Eğrilik Bağıntıları

Ölçümü tamamlanan lifsiz referans kirişlerinde eğrilik süneklikleri 2.58 ve 5.59 olarak belirlenmişken lifli kirişlerde bu değerlerin 7.35-19.94 arasında değiştiği belirlenmiştir. Yerdeğiştirme sünekliğinde olduğu gibi, Maksimum eğrilik sünekliği $\rho=0.019$ 'luk donatı oranına sahip kirişte elde edilmiş, daha düşük ve daha yüksek donatı oranlarında süneklik azalmıştır. Liflerin orta bölgede büyük çatlak oluşumlarına sebep olması eğrilik sünekliklerinin lifsiz durumlara göre çok daha büyük olmasını sağlamıştır.



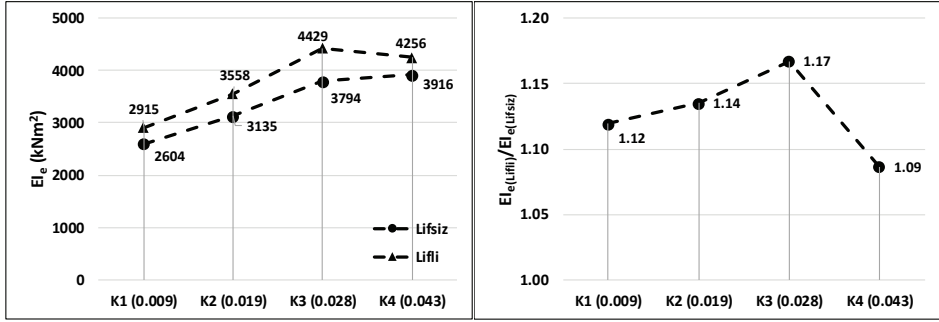
Şekil 10 - Moment- Eğrilik Bağıntısına Ait Karakteristik Değerler

Çizelge 6 - Moment-Eğrilik Bağıntısına Ait Karakteristik Değerler

Kiriş Adı	ϕ_y (1/m)	M_u (kNm)	ϕ_u (1/m)	M_{maks} (kNm)	$\mu_{\phi} = \phi_u / \phi_y$	$EI_c = M_{maks} / \phi_y$ (kNm ²)
K1-R	0.0144	*	*	*	*	2604
K2-R	0.0209	63.69	0.1168	65.52	5.59	3135
K3-R	0.0254	*	*	*	*	3794
K4-R	0.0285	109.84	0.0734	111.61	2.58	3916
K1-F	0.0176	41.08	0.2784	51.31	15.82	2915
K2-F	0.0249	70.88	0.4965	88.61	19.94	3558
K3-F	0.0240	85.03	0.3644	106.29	15.18	4429
K4-F	0.0299	106.08	0.2198	127.59	7.35	4256

Deprem etkileri ve yeniden dağılım etkisindeki sürekli kirişlerde daha büyük eğrilik sünekliliklerine ihtiyaç bulunmakla birlikte, geleneksel beton ile üretilen kirişlerin düşey yükler altındaki tasarımında dengeli donatı oranına bağlı olarak verilen sınır koşullar ($\rho \leq 0.85\rho_b$ [41], ($\rho \leq 0.75\rho_b$ [34]) ile eğrilik sünekliliğinin en az 2-3 olması garanti altına alınmaktadır [45, 46]. Düşey yük etkisindeki basit kirişlerde eğrilik sünekliliği için bu değerlerin minimum süneklilik değeri olarak alınabileceği görülmektedir. Buna göre UYPLB kullanılan tüm kirişlerde elde edilen sünekliliklerin minimum sünekliliğin çok üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Kirişler için elde edilen etkin eğilme rijitliklerinin donatı oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 11a'da verilmiştir. Ayrıca, her bir donatı oranı için lifli kirişlerden elde edilen rijitlikler lifsiz kiriş rijitliklerine oranlanarak çelik lifin eğilme rijitliği üzerindeki etkisi grafik olarak gösterilmiştir (Şekil 11b). Kirişlerin etkin eğilme rijitliklerinde liflerin katkısıyla lifsiz kirişlere göre %9-%17 oranında artış elde edilmiştir. Eğilme rijitliklerindeki değişim donatı oranına göre belirli bir eğilim göstermemektedir.



a)

b)

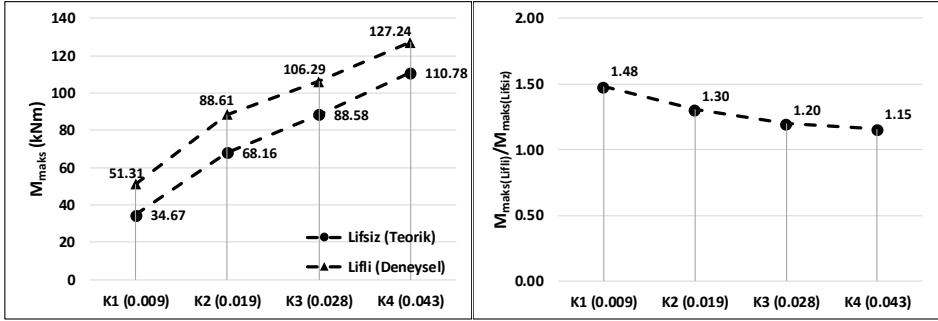
Şekil 11 - a) Kiriş Eğilme Rijitliklerinin Donatı Oranı ile Değişimi, b) Çelik Lifin Rijitlik Üzerindeki Etkisinin Donatı Oranı ile Değişimi

2.4.3. Yük/Moment Taşıma Kapasiteleri

Çelik lifin kiriş yük taşıma kapasitesine olan etkisini belirlemek amacıyla lifli ve lifsiz referans kirişlerinin yük/moment taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Ancak test kirişlerinin bazılarında (K1, K3) lifli kiriş donatı akma dayanımları ile bunlara ait lifsiz referans kirişi akma dayanımları arasında moment taşıma kapasitesini etkileyebilecek düzeyde farklar bulunmaktadır (Çizelge 3). Çelik lifin kapasiteye katkısını belirlerken bu farkın gözönüne alınması gerekmektedir. Bunun için, lifsiz duruma ait deneysel sonuçlar yerine lifli kirişlerin donatı özellikleri ile belirlenen sayısal sonuçlar kullanılmıştır. Böylece, çelik lifin kapasiteye olan net etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Kirişlerin lifsiz durumdaki moment taşıma kapasitelerinin hesabı için ACI-318-14 [34] standardındaki esaslar kullanılmış, ancak kapasitelerin deney sonuçları ile uyumlu olması için donatılarda gerçek *gerilme-şekildeğiştirme* bağıntıları esas alınmıştır. Söz konusu teorik yaklaşımın ultra yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde geçerliliğini belirlemek amacıyla öncelikle lifsiz referans kirişleri için uygulanmıştır. Çizelge 7'den görüleceği üzere deneysel (M_{den}) ve teorik (M_{teo}) sonuçlar arasındaki fark %4'ü geçmemektedir. Buna göre, teorik yaklaşımın moment taşıma kapasitelerini belirlemede yeterli olduğu kabul edilmiş ve lifli kirişlerin donatı özellikleri kullanılarak teorik (referans) kapasiteleri hesaplanmıştır. Kirişler için elde edilen moment taşıma kapasitelerinin (M_{maks}) donatı oranına göre değişimleri Şekil 12a'da, çelik lifin kapasiteye olan etkisi Şekil 12b'de grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7 - Lifsiz Referans Kirişlerinde Deneysel ve Teorik Moment Kapasiteleri

Kiriş Adı	K1-R	K2-R	K3-R	K4-R
M_{den} (kNm)	37.50	65.52	96.36	111.61
M_{teo} (kNm)	36.18	67.24	93.58	109.75
M_{den} / M_{teo}	0.96	1.03	0.97	0.98



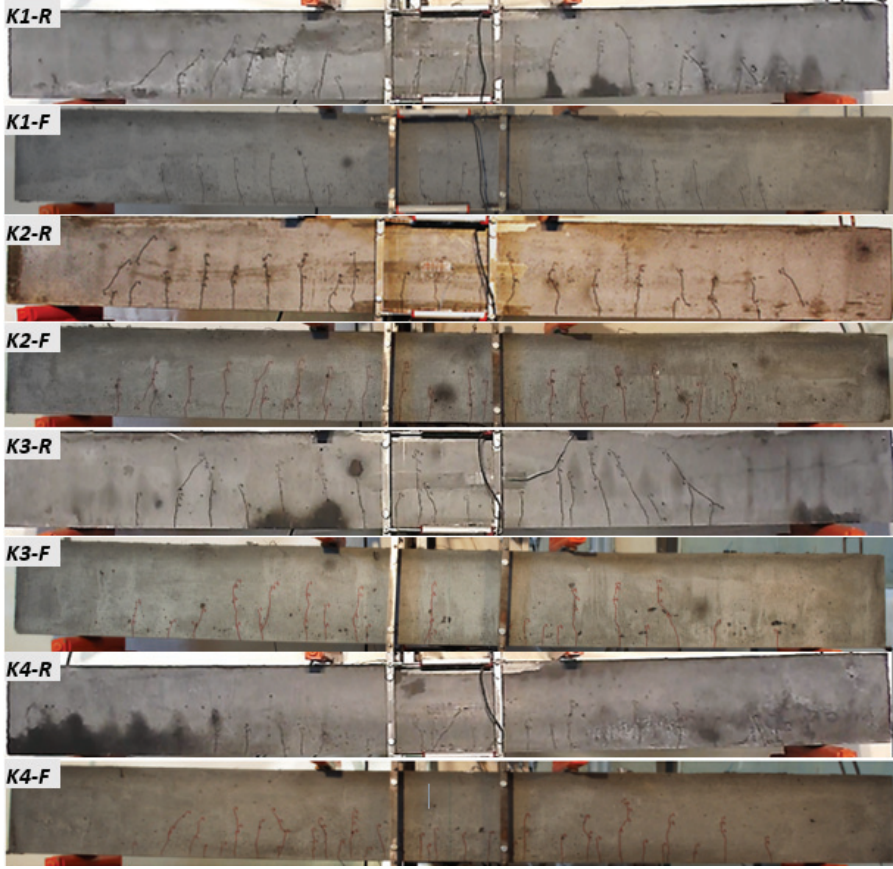
Şekil 12 - a) Kiriş Moment Taşıma Kapasitelerinin Donatı Oranı ile Değişimi, b) Çelik Lifli Kirişlerdeki Taşıma Kapasitesinin Lifsiz Duruma Göre Değişimi

Çekme bölgesindeki liflerin katkısıyla lifsiz kirişlere göre yük/moment taşıma kapasitelerinde %15-%48 arasında artışlar sağlanmıştır. Yük taşıma kapasitelerindeki en büyük artış en düşük donatı oranına sahip K1 kirişinde gerçekleşmiştir. Çekme donatısı oranı arttıkça liflerin sağladığı kapasite artışı azalan bir eğilim göstermiştir (Şekil 12b).

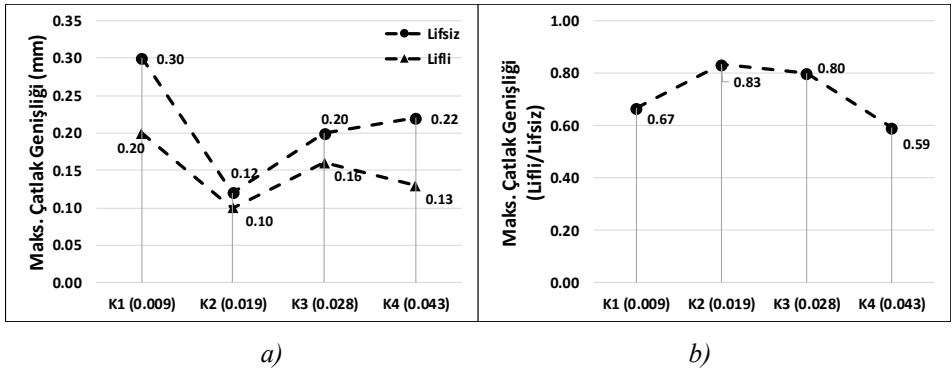
2.4.4. Çatlak Davranışları

Liflerin çatlak davranışına olan etkisini ortaya koymak amacıyla, lifli ve lifsiz test kirişlerine ait çatlak dağılımları ve ölçülen çatlak genişlikleri karşılaştırılmıştır. Çatlak incelemeleri, L kiriş açıklığını ifade etmek üzere, $L/250$ 'lik ve $L/70$ 'lik sehim değerlerinde yapılmıştır. $L/250$ değeri tüm kirişlerde elastik davranış bölgesine karşılık gelmekte ve betonarme eğilme elemanlarında kullanılabilirlik sınır durumuna ait sehim sınırlarını temsilen seçilmiştir. $L/70$ değeri ise önemli plastik şekildeğiştirmelerin olduğu plastik bölgeye karşılık gelmekte ve lifli kirişlerde yaklaşık olarak taşıma gücüne ulaşıldığı sehimi temsil etmektedir. $L/250$ 'lik yerdeğiştirme için elde edilen çatlak dağılımları ve çatlak genişlikleri Şekil 13-14'de, $L/70$ 'lik yerdeğiştirme için elde edilen çatlak dağılımları ve çatlak genişlikleri Şekil 15-16'da verilmiştir.

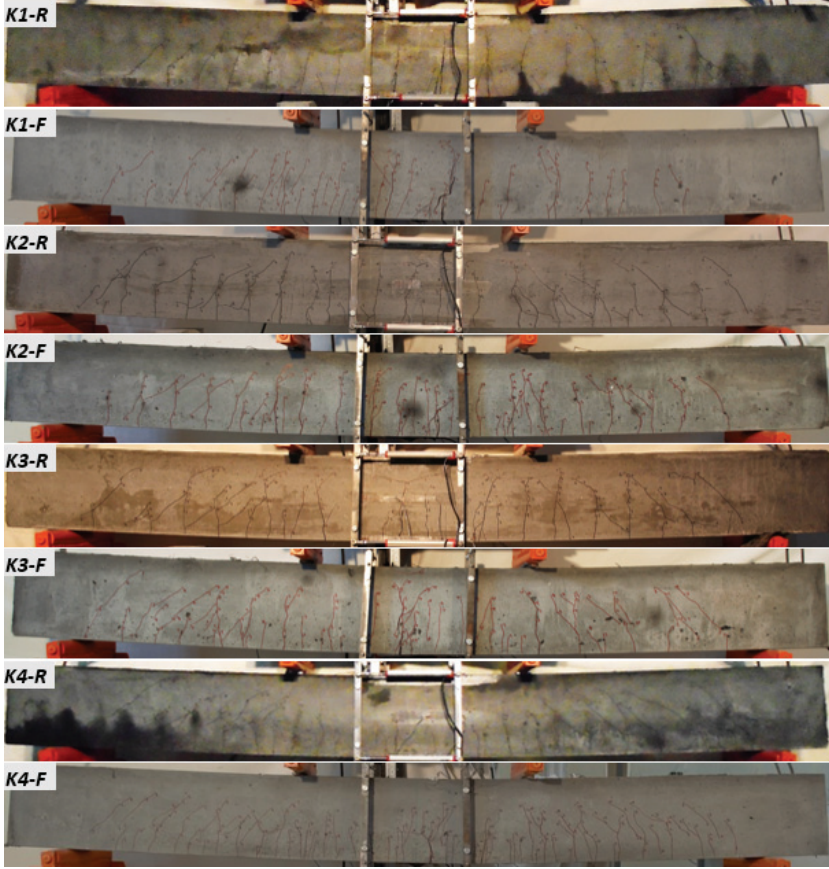
Lifli ve lifsiz referans kirişlerindeki çatlak dağılımları karşılaştırıldığında, *kullanılabilirlik* sınır durumunu temsil eden $L/250$ 'lik yerdeğiştirme değerinde düşük donatı oranları için benzer çatlak dağılımları elde edilirken, donatı oranı arttıkça lifli kirişlerde çatlak sayısının bir miktar arttığı görülmektedir (Şekil 13). Buna karşılık, çatlak genişlikleri lifsiz duruma göre %17-%41 oranında azalma göstermiştir. *Taşıma gücü* sınır durumunu temsil eden $L/70$ 'lik yerdeğiştirme değerinde ise, lifli ve lifsiz kirişler arasındaki çatlak dağılımı büyük farklılık göstermiştir. Lifsiz kirişlerde kiriş boyunca benzer genişlikte çatlaklar gözlenirken, lifli kirişlerde çok sayıda küçük çatlak ile birlikte orta bölgede bir veya iki büyük çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 15). Bu büyük çatlaklar donatı şekildeğiştirmelerini artırarak kopmaya sebep olmuş ve kırılmada belirleyici olmuştur. Bu aşamada lifli kirişlerdeki çatlakların lifsiz duruma göre 2.00-3.21 kat fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 16).



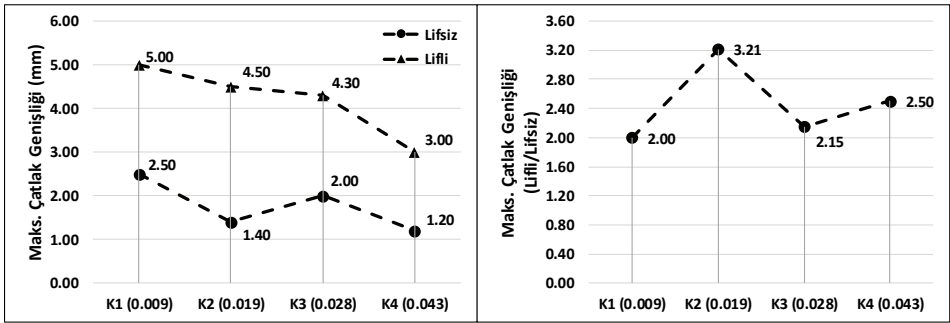
Şekil 13 - Kirişlerdeki Çatlak Dağılımları (L/250 Yerdeğiştirmesi)



Şekil 14 - a) Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Donatı Oranına Göre Değişimi, b) Çelik Lifli Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Lifsiz Duruma Göre Değişimi (L/250)



Şekil 15 - Kirişlerdeki Çatlak Dağılımları (L/70 Yerdeğiştirmesi)



a)

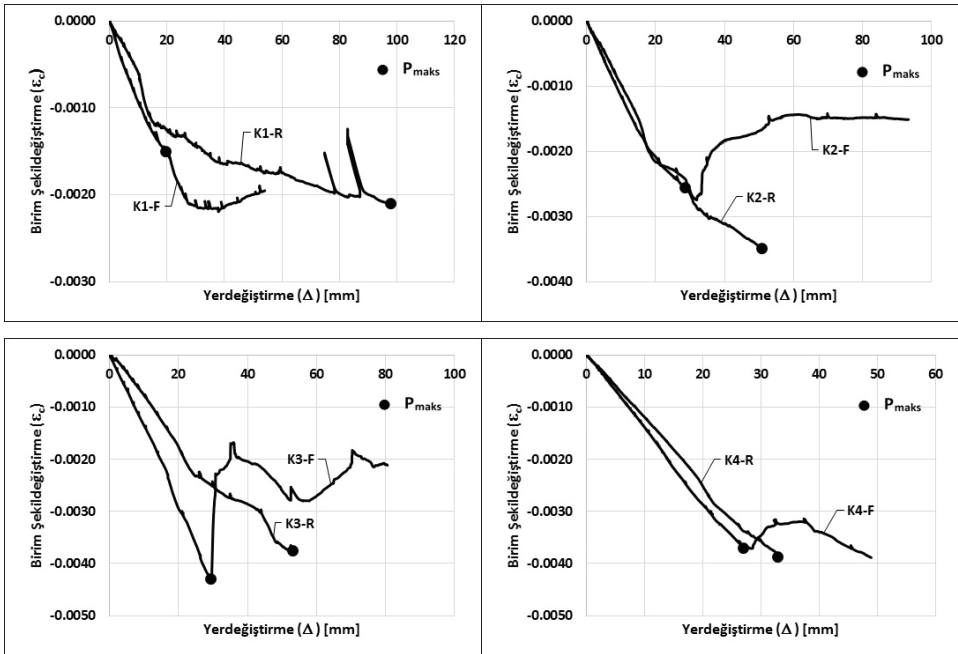
b)

Şekil 16 - a) Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Donatı Oranına Göre Değişimi, b) Çelik Lifli Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Lişsiz Duruma Göre Değişimi (L/70)

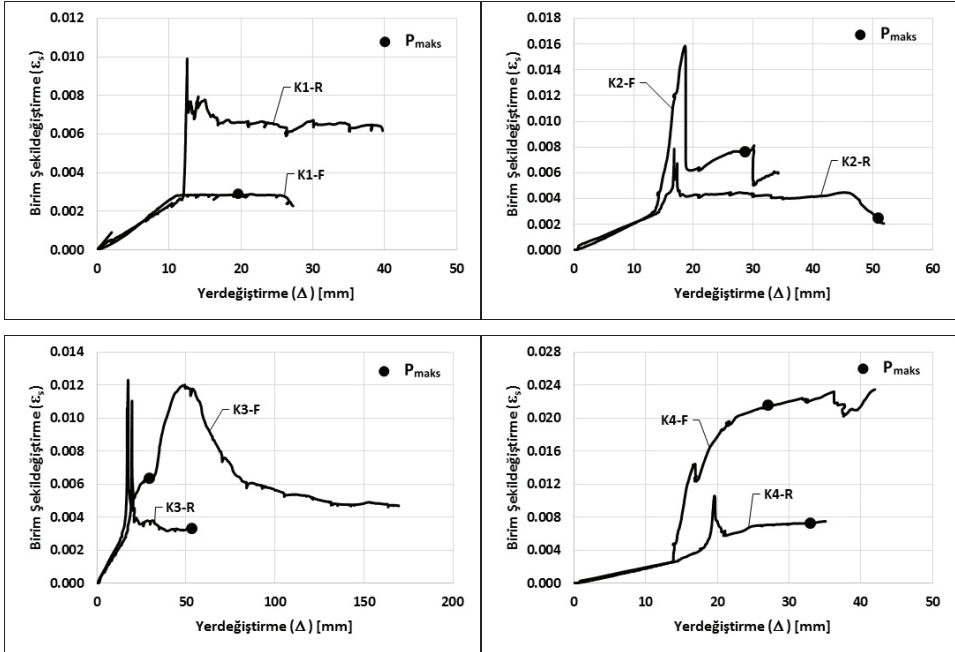
2.4.5. Beton ve Donatı Çeliğinin Şekildeğiştirme Davranışları

Lifli betonun ve lifli beton içerisindeki çekme donatısının şekildeğiştirme davranışları, yapı elamanlarının tasarım esaslarının geliştirilmesi bakımından önem arz etmektedir. Bu nedenle, kirişlerde en büyük şekildeğiştirmelerin olduğu kiriş orta bölgesindeki beton ve donatı için şekildeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Kirişlerin en dış beton basınç lifleri (üç adet) ve çekme donatılarının her biri için şekildeğiştirme ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5). Her bir kiriş için en büyük birim şekildeğiştirmelerin elde edildiği ölçümler, lifli ve lifsiz kirişler için Şekil 17-18'de karşılaştırılmıştır. Yerdeğiştirmeye bağlı olarak sunulan bu grafiklerde maksimum yüke (P_{maks}) karşılık gelen noktalar grafik üzerine işaretlenmiştir.

Lifsiz kirişlerde beton için elde edilen maksimum beton şekildeğiştirmelerinin 0.0021-0.0039 arasında, çelik lifli kirişlerde ise 0.0022-0.0043 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 17). Yüksek donatı oranına sahip K3-F ve K4-F kirişlerinde maksimum beton şekildeğiştirmesi maksimum yük değerinde elde edilmiş ve bu değer beton ezilmesi gözlenmiştir. Düşük donatı oranına sahip K1-F ve K2-F kirişlerinde ise maksimum beton şekildeğiştirmesi, maksimum yük sonrası belirli bir dayanım azalması gerçekleştiği sonra gözlenmiştir. Bu durum düşük donatı oranlı kirişlerde dayanım azalmalarının beton ezilmesinden değil, çekme bölgesindeki liflerin sıyrılmasından kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 17 - Lifli ve Lifsiz Kirişlerin Beton Şekildeğiştirmelerinin Karşılaştırılması



Şekil 18 - Lifli ve Lifsiz Kirişlerin Donatı Şekildeğiştirmelerinin Karşılaştırılması

En düşük donatı oranına sahip K1 kirişinde lifsiz durumda donatı şekildeğiştirmesi daha yüksek elde edilirken, donatı oranı arttıkça lifli kirişlerde elde edilen şekildeğiştirmeler lifsiz kirişlerdekilerin çok üzerine çıkmıştır (Şekil 18). Lifli kirişlerde geleneksel betonarmedekinin aksine, donatı oranı arttıkça donatı şekildeğiştirmeleri de artmıştır. En yüksek donatı oranına sahip K4-F kirişinde yük taşıma kapasitesine ulaşıldığında donatı pekleşme bölgesine geçerken, diğer kirişlerde daha düşük düzeylerde kalmıştır.

Bu sonuçlar, lifli kirişlerde taşıma kapasitesine ulaşıldığı andaki beton ve çelik şekildeğiştirme değerlerinin donatı oranına bağlı olarak geleneksel betonarmeden farklı değerler alabildiğini göstermektedir. UYPLB'da kullanılan lif oranının da bunda etkili olacağı söylenebilmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, betonarme kirişlerde Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının, kiriş yerdeğiştirme ve eğrilik sünekliği, taşıma kapasitesi, eğilme rijitliği, kırılma şekilleri ve çatlak davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan beton içeriğinde %1.0 oranında düz mikro lif ve %0.5 oranında kancalı makro lif karma olarak kullanılmıştır. Düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarını temsil eden ($\rho=0.009-0.043$) dokuz adet kiriş üzerinde dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve salt eğilme davranışları incelenmiştir. İncelenen betonarme kirişlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- UYPLB içeren kirişlerde yerdeğiştirme süneklikleri 2.59-5.03 arasında, eğrilik süneklikleri 7.35-19.94 arasında elde edilmiştir. $\rho=0.019$ 'luk donatı oranı ve daha yüksek donatı oranları için sünekliklerde lifsiz duruma göre %42-%91 artış sağlanmıştır. Düşük donatı oranında ($\rho=0.009$) ise lif kullanımı literatürdeki çalışmalarda da görüldüğü gibi yerdeğiştirme sünekliğinde önemli oranda azalmaya neden olmuştur. Bununla birlikte, incelenen tüm donatı oranları için yeterli sünekliğin sağlanabildiği belirlenmiştir. Buna göre, UYPLB'un yüksek basınç kapasitesinin etkin olarak kullanılabilmesi ve daha ekonomik kiriş boyutlarının uygulanabilmesi için yüksek donatı oranlarının kullanılabilceği düşünülmektedir.
- Yük/moment taşıma kapasiteleri bakımından UYPLB kullanımının lifsiz duruma göre %15-%48 oranında artış sağladığı belirlenmiştir. Taşıma kapasitesindeki artışlar donatı miktarı ile ters orantılı olarak değişim göstermiştir.
- Kirişlerin orta bölgesindeki etkin eğilme rijitlikleri, UYPLB kullanımı ile lifsiz duruma göre ortalama %10 arttırmıştır. Eğilme rijitliklerinin değişimi ile donatı oranı arasında belirli bir eğilim tespit edilmemiştir.
- UYPLB kullanımı ile elastik davranış bölgesindeki maksimum çatlak genişliklerinde ortalama %28 azalma meydana gelmiştir. Taşıma gücü sınır durumunu temsil eden plastik davranış bölgesinde ise, maksimum çatlak genişlikleri lifsiz duruma göre ortalama 2.5 kat artmıştır. Çatlak genişliklerinin değişimi ile donatı oranı arasında belirli bir eğilim görülmemiştir.
- UYPLB kullanımı kirişlerdeki çatlak dağılımını geleneksel betonarmeye göre büyük ölçüde değiştirmiştir. Kiriş boyunca genel olarak çok sayıda küçük çatlak oluşmakla birlikte, taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra orta bölgede bir veya iki büyük çatlak oluşmakta ve bunlar kırılmanın (göçmenin) donatı kopması ile gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Ancak, bu aşamaya kadar olan kısımda lifli betonun basınç sünekliği sayesinde büyük şekildeğiştirme kapasitesi sağlanabilmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kirişlerde UYPLB kullanımının süneklik, taşıma kapasitesi, eğilme rijitliği ve elastik bölgedeki çatlak genişliklerini sınırlama bakımından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Bu avantajlar kullanılan lif içeriğine (tipine ve miktarına) ve donatı oranına bağlı olarak önemli değişimler gösterebilecektir. Bu sonuçlar ışığı altında, farklı lif içerikleri ve donatı oranları için benzer çalışmaların yapılması, UYPLB'un sayısal hesap yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Semboller

EI_e : Etkin eğilme rijitliği

f_y : Donatı akma dayanımı

f_u : Donatı çekme dayanımı

M_{maks} : Moment taşıma kapasitesi

M_{den} : Deneysel moment taşıma kapasitesi

M_{teo} : Teorik moment taşıma kapasitesi

- M_u : Maksimum eğriliğe karşılık gelen moment taşıma kapasitesi
 M_y : Akma momenti
 L : Kiriş açıklığı
 P : Yük
 P_{maks} : Yük taşıma kapasitesi
 P_u : Maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi
 P_y : Akma yükü
 Δ : Sehim (düşey yerdeğiştirme)
 Δ_u : Maksimum yerdeğiştirme
 Δ_y : Akma yerdeğiştirmesi
 ϵ_c : Beton birim şekildeğiştirmesi
 ϕ_y : Akma eğriliği
 ϕ_u : Maksimum eğrilik
 μ_Δ : Yerdeğiştirme sünekliği
 μ_ϕ : Eğrilik sünekliği
 ρ : Çekme donatısı oranı
 ρ_b : Dengeli donatı oranı

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya 113M432 nolu proje kapsamında destek sağlayan TÜBİTAK'a ve akışkanlaştırıcı katkıları konusunda destek sağlayan BASF firmasına teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- [1] Wille, K., Naaman, A. E., Parra-Montesinos, G. J., Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 Mpa (22 ksi): a simpler way, ACI Materials Journal, 108, 1, 46-54, 2011.
- [2] Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S., Parra-Montesinos, G. J., Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, Materials and Structures, 45, 309-324, 2012.
- [3] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., Pu, X., Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials, Cement and Concrete Composites, 34, 538-544, 2012.

- [4] Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., Karabulut, A. S., Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, *Construction and Building Materials*, 23, 1223-31, 2009.
- [5] Yudenfreund, M., Skalny, J., Mikhail, R.S., Brunauer, S., Hardened portland cement pastes of low porosity, II. Exploratory studies, Dimensional changes, *Cement and Concrete Research*, 2, 3, 331-348, 1972.
- [6] Roy, D. M., Gouda, G. R., Bobrowsky, A., Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques, *Cement and Concrete Research*, 2, 349-366, 1972.
- [7] Bache, H. H., *Densified cement/ultrafine particle-based materials*. 2nd int. Conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, 1981.
- [8] Richard, P., Cheyrezy, M., *Composition of reactive powder concretes*. *Cement and Concrete Research*, 25, 7, 1501-1511, 1995.
- [9] AFGC, *Recommendation: Ultra high performance fibre-reinforced concretes*, revised ed., Association Française de Génie Civil; Service d'études techniques des routes et autoroutes, 2013.
- [10] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Frönlich, S., *Ultra-High Performance Concrete UHPC*, Betonkalender, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014.
- [11] JSCE, *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks*, Concrete Engineering Series, 82, Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [12] Russell, H. G., Graybeal, B. A., *Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report project bridge community*, FHWA Publication HRT-13-060, Federal Highway Administration, 2013.
- [13] Gowripalan, N., Gilbert, I., *Design guidelines for ductal prestressed concrete beams*, VSL Australia, 2000.
- [14] Naaman, A. E., *High performance fiber reinforced cement composites classification and applications*, CBM-C1 International workshop, Karachi, Pakistan, 389-400, 2007.
- [15] Taşdemir, M. A., Bayromov, F., *Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, itüdergisi/d, mühendislik serisi*, 1, 2, 125-144, 2002.
- [16] SAMARIS, *Report D22, Full scale application of UHPFRC project rehabilitation of bridges-from the lab to the field*, European project 5th FWP/SAMARIS-Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures-WP 14: HPRCC, 2005.
- [17] Moreillon, L., Menétrey, P., *Rehabilitation and strengthening of existing rc structures with uhpfrc: various application*, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, France, RILEM Publication S. A. R. L, 127-136, 2013.
- [18] Wang, Y. C., Lee, M. G., *Ultra-high strength steel fiber reinforced concrete for strengthening of RC frames*, *Journal of Marine Science and Technology*, 15, 3, 210-218, 2007.

- [19] Tayeh, B. A., Bakar, B. H. A., Johari, M. A. M., Voo, Y. L., Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation-A review, *Procedia Engineering*, 54, 525-538, 2013.
- [20] İlki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, I., Kumbasar, N. "Seismic retrofit of brittle and low strength RC columns using fiber reinforced polymer and cementitious composites", *Journal of Advances in Structural Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 325-347, 2009.
- [21] Yavaş, A., Türker, K., Terzi, M., Hasgül, U., Birol, T., Gören, A., Ultra yüksek dayanımlı lifli beton ile güçlendirilmiş betonarme kolonların tersinir yükler altındaki davranışının incelenmesi, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [22] Tanarlan H.M., Alver N., Jahangiri, R., Yaçınkaya, Ç., Yazıcı, H. Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition, *Construction and Building Materials*, 155, 45–55, 2017.
- [23] Guan, Q., Zhang, P., Xie, X., Flexural behavior of steel fiber reinforced high-strength concrete beams, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 6, 1, 1-6, 2013.
- [24] Yang, I., Joh, C., Kim, B., Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, *Engineering Structures*, 32, 3478-3487, 2010.
- [25] Khalil, W. I., Tayfur, Y. R., Flexural strength of fibrous ultra high performance reinforced concrete beams, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8, 3, 200-214, 2013.
- [26] Stürwald, S., Fehling, E., Design of reinforced UHPFRC in flexure, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel University Press, Germany, 403-410, 2012.
- [27] Dancygier, A. N., Savir, Z., Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios, *Engineering Structures*, 28, 1503-1512, 2006.
- [28] Türker, K., Birol, T., Yavaş, A., Hasgül, U., Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi, *Afyon Kocatepe Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 776-785, 2016.
- [29] Ashour, S. A., Wafa, F. F., Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, 90, 3, 279-287, 1993.
- [30] Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, *Engineering Structures*, 102, 409-423, 2015.
- [31] Bertram, G., Hegger, J., Shear carrying capacity of ultra-high performance concrete beams, 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, 2008.
- [32] Voo, Y. L., Poon, W. K., Foster, S. J., Shear strength of steel fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams without stirrups, *Journal of Structural Engineering*, 136, 11, 1393-1400, 2010.

- [33] Sudheer Reedy, L., Ramana Rua, N. V., Gunneswara Rao, T. D., Shear resistance of high strength concrete beams without shear reinforcement, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1, 1, 101-113, 2010.
- [34] ACI 318-14, Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI Standard, American Concrete Institute, 2014.
- [35] Sivakamur, A., Santhanam, M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres, *Cement and Concrete Composites*, 29, 603-608, 2007.
- [36] Yoo, D. Y., Lee, J. H., Yoon, Y. S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites, *Composite Structures*, 106, 742-753, 2013.
- [37] Marković, I., High-performance hybrid-fibre concrete-development and utilization, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, 2006.
- [38] Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., Koh, K. T., Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials*, 25, 4144-4155, 2011.
- [39] Rossi, P., Arca, A., Parant, E., Fakhri, P., Bending and compressive behaviors of a new cement composite, *Cement and Concrete Research*, 35, 1, 27-33, 2005.
- [40] Birol, T. Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2016.
- [41] Türk Standartları Enstitüsü, TS500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Bakanlıklar, Ankara, 2000.
- [42] Park, R., Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing, *Bulletin of the New Zealand National Society for the Earthquake Engineering*, 22, 3, 155-166, 1989.
- [43] Yoo, D., Yoon, Y., Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, *Engineering Structures*, 102, 409–423, 2015.
- [44] Dancygier, A.N., Berkover, E., Cracking localization and reduced ductility in fiber-reinforced concretebeams with low reinforcement ratios *Engineering Structures* 111, 411–424, 2016.
- [45] Park, R., Ruitong, D., Ductility of doubly reinforced concrete beam sections, *ACI Structural Journal*, 85, 2, 217-225, 1988.
- [46] Rashid, M. A., Mansur, M. A., Reinforced high-strenght beams in flexure, *ACI Structural Journal*, 84, 4, 330-341, 2005.

Zemin Büyütme Katsayılarının Betonarme Taşıyıcı Sistemlerin Sismik Performans Potansiyeline ve Maliyetine Etkileri

Peyman AZİMİ¹
Hatice GAZİ²
Cenk ALHAN³

ÖZ

Bu çalışmada, zemin koşullarına bağlı olarak değişen zemin büyütme katsayıları ile oluşturulan farklı yönetmeliklerdeki farklı tasarım ivme spektrumlarının kullanılmasının bina türü yapıların betonarme taşıyıcı sistemlerinin maliyetine ve sismik performans potansiyeline olan etkileri karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı kat sayılarına sahip prototip betonarme binalar, farklı zemin sınıfları için oluşturulan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY2007), Uniform Building Code (UBC97) ve Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10) yönetmeliklerindeki tasarım ivme spektrumları kullanılarak tasarlanmış ve betonarme taşıyıcı sistemlerin maliyet karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca, tasarımı yapılan taşıyıcı sistemlerin zaman tanım alanı analizleri temsili tarihi deprem kayıtları altında gerçekleştirilerek sismik performans potansiyelleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin büyütme katsayıları, spektral analiz, zaman tanım analizi, sismik performans potansiyeli, yapı maliyeti.

ABSTRACT

Effects of Soil Amplification Factors on the Seismic Performance Potential and Cost of Reinforced Concrete Structural Systems

In this study, the effect of using different design acceleration spectra of different seismic codes, which are constructed using soil amplification factors which vary depending on the soil conditions, on the cost and seismic performance potential of reinforced concrete structural systems of buildings is investigated comparatively. Accordingly, prototype

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 8 Mart 2017 günü ulaşılmıştır. 17 Nisan 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.308431

1 İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - peyman.azimi90@gmail.com

2 İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - hgazi@istanbul.edu.tr

3 İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - cenkalkan@istanbul.edu.tr

reinforced concrete buildings of different number of stories are designed using design acceleration spectra defined in the Turkish Earthquake Code (DBYBHY2007), Uniform Building Code (UBC97) and Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-10) that are generated for different soil types and cost comparisons of the reinforced concrete structural systems are carried out. In addition, time history analyses of these structural systems are carried out for representative historical earthquake records and their seismic performances are compared.

Keywords: Soil amplification factors, response spectrum analysis, time history analysis, seismic performance potential, structural cost.

1. GİRİŞ

Deprem sırasında, ana kayadaki deprem dalgalarının özellikle yumuşak zeminlerde ortaya çıkan zemin büyütmesine uğraması, hem frekans içeriğinin değişmesine hem de genliklerin büyümesine neden olabilmektedir. Bu durum, üst yapıda tasarım yüklerinin artmasına yol açabilmektedir. DBYBHY2007 [1]'de, deprem yüklerini belirleyen tasarım ivme spektrumu, zemin sınıfına göre T_A ve T_B adı verilen spektrum karakteristik periyotlarının değiştirilmesi suretiyle değiştirilmektedir. Böylece daha kötü zemin sınıfları için kullanılan daha yüksek T_B değerleri vasıtasıyla zemin büyütmesinin etkisi, esasen görece uzun periyotlu ve esnek yapılar için olmak üzere dolaylı olarak göz önüne alınmaktadır. Bu yönetmelikte doğrudan tanımlanan zemin büyütme katsayıları bulunmamaktadır. Öte yandan, UBC97 [2] ve ASCE/SEI 7-10 [3] gibi Amerikan yönetmeliklerinde ve 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girecek olan Türk Bina Deprem Yönetmeliği'nde ise; zemin koşullarına bağlı olarak, spektrum karakteristik periyotlarının değiştirilmesine ek olarak yönetmelikte açıkça tanımlanan zemin büyütme katsayıları vasıtasıyla da daha kötü zemin koşulları için tasarım ivme spektrumu hem kısa hem de uzun periyotlu yapıları etkileyecek şekilde doğrudan büyütülmektedir. Bu durum, daha kötü zemin koşulları için, yapıların taşıyıcı sistemlerinin daha büyük deprem kuvvetlerine göre tasarlanması anlamına gelmektedir. Buna bağlı olarak, farklı zemin bölgelerinde tasarlanan betonarme taşıyıcı sistemlerin eleman boyutları da farklı olabilmektedir. Bu ise, maliyeti ve sismik performans potansiyelini etkilemekte olup bu etkinin değerlendirilmesi, farklı yönetmeliklerde farklı şekilde dikkate alınan zemin büyütme katsayılarının kullanılmasının gerekliliği ve yeterliliği hakkında bir değerlendirme yapılabilmesi açısından önemlidir.

Deprem mühendisliği ve sismik tasarım açısından, uyarma ile tepki arasındaki ilişkiyi en açık biçimde ifade eden araç deprem spektrumdur. Deprem spektrumları, tasarım açısından oldukça önemli bir işleve sahip olan maksimum tepkiyi doğrudan ifade eder. Spektral değerler, odak, odak çevresi ve fay ara yüzleri boyunca enerjinin açığa çıkma mekanizması, odak derinliği, jeolojik değişimler ve depremin büyüklüğü gibi etmenlerin yanı sıra kayıt istasyonunun bulunduğu bölgedeki yerel zemin koşullarını da içeren birçok faktöre bağlıdır [4]. Yerel zemin koşulları büyük depremlerden gelen sismik dalgaların hasar olasılığının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır [5]. Araştırma çalışmalarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda ve Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) gibi meydana gelen birçok büyük deprem sonucunda, deprem yönetmelikleri genellikle yerel zemin koşullarının önemli rol oynadığını kabul etmiştir [6].

Zemin büyütmesi, geçmişte meydana gelen birçok yıkıcı depremde ortaya çıkmıştır. Gediz depremi (1970), Romanya depremi (1979), Mexico City depremi (1985) ve Loma Prieta depremi (1989), zemin büyütme etkisinin görüldüğü depremlerden başlıcalarıdır [7]. 1985 Michoacan depreminden sonra Mexico City'de görülen hasarlar, yerel zemin koşullarının sismik yanıt üzerindeki etkileri hakkında incelemelerin başlamasına sebep olmuştur. Ana kayadan yeryüzüne çıkan dalgaların genlikleri şehrin göl yatağına kurulmuş bölgesinde yaklaşık beş kat büyümüştür. Kil zeminin yakınında bulunan yapılar üzerinde büyütülmüş dalgaların yıkıcı etkileri olmuştur. Benzer şekilde 1989'da meydana gelen Loma Prieta depreminde de aynı sonuçlara yakın bir durum ortaya çıkmıştır. Netice itibarıyla, sismik tasarımda, yerel zemin koşullarının büyütme etkilerinin önemi açıkça ortadadır [5].

Zemin büyütme etkileri ve bu etkilere maruz kalan yapıların davranışları üzerine literatürde birçok araştırma mevcuttur. Örneğin, Trifunac [8], frekansa bağlı zemin büyütme faktörlerinin fiziksel tanımını, bölgesel zemin ve jeolojik çevre koşullarına bağlı olarak ortaya koyan basit bir denklem önermiştir. Bouckovalas ve Kouretzis [9], 1999 Atina depreminde sert zeminlerde ortaya çıkan amplifikasyonun etkilerini incelemiştir. Böylece NEHRP-97 [10] ve EC-8 [11] yönetmeliklerinde yer alan sıkı zeminlerin ve yumuşak kayaların aynı zemin sınıfında yer almasının olumsuz etkileri ve söz konusu şartnamelerin eksikliğini ortaya konmuştur. Şafak [12], zemin büyütme türleri ve bu fenomeni üreten mekanizmaları gözden geçirerek deprem kayıtlarını karakterize etmek amacıyla kullanılan modeller ve yöntemler hakkında bilgi sunmuştur. Finn ve Wightman [5], deprem yönetmeliklerinde zemin koşullarının sınıflandırılması ve çeşitli zemin sınıflarına yoğunluk ve frekansa bağlı büyütme faktörlerinin atanması hakkında dönemin gelişmelerini ortaya koymuş ve Kanada Ulusal Yapı Kanunu 2005 (NBCC 2005) sürümünde önerilen yeni zemin büyütme faktörlerini değerlendirmiştir. Zaslavsky ve diğ. [13], yerel zemin sınıflandırmasına göre ivme tepki spektrumlarını doğrulamak amacıyla $V_{s,30}$ parametresi ve ilgili F_a ve F_v faktörlerine bağlı olan NEHRP-97 [10] zemin sınıflandırmasının uygulanabilirliğini, İsrail bina standartları için incelemiştir. Zemin sınıflandırması ve dolayısıyla zemin amplifikasyonu genelleştirmesinin, tek bir parametre, yani $V_{s,30}$ vasıtasıyla tavsiye edilemeyeceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, İsrail jeolojisinin kısa mesafelerde ciddi biçimde değişebilmesi nedeniyle aynı sınıftaki zeminlerde, hem şekil hem de genlik ve frekans açısından farklılıklar görüldüğü ortaya konmuştur. Şişman [14], zeminlerin dinamik özelliklerinin ve zemin büyütme faktörlerinin belirlenmesi amacıyla alternatif iki yöntem kullanarak elde edilen büyütme faktörlerini birbirleriyle karşılaştırmıştır. Sonuç olarak hakim frekans ve zemin büyütme faktörü açısından birbiri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Zemin büyütme etkilerinin önemini ortaya koyan ve bu etkilerin yapısal tasarımda dikkate alınması gerektiğine doğrudan veya dolaylı olarak işaret eden bu çalışmaların yanı sıra [7], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21] ve [22] de zemin büyütme faktörleri ile ilgili diğer araştırma çalışmaları arasında sayılabilir.

Bu çalışmada ise, zemin büyütmesi etkisini dikkate almak amacıyla yönetmeliklerde tanımlanmış olan zemin büyütme katsayılarının betonarme taşıyıcı sistemlerin sismik performans potansiyeline ve maliyetine etkilerinin incelenmesi amaçlanmış olup; bu amaç doğrultusunda farklı kat sayılarına (2, 5, 10 ve 15) sahip prototip betonarme binalar farklı zemin sınıfları için oluşturulan DBYBHY2007 [1], UBC97 [2] ve ASCE/SEI 7-10 [3] tasarım ivme spektrumları kullanılarak tasarlanmış ve tasarlanan bu binaların betonarme taşıyıcı sistemlerinin maliyetleri ile dört adet tarihi deprem kaydı altındaki performans potansiyelleri karşılaştırılmıştır. DBYBHY2007'ye göre 1. derece deprem bölgesinde bulunduğu varsayılan söz konusu binaların sismik performans potansiyeli

karşılaştırmalarında en üst kat deplasmanları ve görelî kat öteleme oranları göz önünde bulundurulmuştur. 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girecek olan yeni deprem yönetmeliğimizde (Türk Bina Deprem Yönetmeliği – TBDY2019) eski deprem tasarım spektrumu formülasyonunun terk edilerek zemin büyütme katsayılarının kullanıldığı ASCE/SEI 7-10'a çok yakın bir deprem tasarım spektrumunun tanımlanıyor olması dikkate alındığında, bu çalışmada yer alan ASCE/SEI 7-10 sonuçları ile DBYBHY2007 sonuçlarının karşılaştırılması, bir anlamda TBDY 2019'un bu açıdan değerlendirilmesine de yardımcı olacaktır. TBDY 2019'da söz konusu zemin büyütme katsayılarının kullanılması, deprem mühendisliği camiasında ilk bakışta taşıyıcı sistemlerin DBYBHY2007'ye kıyasla daha yüksek spektral ivmelere göre tasarlanacağı ve daha maliyetli olacağı intibasını uyandırabilir. Bu çalışma, söz konusu algının gerçeği yansıtıp yansıtmadığının ortaya konması açısından da önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın 2. Bölümünde DBYBHY2007 [1], UBC97 [2] ve ASCE/SEI 7-10 [3] tasarım ivme spektrumları hakkında bilgi verilmiş ve söz konusu spektrumlar özellikle ilgili yönetmelikte tanımlanan zemin büyütme katsayıları açısından karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan yöntem, 3. Bölüm'de verilmiş olup; 4. Bölümde incelenen binalar için gerçekleştirilen spektral analizlerin ve daha sonrasında da seçilen dört yer hareketi etkisinde gerçekleştirilen zaman tanım analizlerinin bulgularına yer verilmiştir. 5. Bölümde ise, çalışma kapsamında elde edilen tüm bulgular doğrultusunda elde edilen sonuçlar bulunmaktadır.

2. TASARIM SPEKTRUMLARI

Tasarım spektrum grafiği, deprem etkisine maruz kalan yapının tasarıma esas deprem kuvvetlerini belirleyen eğri olup yönetmeliklerde genellikle tasarım ivme spektrumu kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında DBYBHY2007, UBC97 ve ASCE/SEI 7-10 yönetmeliklerinde yer alan tasarım ivme spektrumları ele alınmış olup spektrumlar hakkında detaylı bilgi, sırasıyla Bölüm 2.1, 2.2 ve 2.3'de verilmiştir.

2.1. DBYBHY2007 Tasarım İvme Spektrumu

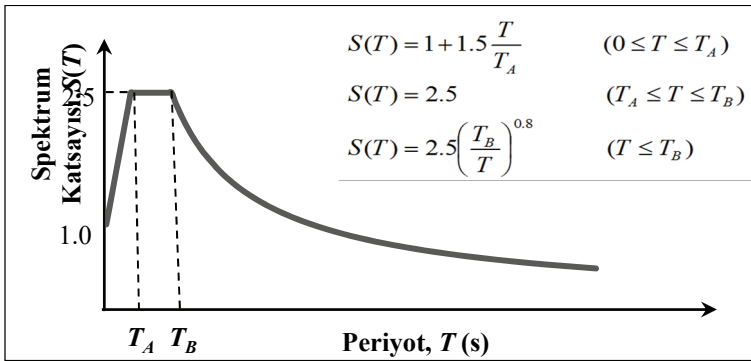
DBYBHY2007'de yer alan elastik tasarım ivme spektrumu, yerel deprensellik ve zemin koşulları göz önüne alınarak belirlenmektedir. Bu nedenle, öncelikle ilgili parametrelerin tarif edilmesinde fayda vardır. Bu parametrelerden biri olan Etkin Yer İvme Katsayısı (A_0), DBYBHY2007 Tablo 2.2'den görülebileceği üzere, deprem bölgelerine göre değişkenlik göstermektedir ve 1., 2., 3. ve 4. deprem bölgelerinde sırasıyla 0.4, 0.3, 0.2 ve 0.1 değerlerini almaktadır. Bir diğer parametre ise, bina kullanım amacına veya türüne bağlı olarak Bina Önem Katsayısı (I) olarak adlandırılmış olup bu parametrenin aldığı değerler, DBYBHY2007 Tablo 2.3'de tanımlandığı üzere önemli binalardan daha az önemli olan binalara doğru azalacak şekilde 1.5 ~ 1.0 arasında değişen değerler almaktadır.

DBYBHY2007'de zemin sınıflarını tanımlamak için ise öncelikle zemin grupları belirlenmektedir. Zemin grupları, DBYBHY2007 Tablo 6.1'de verilmiş olup en iyi zeminden en kötü zemine doğru olacak şekilde A, B, C ve D olarak isimlendirilen 4 zemin grubu bulunmaktadır. Bu zemin grupları göz önüne alınarak tanımlanan zemin sınıfları ise, DBYBHY2007 Tablo 6.2'de sunulmuştur. İlgili tabloya göre, yine en iyiden en kötüye doğru

olacak şekilde Z1, Z2, Z3 ve Z4 olarak isimlendirilen 4 zemin sınıfı bulunmakta olup söz konusu zemin sınıfları, zemin gruplarının yanı sıra, bu grupların zemin tabakası yüksekliklerine bağlı olarak belirlenmektedir. DBYBHY2007 Tablo 2.4'de T_A ve T_B olarak isimlendirilen zemin karakteristik periyotları tanımlanmıştır ve zemin sınıflarına bağlı olarak değişmektedir. Bu doğrultuda, $(T_A - T_B)$ değerleri ile belirlenen tasarım ivme spektrumunun sabit ivme bölgesini belirleyen aralık, Z1, Z2, Z3 ve Z4 zemin sınıfları için giderek artmakta olup bu aralıklar sırasıyla (0.10 - 0.30), (0.15 - 0.40), (0.15 - 0.60) ve (0.20 - 0.90) saniyedir.

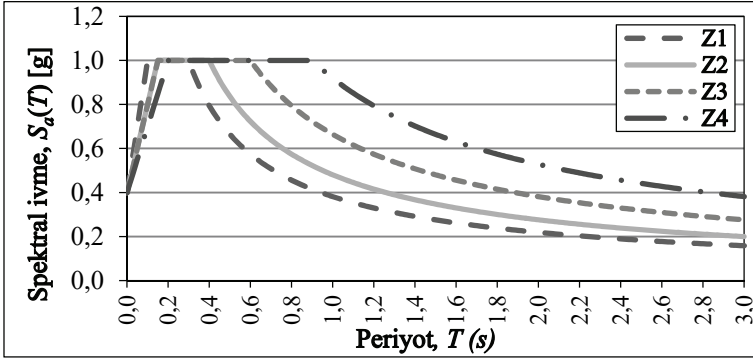
Spektrum katsayısı $S(T)$ ise, T_A ve T_B spektrum karakteristik periyotları kullanılarak; Şekil 1'deki gibi elde edilmektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere, T_A ve T_B periyotları, spektrum katsayısı grafiğinde yer alan sabit ivme bölgesinin alt ve üst sınırlarını göstermektedir. Diğer taraftan yukarıdaki gibi tanımlanan $S(T)$, A_0 ve I parametreleri ile yer çekimi kuvveti (g) çarpılarak elastik ivme spektrumunun ordinatı olan elastik spektral ivme $S_a(T)$ parametresi aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$S_a(T) = S(T) \times (A_0 \times I \times g) \quad (1)$$



Şekil 1 - DBYBHY2007'de Yer Alan Tasarım İvme Spektrum Katsayısı

Konut türü bina ($I = 1$) ve 1. derece deprem bölgesi ($A_0 = 0.4$) için; farklı zemin sınıflarına göre oluşturulan tasarım ivme spektrumları, Şekil 2'deki gibi elde edilebilir. Bu şekilde görüldüğü gibi farklı zemin sınıfları için sırasıyla en iyi zeminden (Z1) en kötü zemine (Z4) doğru tasarım ivme spektrumlarının azalan uzun-periyot bölümlerinde (sabit hız bölgesi) spektral değerler artarken; sabit ivme bölgesinde ise spektral değerler aynı (1.0 g) kalmakta ancak söz konusu kısım Z1'den Z4'e doğru genişlemektedir. Aynı bir doğal periyot değeri için en büyük farklılıkların uzun-periyot bölgesinde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum daha detaylı olarak Bölüm 2.5'te incelenecektir.

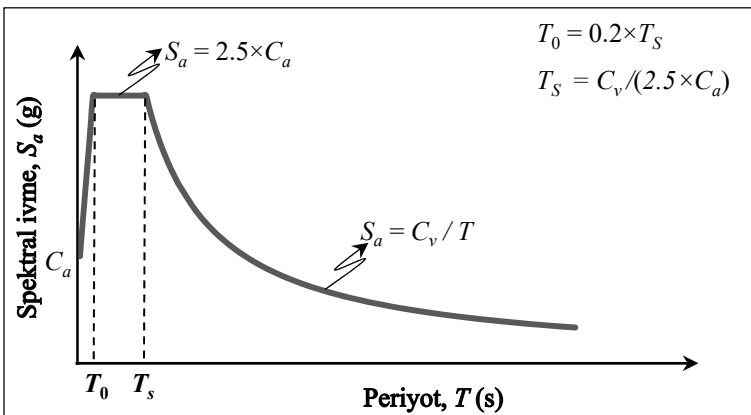


Şekil 2 - DBYBHY2007'de Farklı Zemin Sınıflarına Göre Tasarım İvme Spektrumları ($A_0=0.4$ ve $I=1$ için)

2.2. UBC97 Tasarım İvme Spektrumu

UBC97'de, DBYBHY2007'deki gibi ayrıca bir spektrum katsayısı tanımlanmamakta; doğrudan g cinsinden tasarım ivme spektrumu kullanılmaktadır. Tasarım ivme spektrumu, zemin koşulları, deprem bölgesi ve fay hattına olan mesafeye bağlı olarak değişmektedir.

Anılan şartnamede ortaya konan tasarım ivme spektrumunun oluşturulmasında en önemli parametreler, sismik katsayılar olarak tanımlanan C_a ve C_v olup; tasarım ivme spektrumu, söz konusu C_a ve C_v sismik katsayıları ve yapının periyoduna (T) bağlı olarak, Şekil 3'teki gibi elde edilir. Bu şekilde görüldüğü üzere, tasarım ivme spektrumunun sabit-ivme bölümünün alt ve üst sınırlarını gösteren ve yerel zemin koşullarına göre değişen karakteristik periyotlar T_0 ve T_S olarak adlandırılmış olup; C_a ve C_v katsayılarına bağlı olarak, yine aynı şekil üzerinde verilen denklemler ile elde edilmektedir.

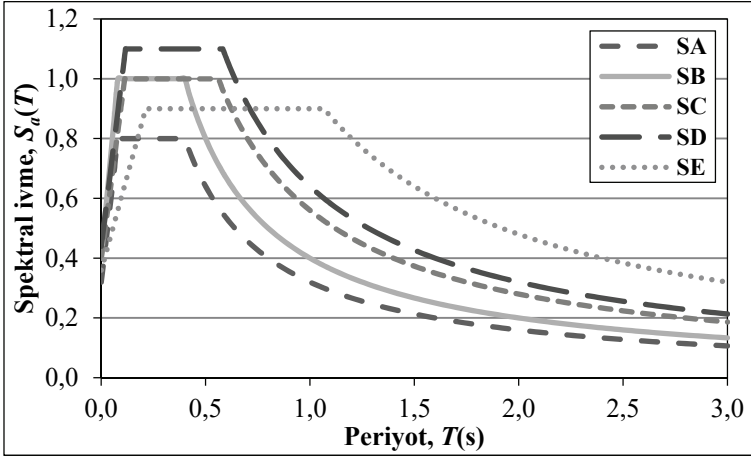


Şekil 3 - UBC97 Yönetmeliği Tasarım İvme Spektrumu

C_a ve C_v sismik katsayıları ise zemin sınıfı, sismik bölge faktörü (Z) ve N_a , N_v yakın kaynak katsayılarına bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrelerden Z sismik bölge faktörü, DBYBHY2007'deki etkin yer ivmesi katsayısına (A_0) denk gelmekte olup; UBC97'de tanımlanmış olan deprem bölgelerine bağlı olarak değerler almaktadır. UBC97'de deprem bölgeleri beş farklı bölgeye (1, 2A, 2B, 3 ve 4) ayrılmaktadır. Z faktörü ise, Deprem bölgesi 1'den Deprem bölgesi 4'e doğru 0.075 ~ 0.4 aralığında artarak değişen değerler almaktadır (UBC97 Tablo 16-1). N_a ve N_v yakın kaynak katsayıları ise; sırasıyla UBC97 Tablo 16-S ve Tablo 16-T'de verilmekte olup sismik kaynak türü ile faya olan en yakın mesafeye göre değişen değerler almakta ve yakın mesafe deprem etkilerini spektral ivme değerlerine yansıtmak için kullanılmaktadır. N_a ve N_v katsayılarının tanımlanmasında kullanılan sismik kaynak türü, UBC97'de Maksimum Moment Magnitudü (M) ve Kayma Hızı (SR)'na bağlı olarak üçe ayrılmaktadır: A türü sismik kaynak, sismik aktivitesi yüksek olan (kayma hızı en az 5 mm/sene) ve büyük magnitudü ($M \geq 7$) depremleri yaratma gücüne sahip sismik kaynaktır. B türü sismik kaynak, A ve C sismik kaynak türü olmayan sismik kaynaktır. C türü sismik kaynak ise, sismik aktivitesi nispeten düşük (en fazla 2 mm/sene) olan ve büyük magnitudü depremleri yaratma potansiyeli olmayan ($M < 6.5$) sismik kaynaktır.

UBC97'de, yukarıda kısaca özetlenmiş olan Z , N_a ve N_v parametrelerine bağlı olarak tanımlanan C_a ve C_v katsayılarının aldığı değerler, sırasıyla ilgili yönetmelikte yer alan 16-Q ve 16-R tablolarında sunulmuş olup bu katsayılar iyi zeminden kötü zemine doğru artmaktadırlar. Yani zemin büyütmesi etkileri bu katsayıların içerisinde gizli bir çarpan olarak yer almaktadır ve zemin büyütme etkisini tarif etmek üzere ayrıca bir zemin büyütme katsayısı tanımlanmamıştır. Durum, ilgili tablolardaki değerler kullanılarak bir örnekle açıklanacak olursa, Deprem Bölgesi 1'de ($Z=0.075$) SA zemin sınıfı için C_a katsayısı 0.06 iken, yine aynı deprem bölgesinde SA'ya göre daha kötü bir zemin sınıfı olan SD zemin sınıfı için C_a katsayısı değeri 2 katına çıkmakta ve 0.12'ye eşit olmaktadır. Benzer şekilde, Deprem Bölgesi 2B'de ($Z=0.2$) SB zemin sınıfı için C_v katsayısı 0.20 iken, yine aynı deprem bölgesinde SB'ye göre daha kötü olan SE zemin sınıfı için C_v katsayısı değeri 3.2 katına çıkmakta ve 0.64'e eşit olmaktadır. Sismik açıdan en aktif bölge olan Deprem bölgesi 4 (DBYBHY2007'de 1. derece deprem bölgesine denk gelmektedir) için ($Z = 0.4$) ise, C_a ve C_v katsayılarının hesabında sırasıyla N_a ve N_v de ayrıca birer yakın-kaynak büyütme çarpanı olarak yer almaktadır.

UBC97'de zemin profilleri, zeminlerin kayma dalgası hızı (V_s), standart penetrasyon sayısı (N_{SPt}), drenajsız kayma mukavemeti (S_u) ve plastisite indeksi (PI) parametrelerine bağlı olarak en iyiden en kötüye doğru SA, SB, SC, SD, SE ve SF olarak isimlendirilmiş olan altı farklı sınıfta tanımlanmaktadır. Söz konusu zemin sınıflarına ait detaylı bilgiler, UBC97 Tablo 16-J'te verilmiştir. Sismik açıdan en aktif bölge olan Deprem bölgesi 4 ($Z = 0.4$) ve yakın kaynak etkilerine bağlı olarak ayrıca bir büyütme etkisi olmayan durumlar ($N_a = N_v = 1$) için, SA, SB, SC, SD, SE ve SF zemin sınıflarına ait UBC97 tasarım ivme spektrumlarının değişimi, Şekil 4'te verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere; spektral ivme değerleri referans zemin sınıfı olan SB'ye göre (DBYBHY2007'de Z2 zemin sınıfına denk gelmektedir) daha kötü olan zeminler için (SC, SD ve SE) artmakta, daha iyi olan zemin (SA) için ise azalmaktadır. Burada dikkati çeken husus, zemin kötüleştikçe sabit-ivme bölgesi genişlemekle birlikte DBYBHY2007'dekinden farklı olmak üzere bu bölgede ayrıca artış da göstermektedir.



Şekil 4 - UBC97 Tasarım İvme Spektrumları ($Z= 0.4$, faya olan mesafe ≥ 15 km: $N_a=N_v=1$)

2.3. ASCE/SEI 7-10 Tasarım İvme Spektrumu

ASCE/SEI 7-10 tasarım ivme spektrumlarının oluşturulması için izlenecek yöntem, adım adım şöyledir:

1) ASCE/SEI 7-10 Tablo 20.3-1'e göre zemin sınıfı belirlenir. Bu yönetmeliğe göre zeminler, zeminin kayma dalgası hızı (V_s) esas alınarak en iyi zeminden en kötü zemine doğru A, B, C, D, E ve F olarak isimlendirilen altı sınıfa ayrılmaktadır. V_s 'in bilinmediği yerlerde, zemin sınıfını belirlemek için bölgenin ortalama standart penetrasyon direnci (\bar{N}) ve drenajsız kayma mukavemeti (S_u) değerleri kullanılmaktadır.

2) Tasarım ivme spektrumunun oluşturulabilmesi için gerekli diğer parametreler, harita spektral ivme katsayıları olarak isimlendirilen S_S ve S_1 katsayılarıdır. %5 sönüm oranı için dikkate alınmış maksimum spektral ivme, 0.2 ve 1.0 saniye olan yapısal periyotlar için sırasıyla S_S ve S_1 olarak adlandırılmış olup bu katsayılar, Amerika Birleşik Devletleri sınırları dâhilinde yer alan herhangi bir coğrafik konum için bu şartnamede bulunan haritalarda (ASCE/SEI 7-10'da verilen Şekil (22-1) ~ (22-6)) gösterilmektedir. Bu haritalar, S_S ve S_1 'in sabit değerlerinin konturlarını göstermekte olup; her kontur hattı g 'nin yüzdesi olarak etiketlenmiştir.

3) Tablo 1 kullanılarak zemin katsayıları (F_a ve F_v) değerleri, belirlenir. Bu tabloda, S_S ve S_1 'in iki sütun arasında olan herhangi bir değeri için F_a ve F_v değerleri enterpolasyon yöntemi kullanılarak elde edilmektedir.

4) Daha önce belirlenmiş olan harita spektral ivme katsayıları S_S ve S_1 , farklı zemin sınıfları için zemin büyütme etkilerini yansıtabilmek amacıyla kısa ve uzun periyotlarda sırasıyla zemin katsayıları F_a ve F_v ile çarpılarak, maksimum deprem seviyesinde %5 sönüm için sırasıyla S_{MS} ve S_{M1} olarak tanımlanan spektral ivme parametreleri elde edilir:

$$S_{MS} = F_a \times S_S \quad (2)$$

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \quad (3)$$

Tablo 1 - ASCE/SEI 7-10'a Göre Zemin Katsayıları F_a ve F_v .

Zemin sınıfı	F_a	F_v	F_a	F_v	F_a	F_v	F_a	F_v	F_a	F_v
	$S_s \leq 0.25$	$S_1 \leq 0.1$	$S_s = 0.5$	$S_1 = 0.2$	$S_s = 0.75$	$S_1 = 0.3$	$S_s = 1.0$	$S_1 = 0.4$	$S_s \geq 1.25$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.7	1.2	1.6	1.1	1.5	1.0	1.4	1.0	1.3
D	1.6	2.4	1.4	2.0	1.2	1.8	1.1	1.6	1.0	1.5
E	2.5	3.5	1.7	3.2	1.2	2.8	0.9	2.4	0.9	2.4
F	Bölge tepki analizi (site response analiz) ASCE/SEI 7-10 Bölüm 21.1'e göre yapılacaktır.									

5) Bir önceki adımda hesaplanan spektral ivme parametreleri (S_{MS} ve S_{M1}) kullanılarak, yine %5 sönüm için tasarım depremi seviyesinde sırasıyla kısa ve uzun periyot tasarım spektral ivme parametreleri olarak tanımlanan S_{DS} ve S_{D1} parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \quad (4)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \times S_{M1} \quad (5)$$

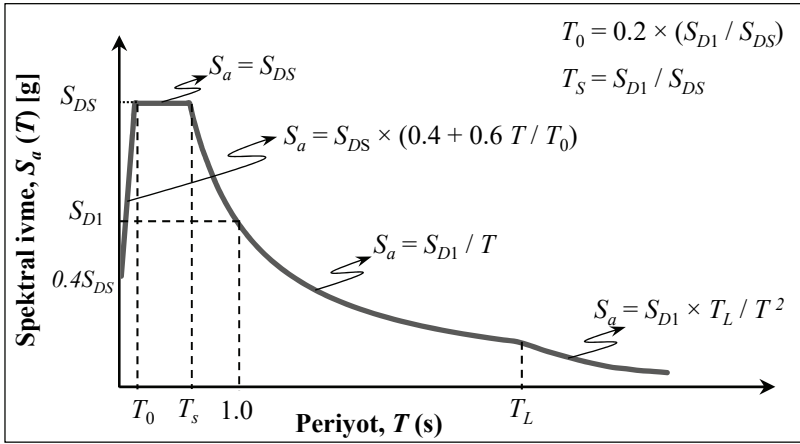
6) Tasarım ivme spektrumunun karakteristik periyotları (T_0 ve T_s), bir önceki adımda belirlenen tasarım spektral ivme parametreleri (S_{DS} ve S_{D1}) kullanılarak, Şekil 5'de verilen formüllerle hesaplanır. T_0 ve T_s karakteristik periyotları, spektrumun sabit-ivme bölümünün sırasıyla alt ve üst sınırlarını göstermekte olup; yerel zemin koşullarına göre değişmektedir.

7) Son adımda, S_a değerleri Şekil 5'de verilen formülasyonlar ile hesaplanıp şekilde görülen tasarım ivme spektrumu çizilir. Bu şekilde T_L değeri ise uzun periyoda geçiş noktasını göstermektedir ve bu değerler ilgili yönetmelikte bulunan haritalardan (ASCE/SEI 7-10'daki Şekil (22-12) ~ (22-16)'da) coğrafi konuma bağlı olarak elde edilir.

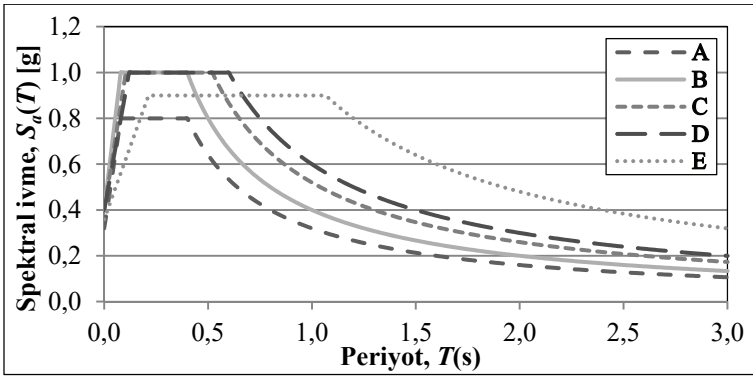
S_I ve S_S katsayılarının sırasıyla 0.6g ve 1.5g alınması durumunda tasarım ivme spektrumları Şekil 6'daki gibi elde edilebilir. Görüldüğü üzere spektral ivme değerleri, spektrumun azalan kısmında (sabit hız bölgesi) referans zemin sınıfı olan B'ye göre (DBYBHY2007'de Z2 ve UBC97'de SB zemin sınıfına denk gelmektedir) daha kötü olan zeminler için (C, D ve E) daha fazla iken, daha iyi olan zemin (A) için ise daha düşük kalmaktadır. DBYBHY2007'dekine benzer şekilde, zemin kütüleştirikçe sabit-ivme bölgesi genişlemekte ayrıca UBC97'dekine benzer şekilde bu bölgede de spektral ivme değerleri değişmektedir. Bu durum, detaylı bir şekilde Bölüm 2.5'de incelenecektir.

1 Ocak 2019'da yürürlüğe girecek olan TBDY 2019 yönetmeliğinde kısa periyot bölgesi için ve 1.0 s periyot için tanımlanan yerel zemin etki katsayıları (sırasıyla F_s ve F_I) Tablo 2'de verilmiştir. Söz konusu katsayıların ASCE/SEI 7-10'daki karşılıklarının sunulduğu Tablo 1 ile Tablo 2'nin karşılaştırılmasından görüleceği üzere; benzer S_s ve S_1 katsayıları ve benzer zemin sınıfları için tanımlanan F_a veya F_s ve F_v veya F_I katsayıları, TBDY2019 ve ASCE/SEI 7-10 yönetmeliklerinde hemen hemen aynı değerlere sahiptir. Spektral ivme

formülasyonlarının da her iki yönetmelikte aynı olduğu dikkate alınır, ASCE/SEI 7-10 için bu çalışma kapsamında yapılan yorumların TBDY 2019 yönetmeliği için de geçerli olabileceği söylenebilir.



Şekil 5 - ASCE/SEI 7-10 Tasarım İvme Spektrumu.



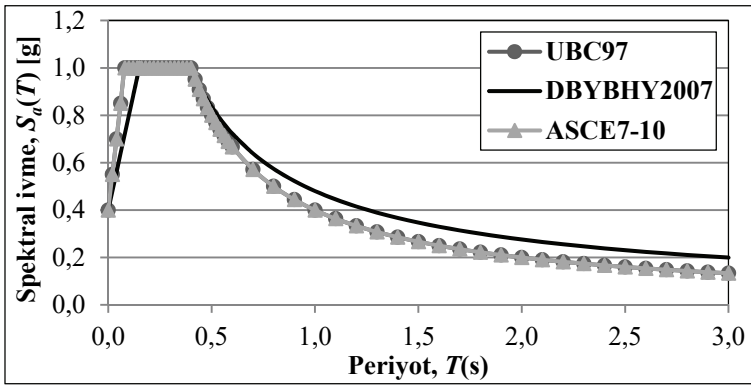
Şekil 6 - ASCE/SEI 7-10 Tasarım İvme Spektrumları ($S_1 = 0.6g$, $S_S = 1.5g$)

Tablo 2 - TBDY2019'a Göre Yerel Zemin Etki Katsayıları F_s ve F_1 .

Zemin sınıfı	F_s	F_1	F_s	F_1	F_s	F_1	F_s	F_1	F_s	F_1	F_s	F_1
	$S_1 \leq 0.25$	$S_1 \leq 0.1$	$S_s=0.5$	$S_1=0.2$	$S_s=0.75$	$S_1=0.3$	$S_s=1.0$	$S_1=0.4$	$S_s=1.25$	$S_1=0.5$	$S_1 \geq 1.5$	$S_1 \geq 0.6$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8
ZC	1.3	1.5	1.3	1.5	1.2	1.5	1.2	1.5	1.2	1.5	1.2	1.4
ZD	1.6	2.4	1.4	2.2	1.2	2.0	1.1	1.9	1.0	1.8	1.0	1.7
ZE	2.4	4.2	1.7	3.3	1.3	2.8	1.1	2.4	0.9	2.2	0.8	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.											

2.4. Referans Zeminler Z2, SB ve B için Tasarım İvme Spektrumlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada ele alınan prototip binaların referans tasarımında kullanılacak olan Z2, SB ve B türü referans zeminler için sırasıyla DBYBHY2007, UBC97, ASCE/SEI 7-10'a göre elde edilen ve sırasıyla Şekil 2, 4 ve 6'da görülebilecek olan spektrumlar Şekil 7'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 7'de görüldüğü gibi, UBC97 ve ASCE/SEI 7-10 spektrum eğrileri arasında fark yoktur. DBYBHY2007 spektrum eğrisi ise UBC97 ve ASCE/SEI 7-10'dan biraz farklı olup; sabit-hız bölgesinde bir miktar daha yüksek değerler almakla birlikte, netice itibarıyla, üç farklı spektrum eğrisi de referans zemin sınıfları (Z2, SB ve B) için birbirlerine oldukça yakındır. Asıl farklılıklar diğer zemin sınıfları için mevcut olup; Bölüm 2.5'de bu farklılıklar detaylı olarak ortaya konmaktadır.



Şekil 7 - ASCE/SEI 7-10, UBC97 ve DBYBHY2007'de Sırasıyla B, SB ve Z2 Zemin Sınıfları İçin Tasarım İvme Spektrumları ($S_I = 0.6g$, $S_S = 1.5g$, $Z = 0.4$, $N_a = N_v = 1$, $A_0 = 0.4$, $I = 1$)

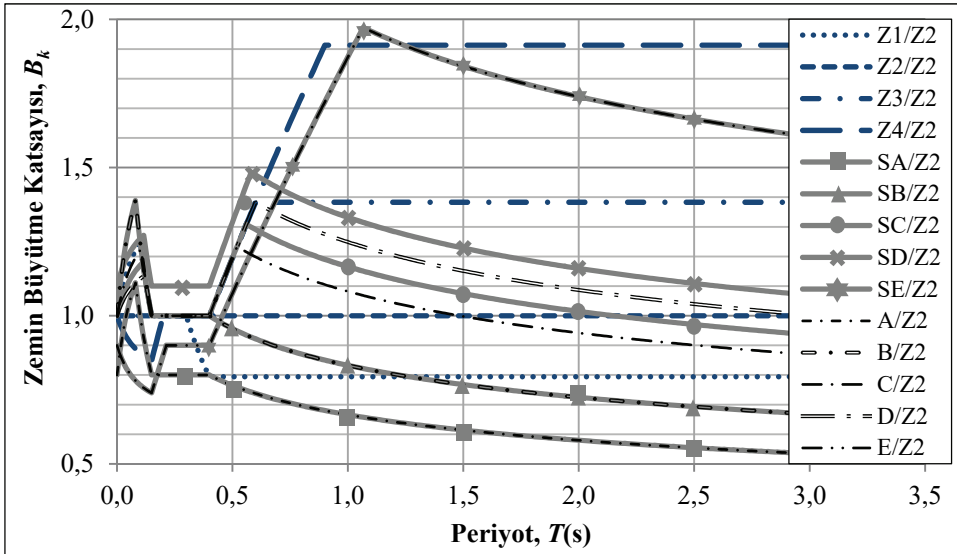
2.5. Zemin Büyütme Katsayılarının Karşılaştırılması

Zemin büyütme katsayıları UBC97 şartnamesinde açıkça tarif edilmemiş olmakla birlikte sismik katsayıların içinde bir çarpan olarak yer almakta olup, dördüncü deprem bölgesi ($Z=0.4$) için $N_a = N_v = 1$ olduğu durumda C_a ve C_v değerlerinin 0.4'e bölünmesi durumunda ortaya çıkan değerlerdir. Tablo 3'de verilen bu değerlerin ($C_a/0.4$ ve $C_v/0.4$) ASCE/SEI 7-10'da açıkça tarif edilmiş olan zemin katsayıları F_a ve F_v 'ye yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. DBYBHY2007'de zemin büyütme katsayıları açıkça tarif edilmediğinden bu çalışmaya özel B_a ve B_v olarak adlandırılmış olup, 1.0'a eşittir.

Tablo 3'deki katsayıları bakıldığında, DBYBHY2007'nin zemin büyütmesini uygun şekilde dikkate almadığı ve bu açıdan güvensiz olabileceği düşünülebilir. Ancak, bu etkinin DBYBHY2007'de spektruma bir çarpan olarak etki eden açıkça tanımlanmış katsayılarla değil, spektrum formülasyonunun içerisinde gizli olarak yer aldığını ortaya koyabilmek ve adil bir karşılaştırma yapabilmek için UBC97, ASCE/SEI 7-10 ve DBYBHY2007'de bulunan tüm tasarım spektral ivme değerleri Z2 referans zemine ait spektral ivme değerlerine bölünerek bu çalışmaya özel zemin büyütme katsayısı (B_k) elde edilmiştir.

Tablo 3 - Farklı Yönetmeliklerdeki Zemin Büyütme Katsayıları
($S_I = 0.6g$, $S_S = 1.5g$, $Z = 0.4$, $N_a=N_v=1$, $A_0=0.4$)

Zemin sınıfı	UBC97	ASCE/SEI 7-10	DBYBHY2007	UBC97	ASCE/SEI 7-10	DBYBHY2007
	Z = 0.4	$S_I \geq 1.25$	$A_0 = 0.4$	Z = 0.4	$S_I \geq 0.5$	$A_0 = 0.4$
	$C_a/0.4$	F_a	B_a	$C_v/0.4$	F_v	B_v
A veya S_A	0.8	0.8	1.0	0.8	0.8	1.0
B veya S_B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C veya S_C	1.0	1.0	1.0	1.4	1.3	1.0
D veya S_D	1.1	1.0	1.0	1.6	1.5	1.0
E veya S_E	0.9	0.9	1.0	2.4	2.4	1.0



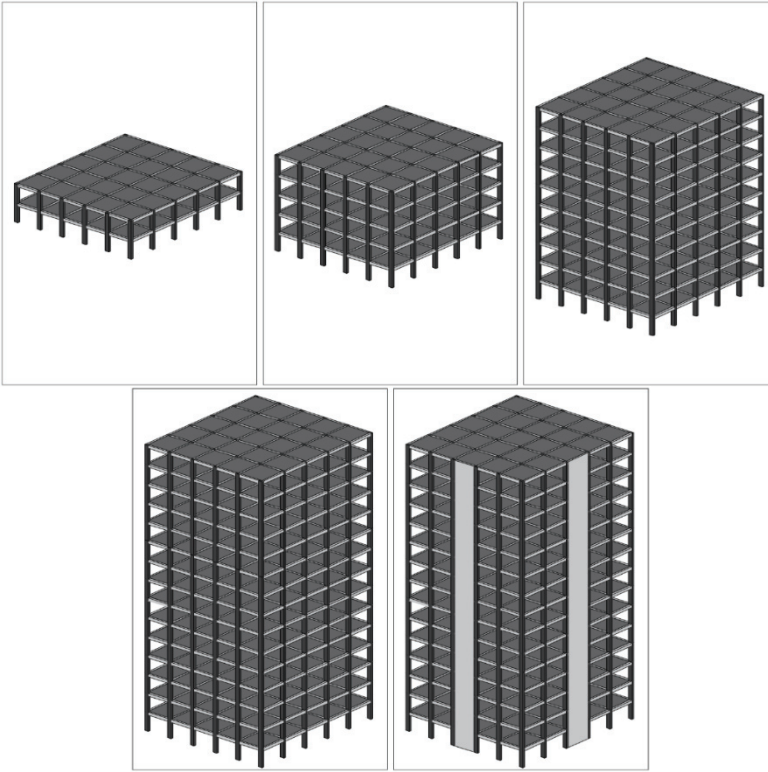
Şekil 8 - ASCE/SEI 7-10, UBC97 ve DBYBHY2007'deki Farklı Zemin Sınıfları İçin Z2 Spektrum Değerlerine Göre Büyütmeyi Gösteren Zemin Büyütme Katsayıları,
 B_k ($S_I = 0.6g$, $S_S = 1.5g$, $Z = 0.4$, $N_a=N_v=1$, $A_0=0.4$)

Şekil 8, irdelenen zemin sınıflarına ait spektral ivme değerlerinin, Z2 referans zemin sınıfına ait spektral ivme değerlerinin kaç katı olduğunu farklı periyot değerleri için göstermekte olup; bu şekilde B_k katsayılarının aldığı değerler farklı zemin sınıfları için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Z2'ye göre normalize edilerek elde edilen bu zemin büyütme katsayıları incelendiğinde, örneğin Z4 için hesaplanan zemin büyütme katsayısının ($Z4/Z2$), D ve SD için elde edilenin ($D/Z2$ ve $SD/Z2$) çok üzerinde, E ve SE için hesaplananların ($E/Z2$ ve $SE/Z2$) ise geniş bir periyot aralığında üzerinde kaldığı görülmektedir. Yani, DBYBHY2007'nin zemin büyütme etkisini uzun periyotlu yapılar için (sabit hız bölgesinde) aslında dolaylı olarak ciddi bir şekilde dikkate aldığı ve diğer Amerikan yönetmeliklerine ve

TBDY 2019'a göre daha yüksek spektral ivme değerleri öngördüğü ortaya çıkmıştır. Ancak, sabit ivme bölgesinde durum böyle değildir; yani DBYBHY2007 zemin büyütme etkisini bu kısımlarda UBC97 veya ASCE/SEI 7-10 ve TBDY 2019 yönetmeliklerindeki gibi dikkate almamakta ve spektral ivme değerleri bu yönetmeliklerdeki altıda kalabilmektedir.

3. YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, Giriş bölümünde ortaya konan amaç doğrultusunda, farklı kat sayılarına sahip prototip betonarme binalar farklı zemin sınıfları için oluşturulan DBYBHY2007 [1], UBC97 [2] ve ASCE/SEI 7-10 [3] tasarım ivme spektrumları kullanılarak tasarlanmış ve tasarlanan bu binaların betonarme taşıyıcı sistemlerinin maliyetleri ile tarihi dört örnek deprem kaydı altındaki performans potansiyelleri karşılaştırılmıştır [23].



Şekil 9 - 2, 5, 10 ve 15 Katlı Prototip Bina Modellerinin Üç Boyutlu Görünüşleri.

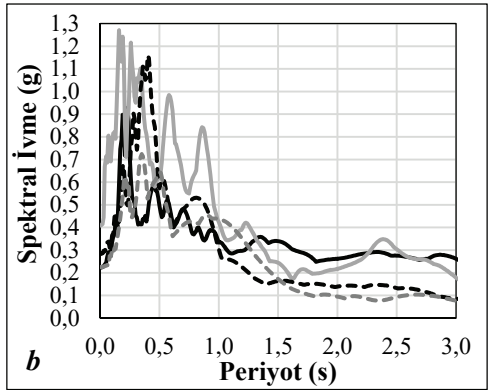
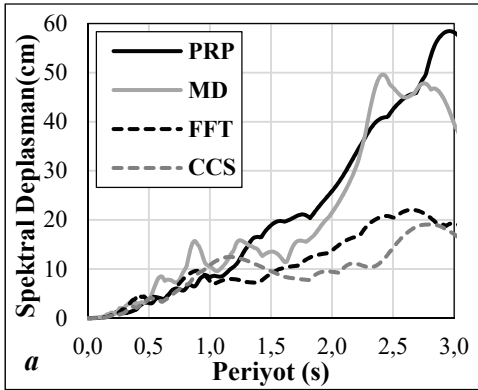
Bu çalışmada kullanılan prototip modellere ait geometrik özellikler Benmokhtar, 2014 [24] çalışmasındaki yapısal modelden alınmıştır. Buna göre, aynı tipik kat planına sahip dört farklı yükseklikte (2, 5, 10 ve 15 katlı) ve taşıyıcı sistemleri betonarme çerçeve olan dört adet prototip bina ele alınmıştır. Sadece 15 katlı bina, ayrıca çerçeve-perde taşıyıcı sisteme sahip

olacak şekilde de modellenmiş ve tasarlanmıştır. Binaların kat planları simetriktir ve aks sayısı ile açıklıkları da yüksekliği en fazla olan bina modelinde dahi yapı narınlığı 2'yi geçmeyecek şekilde tüm binalar için aynıdır. Her iki yatay eksen doğrultusunda da 5m aralıklarla 6 adet aks bulunan tipik kat planlarına sahip binalar için tipik kat yüksekliği ise $h_i=3$ m olarak tanımlanmıştır. Ne planda ne de düşeyde herhangi bir düzensizlik bulunmamaktadır. Bu binalara ait üç boyutlu görünüşler, Şekil 9'da verilmiştir.

Tüm tasarımlar, DBYBHY2007 [1] ve TS500'deki [25] kurallar doğrultusunda bir tasarım programı [26] yardımıyla yapılmıştır, ancak sonraki kısımlarda detayları anlatılan farklı tasarımlarda kullanılan tasarım ivme spektrumları farklı olup DBYBHY2007 [1], UBC97 [2] ve ASCE/SEI 7-10'dan [3] alınmıştır. Tasarımlar, modal spektral analiz yöntemi ile yapılmıştır; ancak daha sonra temsili dört tarihi deprem kaydı altında farklı tasarımların sismik analizleri, zaman-tanım alanı analizi yöntemi kullanılarak da gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4 - Deprem Kayıtlarının Özellikleri

Deprem ve Tarihi	İstasyon ve Kayıt Adı	Yer Hareketi Kodu	Faya olan en yakın uzaklık (km)	Pik Yer İvmesi (g)
Darfield New Zealand 2010	Pages Road Pumping Station PRPCS	PRP	24.55	0.223
El Mayor-Cucapah 2010	Michoacan De Ocampo MDO090	MD	15.91	0.408
Cape Mendocino 1992	Fortuna Fire Station FFT360	FFT	20.41	0.283
Coalinga-01 1983	Cantua Creek School H-CAK270	CCS	24.02	0.225



Şekil 10 - Deprem Kayıtlarına Ait %5 Sönümlü Spektrumlar: (a) Deplasman ve (b) İvme.

Söz konusu zaman-tanım alanı analizlerinde kullanılmak üzere, incelenen üç yönetmelikte de ortak olarak en kötü zemin sınıfına giren bir zeminde (UBC97'de SD) kaydedilmiş, yakın-

fay etkilerini içermeyen (faya uzaklık mesafesi 15 km'den fazla) kayıtlar (Bkz. Tablo 4) seçilmiş ve pik yer ivmeleri yönetmeliklerin birinci derece deprem bölgeleri (UBC97'de 4. Derece deprem bölgesi) için tanımlanan yer ivmesi katsayısı (=0.4) ile uyumlu olacak şekilde 0.4g'ye ölçeklendirilerek zaman-tanım analizlerinde kullanılmıştır. Bu kayıtlar, Berkeley Üniversitesi'nin PEER-NGA [27] Ground Motion data bankasından indirilmiştir. Söz konusu yer hareketi kayıtlarının $V_{s,30}$ değerleri 206 ile 355 m/s aralığındadır. Bu deprem kayıtlarına ait spektral deplasman ve spektral ivme grafikleri %5 sönüm için sırasıyla Şekil 10a ve b'de verilmiştir.

4. ANALİZLER VE BULGULAR

4.1. Farklı Spektrumlara Göre Analiz ve Tasarım

Bu çalışma kapsamında, çerçeve sisteme sahip kat adetleri farklı 4 adet binanın 14 farklı spektruma göre analizi ve tasarımı gerçekleştirilmiş olup toplamda 56 farklı bina tasarımı yapılmıştır. Buna ek olarak, sadece en kötü zeminlerin ele alındığı durumlar için 15 katlı bina ayrıca perdeli-çerçevesel sistem olarak da ele alınmış ve 3 ek tasarım daha yapılmıştır.

Öncelikle Z2 referans tasarımı gerçekleştirilmiştir. 12cm kalınlığındaki bir döşeme için "DBYBHY2007'deki 0.02 görelî kat öteleme oranı sınırını aşmayacak şekilde mümkün olan en küçük yapısal eleman boyutlarının kullanılması" kriteri kullanılarak elde edilen "Z2'ye göre optimum tasarım" Tablo 5'de verilmiştir [24]. Dolayısıyla, Tablo 5'de rapor edilen boyutlar, uygulamada kullanılacak 5 ve 5'in katları (35 cm, 40 cm, 45 cm, vs.) yerine, herhangi bir yuvarlama yapılmaksızın burada yürütülen teorik çalışmanın kriterlerine uygun boyutlardır. Ayrıca, söz konusu boyutların belirlenmesinde mevcut deprem yönetmeliği DBYBHY2007'de önerildiği gibi çatlamamış kesit özellikleri dikkate alınmıştır. Çatlamış kesit özellikleri kullanılması durumunda, uygulanacak 0.02 görelî kat öteleme oranı sınırı nedeniyle eleman boyutlarının incelenen tüm durumlar için büyümesi ve daha büyük boyutlar çatlamış kesit özellikleri ile birlikte kullanıldığında da, aşağıda ortaya konan görelî kat ötelemesi ve kat deplasmanları sonuçlarının benzer eğilimler göstermesi beklenir.

Tablo 5 - Z2 Tasarım İvme Spektrumu İçin 2,5,10 ve 15 Katlı Binaların Optimum Tasarım Boyutları [cm]

Bina türü	2 katlı	5 katlı	10 katlı		15 katlı		
Kat No	1-2	1-5	1-5	6-10	1-5	6-10	11-15
Döşeme kalınlığı	12	12	12	12	12	12	12
Kiriş boyutları	25×36	25×36	25×36	25×36	32×36	31×36	25×36
Kolon boyutu	36×36	36×36	42×42	35×35	54×54	47×47	36×36

Farklı spektrum yüklemeleri (DBYBHY2007, UBC97 ve ASCE/SEI 7-10) altında 2, 5, 10 ve 15 katlı binalar için tasarım boyutları, benzer yöntem kullanılması ve Tablo 5'deki boyutlar üzerinde gerekli değişiklikler yapılması suretiyle elde edilmiş olup yer kısıtı nedeniyle bu boyutlar burada sunulmamıştır. Bu hususla ilgili detaylı bilgi için Azimi, 2016'ya [23] başvurulabilir.

4.2. Bulgular

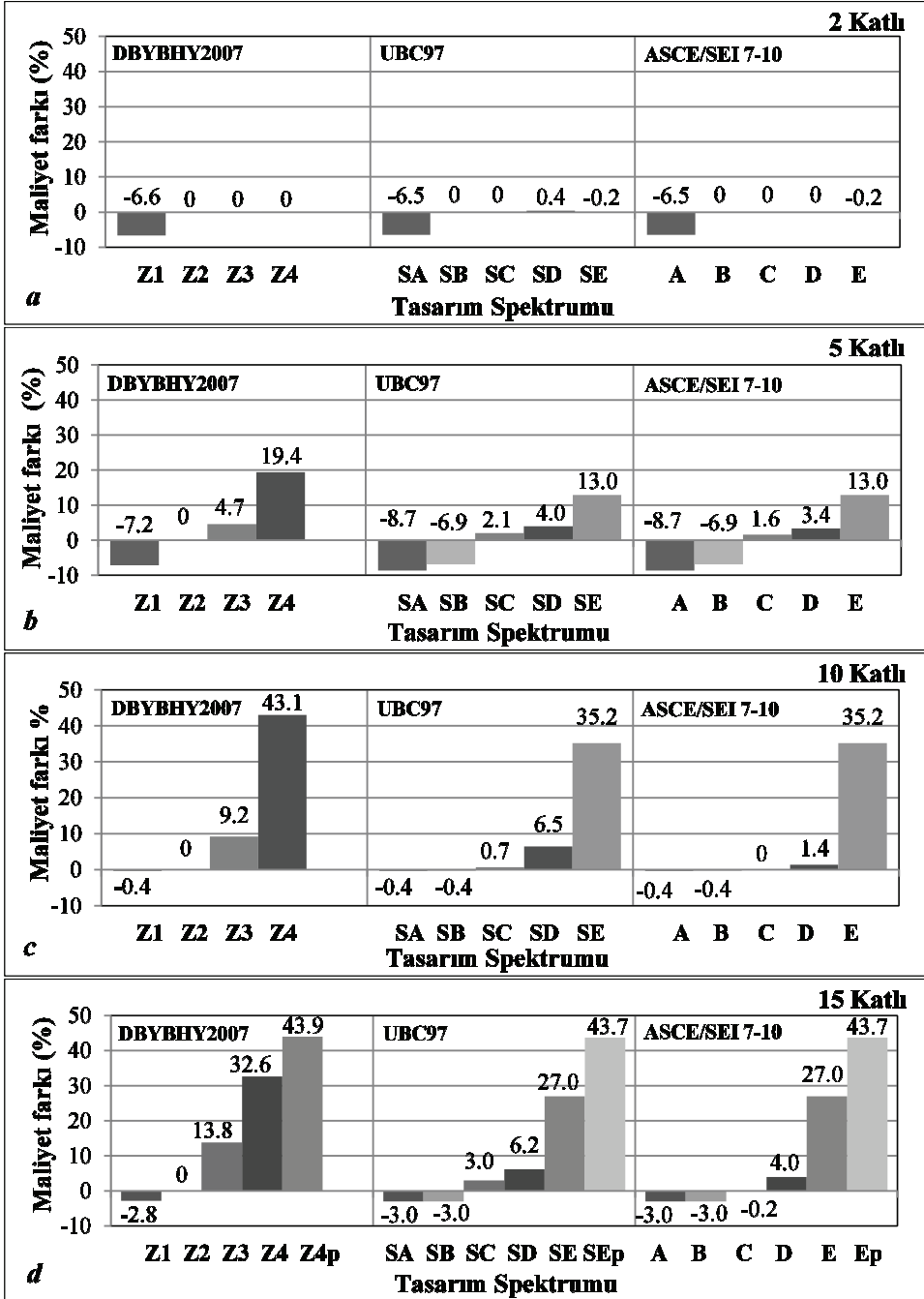
Bu kısımda öncelikle Bölüm 4.1’de tasarımları yapılan 2, 5, 10 ve 15 katlı binaların taşıyıcı sistemlerinin farklı spektrum yüklemeleri için maliyet karşılaştırmaları yapılmıştır. İkinci aşamada ise sismik performans potansiyeli karşılaştırmaları, görelî kat ötelemelerinin ve en üst kat deplasmanlarının karşılaştırılması suretiyle ortaya konmuştur.

4.2.1. Taşıyıcı Sistemlerin Kaba Maliyetinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada, DBYBHY2007, UBC97 ve ASCE/SEI 7-10 yönetmeliklerindeki farklı zemin sınıfları için oluşturulan spektrumlar kullanılarak yapılan taşıyıcı sistem tasarımlarının kaba maliyetleri elemanlara dayalı maliyet hesabı yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Elemanlara dayalı maliyet hesabı yöntemine göre, çerçevesel veya çerçevesel/perdeli taşıyıcı sistemlerin taşıyıcı elemanları olan kolon, kiriş ve perdelerin toplam hacmi ile betonun birim m³ fiyatı çarpılarak toplam beton maliyeti hesaplanmıştır. Bu elemanlarda kullanılan toplam donatı maliyeti ise toplam donatı ağırlığı ile donatı birim kg fiyatı çarpılarak; kalıp maliyeti de yine bu elemanlar için toplam kalıp alanı ile kalıp birim m² fiyatı çarpılarak hesaplanmıştır. Farklı spektral yüklemeler (Z1, Z3, Z4, SA, SB, SC, SD, SE, A, B, C, D ve E) için yapılan tasarımların maliyetlerinin Z2 tasarım maliyetine göre yüzde cinsinden farkı (artış veya azalışları) Denklem 6 yardımıyla hesaplanmış olup maliyet değerleri makalede her durum için TL cinsinden ayrı ayrı sunulmamıştır. Bu şekilde hesaplanan farkların pozitif değerleri maliyette Z2 tasarımlarına göre artışı, negatif değerleri ise azalışı ifade etmektedir. Burada belirtmek gerekir ki; maliyet hesabında boyutlara ve bina yüksekliğine bağlı olarak iskelelerin büyüklük ve özelliklerinde ortaya çıkabilecek farklılıklar gözletilmemiş olup iş sağlığı ve iş güvenliği önlemlerine bağlı ek maliyetler de göz önüne alınmamıştır.

$$\text{Maliyet Farkı (\%)} = \frac{\text{Maliyet}_{\text{spektrum.i}} - \text{Maliyet}_{\text{DBYBHY2007(Z2)}}}{\text{Maliyet}_{\text{DBYBHY2007(Z2)}}} \times 100 \quad (6)$$

Maliyet karşılaştırmaları 2, 5, 10 ve 15 katlı binalar için sırasıyla Şekil 11a, b, c ve d’de sunulmuştur. Şekil 11a, b, c ve d incelendiğinde, karşılaştırma için referans alınan Z2 türü zemine göre daha sağlam olan Z1 (SA ve A) türü zemin için maliyette azalma görülmektedir. Ancak maliyetteki azalma sadece 2 ve 5 katlı binalarda anlamlı mertebelerde olup 10 ve 15 katlı binalarda önemsenmeyecek kadar azdır: Daha sağlam zeminler söz konusu olduğunda, yani Z1, SA ve A spektrumları ile tasarlanan binaların Z2 spektrumu ile tasarlanan binaya göre maliyet farkı, 2 katlı binalar için sırasıyla -%6.6, -%6.5 ve -%6.5 (Şekil 11a), 5 katlı binalar için sırasıyla -%7.2, -%8.7 ve -%8.7 (Şekil 11b), 10 katlı binalar için sırasıyla -%0.4, -% 0.4 ve -%0.4 (Şekil 11c) ve 15 katlı binalar için sırasıyla -%2.8, -% 3.0 ve -%3.0 (Şekil 11d) olmaktadır.

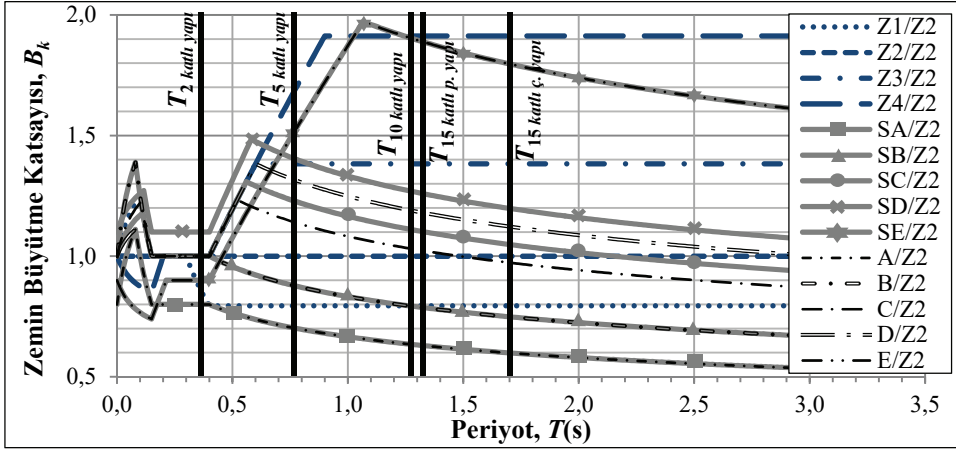


Şekil 11 - Bir Tasarım Spektrumu İçin Hesaplanan Kaba Maliyetin Z2 Spektrumu İçin Hesaplanan Kaba Maliyete Göre Farkı (Bkz. Denklem (6))

Z2'ye göre daha zayıf zeminler olan Z3 ve Z4; SC, SD ve SE; C, D ve E için maliyette artışlar görülmektedir. Bu maliyet artışları, zemin kötüleştikçe genel olarak daha belirginleşmektedir. Ayrıca, kat sayısı arttıkça daha zayıf zemin olan Z4; SD ve SE; D ve E için maliyet artışı daha da belirginleşmektedir. Kaba maliyet karşılaştırmalarının sonuçları, aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Şekil 11a'dan görüldüğü üzere, Z2'ye göre daha kötü zeminlere ait spektrumlar altında tasarlanan 2 katlı binaların Z2 spektrumu altında tasarlanan bir 2 katlı binaya göre maliyet farkı neredeyse yoktur.
- Şekil 11b'den anlaşılacağı gibi, 5 katlı yapılar için, SC ve C; SD ve D spektrumları altında tasarlanan binaların Z2 spektrumu altında tasarlanan binaya göre maliyet artışı sırasıyla yaklaşık %2 ve %4 civarında olmaktadır. Z3 spektrumu altında tasarlanan binanın Z2 spektrumu altında tasarlanan binaya göre maliyet artışı da %4.7'ye eşittir. Z2 spektrumu için tasarlanan binaya göre maliyet artışı Z4 için %19.4 olup, SE ve E spektrumları için olan %13.0 olan maliyet farkından büyüktür. 10 katlı yapılar için Şekil 11c'den görüldüğü üzere, SC ve C spektrumları altında tasarlanan binaların Z2 spektrumu altında tasarlanan binaya göre maliyet farkı sıfıra yakındır. Ancak SD ve D spektrumları altında tasarlanan binaların Z2 spektrumu altında tasarlanan binaya göre maliyet artışı sırasıyla %6.5 ve %1.4 olmaktadır. Z3 zeminlerde ise, Z2'ye göre maliyet artışı %9.2'dir. Z2 spektrumu için tasarlanan binaya göre maliyet artışı Z4 için %43.1 olup, SE ve E spektrumları için %35.2 olan maliyet farkından büyüktür.
- 15 katlı yapılar için Şekil 11d'den anlaşılacağı gibi, SC ve C spektrumları altında tasarlanan binaların Z2 spektrumu altında tasarlanan binaya göre maliyet farkı sırasıyla %3.0 ve -%0.2 olmaktadır. SD ve D spektrumları altında tasarlanan binaların Z2 spektrumu altında tasarlanan binaya göre maliyet farkı ise, sırasıyla %6.2 ve %4.0 olmaktadır. Z2 spektrumu için tasarlanan binaya göre maliyet farkı Z4 için %32.6 olup, SE ve E spektrumları için %27.0 olan maliyet farkından büyüktür.
- Diğer binalardan farklı olarak 15 katlı binalara özel olmak üzere çerçeve sisteme ek olarak, en kötü zeminler için perdeli-çerçeve sistemler de tasarlanmıştır (grafiklerde "p" alt indisi ile gösterilmiştir). Şekil 11d'den görüldüğü üzere, perdeli-çerçeve sistem kullanıldığında Z4, SE ve E zeminlerinin Z2 zemine göre maliyet farkı çerçeve sistem kullanıldığında elde edilen farka göre daha büyük olmaktadır (Z2'ye göre maliyet farkları yaklaşık %44'tür).

ASCE/SEI 7-10, UBC97 ve DBYBHY2007'deki farklı zemin sınıfları için Z2 spektrum değerlerine göre büyütme gösteren bu çalışmaya özel tarif edilmiş olan zemin büyütme katsayıları, B_k , Bölüm 2'de tarif edilmiş ve Şekil 8'de sunulmuştur. Bu şeklin üzerine, bu çalışmada ele alınan tüm yapıların doğal periyotları işaretlenerek Şekil 12'de tekrar sunulmuştur. Şekil 12'den, farklı yapılar ve farklı zemin koşulları için B_k 'nin 1.0 değerinden farklı miktarlarda saptığı görülmektedir. Bu durum, yukarıda ortaya konan maliyet karşılaştırmaları ile birlikte değerlendirildiğinde, $B_k=1.0$ 'dan sapma miktarı arttıkça maliyet farkının arttığı sonucuna ulaşılmaktadır.



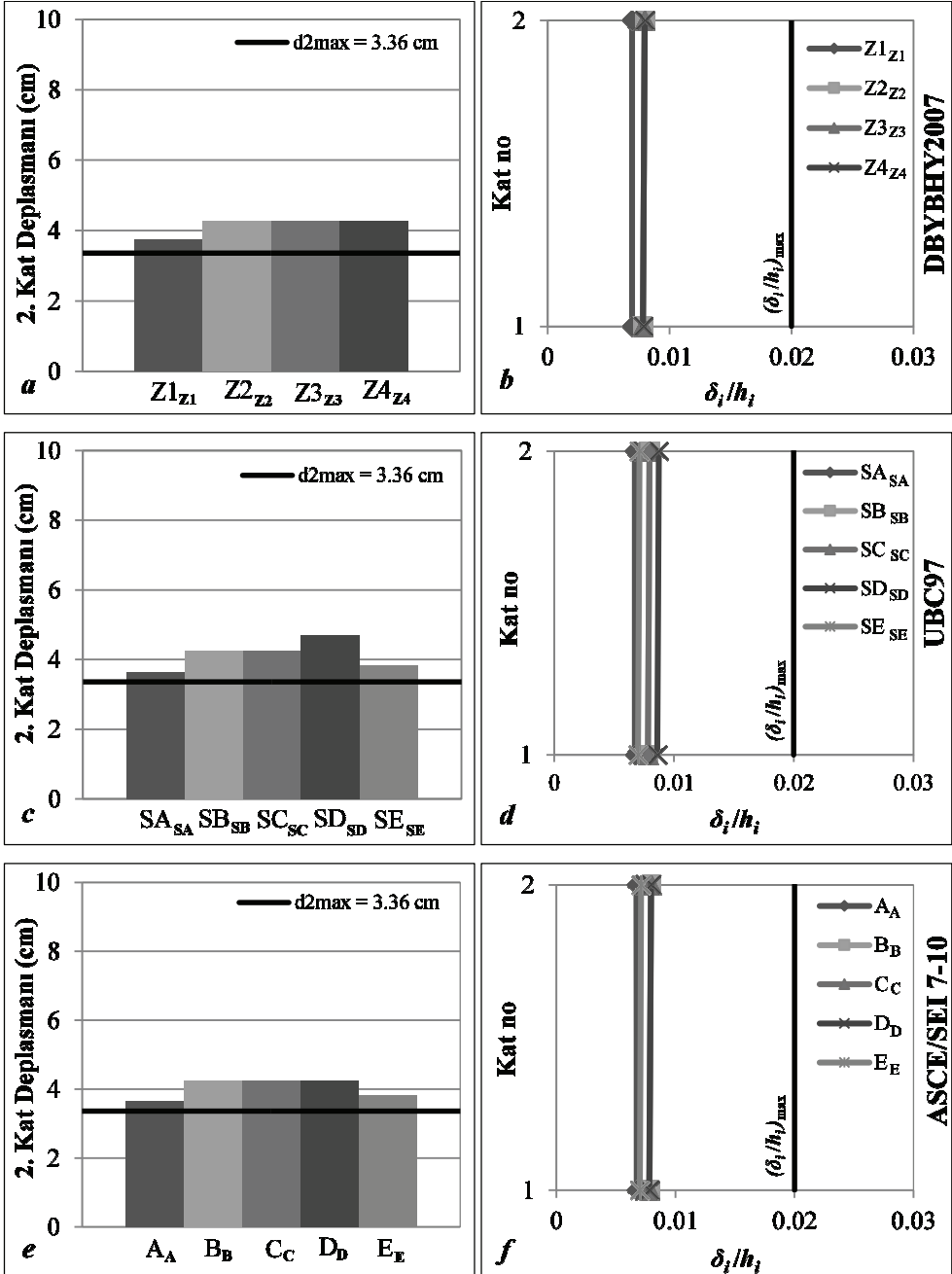
Şekil 12 - Zemin Büyütme Katsayıları ($S_1 = 0.6g$, $S_s = 1.5g$, $Z = 0.4$, $N_a=N_v=1$, $A_0=0.4$) ve Prototip Binaların Periyotları (Bina periyotları Z4, SE ve E tasarımlarına aittir).

4.3. Spektral Analize Göre Sismik Performans Potansiyellerinin Karşılaştırılması

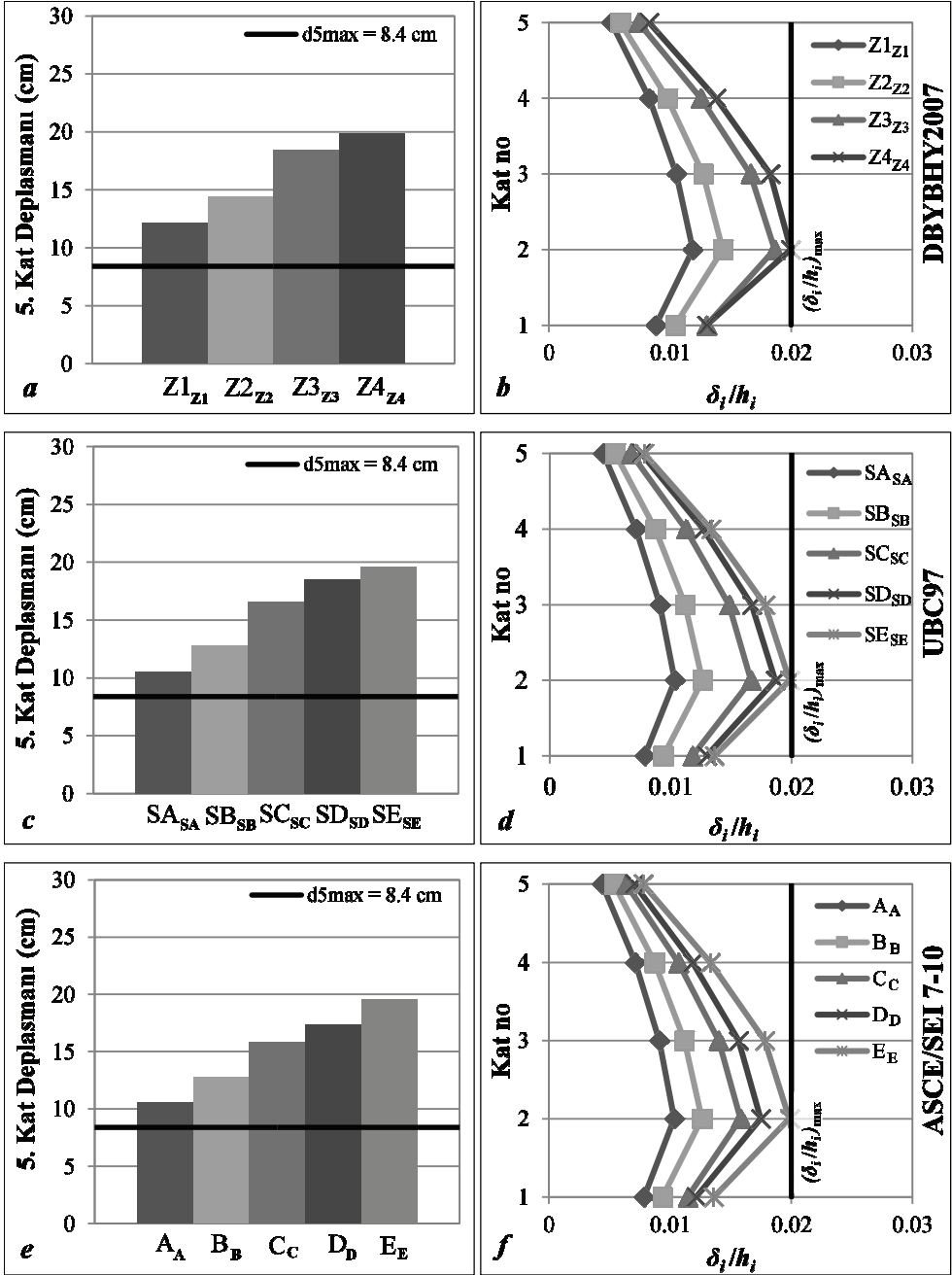
Görelî kat ötelemesi oranları (görelî kat ötelemelerinin kat yüksekliklerine oranı) ve en üst kat deplasmanları birer kriter olarak ele alınmak suretiyle sismik performans potansiyeli değerlendirmelerinin yapıldığı bu kısımdaki analizler, Bölüm 4.1'de detayları verilen modeller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda, Z1, Z2, Z3 ve Z4'e göre yapılan tasarımlar sırasıyla Z1, Z2, Z3 ve Z4 deprem tasarım spektrumlarına maruz bırakılmış ($Z1_{Z1}$, $Z2_{Z2}$, $Z3_{Z3}$, $Z4_{Z4}$); SA, SB, SC, SD ve SE'ye göre yapılan tasarımlar sırasıyla SA, SB, SC, SD ve SE deprem tasarım spektrumlarına maruz bırakılmış (SA_{SA} , SB_{SB} , SC_{SC} , SD_{SD} , SE_{SE}) ve A, B, C, D ve E'ye göre yapılan tasarımlar sırasıyla A, B, C, D ve E deprem tasarım spektrumlarına maruz bırakılmış (A_A , B_B , C_C , D_D , E_E) olup Şekil 13 – 16'da sunulan grafikler bu durum dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Burada incelenecek görelî kat ötelemeleri etkin görelî kat ötelemeleri (δ_i) olup, bir i. kat için bu değer, yapı davranış katsayısı R ile azaltılmış deprem yükleri için hesaplanan görelî kat ötelemesi Δ_i değerinin R ile çarpılmasıyla elde edilir: $\delta_i = R \times \Delta_i$. Benzer şekilde, burada incelenecek en üst kat deplasmanı (N . kat deplasmanı) etkin deplasman (dN) olup bu değer, R ile azaltılmış deprem yükleri için hesaplanan en üst kat deplasmanı DN değerinin R ile çarpılmasıyla elde edilir: $dN = R \times DN$. Karşılaştırmalar, etkin görelî kat ötelemeleri oranları (δ_i/h_i) ve etkin en üst kat deplasmanı (dN) baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Grafiklerde etkin görelî kat öteleme oranları için üst sınır olarak DBYBHY2007 tarafından belirlenen üst sınır olan $(\delta_v/h_i)_{\max} = 0.02$ alınmıştır. En üst kat deplasmanı için ise üst sınır olarak Sindel ve diğ., 1995 [28] tarafından pratik gözlemler ve farklı ülkelere ait çok sayıda deprem yönetmeliğinin incelenmesi sonucunda tanımlanmış sınır olan, H bina toplam yüksekliği olmak üzere, $dN_{\max} = 0.0007 \times R \times H$ dikkate alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan yüksek süneklikli betonarme çerçeveler için $R = 8$ olduğundan $dN_{\max} = 0.0056 \times H$ olup 2, 5, 10 ve 15 katlı binalar için sırasıyla, $H = 6, 15, 30$ ve 45 m olduğundan sırasıyla $d2_{\max} = 3.36$ cm, $d5_{\max} = 8.4$ cm, $d10_{\max} = 16.8$ cm ve $d15_{\max} = 25.2$ cm olarak hesaplanmıştır. Perdeli-çerçeve sistem için $R = 7$ olarak dikkate alındığından $dN_{p,\max} = 0.0049 \times H$ eşitliğinden $d15_{p,\max} = 22.05$ cm olarak hesaplanmıştır. 2,

5, 10 ve 15 katlı binalar için sırasıyla Şekil 13, 14, 15 ve 16 incelendiğinde şu tespitler yapılabilir:

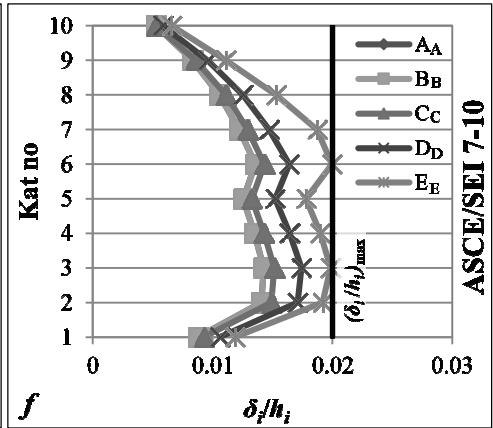
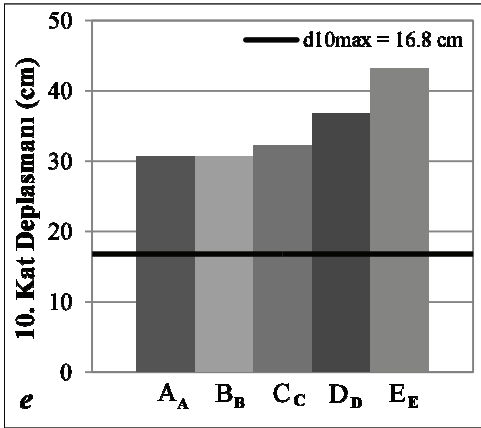
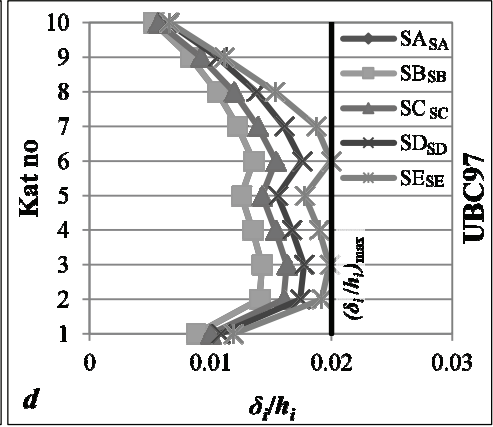
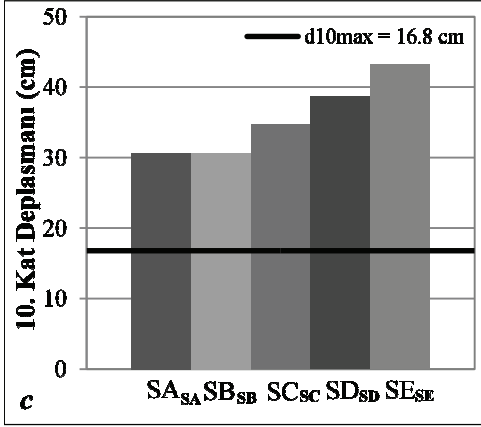
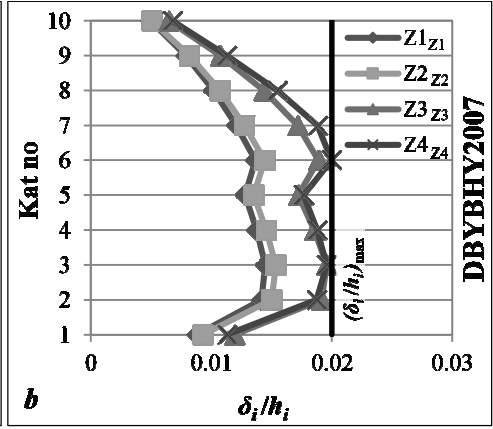
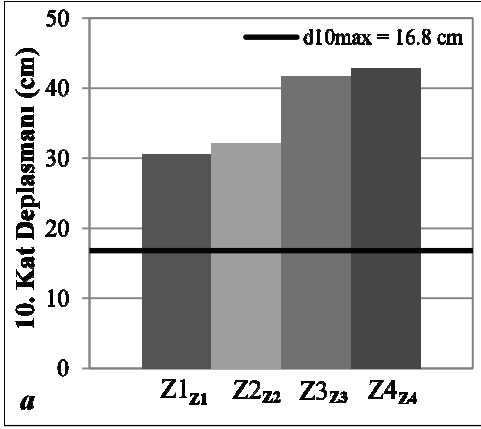
- 2 katlı binalar için (Şekil 13), farklı tasarım ve spektrum yüklemesi durumlarında elde edilen etkin görelî kat ötelemesi oranları yaklaşık aynıdır. Tasarım kriterine uygun olarak hiçbir durumda 0.02 sınırını aşmamış olup bu sınırın çok altında kalmıştır. Dolayısıyla, bu az katlı yapılar için tasarım boyutlarının belirlenmesinde görelî kat ötelemesi oranı sınırı haricindeki kriterlerin (örneğin minimum boyutların) etkin olduğu anlaşılmaktadır. Öte yandan, en üst kat deplasmanları Sindel ve diğ., 1995 [28] tarafından önerilen $d_{2max} = 3.36$ cm sınırını bir miktar geçerek yaklaşık 4 cm civarına ulaşmıştır. Yani, DBYBHY2007'de ortaya konulan etkin görelî kat ötelemesi oranı sınırına göre yeterli olan 2 katlı binaların, Sindel ve diğ., 1995 [28] tarafından önerilmiş olan en üst kat deplasmanı sınırlarını az da olsa aştığı görülmektedir.
- 5, 10 ve 15 katlı binalar için sırasıyla Şekil 14, 15 ve 16 incelendiğinde, farklı tasarımlar ve spektrum yüklemeleri için elde edilen etkin görelî kat ötelemesi oranlarının hiçbir durumda DBYBHY2007'de ortaya konulan 0.02 sınırını geçmediği, ancak zayıf zeminlere (Z4, SE ve E) ait spektrum yüklemeleri altında, ilgili zeminlere göre yapılmış olan tasarımların 0.02 sınırına dayandığı görülmektedir. Yani, daha iyi zeminler için yapılmış olan tasarımlar bu spektrum yüklemelerine maruz kalacak olsa, 0.02 sınırının aşılabileceği anlaşılmaktadır. Bu tür bir yükleme durumu daha sonra Bölüm 4.3.1'de irdelenecektir. 5, 10 ve 15 katlı binalar için hiçbir durumda 0.02 görelî kat ötelemesi sınırı aşılmamasına rağmen bu tasarımlar, Sindel ve diğ., 1995 [28] tarafından 5, 10 ve 15 katlı binalar için önerilen sırasıyla $d_{5max} = 8.4$ cm, $d_{10max} = 16.8$ cm, $d_{15max} = 25.2$ cm sınırlarını aşmıştır. Daha zayıf zemine doğru gidildikçe, bu zemin sınıfları için oluşturulan ve zemin büyütme katsayıları ile büyütülmüş spektrumlara göre tasarlandıklarından daha rijit yapılar söz konusu olmasına rağmen, bu zemin sınıfları ile uyumlu spektral yüklemeler altında sınırlar çok daha fazla aşılmış ve deplasmanlar ilgili sınırın yaklaşık iki buçuk katına kadar çıkmıştır. Yani, zemin büyütmesi dikkate alınmadan daha iyi zeminler için oluşturulan tasarım spektrumlarına göre yapılan tasarımlar bu zayıf zeminler için oluşturulan spektrumlara maruz kalacak olsa, en üst kat deplasmanı sınırının çok daha fazla aşılabileceği değerlendirilebilir. Bu tür bir yükleme durumu daha sonra Bölüm 4.3.1'de irdelenecektir.
- Ayrıca, her üç yönetmeliğin en zayıf zeminlerinde (Z4, SE ve E) 15 katlı binalar perdeli-çerçeve sistem olarak da tasarlanmış olup etkin görelî kat ötelemesi oranları ve etkin en üst kat deplasmanları açısından çerçeve sistem ile kıyaslaması Şekil 17'de sunulmuştur: Z4, SE ve E tasarım spektrumlarına göre tasarlanıp aynı spektrumlara maruz bırakılan çerçeve sistemlerde ($Z_{4ÇZ4}$, $SE_{ÇSE}$, $E_{ÇE}$) etkin görelî kat ötelemesi oranları 0.02 sınırını zorlamış olup, perdeli-çerçeve sistemlerde (Z_{4PZ4} , SE_{PSE} , E_{PE}) ise çerçeve sistemlere göre çok daha küçük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca, Sindel ve diğ., 1995 [28] tarafından önerilen $d_{15max}=25.2$ cm en üst kat deplasmanı sınırı Z4, SE ve E tasarım spektrumlarına göre tasarlanan ve bu spektrumlara maruz bırakılan çerçeve binalarda ($Z_{4ÇZ4}$, $SE_{ÇSE}$, $E_{ÇE}$) yaklaşık 70 cm'ye ulaşmış olmasına karşın, perdeli-çerçeve sistemler (Z_{4PZ4} , SE_{PSE} , E_{PE}) $d_{15p,max}=22.05$ cm sınırını geçmekle birlikte etkin en üst kat deplasmanları 50 cm'nin altında kalarak daha iyi bir performans sergilemişlerdir (Şekil 17).



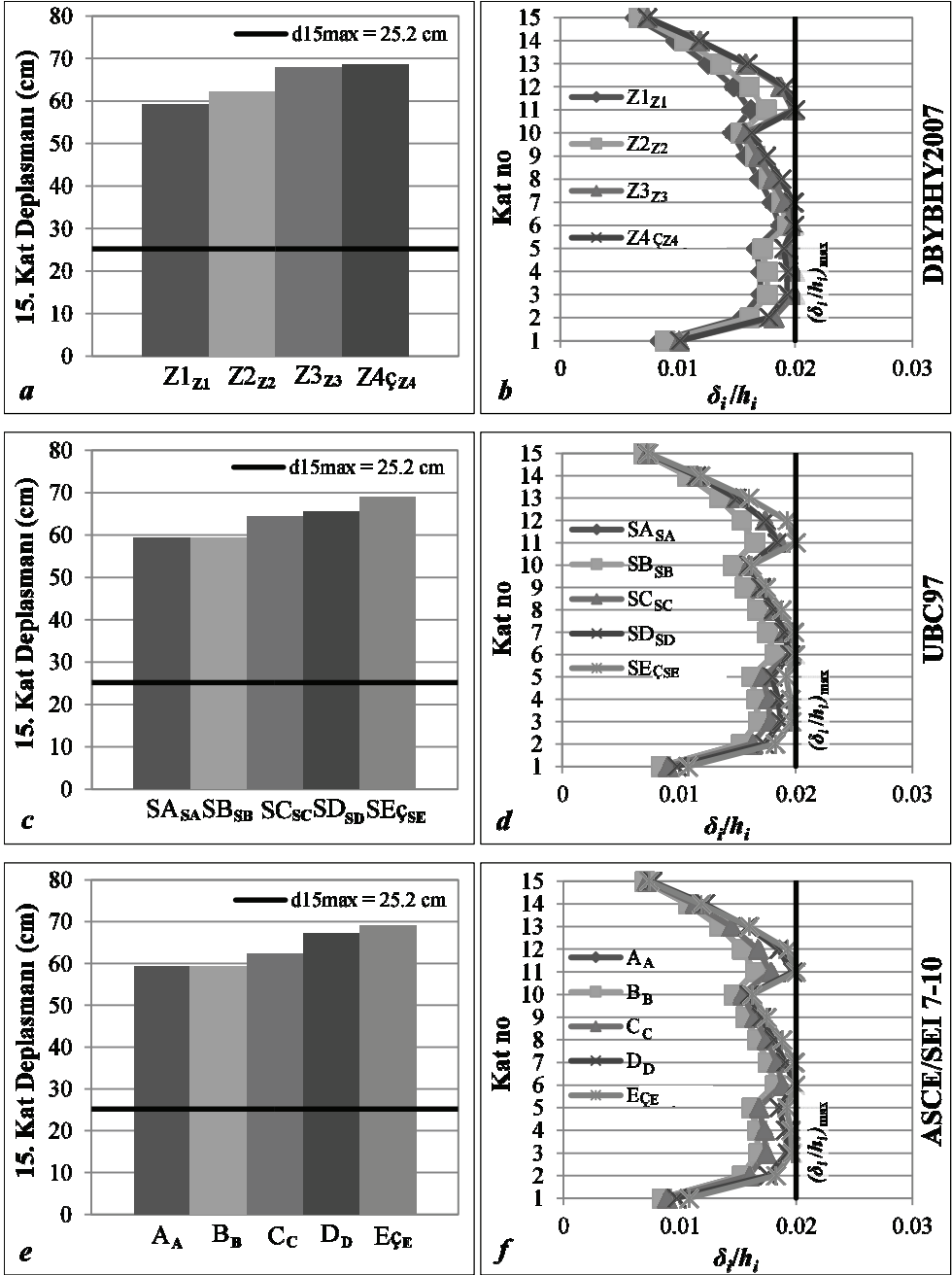
Şekil 13 - Farklı Tasarım Spektrumlarına Göre Tasarlanan 2 Katlı Binaların İlgili Spektrum Yüklemeleri Altındaki Etkin En Üst Kat Deplasmanları (a, c, e) ve Etkin Göreli Kat Ötelemesi Oranları (b, d, f).



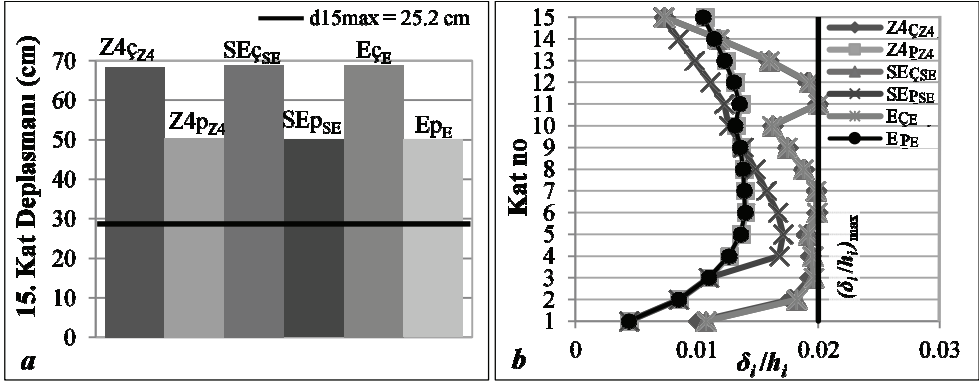
Şekil 14 - Farklı Tasarım Spektrumlarına Göre Tasarlanan 5 Katlı Binaların İlgili Spektrum Yüklemeleri Altındaki Etkin En Üst Kat Deplasmanları (a, c, e) ve Etkin Göreli Kat Ötelemesi Oranları (b, d, f).



Şekil 15 - Farklı Tasarım Spektrumlarına Göre Tasarlanan 10 Katlı Binaların İlgili Spektrum Yüklemeleri Altındaki Etkin En Üst Kat Deplasmanları (a, c, e) ve Etkin Göreli Kat Ötelemesi Oranları (b, d, f).



Şekil 16 - Farklı Tasarım Spektrumlarına Göre Tasarlanan 15 Katlı Binaların İlgili Spektrum Yüklemeleri Altındaki Etkin En Üst Kat Deplasmanları (a, c, e) ve Etkin Göreli Kat Ötelemesi Oranları (b, d, f).



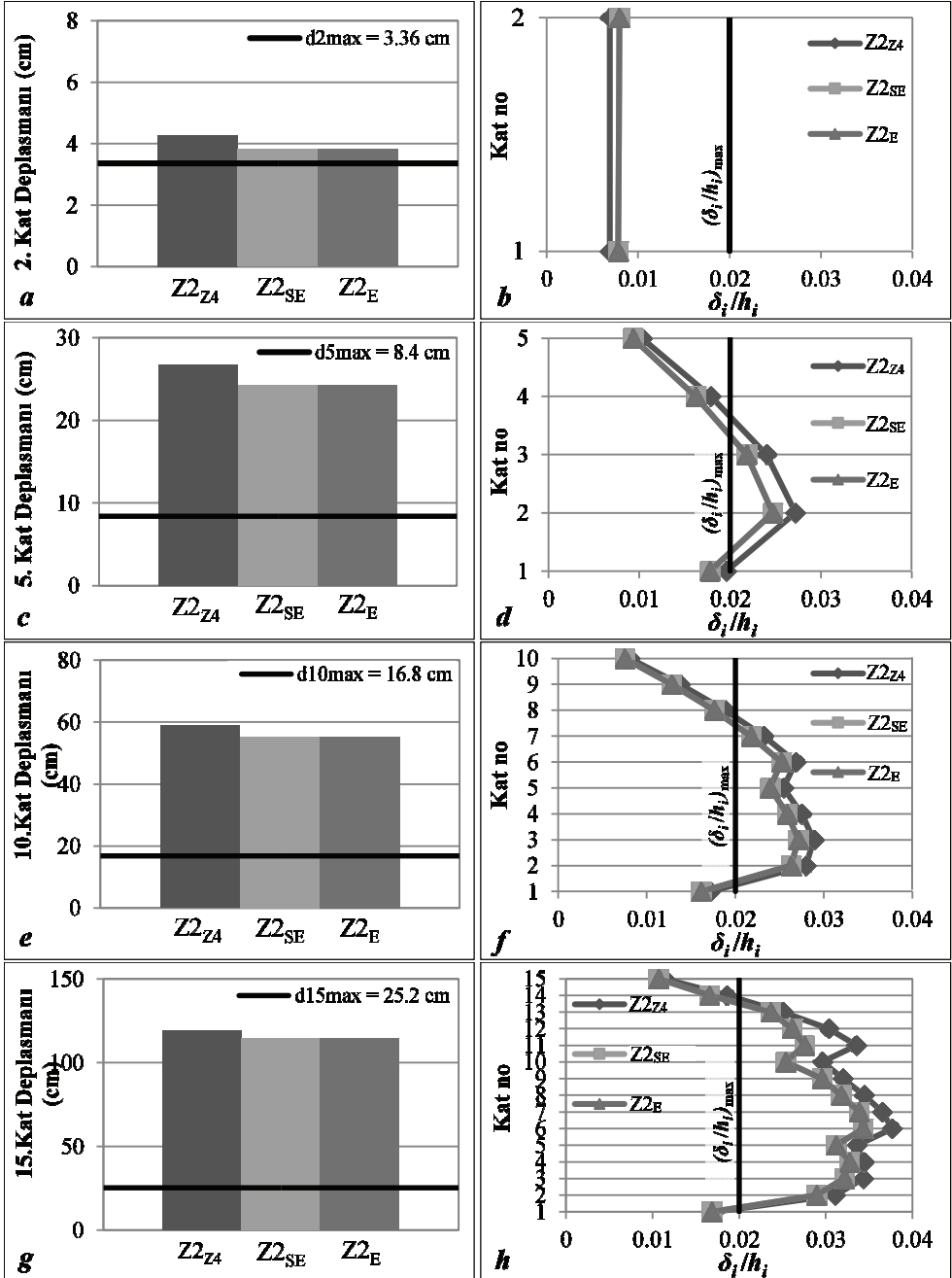
Şekil 17 - En Kötü Zeminler İçin Farklı Tasarım Spektrumlarına Göre Tasarlanan 15 Katlı Binaların İlgili Spektrum Yüklemeleri Altındaki Etkin En Üst Kat Deplasmanları ve Etkin Göreli Kat Ötelemesi Oranlarının Çerçevesel ve Çerçevesel-Perdeli Sistemler İçin Kıyaslaması.

4.3.1. Z2 Tasarımlarının Z4, SE ve E Spektrumlarına Maruz Bırakılması

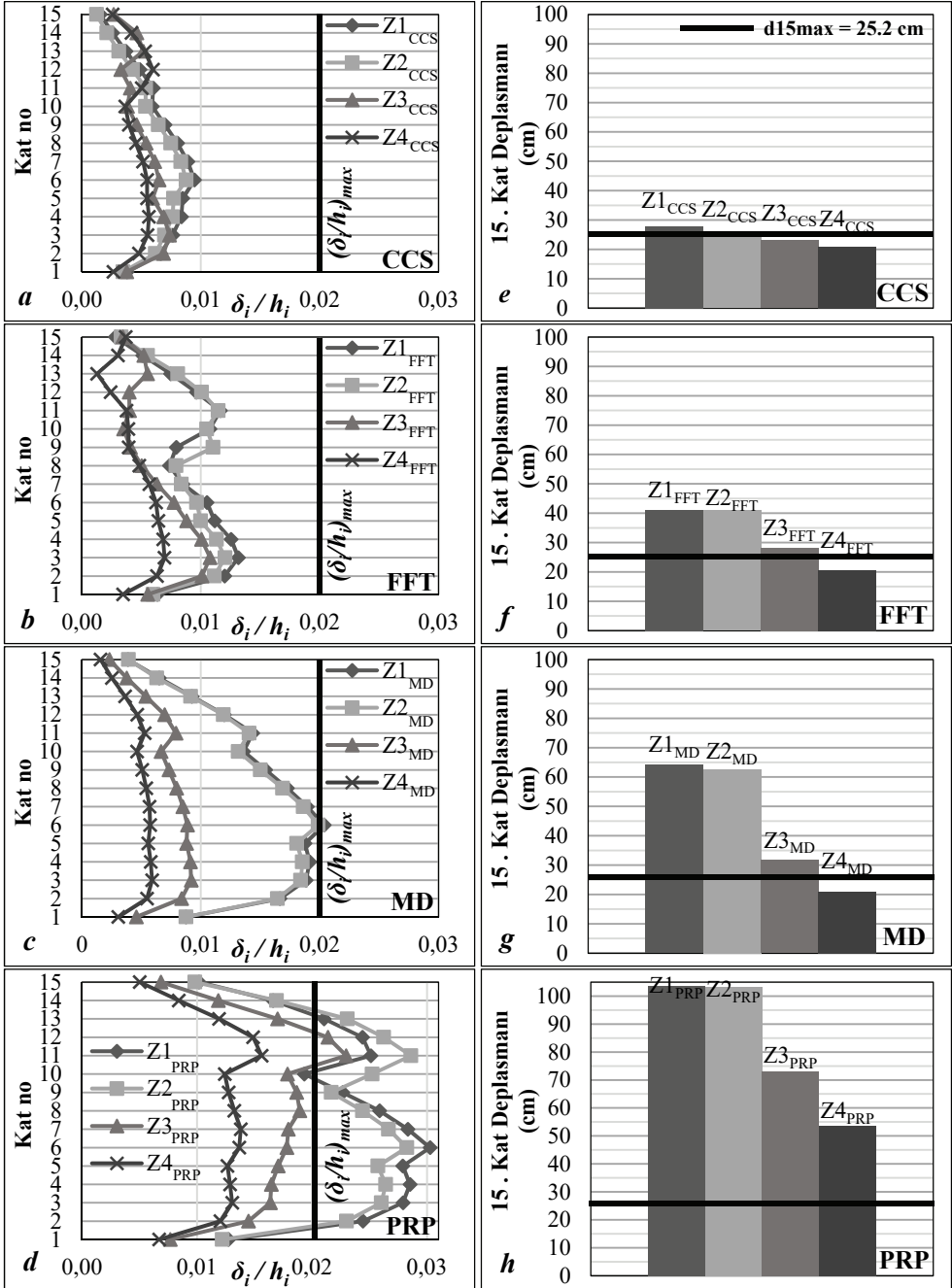
Zemin büyütme katsayılarının tasarımda dikkate alınmasının sismik performans potansiyeli açısından önemini ortaya koyabilmek amacıyla, 2, 5, 10 ve 15 katlı binaların Z2 tasarımları Z4, SE ve E spektrumlarına maruz bırakılmış olup ($Z2_{Z4}$, $Z2_{SE}$, $Z2_E$) bu durumlara ait etkin en üst kat deplasmanları ve etkin göreli kat ötelemesi oranları Şekil 18’de sunulmuştur. Görüldüğü üzere, 2 katlı binalar dışındaki binalar için etkin göreli kat ötelemesi oranları, 0.02 sınırını aşmıştır. Z4 spektrumuna maruz bırakılan durumlarda SE ve E spektrumlarına maruz bırakılan durumlara göre bir miktar daha büyük değerlere ulaşmıştır. Ayrıca, Sindel ve diğ., 1995 [28]’in önerdiği dN_{max} etkin en üst kat deplasman sınırları da tüm binalar tarafından aşılmış olup, bina toplam kat sayısı arttıkça sınırı aşma miktarı da artmış ve 15 katlı binalarda ilgili sınırın neredeyse 5 katına ulaşmıştır.

4.3.2. Zaman Tanım Alanı Analizlerine Göre Sismik Performans Potansiyellerinin Karşılaştırması

Z1, Z2, Z3 ve Z4 tasarım spektrumlarına göre tasarımı yapılan 15 katlı binalar, malzeme, eleman boyutları ve sismik yüke esas zati ve hareketli yükler aynen kullanılarak, zaman tanım alanı analizlerinin yapılabilmesi için bir sonlu elemanlar programında [29] ayrıca modellenmiştir. Sismik yüke esas toplam kat kütleleri binanın ağırlık merkezinde tanımlanmış ve her katta rijit diyafram kabulü yapılmıştır. Detayları Bölüm 3’te verilen ve SD türü zeminlerde kayıt edilen kuvvetli yer hareketleri (Bkz. Tablo 4) altındaki zaman tanım alanı analizleri neticesinde elde edilen etkin göreli kat ötelemesi oranları ve etkin en üst kat deplasmanları, Z1, Z2, Z3 ve Z4 spektrumlarına göre tasarlanmış olan 15 katlı binalar için karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 19 (a-d) ve Şekil 19 (e-h)’de sunulmuştur.



Şekil 18 - Z2 Tasarım Spektrumuna Göre Tasarlanan Binaların Z4, Se ve E Spektrumları Altında Etkin En Üst Kat Deplasmanları (a, c, e, g) ve Etkin Göreli Kat Ötelemesi Oranları (b, d, f, h).



Şekil 19 - 15 Katlı Binaların Etkin Etkin Göreli Kat Ötelemesi Oranları ve Etkin En Üst Kat Deplasmanları: (a, e) Cantua Creek School (CCS); (b, f) Fortuna Fire Station (FFT); (c, g) Michocan De Ocampo (MD); (d, h) Pages Road Pumping Station (PRP) Kaydı Altında.

Şekil 19a ve b'den görüldüğü üzere, Cantua Creek School (CCS) ve Fortuna Fire Station (FFT) kayıtlarına maruz bırakılan Z1, Z2, Z3 ve Z4 tasarımları ($Z1_{CCS}$, $Z2_{CCS}$, $Z3_{CCS}$, $Z4_{CCS}$, $Z1_{FFT}$, $Z2_{FFT}$, $Z3_{FFT}$ ve $Z4_{FFT}$) için elde edilen etkin görelî kat ötelemesi oranlarının tamamı, DBYBHY2007 yönetmeliğinde tanımlanmış olan $(\delta_i/h_i)_{max}=0.02$ sınırının altında kalmaktadır. Diğer taraftan, Şekil 19c'de görüldüğü üzere; Michocan De Ocampo (MD) kaydına maruz bırakılan Z3 ve Z4 tasarımları ($Z3_{MD}$ ve $Z4_{MD}$) için elde edilen etkin görelî kat ötelemesi oranları 0.02 sınırının çok altında kalırken; Z2 tasarımı ($Z2_{MD}$) için sınırdaki değerler almakta, Z1 tasarımı ($Z1_{MD}$) için ise bu sınır az da olsa aşılmaktadır. Söz konusu Z1, Z2, Z3 ve Z4 tasarımlarının yukarıda bahsi geçen üç deprem kaydına göre daha agresif bir deprem kaydı olan Pages Road Pumping Station (PRP) yer hareketi kaydına maruz kalması halinde ise (Şekil 19d), bu tasarımlar arasından sadece Z4 tasarımı ($Z4_{PRP}$) için elde edilen etkin görelî kat ötelemesi oranları 0.02 sınırını aşmaz iken; söz konusu sınır, özellikle Z1 ve Z2 tasarımları ($Z1_{PRP}$ ve $Z2_{PRP}$) için önemli ölçüde aşılmaktadır. Durumu etkin en üst kat deplasmanları açısından ortaya koyan grafikler ise, Şekil 19 (e-h)'de sunulmuştur. Z1 ve Z2 tasarımları için elde edilen etkin en üst kat deplasmanları CCS kaydı altında Şekil 19e'den görüldüğü üzere Sindel ve diğ., 1995 [28] tarafından önerilen $d15_{max}=25.2$ cm sınırına yakın değerler almakta iken, FFT, MD ve PRP kayıtları altında ise sınır ciddi şekilde aşılmaktadır (sırasıyla yaklaşık 41 cm, 64 cm ve 103 cm). Z3 tasarımı için etkin en üst kat deplasmanları açısından belirlenen sismik performans potansiyeli Z1 ve Z2 tasarımlarına göre daha üstün olmakla birlikte $d15_{max}=25.2$ cm sınırı FFT, MD ve PRP kayıtları altında (özellikle PRP için) yine de aşılmaktadır (sırasıyla yaklaşık 28 cm, 32 cm ve 73 cm). Z4 tasarımının etkin en üst kat deplasmanları açısından en yüksek sismik potansiyele sahip olduğu ve PRP kaydı hariç tüm kayıtlar altında $d15_{max}=25.2$ cm sınırının altında değerler aldığı görülmüştür. Görüldüğü üzere, yönetmeliklerde önerilen zemin büyütme etkileri dikkate alınarak yapılan tasarımlar, tasarımda öngörülene benzer kötü bir zeminde (SD) alınan gerçek bir deprem kaydına maruz kalması halinde, diğer tasarımlara göre etkin görelî kat ötelemesi oranları ve etkin en üst kat deplasmanları açısından genel olarak başarılı bir sismik performans potansiyeli ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, zemin büyütme katsayılarının çerçeve türü betonarme binaların taşıyıcı sistemlerinin sismik performans potansiyeli ve maliyetine olan etkilerinin araştırılması amacıyla az ve orta katlı binaları temsilen 2 ve 5 katlı ve çok katlı binaları temsilen 10 ve 15 katlı prototip binalar, farklı spektrumlar kullanılarak (DBYBHY2007'de Z1, Z2, Z3, Z4, UBC97'de SA, SB, SC, SD, SE ve ASCE/SEI 7-10'da A, B, C, D, E) DBYBHY2007'ye göre tasarlanmıştır. 15 katlı bina, perdeli-çerçeve olarak da en kötü zeminler (Z4, SE ve E) için ayrıca tasarlanmıştır. Bu binalar tüm spektrumlara ve ayrıca, 15 katlı binalar seçilen örnek tarihi deprem kayıtlarına maruz bırakılarak sismik performans potansiyeli karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapısal taşıyıcı sistem tasarımlarında öncelikli unsur "güvenlik" olmakla birlikte, "maliyet" unsurunun mühendislik uygulaması açısından bunun akabinde göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. Bu sebeple, bu çalışmada farklı zemin özelliklerine bağlı olarak farklı yönetmeliklerin getirdiği koşullar maliyet açısından da karşılaştırılmış ve bu koşullara göre tasarlanan binaların sismik performans potansiyelleri (güvenlik seviyeleri) ile birlikte değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Z2 spektrumuna göre tasarlanmış binalar ile (i) Z1, SA veya A türü zeminlere ait spektrumlara göre tasarlanmış binalar karşılaştırıldığında, maliyette azalma 2 ve 5 katlı binalarda anlamlı mertebelerde (%8 civarı) olup 10 ve 15 katlı binalarda önemsenmeyecek kadar azdır; (ii) Z4 (SC, SD, SE veya C, D, E) türü zeminlere ait spektrumlara göre tasarlanmış çerçevesiz binalar karşılaştırıldığında, maliyette kayda değer artışlar 10 ve 15 katlı binalarda görülmektedir. Maliyet artışı Z4 için 15 katlı binalarda yaklaşık %33'e, E ve SE için ise yaklaşık %27'ye ulaşmıştır. Yani, Z4 spektrumu daha büyük deprem kuvvetlerine göre tasarım gerektirmekte ve daha maliyetli olmaktadır; (iii) Z4, SE ve E türü zeminlere ait spektrumlara göre tasarlanmış 15 katlı perdeli-çerçevesiz binalar karşılaştırıldığında, maliyet farkı %44'e ulaşmaktadır. Perdeli-çerçevesiz sistemler daha maliyetli olmakla birlikte özellikle etkin en üst kat deplasmanlarının sınırlandırılmasında önemli rol oynamaktadır.
2. Prototip binalar, tasarlandıkları spektrum yüklemelerine maruz bırakıldıklarında, Sindel ve diğ., 1995 [28] tarafından ortaya konan etkin en üst kat deplasmanı sınırlarının aşıldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla, yönetmeliklere, etkin en üst kat deplasmanına bağlı bir sınırın da getirilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.
3. Yönetmeliklerde önerilen zemin büyütme katsayıları dikkate alınarak yapılan tasarımların, tasarımda öngörülene benzer kötü zeminlere ait deprem kayıtları altında başarılı bir sismik performans potansiyeli sergilediği, bu katsayılar dikkate alınmadan yapılacak tasarımların ise başarısız olabileceği belirlenmiştir.
4. DBYBHY2007, zemin büyütme etkisini uzun periyotlu yapılar için (sabit hız bölgesinde) ciddi bir şekilde dikkate almakta ve diğer Amerikan yönetmelikleri ile TBDY 2019'a göre daha yüksek spektral ivme değerleri öngörmektedir. Ancak, DBYBHY2007 sabit ivme bölgesinde zemin büyütme etkisini UBC97 ve ASCE/SEI 7-10 veya TBDY 2019 yönetmeliklerindeki gibi dikkate almamakta ve spektral ivme değerleri bu yönetmeliklerdekilere göre düşük kalabilmektedir. Dolayısıyla TBDY2019, DBYBHY2007'ye göre spektral ivmelerde sabit hız bölgesinde azalma, sabit ivme bölgesinde ise artış getirmektedir.

Bu çalışmadaki binaların, DBYBHY2007'deki 1. Derece Deprem Bölgesinde olduğu varsayılmış olup; sonuçlar bu varsayım için geçerlidir. Diğer taraftan, kısa periyot bölgesi için tanımlanan yerel zemin etki katsayıları özellikle 3. ve 4. Derece Deprem Bölgelerinde en iyi zeminden en kötüye doğru arttığından, bu deprem bölgelerinde farklı zemin sınıfları üzerinde inşa edilen az katlı yapıların sismik performans potansiyelleri arasındaki farklılığın da artması beklenir. Bu nedenle, söz konusu bölgeler farklı bir çalışma ile ayrıca ele alınabilir.

Semboller

- A_0 : Etkin yer ivmesi katsayısı
 B_k : Z2'ye göre zemin büyütme katsayısı
 C_a, C_v : Sismik katsayılar
 dN : Etkin en üst kat deplasmanı

- F_a, F_v : ASCE/SEI 7-10'da tanımlanan zemin büyütme katsayıları
 h_i : Binanın i. kat yüksekliği
 h_1 : En üst zemin tabakası kalınlığı
 I : Bina önem katsayısı
 M : Deprem hareketinin maksimum moment magnitudü
 N_a, N_v : Yakın kaynak katsayıları
 N_{SPT} : Zeminin standart penetrasyon direnci
 PI : Plastisite indeksi
 R : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
 $S(T)$: Tasarım ivme spektrum katsayısı
 SR : Kayma hızı
 S_u : Drenajsız kayma mukavemeti
 S_a : Spektral ivme
 S_s, S_1 : Harita spektral ivme değerleri
 S_{MS}, S_{M1} : Maksimum deprem seviyesi için spektral ivme parametreleri
 S_{DS}, S_{D1} : Tasarım spektral ivme parametreleri
 T : Yapı doğal periyodu
 T_A, T_B : DBYBHY2007'de tanımlanan spektrum karakteristik periyotları
 T_0, T_S : ASCE/SEI 7-10'da tanımlanan spektrum karakteristik periyotları
 V_s : Zeminin kayma dalgası hızı
 Z : UBC97'de tanımlanan sismik bölge faktörü
 Δ_x : İki kat arasındaki deplasman farkı
 δ_i : Binanın i. katındaki etkin görelî kat ötelemesi

Kaynaklar

- [1] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [2] UBC, Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, California.
- [3] ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 2010.
- [4] Tehranizadeh, M., Hamedî, F., Influence of earthquake source parameters and damping on elastic response spectra, Fourth International Conference On Recent Advances In Geotechnical Earthquake Engineering And Soil Dynamics, 2001.

- [5] Finn, L.W.D., Wightman, A., Ground motion amplification factors for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30, 272-278, 2003.
- [6] Ptilakis, K., Riga, E., Anastasiadis, A., Design spectra and amplification factors for Eurocode 8, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10 (5), 1377-1400, 2012.
- [7] Tezcan, S., Kaya, E., Bal, E.I., Özdemir, Z., Seismic amplification at Avcılar, Istanbul, *Engineering Structures*, 24, 661-667, 2002.
- [8] Trifunac, M., How to model amplification of strong earthquake motions by local soil and geologic site conditions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19, 833-846, 1990.
- [9] Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G.P., Stiff soil amplification effects in the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 671- 687, 2001.
- [10] FEMA 368-369, NEHRP- Recommended provisions for seismic regulations for new buildings, Buildings Seismic Safety Council, Washington D.C., USA, 1997.
- [11] Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, European Norm, European Committee for Standardisation, Brussels, 2004.
- [12] Şafak, E., Local site effects and dynamic soil behavior, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, 453- 458, 2001.
- [13] Zaslavsky, Y., Shapira, A., Gorstein, M., Perelman, N., Ataev, G., Aksinenko, T., Questioning the applicability of soil amplification factors as defined by NEHRP (USA) in the Israel building standards, *Natural Science*, 631-639, 2012.
- [14] Şişman, F.N., Zeminlerin dinamik özelliklerinin ve zemin büyütme faktörlerinin alternatif yöntemlerle belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, Deprem Mühendisliği, 2013.
- [15] Bessonon, B., Kaynia, A.M., Site amplification in lava rock on soft sediments, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 525-540, 2002.
- [16] Zembaty, Z., Rutenberg, A., Spatial response spectra and site amplification effects, *Engineering Structures*, 24, 1485-1496, 2002.
- [17] Stewart, J., Choi, Y., Liu, A., Amplification factors for spectral acceleration in active regions, *PEER Annual Meeting Research Digest*, 14, 2002.
- [18] Choi, Y., Stewart, P.J., Nonlinear site amplification as function of 30 m shear wave velocity, *Earthquake Spectra*, 21, 1-30, 2005.
- [19] Tsang, H., Lam, T.K.N., Wilson, L.J., A design spectrum model featuring resonant-like soil-amplification, Australian Earthquake Engineering Society Conference, Kasım 2013, Hobart Tasmania, 2013.
- [20] Khanbabazadeh, H., Anakaya eğiminin zemin büyütmesine etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 2014.

- [21] Finn, L.W.D , Ruz, F., Amplification effects of thin soft surface layers: A study for NBCC 2015, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 37, 32-42, 2015.
- [22] Kuruoglu, M., Eskisar, T., Effect of local soil conditions on dynamic ground response in the southern coast of Izmir Bay, Turkey, Russian Geology and Geophysics, 56, 1201–1212, 2015.
- [23] Azimi, P., Zemin büyütme katsayılarının betonarme taşıyıcı sistemlerin deprem performansına ve maliyetine etkileri, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016.
- [24] Benmokhtar, N., Yakın fay katsayılarının betonarme taşıyıcı sistemlerin deprem performansına ve maliyetine etkileri, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2014.
- [25] TS500 Türk Standardı: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Şubat 2000.
- [26] STA4-CAD, Structural Analysis for Computer Aided Design, Bilgisayar Destekli Tasarım için Yapısal Analiz, Ankara, 2015.
- [27] PEER Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA 94720-1792, peer_center@berkeley.edu, 2013.
- [28] Sindel, Z., Akbaş, R., Tezcan, S., Drift control and damage in tall buildings, Engineering Structures, 18, 957-966, 1995.
- [29] SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design: Computers and Struct. Inc. Berkeley, California, 2015.

Yapıların Zaman-Frekans Ortamında Dalgacık Dönüşümü Metoduyla Hasar Analizleri

Ömer Fatih SAK¹
Kemal BEYEN²

ÖZ

Bu çalışmada zaman-frekans ortamında uygulanan hasar tanılama tekniklerinde gözlenen son araştırmalara bakılarak yeni hasar tanılama algoritmaları incelenmiştir. Özellikle yapı sağlığı çalışmalarında ivme, hız ve deplasman gibi kinematik parametreleri ve bunların türevleri üzerinden örneğin hız bilgisinin enerji tabanlı kinetik bir parametre ile ifade edilerek etkin hasar tespitleri yapılabildiği bilinmektedir. Analitik modellerden elde edilen sityasyon ve ergodik yapıda olmayan kinematik ölçümlere dalgacık dönüşümleri uygulanarak hasar alan ve doğrusal olmayan özellik gösteren yapısal elemanlar tespit edilmiştir. Sürekli dalgacık dönüşümü ve dalgacık paket dönüşümü uygulanan örneklerde bu metodların hasar tespitinde etkili bir yöntem olarak kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapı sağlığı, dalgacık dönüşümleri, hasar tanılama.

ABSTRACT

Damage Analysis of the Structures in Time-Frequency Domain with Wavelet Transform Method

In this study, newly improved damage detection algorithms of the recent researches have been investigated in time-frequency domain analysis. It is known that effective damage assessment can be made on accelerations, velocities and displacements as kinematic information and the derived energy consumption through dynamic behavior of a structural system in view of structural health studies. The wavelet transforms are applied to the kinematic parameters inferred from analytical models which do not have stationary and ergodic characteristics and results are used to determine the damage potentials of the structural members and nonlinearity if exist. Cases in which the continuous wavelet transform and wavelet packet transform are applied show great potential for an effective damage detection. It is believed that *these methods* should be *used* in a complementary way to *effectively* and correctly assess the health condition of an engineering structure.

Keywords: Structural health, wavelet transforms, damage identification.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 17 Mart 2017 günü ulaşmıştır. 17 Nisan 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.300366

1 Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - omerfatihsak@gmail.com

2 Kocaeli Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - kbeyen@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ

Doğal afetler arasında deprem en yıkıcılarındandır. Toplumsal krizlerin ötesinde yüksek seviyede can ve mal kaybına sebebiyet vermektedir. Örneğin 1994'de Amerika Los Angeles depremi sonucunda 61 can kaybı ve 40 Milyar dolar kayıp yaşanmıştır. 1995 yılında Japonya Kobe depreminde 6.400 can kaybı ve 100 Milyar dolar kaybedilmiştir. 1999 Türkiye Kocaeli depreminde 18.373 can kaybı ve 20 Milyar dolar kaybedilmiştir. 1999 senesinde Çin'in Tayvan şehrinde 2.300 can kaybı ve 9 Milyar dolar mal kaybı olmuştur. Son olarak 2011 Van depreminde 644 vatandaşımız hayatını kaybetmiştir. Bu sonuçları mühendislik disiplinleri bağlamında değerlendirdiğimiz takdirde can ve mal kayıplarının depremden ziyade depreme dayanıksız yapılardan kaynaklandığı görülmektedir. Bu sebeple zararı depremin değil gerekli dayanıma sahip olmayan binaların verdiği bir gerçektir. Sonuç olarak binaların imal edilmeden önce depreme karşı yüksek performans sergilemesi ve imalat aşamalarının denetlenmesi gerekmektedir. Bunun neticesinde kritik öneme sahip, insanların yoğun olarak kullandığı ve belirli yüksekliğe sahip binaların da anlık olarak izlenmesi ve yapısal performanslarının düzenli olarak takip edilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Bu nedenle akıllı binalar olarak tanımlanan, hareket sensörleriyle yapı sağlığının anlık olarak izlendiği ve olası deprem karşısında hasarın hangi bölgede ve mertebede olduğunu tespit edebilen sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerde hasarı tanılamak için faydalanan temel prensip yapısal elemanlarda oluşabilecek hasarların ve rijitlik kayıplarının yapıdaki frekans, mod şekli gibi parametrelerini değiştirmesidir. Tespit edilmek istenen modal parametreler gürültü, ortam kaydı ya da deprem kaydıyla belirlenebilmektedir. Titreşim parametrelerine bağlı olarak hasar tanılama metotları dört ana kategoride değerlendirilmektedir. Bunlar; doğal frekansa bağlı metotlar, mod şekline bağlı metotlar, mod şekli eğriliğine bağlı metotlar ve mod şekilleri ile frekansları birlikte kullanan metotlardır.

Araştırma ve yeni metotlar belirlemede basit yapılara odaklanmak için iki ana sebep bulunmaktadır. Bunlardan birisi çoğu yapının kiriş veya plakalardan meydana gelmesidir. Bir diğer sebebi ise kiriş ya da plakalarda belirli bir hasarın tanımlanmasıyla tanılama tekniklerinde önemli kriterlere ulaşılabilir. Özelde daha basit bir şekilde ispatlanan bu metotlar genel ve büyük yapılara da kolaylıkla uygulanabilmektedir. Son yıllarda sensör maliyetleri teknolojinin de gelişmesiyle birlikte yaygın olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Bundan otuz sene öncesinde bir yapı üzerinde sadece üç adet ivmeölçer kullanılmakta ve yeterli görülmekteydi. Şimdi ise maliyetlerinin düşmesiyle birlikte tek bir yapı üzerinde yüzlerce sensör geliştirilebilmektedir.

2. GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Araştırmacıların bir çoğu yapı sağlığı izleme sistemlerini anomali tespiti bağlamında tanımlamışlardır. Bunlar zaman-frekans çözünürlüklerindeki tepe noktaları, ani sivriltiler, skalogramdaki düzensizlikler, enerji katsayılarındaki farklılıklar ve eşikleme parametreleri olabilmektedir.

Deng ve Wang [1] kirişlerde hasarın oluşumu ve konumunu belirleme oranını uzamsal dalgacık dönüşümünü kullanarak araştırmıştır. Sabit yükler altında basit mesnetli kirişi ve dinamik darbe yükü altında konsol kirişi Haar dalgacık dönüşümünü kullanarak tepki sinyalini analiz etmişlerdir. Worden ve Dulei-Barton [2] tarafından tanımlanan yapısal sağlık

izleme sistemlerinin yapıları dalgacık dönüşümlerinin özellikleri sayesinde sinyalin zaman ve frekans çözünürlüklerini iyi bir şekilde sağlamaktadır. Böylece yeniden düzenlenen izleme yapısı araştırmacıları dalgacık dönüşümlerini hasar tespiti ile ilgili özellikleri teşhis etmek için motive etmiştir. Patsias ve Staszewski [3] dalgacık dönüşümlerinin kullanarak optik olarak gözlenen mod şekillerinden hasar tespiti yapılabildiğini göstermişlerdir. Mod şekillerinin dalgacık dönüşümlerinden yardımcı bilgi üretilmiş ve mod şekil değiştirmeleri yaklaşım sinyallerinden elde edilmiştir. Detay sinyallerinden ise hasar konumu hakkında bilgiye ulaşılmıştır. Hasar tespiti dalgacık skalogramındaki sinyal enerjisi gözlemlenerek gerçekleştirilebilmektedir. Yan ve Yam [4] enerji spektrumu ve dalgacık paket analizi metodunu bir indis vektörü ile kullanarak küçük yapısal hasarları tespit etmiştir. Belirli bir dalgacık ayrıştırma seviyesinde indis vektörünün en büyük değeri hasarlı moda bağlı olarak hasarı göstermektedir. Son olarak hasarın konumu ve derecesi kompozit bir yapıda tanımlanmıştır. Mallat [5] tarafından dalgacık dönüşümlerinde kullanılmak üzere iki tür dalgacık fonksiyonu tarif edilmiştir. Bunlar gerçek ve analitik dalgacıklardır. Gerçek dalgacıklar sert sinyal geçişlerini algılamak için, analitik dalgacıklar ise anlık frekans değişimini tanımlamak için kullanılmaktadır. Bir dalgacığın tüm negatif frekansları için Fourier dönüşümü sıfıra eşit ise analitik dalgacık olarak adlandırılmaktadır. Liew ve Wang [6] yapısal sistemlerdeki yayılmayan çatlak tespiti için dalgacık dönüşümünün özdeğer analizinden daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Park ve diğ. [7] laboratuvar ortamında modellenen ve 300 eleman ve 91 düğüm noktasından oluşan uzay kafes sistemi modal uzama enerjisi metoduyla analiz etmiştir. Bu metotla frekans kaydırma yöntemlerinin aksine şiddetli hasar senaryoları zayıf hasar senaryolarına nazaran daha iyi tanımlanmıştır. Bu durumun deneysel verilerdeki gürültünün maskeleye etkisine bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Douka ve diğ. [8] temel titreşim modunun sürekli dalgacık dönüşümünü kullanarak kiriş üzerindeki çatlakın konumu ve büyüklüğünü belirlemiştir. Benzer bir çalışma Gentile ve Messina [9] tarafından yapılmıştır. Sürekli dalgacık dönüşümünün çatlak konumu ve büyüklüğünün gürültülü ve temiz data üzerinden tespit edebildiğini göstermişlerdir.

Zaman tanım alanındaki titreşimlerden hasar tanılamaları yapan, mod şekli ve frekans gibi modal parametrelerin elde edildiği akıllı binalarda (Xu ve diğ. [10]) deprem sonrası durum tespiti amaçlanmaktadır. Chang ve Chen [11] çok çatlaklı kirişte hasar tespiti için uzaysal Gabor dalgacık tabanlı tekniği sunmuştur. Doğal frekanslar ve çatlak pozisyonları göz önüne alındığında, çatlak derinlikleri geleneksel karakteristikte denklemlere dayanan bir optimizasyon işlemiyle çözülmüştür. Analiz ve karşılaştırmalar bu metodun çatlak pozisyonunu ve derinliğini tespit edebildiğini ve tutarlılığının da iyi seviyede olduğunu göstermiştir. Chang ve Chen [12] bu tekniği dikdörtgen biçiminde bir plakaya da uygulamışlardır. Kim ve diğ. [13] kiriş benzeri yapılar için dalgacık dönüşümü kullanarak mod şekli eğriliğine dayalı hasar tanılama metodu önermiştir. Bu çalışmada küçük bir hasar varsayımı ve Haar dalgacık dönüşümü kullanarak bir dizi doğrusal cebrik denklemler hasar mekanizmasına bağlı olarak verilmiştir. Poudel ve diğ. [14] kiriş tipi yapılarda mod şekli farklılığının kompleks Gaussian dalgacık dönüşümüne dayalı olan bir hasar tespit metodu önermiştir. Gaussian dalgacığı, kompleks Gaussian dalgacığı ve Morlet dalgacığı olmak üzere üç farklı dalgacık dönüşümleri bu çalışmada karşılaştırılmıştır.

Dalgacık paket dönüşümü (WPT) hasar tanılama metodu olarak inşaat, uzay ve makine mühendisliği gibi birçok alanda çalışılmıştır. Sami ve diğ. [15] dalgacık paket enerji bileşenlerini sinirsel ağlar modeline bir girdi olarak tanımlayarak hasar tespitinde

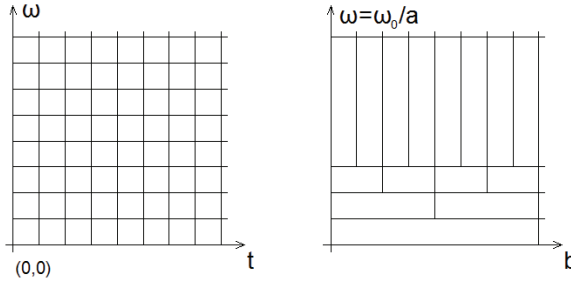
kullanmışlardır ve bu metodun hasar tanılamada kullanışlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Zhong ve Oyadiji [16] sürekli dalgacık dönüşümüne yeni bir yaklaşım önermiştir. Çatlamış basit mesnetli bir kirişin mod şekillerinin iki data seti üzerinden çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak orijinal mod şekil verisinin sürekli dalgacık dönüşüm sonuçlarından daha iyi bir çatlak göstergesi elde etmişlerdir. Analitik ve deneysel sonuçlar önerilen yöntemin çatlak tespiti için çatlak olmayan kirişin modal parametrelerini gerektiren çatlak tespit metodlarına göre üstünlüğünü göstermiştir. Beyen [17] dalgacık spektrumlarının yapı sağlığı durum değerlendirme çalışmalarında önemi hakkında çalışmıştır. Bu çalışmada hareket noktasını oluşturan dalgacık güç spektrumu özellikleri, istatistiki tutarlılık ve çapraz korelasyon uygulamalarının yapı sağlığı çalışmalarında elde edilecek sonuçları güçlendirdiğini gösterilmiştir. Beata ve diğ. [18] yapı üzerinde ilerleyen dalgalar üzerinden hasar tanılama çalışması yapmıştır. Yansıyan dalgaların enerjilerinin düşük olmasından hasarı tanımlamanın güçleşmesi neticesinde dalgacık analizleri kullanılmıştır. Hasar sonrasında oluşan yansıma dalgaları üzerinden tanılamayı gerçekleştirmek için Morlet dalgacıklarına dayalı sürekli dalgacık dönüşümü skalogramlarına bakılmıştır. Wang ve diğ. [19] dalgacık paket bileşenlerinin enerjileri üzerinden hasar tespiti ve konumunu belirlemek için modifiye dalgacık paket enerji derecesini (MWPER) geliştirmişlerdir. Bir deneysel çalışma üzerinden dalgacık paket enerji derecesi (WPER), MWPER ve uzama zaman eğrisinin zarf alanı (EASC) metodlarını kıyaslamışlardır. Sonuç olarak küçük hasarlarda MWPER metodunun diğer iki metoda göre daha duyarlı olduğunu göstermişlerdir. Kaloop ve diğ. [20] analitik bir model üzerinden Daubhecies (DB10) dalgacığını kullanarak sürekli dalgacığın toplam enerjisi ve ayrık dalgacığın dağılımları üzerinden mukayeseli olarak hasar tanılama çalışması yapmıştır. Sonuç olarak ayrık metodun sürekli olana göre daha belirgin olduğu ve hasar tespiti için daha uygun olduğu sonucuna ulaşmıştır. Sonuçların saha ölçümlerinden elde edilen veriler üzerinden deneysel olarak da çalışılması gerektiği belirtilmiştir. Kareem ve diğ. [21] doğrusal olmayan sinyal karakterizasyonunun sürekli dalgacık dönüşümü ve ampirik mod ayrışımıyla Hilbert dönüşümünü incelemiştir. Kareem ve diğ. [22] bir başka çalışmada sürekli dalgacık dönüşümü ile Hilbert Huang dönüşümünün gürültü altındaki anlık frekans tahminlerinin performanslarını değerlendirmiştir. Sonuç olarak gürültü seviyesi arttıkça HHD'nin ampirik temellerden sinyal çıkarma ve yeniden yapılandırma süreçlerinin problemlili olduğu ve dalgacık dönüşümünün bu tür analizler için daha güvenilir bir alternatif sağladığı belirtilmiştir.

3. YAPILARIN DAVRANIŞI VE ZAMAN-FREKANS ALANINDA HASAR TANILAMA

Yapıların tasarımında ve inşaat sonrası yapı izleme metodlarında temel alınan en önemli faktörlerden birisi yapının deprem karşısındaki davranışı ve hasar görülebilirlik mertebesidir. Farklı amaçlarla kullanılacak yapılarda hasar mertebeleri sınırlandırılmaktadır ve yapıların tamamının can güvenliğini sağlayacağı öngörülmektedir. Hasar anomalisini tespit edebilmek için zaman-frekans çözünürlüğünde yaygın olarak dalgacık dönüşümleri kullanılmaktadır. Dalgacık sınırlı süreli olan; ortalaması, başlangıç ve bitiş değeri sıfır olan dalga formlarına denilmektedir. Dalgacıklar düzensiz, sınırlı süreli ve asimetric olduğundan anomali, titreşim ve sinyal içindeki olayları iyi tanımlamaktadırlar.

Dalgacık dönüşümleri kısa süreli fourier dönüşümlerine (STFT) göre bir takım farklara ve avantajlara sahiptir. Bilindiği gibi kısa süreli fourier dönüşümleri de zaman frekans

çözünürlüğü vermektedir ancak dalgacık dönüşümlerinden elde edilen çözünürlüklerde sabit bir şekil bulunmamaktadır. Düşük frekanslarda daha iyi frekans çözünürlüğü, yüksek frekanslarda ise daha iyi zaman çözünürlüğü vermektedir. Bu değişken çözünürlük bazı belirli sinyallerde düşük ve yüksek frekansların aynı anda zaman-frekans alanında birleştirilerek görülmesinde avantaj sağlamaktadır.



Şekil 1 - Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü ile Dalgacık Dönüşümünün Zaman Frekans Alanındaki Mukayesesi

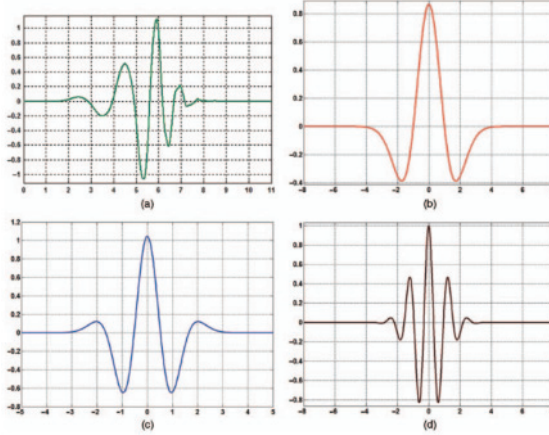
Dalgacık analizine dayalı hasar tespit teknikleri iki farklı yaklaşıma dayanmaktadır. Bunlardan birincisi ayrık dalgacık dönüşümleridir. Bunlar sinyaldeki yaklaşım ve detay seviyelerindeki ani değişimleri tespit ederler. Detay ayrışımındaki ani sıçramalar yapısal hasarla ilişkili olabilmektedir. İkinci yaklaşım olarak sürekli dalgacık dönüşümleri tepki sinyalinin zaman frekans haritasını oluşturarak yapının doğal frekansındaki değişimleri tespit etmektedir. Genel olarak sürekli dalgacık dönüşümleri zaman-frekans analizleri için daha iyi olmakla birlikte ayrık dalgacıklar ayrıştırma, sıkıştırma ve özellik belirlemek için daha uygundur. Ancak dalgacık seçimi her zaman açık değildir. Grossman ve Morlet dalgacıkları en iyi bilinen sürekli dalgacıklardır. Daubechies dalgacıkları bilinen en iyi ortogonal dalgacıklardır. Biortogonal dalgacıklar (örn. Dual B-Dalgacıklar) ayrık dalgacıkların özel durumlarında kullanılır ve iki dalgacık setinden oluşur. Bunlardan birisi ayrıştırma diğeri yeniden inşa etme için kullanılmaktadır. Dalgacık filtrelerinde ayrık (discrete) ve sürekli (continuous) dalgacık dönüşümlerine ilave olarak dalgacık çoklu çözünürlük (multi-resolution) analizi (WMRA) ve dalgacık paket transformasyonu (WPT) olarak da kullanılmaktadır. Zaman alanında $x(t)$ sinyalinin sürekli dalgacık dönüşümü (CWT) şöyle tanımlanmaktadır:

$$CWT(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (1)$$

Burada a ve τ değerleri sırasıyla $\psi(t)$ wavelet fonksiyonunun ölçek ve yerdeğiştirme parametreleridir. Zaman alanındaki sinyal dalgacık dönüşümünün ölçeklenmiş ve yer değiştirmiş olan versiyonları ' a ' ölçeğinde ve ' τ ' ötelemesine göre çoğaltılmaktadır. Ayrık dalgacık dönüşümü (DWT) ayrık bir zaman diliminde verilen $x(n)$ için şöyle tanımlanmaktadır:

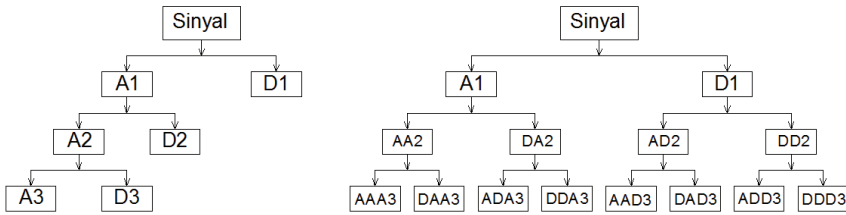
$$C_{j,k} = 2^{(-j/2)} \sum_n x(n) \psi(2^{-j}n - k) \quad (2)$$

Bu denklemde $\psi(n)$ dalgacık fonksiyonunu, $2^{-j/2}$ ve $\psi(2^{-j}n-k)$ ise $\psi(n)$ fonksiyonunun 'j' kadar ölçeklenmiş ve 'k' kadar ötelenmiş versiyonlarını göstermektedir. Dalgacık fonksiyonu olarak kullanılan ana dalgacıklardan bazıları (a) Daubechies, (b) Mexican hat, (c) Gaussian ve (d) Morlet olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2 - (a) Daubechies, (b) Mexican hat, (c) Gaussian ve (d) Morlet Ana Dalgacık Fonksiyonlarının Gösterimi

Dalgacık çoklu çözünürlük analizi (WMRA), ayrık dalgacık dönüşümünü filtrelerle uygulamak için kullanılan bir tekniktir. Çeşitli çözünürlük ölçeklerinde sinyallerin ayrışmasını sağlamaktadır. İlk olarak Mallat tarafından iki boyutlu görüntü analizleri yapabilmek ve bu işlemleri hızlandırabilmek amacıyla çalışılmıştır. Dalgacık paket dönüşümü (WPT) dalgacık çoklu çözünürlük analizine benzer şekilde sinyali ardışık olarak düşük ve yüksek frekans bileşenlerine tekrarlı olarak ayrıştıran bir tekniktir. Ancak WMRA'dan farklı olarak belirli bir seviyede sadece yaklaşım sinyallerini değil detay sinyallerini de ayrıştırmaya devam etmektedir.



Şekil 3 - WMRA ve WPT Tekniklerinin Karşılaştırılması

Dalgacık paketi ölçekleme fonksiyonlarıyla dalgacık fonksiyonlarının ayrışım ve dönüşümlerin ikili dallarını oluşturan bir ailedir. Böylece dalgacık paketleri sinyal özelliklerinin ortonormalitesi ve bunlara karşılık gelen dalgacık fonksiyonlarından elde

edilen zaman-frekans konumlarını barındırmaktadır. Bir dalgacık paketi $\Psi_{j,k}^i(t)$ ile ifade edilen ve üç indisten oluşan bir fonksiyon ile ifade edilebilir. Burada i, j ve k indisleri sırasıyla modülasyon, ölçek ve çeviri parametreleridir. Denklem şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \Psi^i(2^j t - k), \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

Bu denklemde $i=0$ için $\Psi^0(t) = \phi(t)$ ve $i=1$ için $\Psi^1(t) = \Psi(t)$ değerini almaktadır. Bu denklemde $\phi(t)$ ölçekleme fonksiyonu ve $\Psi(t)$ ana dalgacık fonksiyonunu ifade etmektedir. $i>1$ olması durumunda Ψ^i ana dalgacık fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\Psi^{2i} = \sqrt{2} \sum_k h(k) \Psi^i(2t - k) \quad (4)$$

$$\Psi^{2i+1} = \sqrt{2} \sum_k g(k) \Psi^i(2t - k) \quad (5)$$

Burada $h(k)$ ve $g(k)$ ana dalgacık fonksiyonu ile ilişkili dördün ayna filtreleri ve ölçekleme fonksiyonlarıdır. Dalgacık dönüşümünün modülünün karesi zaman ölçekli düzlem üzerinde enerji yoğunluğu dağılımı olarak yorumlanabilir. Bir sinyalin enerjisi ağırlıklı olarak zaman ölçekli düzlemde dalgacık dönüşümünün tepelerinde yoğunlaşmaktadır. Hasar tespiti için temel bir özellik olarak doğal frekanslara nazaran mod şekilleri ve bunların türevlerinin daha faydalı olduğu açık olarak görülmektedir (Farrar ve James [23]). İlk olarak mod şekilleri yerel bilgileri içermektedir. Bu da onları yerel hasarları ve çoklu hasar konumunu tespit etmek için daha hassas hale getirmektedir. İkincisi mod şekilleri sıcaklık gibi çevresel etkilere karşı doğal frekanslara nazaran daha az duyarlıdır.

4. ANALİZ YÖNTEMLERİNİN ANALİTİK YAPILARA UYGULANMASI

Türk Standartları (TS) 500 ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007'ye uygun olarak modellenen dört katlı analitik çerçevede kolonlar 30x60, kirişler 25x50 olarak seçilmiştir. X yönlü açıklıklar 4 m, kat yüksekliği 3 m'dir. Toplamda 24 kolon ve bunları birbirine bağlayan kirişlerle çerçeve oluşturulacak sinüs girdi kuvveti ile hasar verilerek modal parametreler tespit edilecektir.

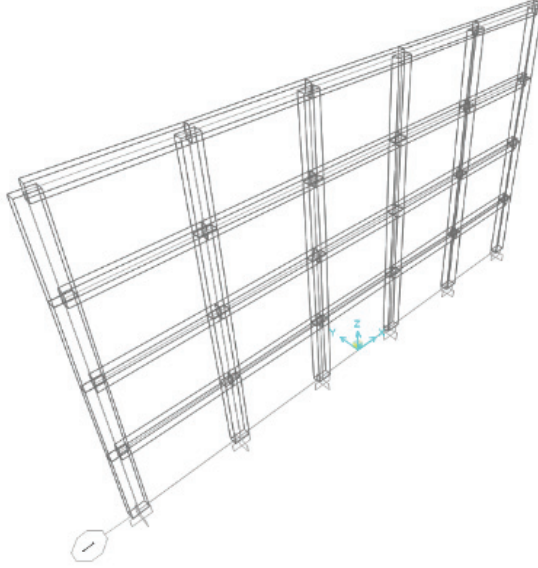
İkinci örnekte ise benzer yapı üç boyutlu çerçeve olarak da modellenerek deprem kuvvetleri uygulanarak dalgacık dönüşümü ile hasar anomalisinin yapısal performansa bağlı olarak nasıl değiştiği tespit edilmeye çalışılacaktır.

Üçüncü örnekte daha komplike bir yapı Perform 3D programıyla analiz edilerek sürekli ve dalgacık paket dönüşümü üzerinden relatif ivme, hız ve deplasman parametreleri ile mutlak ivme kayıtlarına bakılarak çalışılmıştır. Ayrıca hız parametrelerinden elde edilen enerji değerlerinin zaman-frekans çözünürlükleri incelenmiştir.

4.1. İki Boyutlu Çerçeve Yapının Modal Parametrelerinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi

Yapı eşdeğer deprem yükü, spektral yükleme ve zaman tanım alanında deprem kaydı ile analiz edilmiştir. Yapı periyodu, yumuşak kat, zayıf kat, burulma düzensizliği durumu, görelî

kat ötelemesi ve 2. Mertebe gösterge değeri kontrolleri DBYBHY2007'ye göre uygun aralıklarda çıkmıştır. Yapının modal parametreleri sonlu elemanlar metodu ile belirlenmiştir.



Şekil 4 - Yapı 3B Görünümü

Tablo 1 - Hasarsız Yapı Periyodunun Sonlu Elemanlar Metoduyla Tespit Edilmesi

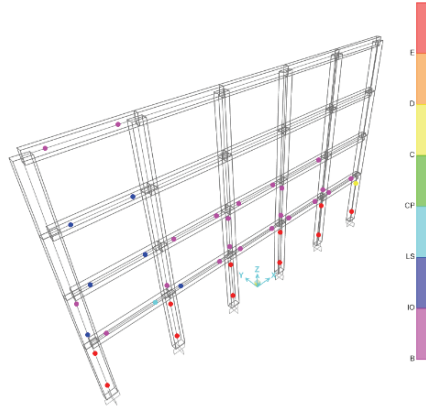
TABLE: Modal Participating Mass Ratios

OutputCase	StepType	StepNum	Period	UX	UY	SumUX
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0,195	0,829	0	0,82951
MODAL	Mode	2	0,0602	0,113	0	0,94325
MODAL	Mode	3	0,033	0,043	0	0,98658
MODAL	Mode	4	0,023	0,013	0	0,99999

X yönü için periyot modelimizde 0,195 sn çıkmıştır. Yapı periyot değerleri DBYBHY2007'de tanımlanan üst sınırı aşmadığından modal parametreler uygun aralıkta kalmaktadır.

4.2. Yapı Deprem Performansının Deprem Kayıt Hareketi İle Doğrusal Olmayan Metotla Belirlenmesi

Yapının modal parametreleri kuvvetli shaker kuvveti ile doğrusal olmayan analiz ile SAP2000 programıyla analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır. Burada sin fonksiyonu x yönlü ivme olarak çerçeveye etkilmiştir.

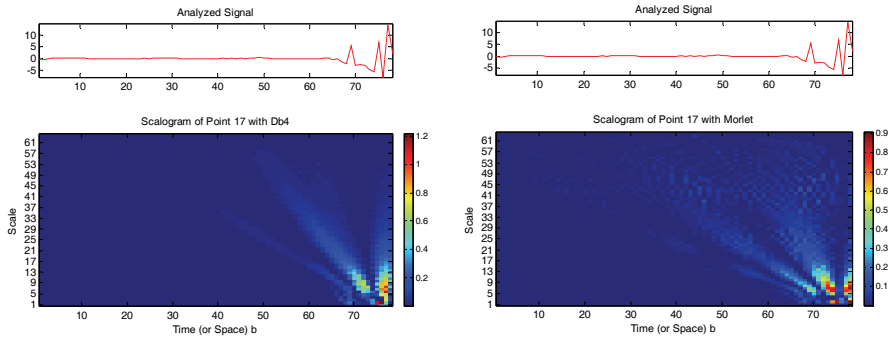


Şekil 5 - Kuvvetli Deprem Zaman Tanım Alanında Analiz Sonucu Mafsallaşma Grafiği

Yapıdaki kolonların mafsallaşması incelendiğinde 1. ve 2. katta bir takım elemanların göçme öncesi performans seviyesini aştığı gözlemlenmiştir. Buradaki referans şekil değiştirme parametreleri DBYBHY2007 değerleri baz alınarak değiştirilmiştir.

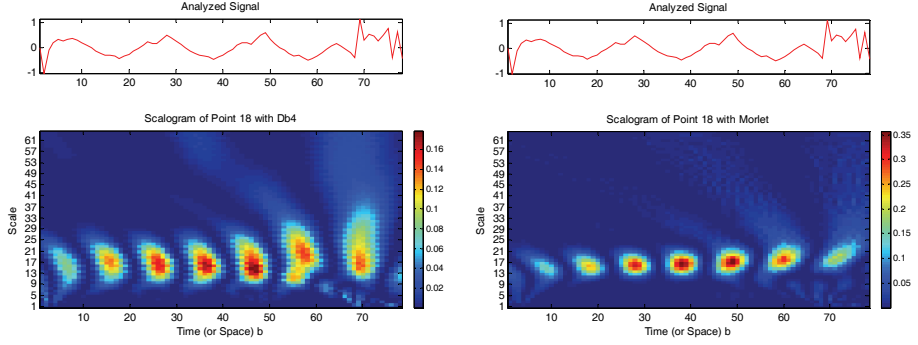
4.3. Hasarlı ve Hasarsız Parametreler Üzerinden Dalgacık Analizi Metodu ile Hasar Tanılama Çalışması

Yapısal hasar oluşan kolonun alt ve üstünde bulunan kolonlarla birlikte noktasal ivme ölçümü yapılarak, bu noktaların ve hasarlı durumlarının parametreleri Db4 ve Morlet dalgacık filtreleri ile incelenerek iki durum arasındaki farklılıklar tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için gerekli kodlar MATLAB programıyla yazılmıştır.

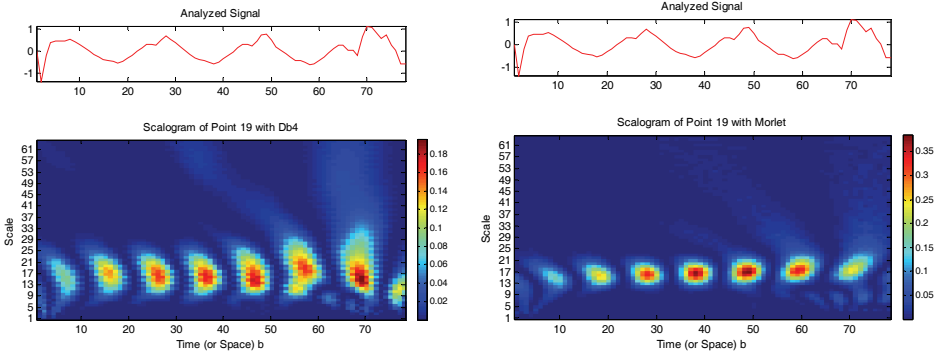


Şekil 6 - 17 Numaralı Hasarlı Noktanın Db4 ve Morlet ile Analizi

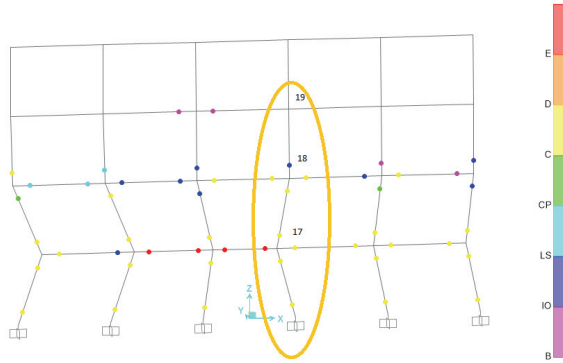
17 numaralı elemanda maksimum ivme değerlerinin 10 m/sn^2 seviyelerine kadar yükseldiği ve dalgacık filtrelerinde grafiğin sadece sağ alt kısmında enerji yığılmasının olduğu gözlemlenmiştir.



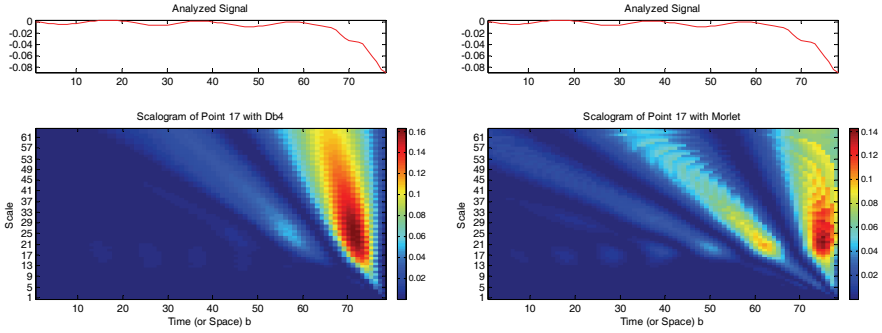
Şekil 7 - 18 Numaralı Hasarlı Noktanın Db4, Morlet, Mexh ve Sym2 ile Analizi



Şekil 8 - 19 Numaralı Hasarlı Noktanın Db4 ve Morlet ile Analizi

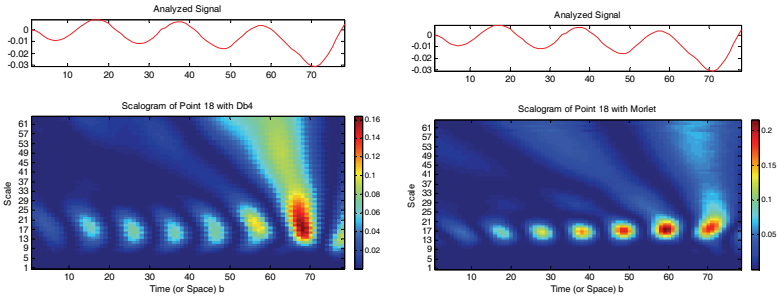


Şekil 9 - Kuvvetli Shaker Kuvveti Sonrası Yapının Hasar Seviyeleri

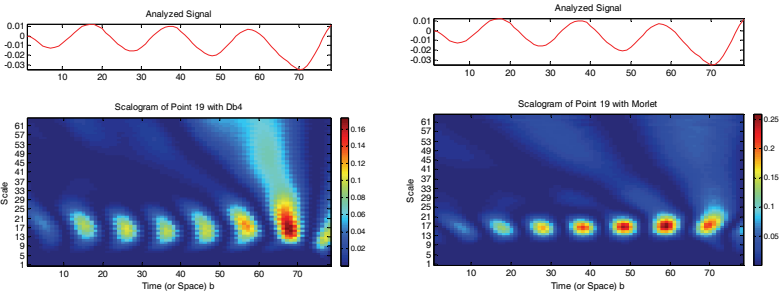


Şekil 10 - 17 Numaralı Hasarlı Nokta Deplasmanlarının Db4 ve Morlet ile Analizi

17 numaralı elemanda maksimum deplasman değerlerinin 8cm seviyelerine kadar yükseldiği ve dalgacık filtrelerinde grafiğin sadece sağ kısmında enerji yığılımlarının olduğu gözlemlenmiştir. Grafiklerde frekans mertebesinin ölçek ile ters orantılı olarak zamanla düştüğü gözlemlenmiştir.



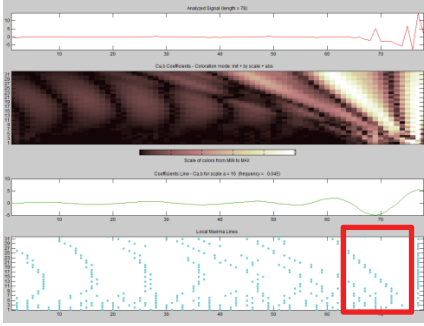
Şekil 11 - 18 Numaralı Hasarlı Nokta Deplasmanlarının Db4 ve Morlet ile Analizi



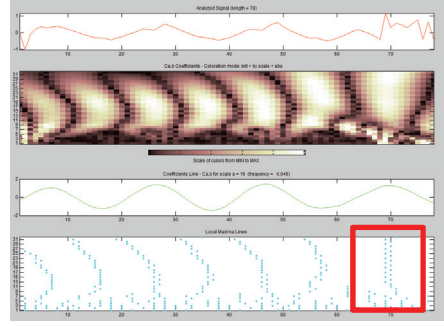
Şekil 12 - 19 Numaralı Hasarlı Nokta Deplasmanlarının Db4 ve Morlet ile Analizi

Hasarlı ve hasarsız elemanların ivme parametreleri ile sürekli dalgacık dönüşümü yapıldığında hasar oluşumu ile ilgili olarak net bir görüntü elde edilebilmektedir. Yerel üst

çizgilerinde son aşamada kırıklara rastlanmaktadır. Bu çapraz kırılmalar hasara işaret eden bir parametre olarak değerlendirilebilir. Aynı kuvvet etkisi altında hasarlı eleman ivme değerlerinin hasarsızına göre on kat fazla olması da elemanın hasar almasıyla ilişkilendirilebilir.

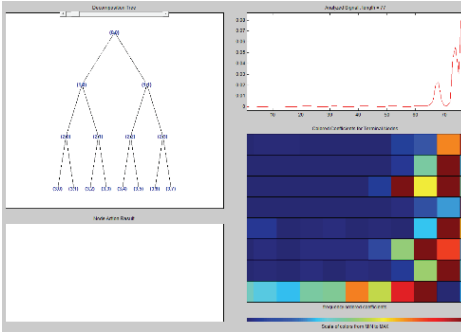


Şekil 13 - 17 Nurmaralı Hasarlı Noktanın İvme Değerlerinin Db4 İle Analizi

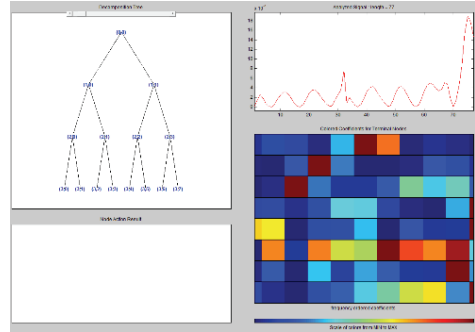


Şekil 14 - 18 Nurmaralı Hasarlı Noktanın İvme Değerlerinin Db4 ile Analizi

Hasarsız noktayı ele aldığımızda yerel üst çizgisinin tekrar hasarlı elemandan farklı olarak süreklilik gösterdiğini belirtebiliriz. Dalgacık paket dönüşümü ile hasarlı ve hasarsız elemanlara bakıldığında hasar anında belirgin bir şekilde tespit yapılabilmektedir. Hasarlı ve hasarsız elemanların enerji parametrelerine bakıldığında ise aynı kuvvetin etkideği iki benzer kırıktan hasarlı olanın enerji değerleri hasarsız olana göre 4 kat daha fazla çıkmaktadır. Bu durum dalgacık paket dönüşümünde de belirgin bir şekilde görülmekte ve hasar belirtileri koyu kırmızı renklerle grafiğin sağ kısmında yoğunlaşmaktadır. Hasarsız elemanda ise bu değerler zamana yayılı bir şekilde görülmektedir.



Şekil 15 - 17 Nurmaralı Hasarlı Noktanın İvme Değerlerinin Db4 İle Dalgacık Paket Dönüşümü

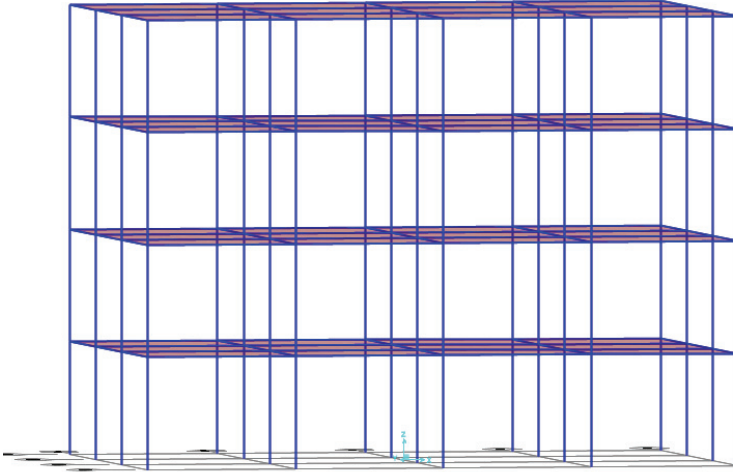


Şekil 16 - 18 Nurmaralı Hasarlı Noktanın İvme Değerlerinin Db4 İle Dalgacık Paket Dönüşümü

Sonuç olarak hasar tespitinde ayırık, sürekli ve dalgacık paket dönüşümünün yanı sıra yerel üst çizgilerinin de belirleyici faktörler olduğu anlaşılmaktadır.

4.4. Üç Boyutlu Çerçeve Yapının Modal Parametrelerinin Sonlu Elemanlar Metodu ile Belirlenmesi

Yapı eşdeğer deprem yükü, spektral yükleme ve zaman tanım alanında deprem kaydı ile analiz edilmiştir. Yapı periyodu, yumuşak kat, zayıf kat, burulma düzensizliği durumu, görelî kat ötelemesi ve 2. Mertebe gösterge değeri kontrolleri DBYBHY2007'ye göre uygun aralıklarda çıkmıştır. Yapının modal parametreleri sonlu elemanlar metodu ile belirlenmiştir.



Şekil 17 - İki Boyutlu Çerçeve Yapı 3B Görünümü

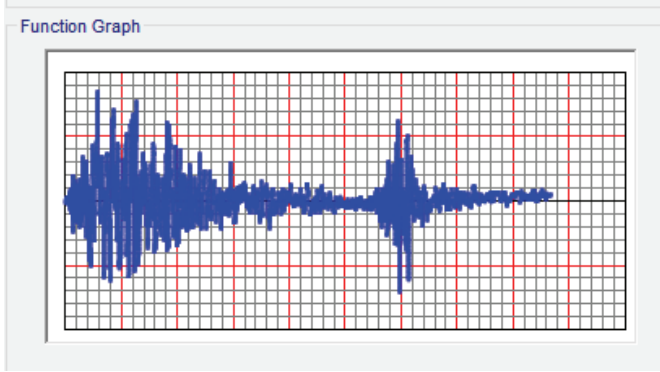
Tablo 2 - Hasarsız (Modal) ve Hasarlı (Modal-NL) Yapı Periyodunun Sonlu Elemanlar Metoduyla Tespit Edilmesi

TABLE: Modal Periods And Frequencies						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency	UX	UY
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0,408	2,450	0	0,94059
MODAL	Mode	2	0,283	3,530	0	0
MODAL	Mode	3	0,260	3,845	0,93272	0
MODAL	Mode	4	0,095	10,537	0	0,05932
MODAL-NL	Mode	1	0,402	2,488	0	0,93739
MODAL-NL	Mode	2	0,301	3,323	0	0,00021
MODAL-NL	Mode	3	0,274	3,647	0,94233	0
MODAL-NL	Mode	4	0,094	10,651	0	0,06229

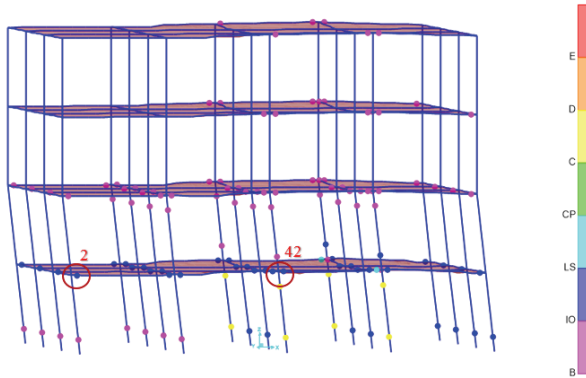
X yönü için hakim olan 3. modun periyodu hasarsız modelimizde 0,260 sn iken hasarlı modelde 0,274 sn'ye yükselmiştir. Y yönü için hakim olan 1. modun periyodu ise hasarsız modelimizde 0,408 sn iken hasarlı modelimizde 0,402 sn'ye inmiştir.

4.5. Yapı Deprem Performansının Deprem Kayıt Hareketi İle Doğrusal Olmayan Metotla Belirlenmesi

Yapının modal parametreleri kuvvetli deprem kuvveti ile doğrusal olmayan analiz ile SAP2000 programıyla analiz edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmaktadır. Kuvvet kaydı olarak olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi kullanılmıştır.



Şekil 18 - 17 Ağustos 1999 Kocaeli Merkez Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü Deprem Kaydı



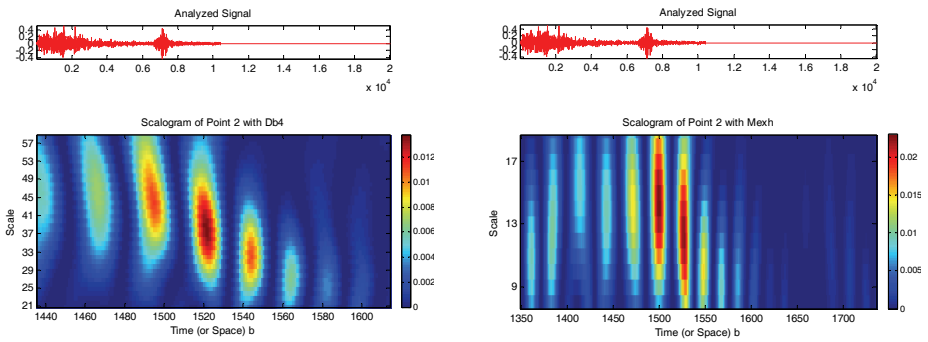
Şekil 19 - Kuvvetli Deprem Zaman Tanım Alanında Analiz Sonucu Mafsallaşma Grafiği

Yapıdaki kolonların mafsallaşması incelendiğinde 1. Katta ileri hasar seviyesine ulaşan elemanlar ve 2. katta bir takım elemanların göçme öncesi performans seviyesini aştığı gözlemlenmiştir. Buradaki referans şekil değiştirme parametreleri DBYBHY2007 değerleri baz alınarak değiştirilmiştir.

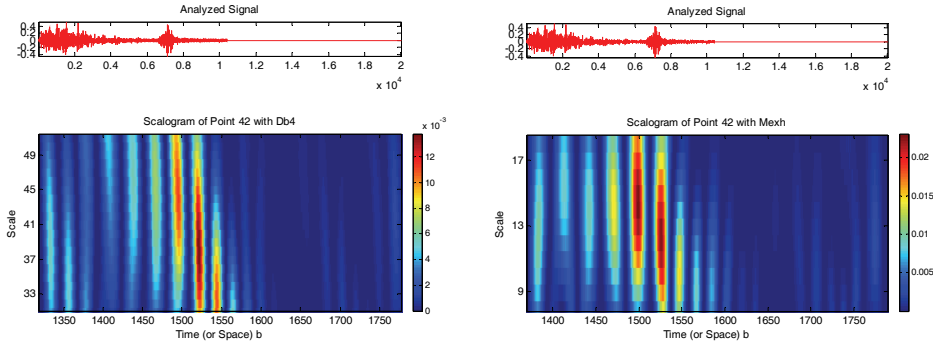
4.6. Hasarlı ve Hasarsız Parametreler Üzerinden Dalgacık Analizi Metodu ile Hasar Tanılama Çalışması

Yapısal hasar oluşan kolonun alt ve üstünde bulunan kolonlarla birlikte noktasal ivme ölçümü yapılarak, bu noktaların hasarsız (zayıf shaker kuvveti) ve hasarlı (kuvvetli shaker kuvveti) durumlarının parametreleri Db4, Morlet, Mexican Hat ve Symlet dalgacık filtreleri ile incelenerek iki durum arasındaki farklılıklar tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunun için gerekli kodlar MATLAB programıyla yazılmıştır. Yapılan analizler sonucunda Db4 ve Mexh dalgacık modellerinin analiz yapımız için uygun ve yeterli oldukları görülmüştür. İlgili kodlar çalışmamızın Ek-1 kısmında verilmiştir. Burada 2 ve 42 numaralı elemanların hasarlı ve hasarsız ivme ve deplasman kayıtlarından yola çıkılarak hasar alan 42 nolu elamanın dalgacık transformasyonundaki belirgin farklarına bakılacaktır.

Öncelikle hasarsız durumu ele aldığımızda aşağıdaki değerlere ulaşılmaktadır.



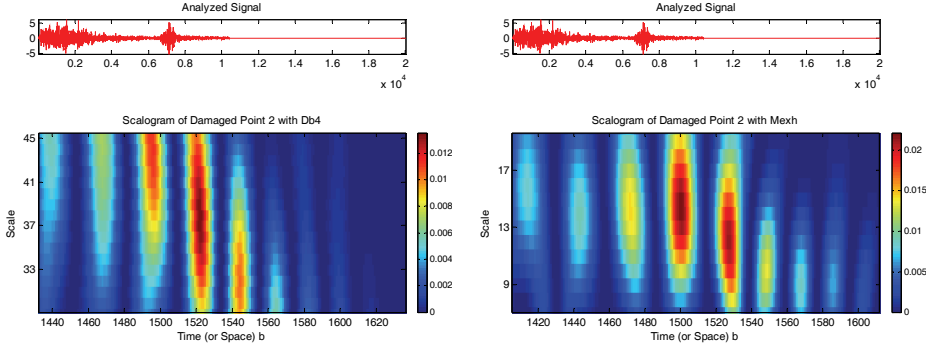
Şekil 20 - 2 Numaralı Hasarsız Noktanın Db4 ve Mexh ile Analizi



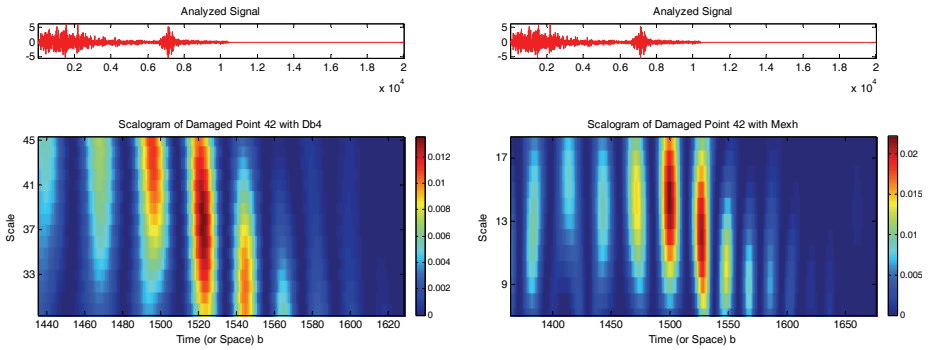
Şekil 21 - 42 Numaralı Hasarsız Noktanın Db4 ve Mexh ile Analizi

Zaman çizelgesindeki değerler 0,005 mertebesinde ilerlediğinden 1525. adım yaklaşık olarak 7,62 saniyeye denk gelmektedir. Bu zaman diliminde ölçek şiddeti db4 dalgacık ailesinde 40 değerini, Mexh dalgacık modelinde ise 13 değerini vermektedir.

Hasarlı durumu ele aldığımızda aşağıdaki değerlere ulaşılmaktadır.

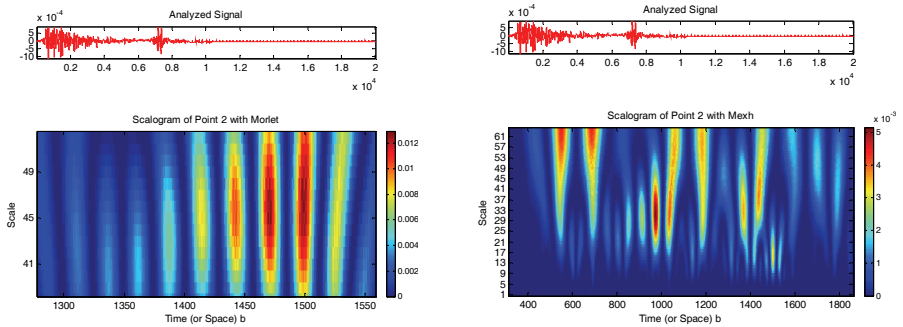


Şekil 22 - 2 Numarlı Hasarlı Noktanın Db4 ve Mexh ile Analizi

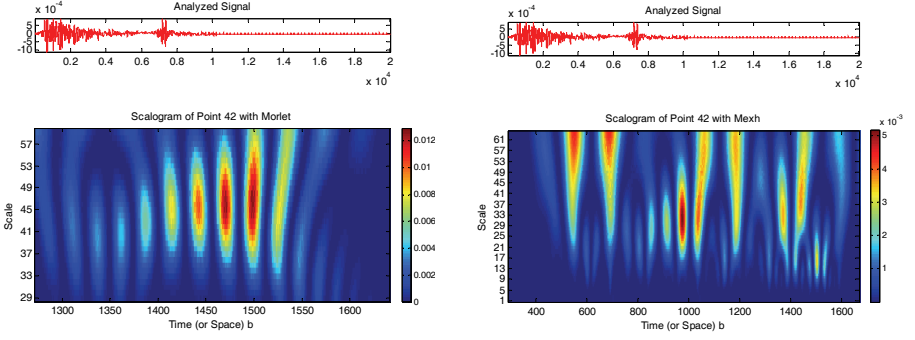


Şekil 23 - 42 Numarlı Hasarlı Noktanın Db4 ve Mexh ile Analizi

Zaman çizelgesindeki değerler 0,005 mertebesinde ilerlediğinden 1525. adım yaklaşık olarak 7,62 saniyeye denk gelmektedir. Bu zaman diliminde ölçek şiddeti Db4 dalgacık ailesinde 37 mertebesine inmektedir. Yani yapı elemanındaki frekans ölçek ile ters orantılı olarak yükselmiştir. Aynı analizler 2 ve 42 numaralı elemanların deplasman değerleri üzerinden tekrarlanacaktır. Bu analizde ise en uygun dalgacık türü Morlet ve Mexh olmaktadır.

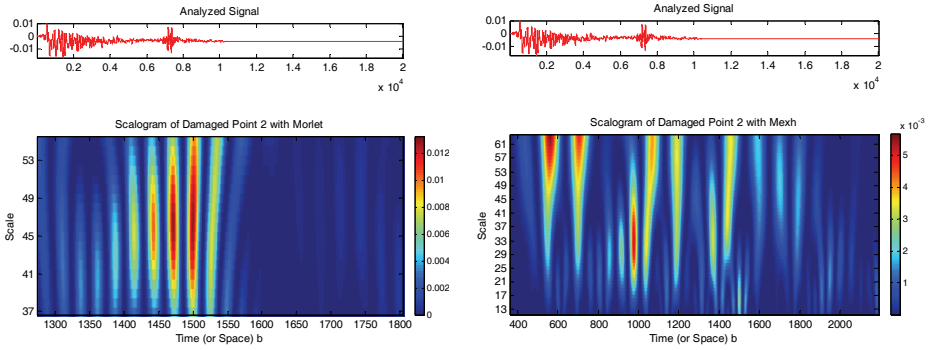


Şekil 24 - 2 Numarlı Hasarsız Noktanın Morlet ve Mexh ile Analizi

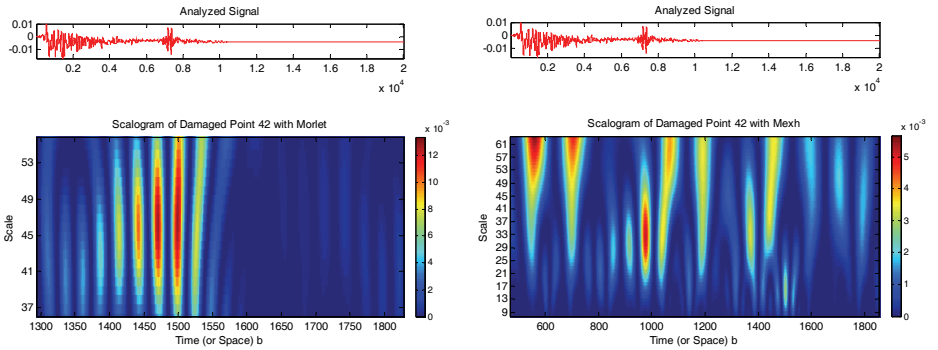


Şekil 25 - 42 Numaralı Hasarsız Noktanın Morlet ve Mexh ile Analizi

Zaman çizelgesindeki değerler 0,005 mertebesinde ilerlediğinden 1500. adım yaklaşık olarak 7,50 saniyeye denk gelmektedir. Bu zaman diliminde ölçek şiddeti Morlet dalgacık ailesinde 47 değerini, Mexh dalgacık modelinde ise 5. saniyede 33 değerini vermektedir. Hasarlı durumu ele aldığımızda aşağıdaki değerlere ulaşılmaktadır.



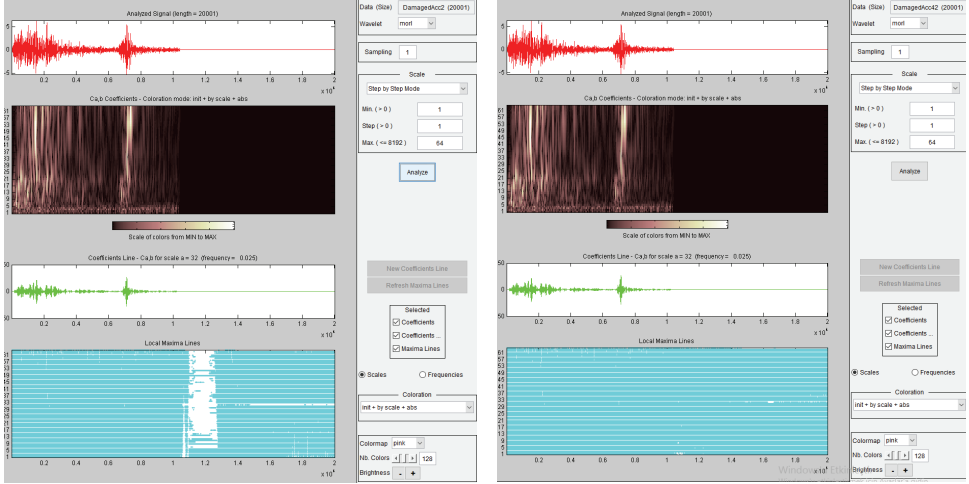
Şekil 26 - 2 Numaralı Hasarlı Noktanın Morlet ve Mexh ile Analizi



Şekil 27 - 42 Numaralı Hasarlı Noktanın Morlet ve Mexh ile Analizi

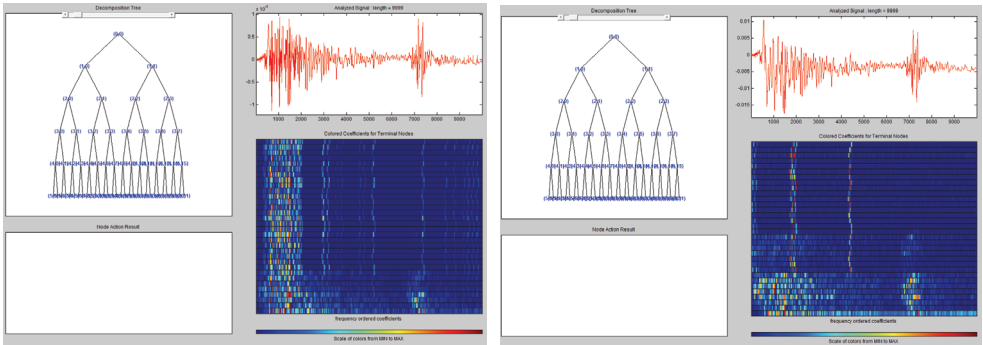
Zaman çizelgesindeki değerler 0,005 mertebesinde ilerlediğinden 1500. adım yaklaşık olarak 7,50 saniyeye denk gelmektedir. Bu zaman diliminde ölçek şiddeti Morlet dalgacık ailesinde 46 değerini, Mexh dalgacık modelinde ise 5. saniyede 32 değerini vermektedir. Burada deplasman kaydından da frekans değerinin düştüğü sonucuna ulaşılabılır. Frekans değerinin düşmesi yapının hasar aldığını göstermektedir.

Ayrıca hasarlı ivme kayıtlarından morlet dalgacık metoduyla incelendiğince hasar alan 42 numaralı elemanın 2 numaralı elemandan farklı olarak yerel üst çizgilerinde süreklilik gözlemlenmiştir. Bu süreksizlik de yapı elemanının hasar alması olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 28 - 2 ve 42 Numarlı Hasarlı Noktaların Morlet ile Analizi ve Yerel Üst Çizgileri

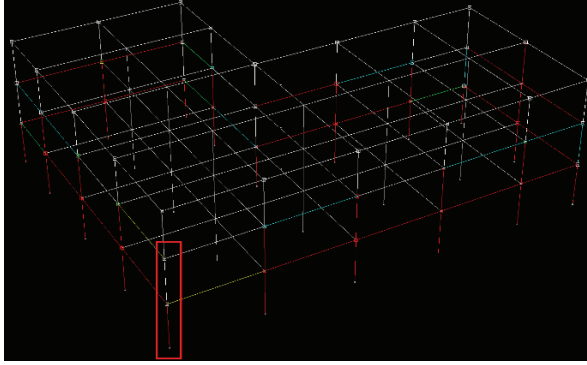
Hasarlı elemanın deprem öncesi ve sonrasında elde edilen deplasman değerleriyle Db4 dalgacık paket dönüşümü yapıldığında frekans düzenli katsayılarla yığılma gözlemlenmektedir. Bu yoğunluk ve dağılım parametreleri de hasara işaret etmektedir. İki boyutlu analitik modelimizle benzer şekilde hasarlı elemanın dalgacık paket dönüşümü grafiğinde bölgesel yoğunlaşma gözlemlenirken hasarsız elemanda böyle bir yoğunlaşma zamana yayılı olarak görülmektedir.



Şekil 29 - 42 Numaralı Noktanın Hasarsız ve Hasarlı Dalgacık Paket Dönüşümü

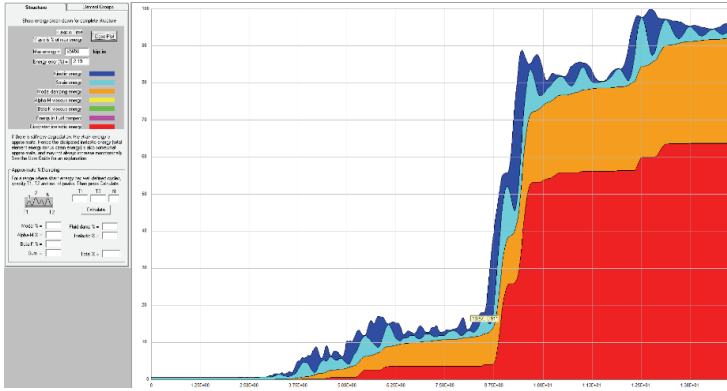
4.7. Üç Boyutlu Analitik Yapı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bu örnekte 3 katlı L şeklinde planlanmış olan analitik modelde 72 kolon ve bunları birbirine bağlayan kirişler bulunmaktadır. Yapı 1994 Northridge depremiyle analiz edilerek kinetik ve kinematik değerleri elde edilmiştir. Sonrasında bu değerler üzerinden dalgacık dönüşümleri çalışılmıştır.



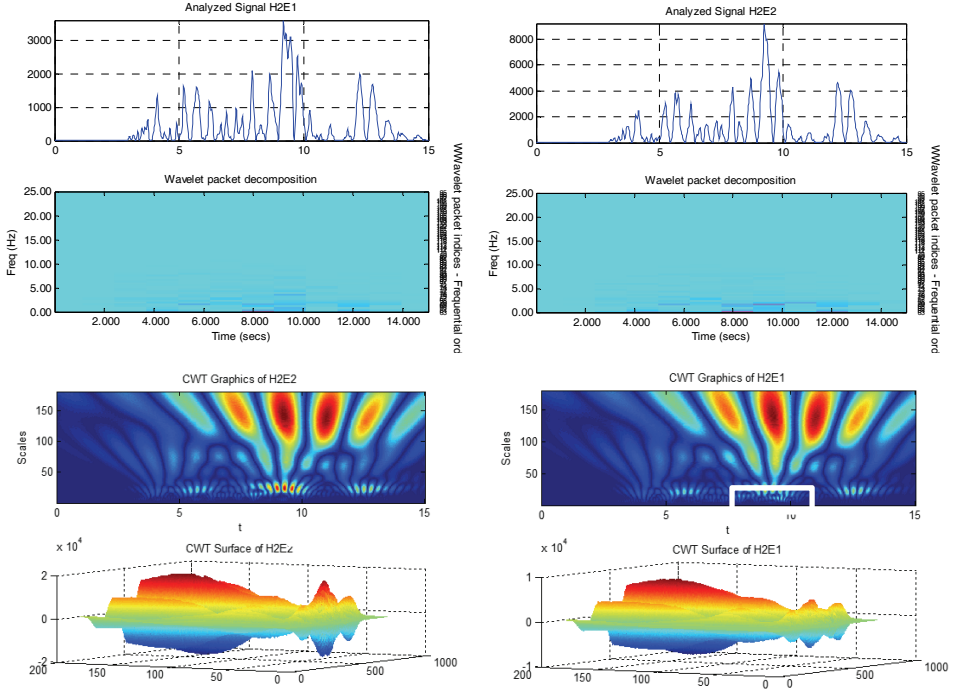
Şekil 30 - Perform 3D Analitik Modeli ve Hasar Alan Elemanlar

Yapının enerji tüketim grafiği incelendiğinde 9. saniyeden sonra ani artışlar gözlenmektedir.



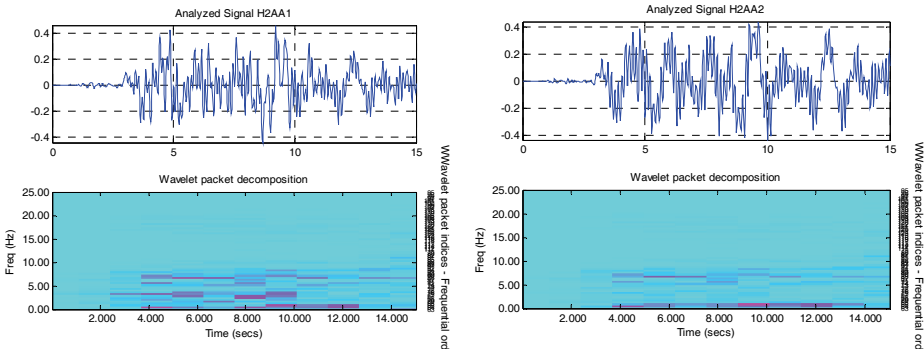
Şekil 31 - Analitik Modelin Enerji Tüketim Parametreleri

Yapının hasar alan elemanının üst noktası (1) ile hasar almayan elemanın üst noktalarının (2) Perform 3D programına göre H1, H2 ve V yönlerindeki relatif ivme, hız, deplasman değerleri ve mutlak ivme değerleri üzerinden sürekli dalgacık dönüşümü ve dalgacık paket dönüşümü çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca hız parametresinden enerji alanına geçiş yapılarak bu iki elemanın arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Dalgacık paket dönüşümünde sym6, sürekli dalgacıkta ise Morlet kullanılmıştır.

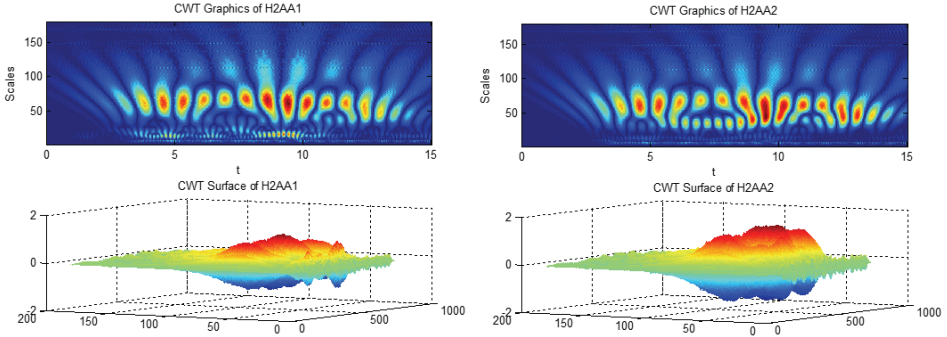


Şekil 32 - Analitik Modelin Enerji Parametresi Üzerinden Dalgacık Dönüşümleri

H2 yönlü enerji grafikleri karşılaştırıldığında 2 numaralı hasarsız elemanda yer alan yüksek frekans mertebesinin hasar alan elemanda azaldığını gözlemlemekteyiz. Enerji değerlerinin 9. Saniyeden sonra değiştiğini ve bunun yapı enerjisi tüketimiyle aynı zamanda gerçekleştiğini belirtebiliriz. Yani hasar doğru zamanda yakalanmıştır.

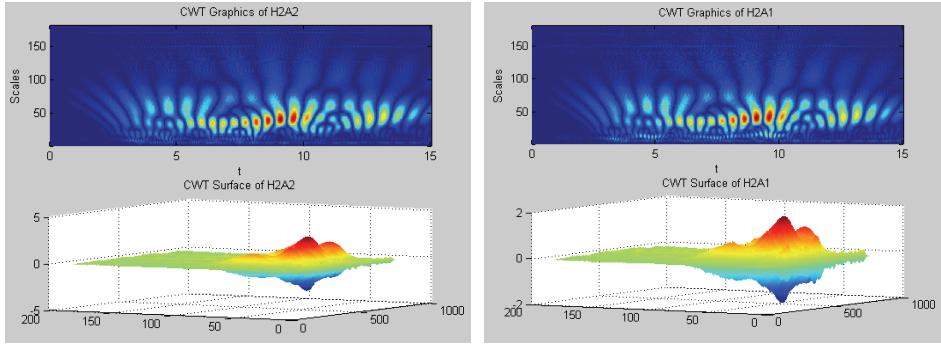


Şekil 33 - Analitik Modelin Mutlak İvme Parametresi Üzerinden Dalgacık Dönüşümleri



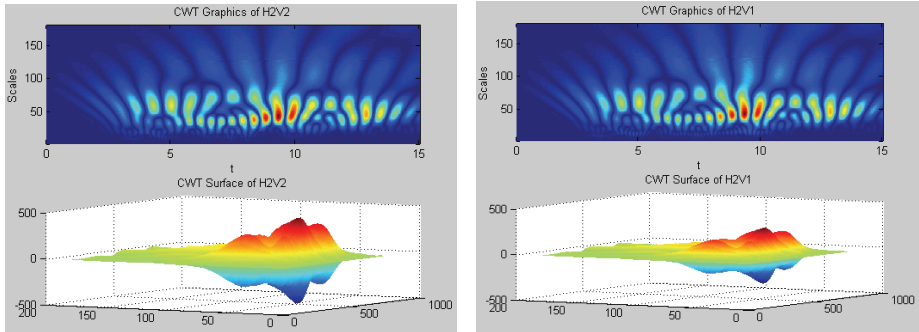
Şekil 33 - Analitik Modelin Mutlak İvme Parametresi Üzerinden Dalgacık Dönüşümleri (devam)

H2 yönlü mutlak ivme değerlerinde de benzer şekilde frekans kayıpları sürekli ve dalgacık paket dönüşümünde gözlemlenebilmektedir.



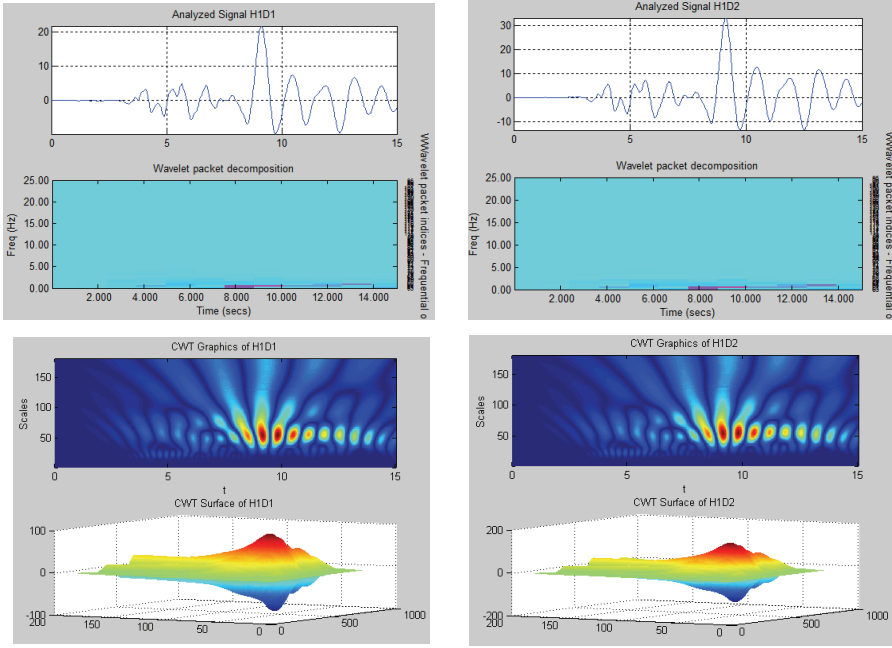
Şekil 34 - Analitik Modelin Relatif İvme Parametresi Üzerinden Dalgacık Dönüşümleri

H2 yönlü relatif ivme değerlerinde ise frekansın zamana göre düştüğünü gözlemleyebiliyoruz. Scale grafiğindeki yükselmeler frekansın tersi olduğundan frekans azalmasını ifade etmektedir.



Şekil 35. Analitik Modelin Relatif İvme Parametresi Üzerinden Dalgacık Dönüşümleri

H2 yönlü relatif hız değerlerinde ise frekansın zamana göre düştüğünü gözlemleyebiliyoruz. Scale grafiğindeki yükselmeler frekansın tersi olduğundan frekans azalmasını ifade etmektedir.



Şekil 36 - Analitik Modelin Relatif Deplasman Parametresi Üzerinden Dalgacık Dönüşümleri

Bu yapıdaki seçilen noktalar için relatif deplasman değerleri üzerinden herhangi bir farklılığa rastlanmamıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada gösterildiği gibi Dalgacık (Wavelet) filtreleri yapı hasarını yakalamada etkin bir metot olarak kullanılabilir. Hasar gören elemanlarla hasar görmeyen elemanlar arasındaki farklar dalgacık spektrumlarındaki zamanla değişen frekans muhteviyatı ve enerji yoğunluğundan anlaşılabilir. Yapı türleri için deplasman ve ivme değerlerinin yanı sıra enerji parametreleri de anlık olarak izlenebilir ve yapı performansının kritik seviyeye gelmesi durumunda erken uyarı algoritmaları geliştirilebilir. Enerji değeri-frekans ilişkisi değişimleri, ivme ve hız değerlerinin zaman-frekans düzleminde değişimi Dalgacık dönüşümleriyle gözlenebilir hale gelmiştir. Frekans değişimi göreceli ivme grafiklerinde mutlak ivmeye göre daha başarılı bir şekilde tespit edilmektedir. Göreceli değerlendirme hasar tanılamada esas alınarak hızlı ve doğru karar ağacı oluşturulabilmektedir. İleride yapılacak çalışmalarla elde edilen sonuçların saha verileriyle doğrulanması sağlanabilir. Benzer şekilde hasarlı mevcut bir yapının Dalgacık analiz sonuçlarıyla nümerik modelinin güncellenmesi ise hale hazırda yapılagelmektedir. Beyen [25] analitik ve deneysel sonuçları bire-bir (auto correlation) ve çapraz (cross correlation) ilişkileriyle zaman-frekans ortamında

çalışmış ve elde edilen Dalgacık transfer fonksiyonlarıyla yapı sağlığı değerlendirmesi ve model hatalarının iyileştirilmesini kat seviyesi hassaslığında uygulamıştır. Veri toplama ağının imkanları çerçevesinde kat taşıyıcı elemanları için de benzer durum değerlendirme ve nümerik model kalibrasyonlarının yapılabileceği belirtilmiştir.

Günümüzde ulaşılan teknoloji izleme, veri saklama-yönetme ve veri işlemeyi hızlandırmıştır. Yüksek işlem hızı ve saklama kapasitesi olan elektronik kartlarla algoritmalar sensör yanına yerleştirilmiş işlemci kartlarıyla analiz edilebilmekte ve sadece karar vermede kullanılacak mühendislik parametre değerleri karar ağacının bulunduğu ortama transfer edilebilmektedir. Uçak ve uzay araçlarında standart olarak uygulanan deneysel modal analiz (DMA) inşaat mühendisliği yapılarında da uygulanmaya başlandığı ve bu süreçle birlikte analizden yapı sağlığı izlemeye, durum tespitinden, hasar görebilirlik çalışmalarına ve köprülerde yapı işletme güvenliği gibi farklı uygulama alanlarında yapı üzerinde yürütülen testlerin artık sürekli izlemeye dönüştüğü Beyen'in [25] çalışmasında vurgulanmıştır. Kusunoki ve diğ. [26] tarafından Vincent Thomas köprüsünün 1987 Whitter, 1994 Northridge depremleri ve 2004 yılında kaydedilen iki çevrel titreşim tepki geçmişi Dalgacık dönüşümleriyle alt bileşenlerine ayrıştırılarak (decomposition) yapı sağlığı değerlendirmesi için yapısal davranış çalışılmıştır. Yapı sağlığı izleme sistemleri içinde bir beton çatlak teşhis ağı Yan ve diğ. [27] tarafından uygulanmıştır.

Dijital sensör teknolojisinde geline son on yılda sensör duyarlılığının ve veri kalitesinin (veri/gürültü oranının) yükselmesiyle örneğin kablosuz ve mikron boyutlarında Mikroelektro-mekanik sistem (MEMS) üç eksenli ivmeölçerler kaliteli sinyal verisiyle 50 ABD doları seviyelerinde bir maliyet ile yapı elemanı üzerinde ve birleşim noktalarında pasif gömülü izleme ağılarıyla kullanımı günümüzde mümkündür [28]. Çok yakın gelecekte düşük bakım ve uzayan servis ömürleriyle bu izleme ağıları aktif izleme ağıları olarak yapı sağlığı içinde kullanımları devam edecektir. Beraber kullanılan diğer farklı hasarsız izleme yöntemleriyle yapı sağlığında hasar teşhis tutarlılığı yükselmiştir. Laboratuvar şartlarında ölçekli yapı modelleriyle yapılan çalışmalar, yükselen sensör hassaslıkları, yonga içi işlem yazılımları ve düşen maliyetler sonuç bilgi erişirme hızının çok yüksek olmasıyla yapı sağlığı kararlarının çok hızlı uygulanabileceği aktif yapı sağlığı izleme sistemlerinin mümkün olacağını göstermektedir [29]. Sensör üreticilerinin pazar yelpazelerine katılacak olan yeni kullanım sektörlerinin talepleri doğrultusunda arz-talep yapısı mevcut maliyetleri çok daha aşağıya çekecektir.

Çok katlı yapıların hızla çoğaldığı şehirlerimizde yapısal deprem güvenliğinin izlenmesi tasarım-imalat tutarlılığının yapı projelerinde son haliyle revize edilecek dinamik parametrelerin değerlendirilmesinden deprem riskinin ilgili yapı için sigortalanmasına kadar uygulama alanları oluşacak bir canlı yapı sağlığı izleme ve değerlendirme mümkündür. Bu çalışmada önerilen yöntemin eleman bazında gerçekçi sonuçlar elde edilecek düzeyde kullanılabilmesi için gerekli olan sensör sayısının günümüzün klasik uygulamalarının ötesinde olduğunu ve önerilen yöntem kullanılarak eleman bazlı gerçekçi hasar tahminlerinin yapılmasının şu an için pratik ve ekonomik açıdan uygulanabilirliğinin zor olduğunu belirtebiliriz. Ancak yaygın kullanıma geçildiğinde sensör maliyetlerinin azalması ve hesap yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte Tanırcan ve diğ.'nin [29] yaptığı çalışmada gösterildiği gibi maliyetler 1/50'lere düşmekte ve uçak ve uzay mühendisliğindeki gibi inşaat mühendisliği yapılarının detaylı ve hassas olarak takip edilmesi mümkün olmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Deng, X. and Wang, Q., Crack Detection Using Spatial Measurements and Wavelet. *Int. J. Fracture*, 9, 123-128, 1998.
- [2] Worden, K. and Dulieu-Barton, J.M., An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. *Structural Health Monitoring*, 3(1), 85–98, 2004.
- [3] Patsias, S. and Staszewski, W.J., Damage Detection Using Optical Measurements and Wavelets. *Structural Health Monitoring*, 1(1), 5–22, 2002.
- [4] Yan, Y.J. and Yam, L.H., Detection of Delamination in Composite Plates Using Energy Spectrum of Structural Dynamic Responses Decomposed by Wavelet Analysis. *Computers and Structures*, 82, 347–358, 2004.
- [5] Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 2nd edn, Academic Press, London, UK, 1999.
- [6] Liew, K.M. and Wang, Q., Application of Wavelet Theory For Crack Identification in Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(2), 152–157, 1998.
- [7] Park, G., Muntges, D.E. and Inman, D.J., Self-Monitoring and Self-Healing Jointed Structures. In: *Damage Assessment Of Structures. Proceedings of the 4th International Conference on Damage Assessment of Structures*, Cardiff, Wales, UK, June, Key Engineering Materials, Vols. 204–205, pp. 204–205, 2001.
- [8] Douka, E., Loutridis, S. and Trochidis, A., Crack Identification in Beams Using Wavelet Analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 40(13–14), 3557–3569, 2003.
- [9] Gentile, A. and Messina, A., On The Continuous Wavelet Transforms Applied to Discrete Vibrational Data for Detecting Open Cracks in Damaged Beams. *Int. Journal of Solids and Structures*, 40(2), 295–315, 2003.
- [10] Xu B., Wu Z., Yokoyama K., Harada T. and Chen G., A Soft Post-Earthquake Damage Identification Methodology Using Vibration Time Series. *Smart Materials and Structures*, 2005.
- [11] Chang, C.C. and Chen, L.W., Damage Detection of a Rectangular Plate by Spatial Wavelet Based Approach. *Applied Acoustics*, 65, 819–832, 2004.
- [12] Chang, C.C. and Chen, L.W., Detection of the Location and Size of Cracks in The Multiple Cracked Beam by Spatial Wavelet Based Approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19, 139–155, 2005.
- [13] Kim, B.H., Park, T. and Voyiadjis, G.Z., Damage Estimation on Beam-Like Structures Using the Multi-Resolution Analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 4238–4257, 2006.
- [14] Poudel, U.P., Fu, G.K. and Ye, H., Wavelet Transformation of Mode Shape Difference Function for Structural Damage Location Identification. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36, 1089–1107, 2007.

- [15] Ekici, S., Selcuk Y., & Poyraz. M., Energy and Entropybased Feature Extraction for Locating Fault on Transmission Lines by Using Neural Network and Wavelet Packet Decomposition. *Expert Systems with Applications* 34.4, 2937-2944, 2008.
- [16] Zhong, S. and Oyadiji, S.O., Detection of Cracks in Simply-Supported Beams by Continuous Wavelet Transform of Reconstructed Modal Data. *Comput. Struct.*, 89(1-2), 127-148, 2011.
- [17] Beyen K., Dalgacık Spektrumlarının Yapı Sağlığı Durum Değerlendirme Çalışmalarında Önemi, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir, Türkiye, 14-16 Ekim 2015.
- [18] Beata Zima, Magdalena Rucka, Application of Wavelet Transform in Analysis of Guided Wave Propagation Signals For Damage Detection in A Steel Plate. *Diagnostyka*, Vol. 16, No. 2, 2015.
- [19] H. Wang, and M. Noori and J. Zhang, A Wavelet-Energy Based Damage Identification Method for Steel Bridges. Conference Paper, June 2016.
- [20] Mosbeh R. Kaloop and Jong Wan Hu, Damage Identification and Performance Assessment of Regular and Irregular Buildings Using Wavelet Transform Energy. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Materials Science and Engineering* Volume 2016, Article ID 6027812, 11 pages, 2016.
- [21] T. Kijewski-Correa and A. Kareem. 2007. Nonlinear Signal Analysis: Time-Frequency Perspectives, *Journal of Engineering Mechanics*, 238-245.
- [22] T. Kijewski-Correa and A. Kareem. 2007. Performance of Wavelet Transform and Empirical Mode Decomposition in Extracting Signals Embedded in Noise, *Journal of Engineering Mechanics*, 849-852.
- [23] Farrar, C.R., James, G.H., System Identification from Ambient Vibration Measurements on a Bridge. *Journal of Sound and Vibration* 205 (1), 1–18, 1997.
- [24] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 6 Mayıs 2007.
- [25] Beyen K., Titreşim Verisiyle Güncellenmiş Sonlu Eleman Modeliyle Hasar Simülasyonu, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32:2 (2017) 403-415.
- [26] Kusunoki K., Elgamal A., Teshigawara M., Conte J. P., Evaluation of Structural Condition Using Wavelet Transforms, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [27] Yan S., Ma H., Li P., Song G., Wu J., Development and Application of a Structural Health Monitoring System Based on Wireless Smart Aggregates, *Sensors*, 17,1641,2017; doi:10.3390/s17071641.
- [28] Jerome P. L., Aaron P., Kincho, H., Thomas, W. K., Kiremidjian, A. S., Ed, C., ‘Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring’, DOI: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2003)16:3(1), *Journal of Aerospace Engineering - ASCE* / July 2003.

- [29] Tanırcan G., Alçık H., Beyen K., Reliability of MEMS Accelerometers for Instrumental Intensity Mapping of Earthquakes, *Annals of Geophysics*, 60, Supplement to 6, SE673,2017, doi:10.4401/ag-7501.

Çelik Çekirdekli Burkulması Önlenmiş Çaprazların (BÖÇ) Tasarımı, Üretimi ve Deneysel İncelenmesi

Çiğdem AVCI KARATAŞ¹

Oğuz Cem ÇELİK²

ÖZ

Bir tür metalik sönümleyiciler olarak kabul edilen Burkulması önlenmiş Çaprazlar (BÖÇ) önemli depremlerde çekme ve basınçta akarak dengeli bir histeretik davranış gösterirler. Bu çalışmada farklı çelik uç detayı malzemesine sahip BÖÇ'lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışına ilişkin deneysel bulgu ve değerlendirmeleri verilmektedir. Denenen BÖÇ'ler için kuvvet-yerdeğiştirme histeretik eğrileri, histeretik enerji yutma miktarları ve etkili sönüm oranları hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Özgün detaylar ile üretilen ve denenen BÖÇ'lerin yeterli bir performans gösterdiği ve bu performansının ileride yapılabilecek çalışmalarla iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik, burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ), histeretik enerji, etkili sönüm oranı.

ABSTRACT

Design, Fabrication, and Experimental Investigation of Steel Core Buckling Restrained Braces (BRBS)

Buckling restrained braces (BRBs), being a sort of metallic damper, display a balanced hysteretic behavior by yielding under tension and compression forces during major earthquakes. The study presents experimental findings and evaluations from hysteretic behaviors of BRBs having different steel core material and end connection details under reversed cyclic displacements. For the tested BRBs, force-displacement hysteretic curves, dissipated hysteretic energies, and effective damping ratios obtained from hysteretic curves are calculated and compared. Experimental results reveal that the BRBs developed here with unique details display sufficient performance and this performance could be improved by similar forthcoming studies.

Keywords: Steel, buckling restrained brace (BRB), hysteretic energy, effective damping ratio.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 20 Nisan 2017 günü ulaşılmıştır. 16 Mart 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.309415

1 Yalova Üniversitesi, Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Yalova - cigdem.karatas@hotmail.com

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul - celikoguz@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ) dengeli ve dolu histeretik özellikleri nedeniyle mevcut çelik ve betonarme iskeletli binaların rijitlik, dayanım ve sünekliklerinin artırılması için güçlendirme amacıyla, yeni binalarda etkin enerji yutma elemanı olarak kullanılabilmektedir. Köprülerdeki kullanımı ise özellikle sünek enerji yutma elemanları olarak (örneğin uç diyaframlarda) çoğunlukla Japonya ve ABD’de yaygınlaşmaktadır. BÖÇ’lerin çekme ve basınçta yaklaşık simetrik davranış göstermesi, rijitlik ve dayanım kaybı göstermeden aynı zamanda stabil histeretik eğrilerin elde edilmesi kullanım alanını genişletmiştir. Tipik bir BÖÇ genellikle dört parçadan oluşmaktadır: Burkulması önlenen ve eksenel kuvveti taşıyan çelik çubuk “çekirdek eleman”, çekirdek elemanın burkulmasını önleyen ve eksenel doğrultusunda çok küçük ya da sıfır yük alan dış eleman ise “dış tüp” olarak isimlendirilmektedir. BÖÇ’ün diğer bileşenleri ise dış tüple birlikte burkulmayı önleyen sistemi oluşturan “dolgu malzemesi (yüksek/normal dayanımlı tamir harcı)” ve çekirdek eleman ile dolgu malzemesi arasında görev yapan “sürtünmesiz yüzey malzemesi” dir. BÖÇ davranışını belirleyen, çekirdek elemanın geometrik yapısıdır. Çekirdek eleman üç bölgeye ayrılmıştır: Elastik olmayan şekildeğiştirmelerin oluşmasının istenildiği “akma bölgesi”, akma bölgesine göre daha geniş enkesiti olan ve çekirdek elemanın tutulu uzunluğu dışında yerel burkulma yapmasına engel olan “güçlendirme bölgesi” ve ana çerçeveye bağlantının yapıldığı, dolgu malzemeli dış tüpün dışında kalan “birleşim bölgesi” dir. BÖÇ'lere ilişkin öncü deneysel çalışmalar Japonya’da Wakabayashi ve diğ. [1] tarafından yapılmış olup çelik düz plakadan üretilmiş çaprazı bir çift prekast betonarme panel arasına yerleştirip ve aralarında sürtünmesiz yüzey tabakası bırakarak “Sandviç Model” adı verilen bir sistem geliştirmişlerdir. Çelik çaprazın dolgulu çelik dış tüple zırhlandığı ilk deneysel çalışmalar ise Kimura ve diğ. [2] tarafından yapılmıştır. Watabane ve diğ. [3], çaprazın tümsel burkulma davranışı üzerine yaptıkları çalışmalarda dış tüpün Euler burkulma yükü P_e , çekirdek elemanın eksenel akma yükü P_y olmak üzere P_e/P_y oranları elde edilmiştir ($0.55 \leq P_e/P_y \leq 3.53$). Sonuçta, başlangıçtaki geometrik kusurların büyüklüğünün tümsel burkulmaların oluşmasına etkisi olduğu ve bu yüzden uygulamada P_e/P_y oranının en az 1.5 alınması gerektiği önerilmiştir. Ghedi ve diğ. [4], çelik çekirdek elemanı ile dış tüp arasında bulunan dolgu malzemesinin BÖÇ’ün davranışı üzerine etkisini anlamak için yapmış oldukları BÖÇ’lü eksenel yükleme deneylerinde dolgu malzemesi olarak normal beton, hafif beton ve sıkıştırılmış agrega kullanmışlardır. Sonuçta, 28 günlük basınç dayanımı $25\sim 30\text{MPa}$ olan normal betonun dikkörtgen kesitli çekirdek plakanın yerel ve tümsel burkulmalarını önlemek için yeterli ve güvenilir olduğunu görmüşlerdir. Berman ve Bruneau [5], bayrak plakası performansının BÖÇ’lü çerçeve sistemlerinin performansına ve sistemin davranışına etkisini incelemişlerdir. BAYRAK plakasıyla kolon-kiriş bağlantısı olan bir çerçeve, olmayan çerçeveye göre daha rijittir. Sistemin rijitliği arttıkça titreşim periyodu kısılırken yatay deprem kuvveti istemi/talebi artmaktadır. Rijit bayrak plakaları BÖÇ'lere eğilme momenti aktarabildiğinden toplam inelastik eksenel şekildeğiştirme kapasitesini azaltabilmektedir. Bazı davranışsal (örneğin birleşim kaynaklarının yorulması gibi) olumsuzluklardan kaçınmak için bayrak plakası tasarlarken plakanın kolon yerine yalnızca kirişe bağlanması da önerilmiştir. Çelik ve diğ. [6] çaprazlı çelik çerçevelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altında performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çoğunlukla tıknaz çaprazların performanslarının narin olanlara göre daha iyi olduğu düşünüldüğünden, çaprazların narinliklerinin soğukta şekil verilmiş çelik dikmelerden oluşan mimari elemanlarla azaltılması yoluna gidilmiş, böylece bir tür BÖÇ elde edilmiştir. Çalışmada

çaprazların burkulması yeterince önlenmiş ve daha dolu histeretik eğrilere ulaşılmıştır. Çelik ve Bruneau [7] iki doğrultuda düzenlenen BÖÇ'lerin sünek enerji yutma elemanları olarak verev köprülerin uç diyaframlarında kullanılmasını ilk kez önermiştir. Son yıllarda çelik BÖÇ'lere ilişkin yapılan deneysel çalışmalar stabilite (örneğin burkulma, uç birleşim) sorunlarının iyileştirilmesi ve mevcut betonarme yapıların (bina, köprü) BÖÇ'lerle güçlendirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Zhao ve diğ. [8] çelik dört köşebentten oluşturulmuş haçvari çekirdek elemanlı 8 adet BÖÇ'ün yerel stabilitesini deneysel ve kuramsal yöntemlerle araştırmışlardır. Yerel burkulma ve histeretik davranıştaki dayanım kayıplarının özellikle köşebent enkesit oranının (b/t) yaklaşık 8.5 olduğu BÖÇ'lerde gerçekleştiği, enkesit oranı azaltılarak çekirdeğin yerel burkulmasının azaltılacağı ve böylelikle stabil histeretik performansın arttırılacağı sonucu elde edilmiştir. BÖÇ'lerde tümsel burkulma olasılığına uç birleşimlerin ve düzlem dışı yerdeğiştirmelerin etkisi Takeuchi ve diğ. [9] tarafından araştırılmıştır. Gerçeğe yakın ölçeklerde kaynaklı ve bulonlu uç birleşimli BÖÇ'lerin histeretik yön değiştiren yükler altında deneyleri Fujishita ve diğ. [10] gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. 1950-1970 yılları arasında Kuzeybatı Pasifik'te üretilen betonarme köprü ayaklarının BÖÇ kullanılarak güçlendirilmesi durumuna yönelik deneysel çalışmalara ilişkin bulgular Bazaez ve Dusicka [11] tarafından sunulmuştur. BÖÇ'lerle güçlendirme yapılması durumunda betonarme köprülerin yerdeğiştirme sünekliğinin 8'e kadar çıkabildiği, kolon ve kirişlerde çatlama ve plastik mafsall oluşumun kontrollü olduğu, böylelikle deprem davranışlarının iyileştiği gözlenmiştir. Chou ve diğ. [12] çift çekirdekli ve merkezlenme davranışı gösteren (self-centering) 7860mm uzunluğunda ASTM A572Gr. 50 çelik malzemeli çekirdek elemanı olan BÖÇ'ün tasarım, üretimi ve histeretik davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Önerilen BÖÇ'ün enerji yutma miktarı, kendini merkezlenme özellikleri, yerdeğiştirme kapasiteleri özetlenmiştir. Türkiye'de BÖÇ konusunda yapılan deneysel çalışmalara verebileceğimiz örnekler şu şekildedir: Eryasar ve Topkaya [13] yapma/hadde çelik profillerin kaynaklı/bulonlu birleşimlerinden oluşturdukları burkulmayı önleyen ortamlı 12 adet BÖÇ numunesi ile deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen BÖÇ'lerin düzgün histeretik davranış sağladığını ve burkulmayı önleyen ortamların, çimento harcı doldurulmuş kutu profillerle oluşturulanlara alternatif olabileceğini göstermişlerdir. Bozkurt ve Topkaya [14] ilk aşamada sabit enkesitli çekirdekli BÖÇ'lerin aksel ve diyagonal çaprazlama durumlarındaki davranış farklarını inceleyerek, bu çaprazların çekme ve basınç dayanımlarının kabul edilebilir sınırların üzerinde kaldığını görmüşlerdir. İkinci aşamada bu olumsuzluğu iyileştirmek için tasarlayarak ürettikleri kaynaklı bindirme çekirdekli BÖÇ'ün diyagonal çapraz deneylerini yapmışlardır. Yeni geliştirilen çekirdekli BÖÇ'ün toplam inelastik şekildeğiştirme değerinin akma şekildeğiştirme değerinin 419 katı olduğu ve ilk aşamadaki BÖÇ deneylerinde elde edilen histeretik eğrilerde %2 olan maksimum aksel şekildeğiştirme değerinin yeni tasarlanan BÖÇ için %2.5'e yükseldiği görülmüştür. Özcelik ve diğ. [15] ürettiklerin farklı enkesitli 10 adet BÖÇ'ün aksel yüklemeye deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin bir bölümünde çimento harcı doldurulmuş çelik kutu enkesitli profiller kullanılırken, diğer bölümünde de sargısız beton ya da betonun FRP (lifli polimer) ile sarılmasıyla burkulmayı önleyici bir ortam oluşturulmuştur. Numunelerde uç dönmelerini önlemek ve uç stabilitesini arttırmak için ek çelik plaka ve profiller kullanılmıştır. Çevrimsel yüklemeler altında yaklaşık %2 birim şekildeğiştirme oranına kadar numunelerden kararlı histeretik davranış elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmada [13, 14, 15]'den farklı olarak uzunluk, enkesit, uç bağlantısı, burkulması önlenen ortam, sürtünmesiz yüzey teknikleri bakımından farklılıkları olan çelik BÖÇ'lerin çevrimsel yüklemeler altında

diyagonal bir düzenekte deneyleri yapılmıştır. Üretilen BÖÇ'lerin en önemli özelliği daha az bileşenli olması ve .fabrikasyona elverişliliğidir. Bu çalışmada farklı çelik malzemesine sahip BÖÇ'lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışına ilişkin deneysel bulgu ve değerlendirmeler verilmektedir. Bu amaçla tasarlanan ve üretilen toplam 5 adet çelik çekirdekli ve çelik dış tüplü BÖÇ'ten ilk 3'ü "ön çalışmalar" olarak ele alınmıştır (BRB-SC1, BRB-SC2, BRB-SC3). Ön çalışmalardan elde edilen bilgi ve deneyimler ışığında tasarımı geliştirilen, üretimi yapılan ve İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL) yön değiştiren tekrarlı yükler altında denenen diğer 2 BÖÇ'ten (BRB-SC4 ve BRB-SC5) elde edilen deneysel bulgular çalışmanın ana bölümünü oluşturmaktadır. BRB-SC1, BRB-SC3 ve BRB-SC4 numuneleri S235JR normal akma dayanımlı, BRB-SC2 ve BRB-SC5 numuneleri S355JR yüksek akma dayanımlı çelik malzemesinden çekirdeği olan BÖÇ'lerdir; böylece farklı çelik malzemelerinin de davranışa olan etkisi incelenmiş olacaktır. BÖÇ'leri oluşturan çelik malzemelerinin mekanik çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Çelik çekirdekli BÖÇ'ün tasarımı, üretimi, deney düzeneği ve numunelerin deneylerinde kullanılan ölçüm aletleri çalışma kapsamında verilmiştir. Denenen BÖÇ'lerin deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılarak, elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik davranış eğrileri, histeretik enerji grafikleri verilmiştir. BÖÇ'lerin etkili sönüm oranları da hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME DENEYLERİ

2.1. Çekme Deneyi Hazırlıkları

Tasarımı yapılan BÖÇ'lerin üretiminde kullanılan çelik malzemelerin (S235JR ve S355JR) mekanik özelliklerini tam olarak belirleyebilmek için çok sayıda çekme numunesi öngörülen standartlara göre ve çekirdek enkesit ölçülerine yakın boyutlarda hazırlanarak çekme deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ASTM A370-08a [16] standartlarına göre her plakadan olmak üzere toplam 9 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme deneyleri İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekildeğiştirmelerin ölçülmesinde akma sonrası şekildeğiştirmeleri ölçen çelik yüzeye uyumlu YFLA-10-3L tipindeki şekildeğiştirme ölçerler (strain-gauge) kullanılmıştır. Çekme numuneleri fabrikada Sa-2½ İsveç yöntemi ile kum püskürtülerek temizlenmiştir. Ancak bu temizleme yeterli bulunmayarak önce P320 kalın zımpara, sonra P120 ince zımpara yapılarak çelik yüzeyler parlak bir renk kazanıncaya kadar devam edilmiştir. Metal yüzeye yapıştırmak için tek bileşenli yapıştırıcılar kullanılmıştır. BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekildeğiştirme ölçümlerinin yapılması için özel olarak metal yüzeyine açılan kanallara strain-gauge yerleştirilmiştir. Bu uygulama, bilindiği ve ulaşıldığı kadarıyla, BÖÇ teknolojisi için yeni bir ölçüm uygulaması olmuştur. Yapılan bu uygulamanın başarısını ölçmek için önceden hazırlanan her çekirdek çekme numunesine kullanılan strain-gauge ölçülerine uygun şekilde $\phi 2mm$ 'lik parmak freze kullanılarak kanallar açılmıştır. Açılan kanallar içine önce bir tabaka yapıştırıcı ile strain-gauge'lerin yerleri sabitlenmiştir. Açılan kanal boşlukları epoksi esaslı, çift bileşenli metal dolgu malzemesi ile doldurularak kapatılmış, dolgu malzemesinin kuruması için 1 gün beklenilmiştir. BÖÇ'lere yerleştirilecek olan strain-gauge'ler bu işlemlerden sonra üzerleri ayrıca TML-SB bantla kapatılmıştır. Böylece, yük hücresinin monotonik hareketi sırasında dolgu malzemesinden etkilenmesinin önlenmesi amaçlanmaktadır. BÖÇ'ün çekirdek gerilme-şekildeğiştirme davranışını tam olarak anlayabilmek için uygulanan kanala strain-gauge yerleştirme işleminin başarılı olduğu

görülmüştür. Üretilen çaprazlara strain-gauge'ler sürtünmesiz yüzey malzemesinden önce yerleştirilmiştir.

2.2. Sürtünmesiz Yüzey ve Dolgu Malzemesi

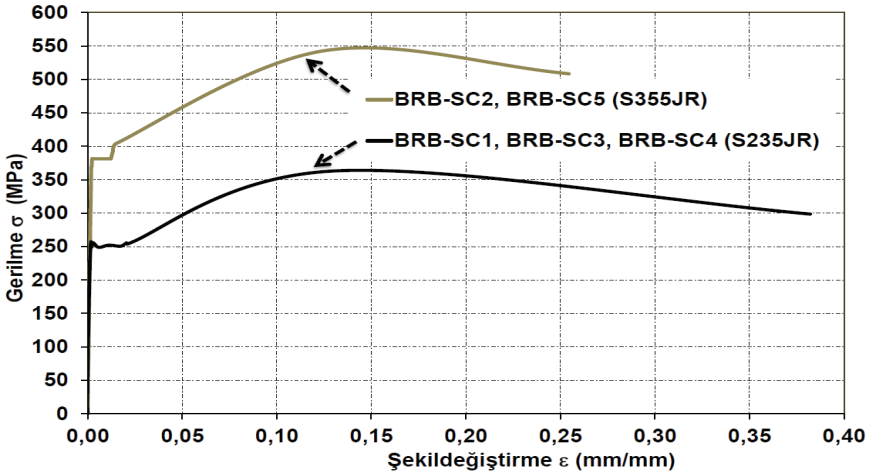
Çekirdek eleman akarak eksenel şekildeğiştirdiğinde yanıl yerdeğiştirmesi dış tüp+dolgu malzemesi tarafından tutulurken, iki eleman arasındaki sürtünmesiz yüzey de eksenel kuvvetin dış tüpe aktarılmasını engellemektedir. Çalışmada tasarlanarak üretilen BÖÇ'lerin sürtünmesiz yüzey malzemesi için düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahip bir malzeme olan ve kendiliğinden metal yüzeyine yapışan politetrafloroetilen (PTFE) bantlar ve kauçuklu gres yağ kullanılmıştır. PTFE'nin statik ve dinamik sürtünme katsayısı 0.04, çekme dayanımı 21~35MPa, eğilme modülü 500MPa, aşınma direnci 85g/μm'dir. Dolgu malzemesi olarak çimento esaslı, yüksek dayanımlı, normal priz alan, rötresiz, büzüşmeyen, dökülebilir akıcı kıvamda yüksek dayanımlı tamir harcı (grout) (Köster-VGM5) kullanılmıştır. Yoğunluğu 2.26g/cm³ olan dolgu malzemesi tek bileşenlidir ve yalnızca su ile karıştırılarak üretilmektedir. Ön hazırlık aşamasında dolgu malzemesinden 150mmx150mm küp kalıplara 6 adet numune alınmıştır. Alınan örneklerden 3'ü 7. günde, diğer 3'ü 28. günde kırılmıştır. 7 günlük basınç dayanımı ortalama (f_c)₇ = 52MPa, 28 günlük basınç dayanımı ortalama (f_c)₂₈ = 64MPa olarak bulunmuştur. Elastisite modülü $E_c = 37GPa$, 28 günlük eğilmede çekme dayanımı $f_{ctk} = 8MPa$, Poisson oranı ise $\nu = 0.35$ 'dir.

2.3. Malzeme Deneyleri Sonuçları

Kanallı çekme deneyi parçalarında akmanın başladığı noktaya kadar okumalar alınmış sonrasında şekildeğiştirme ölçerler hasar görmüştür. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlar BÖÇ'ün tasarımında ve üretiminde kullanılan malzemenin seçimine yönelik önemli bilgiler içermektedir. S235JR (BRB-SC1, BRB-SC3 ve BRB-SC4) ve S355JR (BRB-SC2 ve BRB-SC5) malzemelerinin mekanik özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir. Burada; ϵ_y , ϵ_u , F_{yc} , F_u , E sırasıyla akma şekildeğiştirmesi, maksimum uzama, akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve elastisite modülünü göstermektedir. Çelik dış tüpler için S355JR çelik malzemesinden 140x140x5 kare tüp kesitli ve akma dayanımı 345MPa olan dış tüpler kullanılmıştır. Karşılaştırmalı gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 1'de verilmektedir.

Çizelge 1 - Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Numuneler	Malzeme Özelliği	ϵ_y (%)	ϵ_u (%)	F_{yc} (MPa)	F_u (MPa)	E (GPa)
BRB-SC1 BRB-SC3 BRB-SC4	S235JR	0.15	38.21	257	363	195
BRB-SC2 BRB-SC5	S355JR	0.19	25.45	373	543	204



Şekil 1 - Çelik Malzemelerin Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrileri

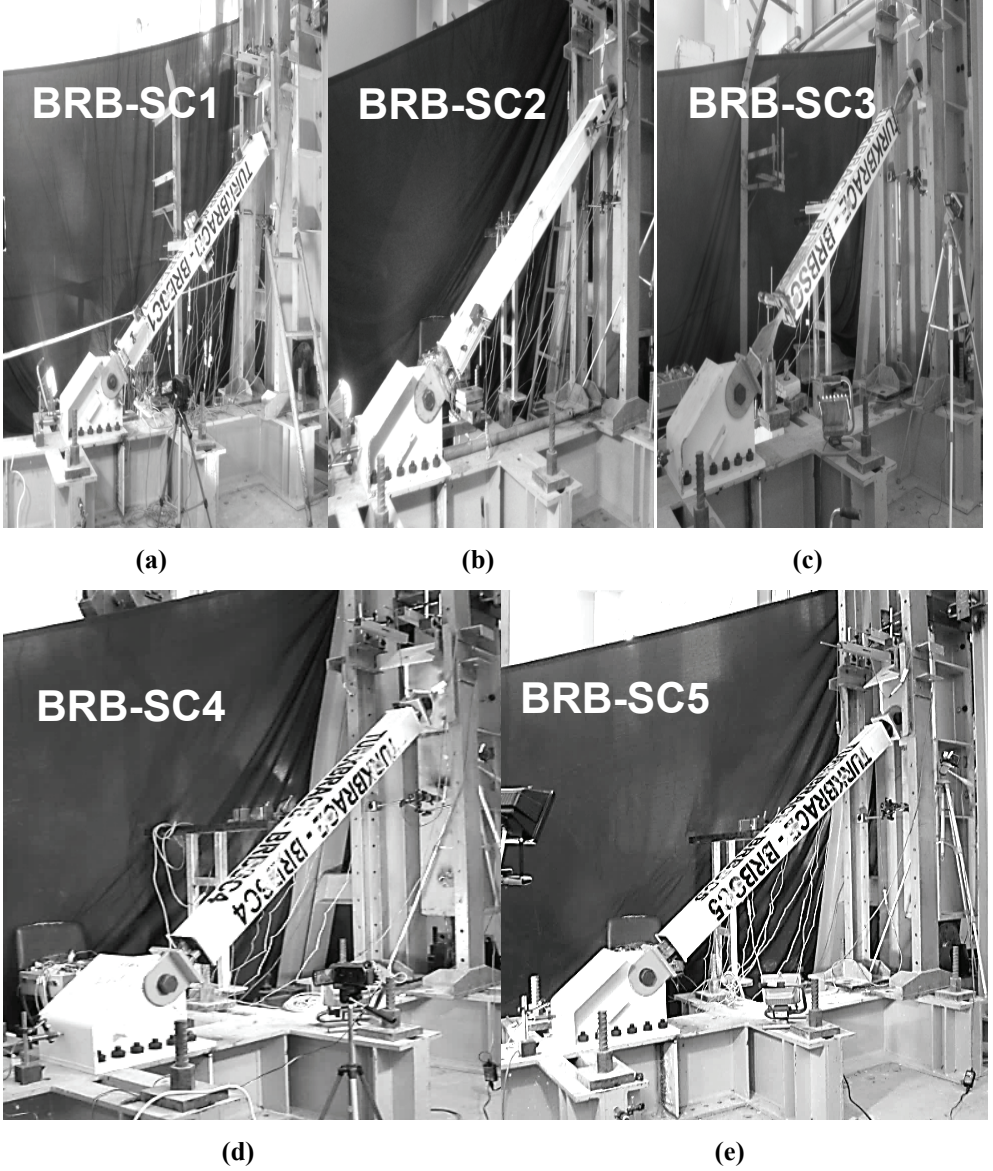
Bu eğrilerden en yüksek dayanımın S355JR'ye, en sünek davranışın S235JR'ye ilişkin olduğu anlaşılmaktadır. BÖÇ çekirdeklerinde kullanılan çelik levhalardan kupon (malzeme) deneyleri için örnekler alınmış ve Şekil 1'deki eğriler elde edilmiştir. Özetle, Şekil 1'de verilen eğriler üretilen BÖÇ'lerin çekirdeklerinde kullanılan çelik levhaların kalınlıkları içindir. Kanallı deney parçalarında kesitin diğer yüzüne yapıştırılan strain-gauge okumaları ile de karşılaştırmalı olarak grafikler elde edilmiştir. Deney parçalarında akmanın başladığı noktaya kadar okumalar alınmış, sonrasında şekildeğiştirme ölçerler hasar görmüştür. Ancak, bu uygulamanın BÖÇ'ün gerçek davranışını anlamada amaca yeterli derecede uygunluğu yapılan deneysel çalışmalarda kanıtlanmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, çelik BÖÇ'lerin üretimi için kullanılacak malzemelerin istenilen amaca ulaşmak için yeterli olduğu anlaşılmış, bu doğrultuda büyük numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

3. BÖÇ TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENEYLER

3.1. Numunelerin Tasarımı ve Üretimi

Numunelerden BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-SC3 ön çalışmalar kapsamında, BRB-SC4 ve BRB-SC5 ise esas/ana çalışmalar kapsamında tasarlanan, üretilen ve denenilen numunelerdir. Şekil 2'de tasarlanarak denenilen numunelerin deney düzeneğindeki genel görünüşleri görülmektedir. Numuneler hidrolik actuatorün/verenin kapasitesini aşmayacak şekilde tasarlanmıştır. Numunelerin boyutlandırılmasında AISC 341-10 [17] ve AISC-LRFD [18] yönetmelikleri esas alınmıştır. Uygulamada sıkça kullanılan dikdörtgen çekirdekli ve içi harçla dolgululu kare dış tüp şeklindeki BÖÇ'lerin tercih edilmesi parametre sayısını azaltmaktadır. Ayrıca akma bölgesi uzunluğunu maksimum yapan ve daha az yatay yük ile daha çok eksenel kuvvet oluşmasına neden olan diyagonal deney sistemi kullanılmıştır. Numuneler P_{yc} eksenel akma dayanımları ve L ($2275mm$) çapraz toplam uzunlukları aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Böyle bir seçim numunelerin enerji yutma kapasitelerini

karşılaştırırken kolaylık sağlamıştır. Çapraz sistem uzunluğu 3339mm'dir. Tüm numunelerin çekirdek akma bölgesi dikdörtgen enkesitlidir. Çekirdeğin tutulu olmayan uzunluğunda yerel burkulmaların oluşmaması için güçlendirme bölgesi haçvari enkesitli olarak tasarlanmıştır. L_1 BÖÇ'lerin mafsal noktaları arasındaki uzunluğu olup tasarlanan BÖÇ'ler de 2110mm'dir. Çalışmada, maksimum akma bölgesi uzunluğu $L_{yc} \leq 1410mm$ olarak alınmıştır ($0.67L_1$).

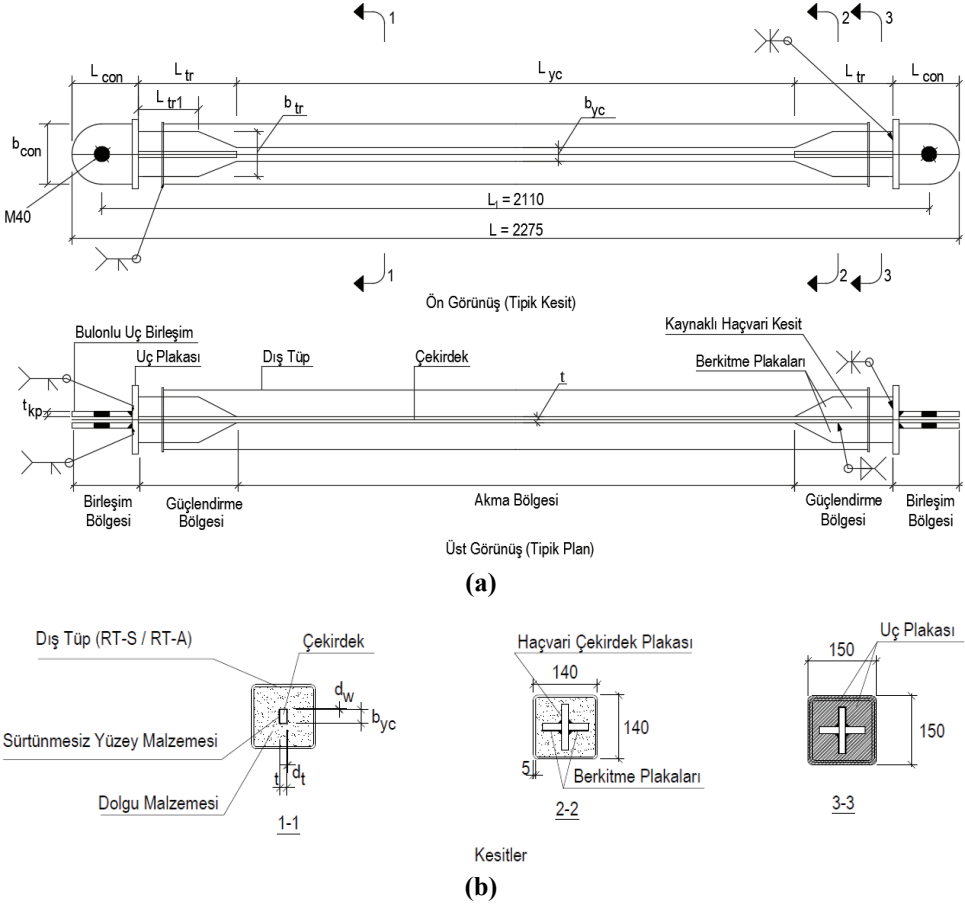


Şekil 2 - Numunelere İlişkin Genel Görünümler:
(a): BRB-SC1, (b): BRB-SC2, (c): BRB-SC3, (d): BRB-SC4, (e): BRB-SC5

BÖÇ'ün burkulma dayanımı malzeme özelliklerinden sonra tahmin edilen etkin burkulma boyu katsayısı K 'ya bağlıdır. Çaprazların burkulma dayanımlarının hesaplanmasında, düzlem dışı ve düzlem içi etkin burkulma boyu katsayıları, uç mesnet koşullarının mafsallı-mafsallı varsayımı ile $K = 1$ olarak alınmıştır. KL etkin burkulma boyu için L_1 dikkate alınmıştır. Burkulmayı önleyen ortam (dolgu malzemesi+dış tüp) geometrik olarak her iki eksen etrafında eşit atalet momenti sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ön çalışmalarda kullanılan numunelerde öncelikli olarak farklı uç detayları incelenmiştir. İç ve dış boşluk oluşturulması ve sürtünmesiz yüzey işlevinin artırılmasına yönelik farklı detaylar ve malzemeler kullanılmıştır. Çekirdek güçlendirme bölgesinin oluşturulmasında, berkitme plakalarının çekirdek üzerinde doğru yere kaynaklanarak kümülatif enerji sönümleme miktarının artırılmasına yönelik incelemelerde bulunulmuştur. Ön çalışmalar kapsamında üretilen 3 adet BÖÇ, sonrasında tasarlanan ve çalışmada esas olan 2 yeni BÖÇ'ün üretim kolaylığına, işlevselliğine, enerji sönümleme kapasitelerinin artırılmasına yönelik teknolojik bilgi edinimlerine altyapı oluşturmuştur. Tasarlanan, üretilen ve denenilen 5 numunenin genel özellikleri aşağıda verilmiştir:

- **BRB-SC1:** Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak tek kat PTFE bant kullanılmıştır. Normal akma dayanımlı (S235JR) çelik çekirdekli ve 355JR kalitesinde dış tüplü numunenin akma bölgesi uzunluğu $1410mm$ ($0.62L$)'dir.
- **BRB-SC2:** Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak burkulmayı önleyen ortam boyunca 3 kat PTFE ve üzerine kauçuklu gres yağı uygulanmıştır. Yüksek akma dayanımlı (S355JR) çelik çekirdekli ve S355JR kalitesinde çelik dış tüplü olarak tasarlanan numunenin akma bölgesi uzunluğu $1380mm$ ($0.61L$)'dir.
- **BRB-SC3:** BRB-SC1 numunesi ile aynı malzeme ve kesit özelliklerine sahip numunenin güçlendirilmiş uç kesiti burkulmayı önleyen ortam dışında bırakılarak farklı bir uç tasarımı denenmiştir. Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak 2 kat halinde PTFE uygulanmıştır. Akma bölgesi uzunluğu $1270mm$ ($0.56L$)'dir.
- **BRB-SC4:** Esas çalışma kapsamında olan numunenin sürtünmesiz yüzey malzemesi için 3 kat PTFE ve üzerine kauçuklu gres yağı uygulanmıştır. Kauçuklu gres yağı sürtünmesizliğe olan katkısının yanında suya ve dolayısıyla korozyona dayanıklı olması nedeniyle de tercih edilmiştir. Çekirdek S235JR kalitesinde ve $16mm \times 30mm$ enkesit boyutlarında akma bölgesi olan çelik plakadan hazırlanmıştır; akma bölgesi uzunluğu $1410mm$ ($0.62L$)'dir. Güçlendirme bölgesi berkitme plakalarının uç kaynaklanma noktası geçiş bölgesinden uzakta gerçekleştirilmiş ve kaynaklar köşede dönülmüştür.
- **BRB-SC5:** Esas çalışma kapsamındaki diğer numune için BRB-SC4 numunesi ile aynı özelliklerde sürtünmesiz yüzey oluşturulmuştur. Güçlendirme bölgesinin hazırlanmasında kaynak noktasının doğru seçimi BRB-SC2 numunesinden elde edilen bulgular doğrultusunda iyileştirilmiştir. S355JR yüksek dayanımlı çelikten üretilmiş olup $12mm \times 25mm$ enkesitlidir; akma bölgesi uzunluğu $1380mm$ ($0.61L$)'dir.

Tasarlanan numunelerin genel plan ve kesit görünüşleri Şekil 3'te verilmektedir. Çizelge 2'de incelenen numunelerin çekirdek elemanlarının geometrik bilgileri vardır. Burada akma bölgesi uzunluğu ve genişliği L_{yc} ve b_{yc} , güçlendirme bölgesi uzunluğu ve genişliği L_{tr} ve b_{tr} , birleşim bölgesi uzunluğu ve genişliği L_{con} ve b_{con} ile gösterilmiştir; t numunelerin çekirdek kalınlığıdır.



Şekil 3 - Numunelerin Geometrik Özellikleri, (a): Plan Görünüşleri, (b): Kesit Görünüşleri

Uçta bayrak plakalarına birleşimde 10.9 kalitesinde M40 yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır. Çelik BÖÇ'lerde kullanılan kaynak yöntemi gaz altı kaynağıdır (GMAW). Gaz altı kaynaklar üretimde Amerikan kaynak standartlarından (AWS) çelik için AWS D1.1/D1.1M'de [19] tanımlanan yöntemlerle yapılmıştır. Kaynak teli olarak E70 elektrodu kullanılmıştır. Bayrak plakaları deney düzeneğine bulonlanarak istenildiğinde sökülüp tekrar takılacak şekilde tasarlanmıştır. Yerel burkulma kapasitesini arttırmak için gövdelerine rijitleştirici plakalar kaynaklanmıştır. Ayrıca plakaların düzlem dışı burkulmaları, serbest kenarlarından rijitleştiriciler kullanılarak kısıtlanmıştır. Kenar rijitleştiricilerin genişlikleri giriş başlık genişliği ile eşit uzunluktadır. BÖÇ'lü çelik çerçevelerin, BÖÇ çekirdeğinin akmasına karşı gelen kuvvet düzeylerinde, akmadan kararlı olması için çaprazdan beklenen maksimum kuvvetlere göre tasarlanması gerekmektedir. Bayrak plakaları S355JR yüksek dayanımlı çelik kalitesindedir. Bayrak plakalarından deney çerçevesine kesme kuvvetini aktaracak bulonlar sürtünme tipi olup 12 adet M24x75 (10.9) HSFG yüksek dayanımlı bulon özelliğindedir. Montaj sırasında bulonlara verilen tork değeri $1030Nm$ 'dir.

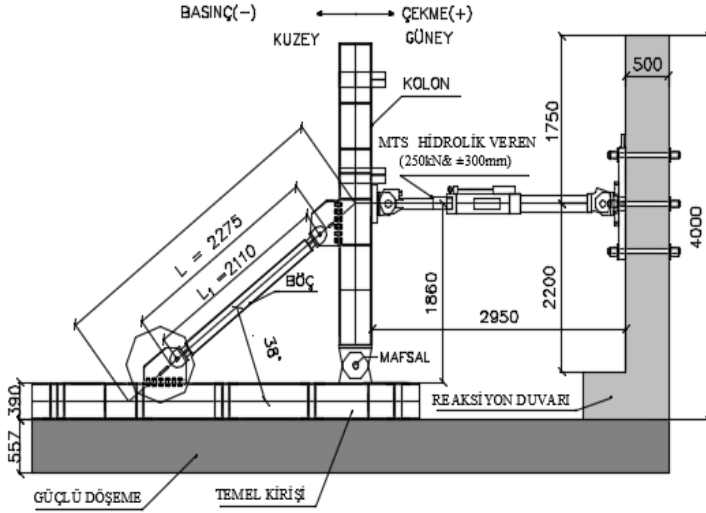
Çizelge 2 - Numunelerin Çekirdeklerinin Geometrik Özellikleri

Özellikler	BRB-SC1	BRB-SC2	BRB-SC3	BRB-SC4	BRB-SC5
L_{yc} (mm)	1410	1380	1270	1410	1380
b_{yc} (mm)	30	25	30	30	25
t (mm)	16	12	16	16	12
L_{con} (mm)	185	184	185	185	184
b_{con} (mm)	165	165	165	165	165
L_{tr} (mm)	249	264	249	249	264
L_{tr1} (mm)	160	172	160	160	172
b_{tr} (mm)	100	98	100	100	98

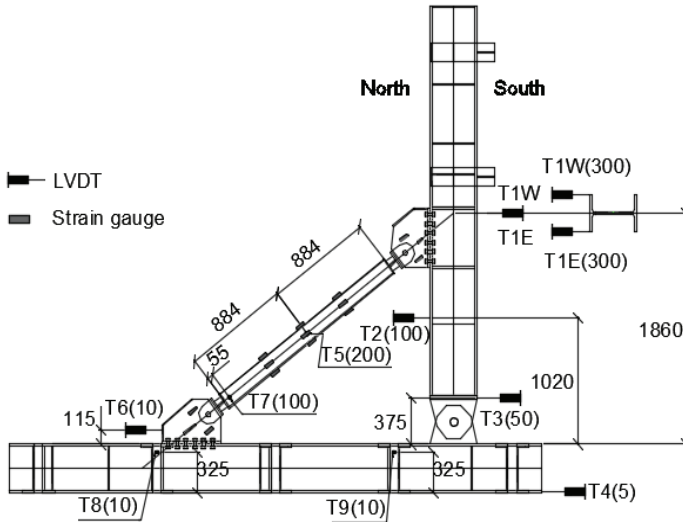
3.2. Deney Düzeneği ve Veri Toplama

Deneyisel çalışma için önceden klasik (burkulan) çaprazların deneylerinde kullanılmak üzere Haydaroğlu ve diğ. [20] tarafından tasarlanan ve BÖÇ deneyleri için yeniden düzenlenen özel bir yüklenme çerçevesi kullanılmıştır. Kullanılan deney düzeneği Şekil 4a'da görülmektedir. S275JR kalitesinde ve HE400A çelik profillerden üretilmiş olan yüklenme çerçevesi çelik temel kirişine mafsallı bağlı kolon ve bu kolonun düzlem dışı hareketini engelleyen çift taraflı çelik payandalardan oluşmaktadır. Payandalar S275JR kalitesindeki HE200A profillerinden üretilmiştir. Kolon dibindeki mafsallı E335 kalitesinde 70mm çaplı pimden oluşmaktadır. 250kN itme-çekme ve $\pm 300mm$ yerdeğiştirme kapasiteli, bilgisayar kontrollü MTS hidrolik veren (actuator) kullanılmıştır. Bütün taşıyıcı bileşenler ve birleşimler güvenlik faktörü en az 2.00 alınarak tasarlanmıştır. Çaprazların deney düzeneğine bağlantısı özel olarak tasarlanan bayrak plakaları ile yapılmış olup birleşimde 10.9 kalitesinde bulonlar kullanılmıştır. Deney düzeneğinin sistemin tümsel davranışına (dayanım ve rijitlik) olarak herhangi bir katkısı olmadığı bu çerçevede yapılan deneylerle kanıtlanmıştır. Bavyrak plakaları deney düzeneği kolon/kiriş başlıklarına M24 (10.9) yüksek dayanımlı bulonlarla birleştirilmiştir. BÖÇ'ün ve yüklenme çerçevesinin davranışını izlemek için uygun bir ölçüm düzeneği tasarlanmıştır. Kolon, kiriş ve bayrak plakalarının elastik kalıp kalmadığı kritik noktalara yerleştirilen strain-gauge ve lineer yerdeğiştirme ölçerler (LVDT) ile kontrol edilmiştir. Numunelere ilişkin ölçüm düzeneği Şekil 4b'de görülmektedir. Her deneyde en fazla 16 adet strain-gauge kullanılmıştır. Strain-gauge'lerden ikisi alt ve üst bayrak plakası doğu ve batı yüzeylerine monte edilerek, bayrak plakalarının yüklemeler sırasında elastik kalıp kalmadığı kontrol edilmiştir. Dış tüpün davranışını izlemek amacıyla ise deneylerde her numunenin dış tüp temiz boyunun 1/4'üne ve bütün yüzeylere olmak üzere 12 adet strain-gauge yapıştirilmiştir. Kanal içerisindeki strain-gauge BRBKN olarak kodlanmıştır. 2 adet 300mm kapasiteli LVDT (T1E ve T1W) yarı stroklu ($\pm 150mm$) olarak hidrolik veren seviyesinde tepe yerdeğiştirmesini ölçmek için kullanılmıştır. Burkulmayı kontrol etmek amacıyla numunenin tam ortasında düzlem dışı yerdeğiştirmeyi ölçmek için yine 300mm kapasiteli LVDT (T5) yarı stroklu ($\pm 150mm$) olarak kullanılmıştır. Diğer taraftan, 10mm kapasiteli LVDT (T6) yarı stroklu olarak bayrak plakasında kullanılmıştır. Ayrıca, deney süresince deney düzeneğinin çalışmasının kontrol etmek için 100mm, 10mm

ve 5mm kapasiteli LVDT'lerden yararlanılmıştır. Deneyler sırasında elde edilen veriler için verileri çoğaltarak veri toplayıcı üzerinden kontrol odasına aktaran kanal çoğaltma kutusu (AWS-50C Switch Box) kullanılmıştır. 10 kanallı veri toplayıcı (TML-TDS 302 Data Logger) ve buna bağlı Visual LOG TDS-7130 programı ile elde edilen elektriksel bilgi grafik ve text dosyası olarak kaydedilmiştir.



(a)

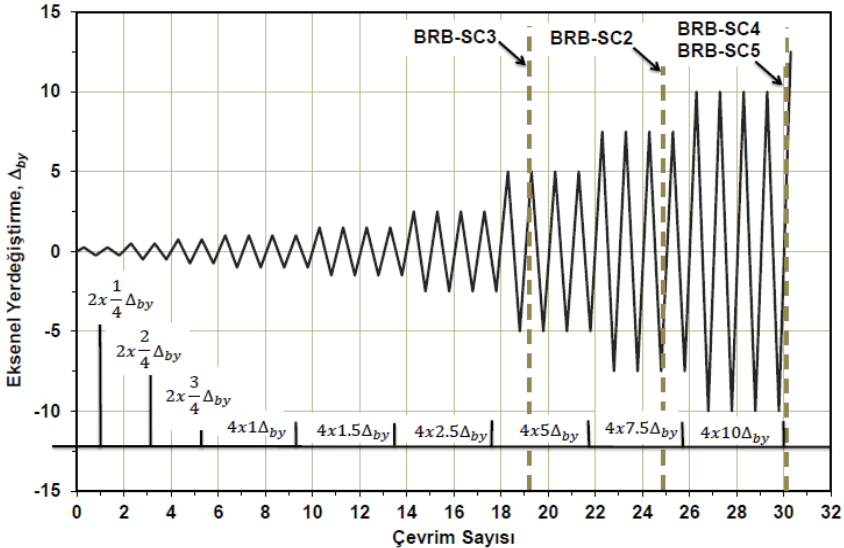


(b)

Şekil 4 - (a): Deney Düzenekinin Genel Görünüşü, (b): Şekildeğiştirme ve Düzlem İçi Yerdeğiştirme Ölçerlerin Yerleşimi

3.3. Yükleme Protokolleri

Deneyler AISC-341-10'da çelik çekirdekli BÖÇ'ler için verilen kriterlere uygun olarak ve yerdeğiştirme kontrollü gerçekleştirilmiştir. Numunelerin eksenlerindeki boy değişimiyle yakından ilişkili olan tepe yatay yerdeğiştirme kontrol parametresi olarak alınmıştır. Kupon deneylerinden elde edilen gerçek malzeme özellikleri kullanılarak SAP2000 [21] programı yardımıyla FEMA-356'da [22] verilen eksenel plastik mafsalsal özelliklerine göre itme (push-over) analizleri yapılarak numunelerin kuramsal kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri elde edilmiştir. Numunelerin öngörülen süneklik kapasiteleri, dayanım, akma ve göçme limitleri belirlenmiştir. AISC 341-10'da, BÖÇ'lü çerçevesel sistemin eksenel olmayan yükleme durumunda çaprazın tasarım kat ötelemesindeki yerdeğiştirme miktarı Δ_{bm} 'nin $5\Delta_{by}$ olarak alınabileceği önerilmektedir. Burada, Δ_{by} çaprazın ilk akma noktasındaki yerdeğiştirme miktarıdır. Ayrıca Δ_{bm} , kat yüksekliğinin %1'inden az olmamalıdır. Akmadan önceki elastik bölgede $2 * \Delta_{by}/4$, $2 * 2\Delta_{by}/4$, $2 * 3\Delta_{by}/4$ genlikli yerdeğiştirme çevrimleri uygulanmıştır. AISC 341-10 ilkelerine göre numunelere uygulanan $4 * 1\Delta_{by}$, $4 * 1.5\Delta_{by}$, $4 * 2.5\Delta_{by}$, $4 * 5\Delta_{by}$, $4 * 7.5\Delta_{by}$, $4 * 10\Delta_{by}$ yerdeğiştirme genlikli standart yükleme protokolü Şekil 5'de verilmekte olup her numunenin göçme yerdeğiştirme seviyesi kesikli düşey çizgilerle belirtilmiştir. AISC 341-10 ilkelerine göre yükleme protokolü sonunda toplam plastik eksenel yerdeğiştirmesinin en az $200\Delta_{by}$ olması gerektiği belirtilmektedir. Bu koşul eksenel yükleme deneylerinde zorunlu olmakla birlikte bu çalışmada olduğu gibi yapılan çerçeve tipine benzer deneylerde zorunlu tutulmamaktadır [14].



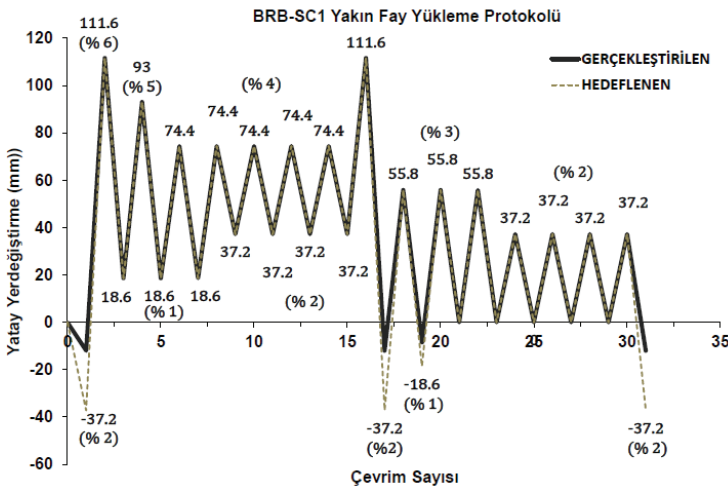
Şekil 5 - BRB-SC2, BRB-SC3, BRB-SC4 ve BRB-SC5 İçin Uygulanan Yükleme Protokolü

Simetrik olmayan yükleme protokollerinin davranış üzerine olan etkisini görmek amacıyla bir yakın fay yüklemesi de dikkate alınmış ve böylece BÖÇ'lerin yakın fay etkileri altında

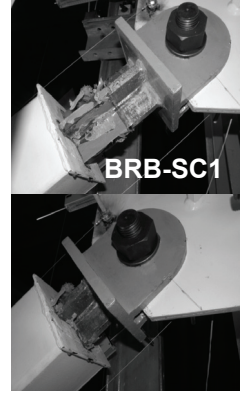
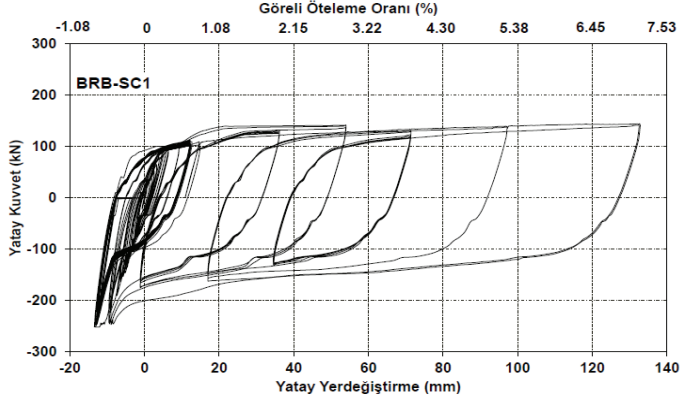
sınırlı olan deneysel çalışmalara bir katkı da sağlanmıştır [23]. Actuator kapasitesini aşmamak için basınçta sınırlı bir (%0.65) yerdeğiştirme uygulanmasına karşın, çekmede protokol aynen (%6) uygulanmıştır. Görelî öteleme oranlarına karşı gelen yerdeğiştirme değerleri hesaplanarak BRB-SC1 numunesi için yakın fay yükleme protokolü oluşturulmuştur. Hedeflenen ve actuator kapasitesini aşmamak için gerçekleştirilen yerdeğiştirme protokolleri Şekil 6'da işaretlenmiştir. Görelî öteleme oranlarından yerdeğiştirmelere geçişte deney düzeneği giriş üst kotundan actuator merkez noktası arasındaki 1860mm'lik uzunluk alınmıştır.

3.4. Deneysel Gözlemler

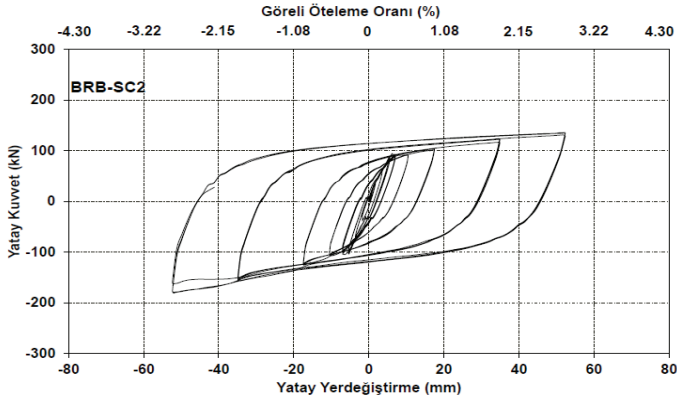
Deney başlangıcında kuramsal akma ve kuvvet değerlerine göre deney kontrol edilmiştir. Elastik çevrimlerden sonra kuvvet-yerdeğiştirme grafiğinde gözle görülür bir akmanın oluşması ile deneysel akma yerdeğiştirmesi ve akma kuvveti belirlenmiştir. Eş zamanlı olarak metal yüzeyine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerin kupon deneyi ile elde edilen akma birim şekildeğiştirmesi değerinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. İki kontrol parametresinden elde edilen sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, metal yüzeyinden akma yerdeğiştirmesi kontrolünün yapılması yönteminin etkinliğini kanıtlamakla birlikte yapılan kupon deneyleriyle elde edilen malzeme özelliklerinin doğruluğunu da göstermektedir. Numunelerin gerçek akma yerdeğiştirmesi belirlendikten sonra akma sonrası çevrimlerde, yükleme protokolü bulunan değere göre güncellenerek deneye devam edilmiştir. Numunelerin deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrileri ile deney sonrası denenen tüm numunelerin ulaştıkları maksimum görelî öteleme oranlarına ilişkin alt uç/üst uç fotoğrafları ön çalışmalar (BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-SC3) için Şekil 7'de, esas çalışmalar olan BRB-SC4 ve BRB-SC5 numuneleri için Şekil 8'de verilmektedir.



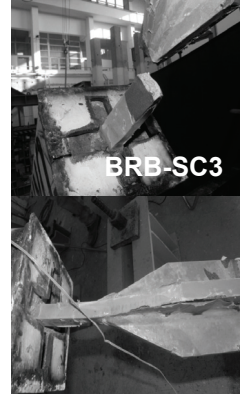
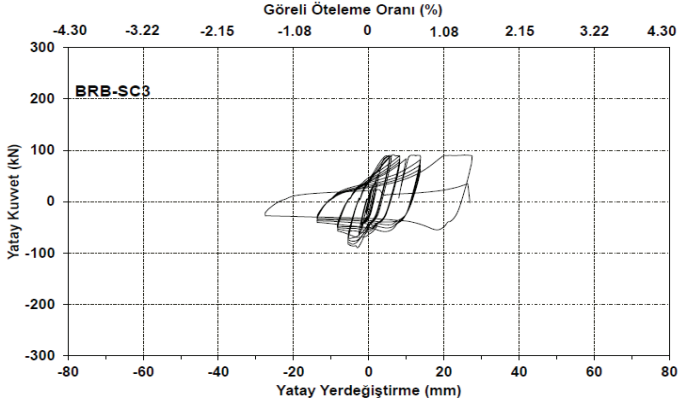
Şekil 6 - BRB-SC1 Numunesi İçin Yakın Fay Yükleme Protokolü



(a)



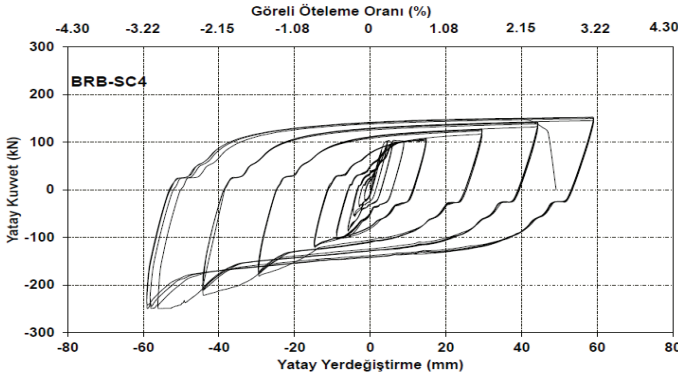
(b)



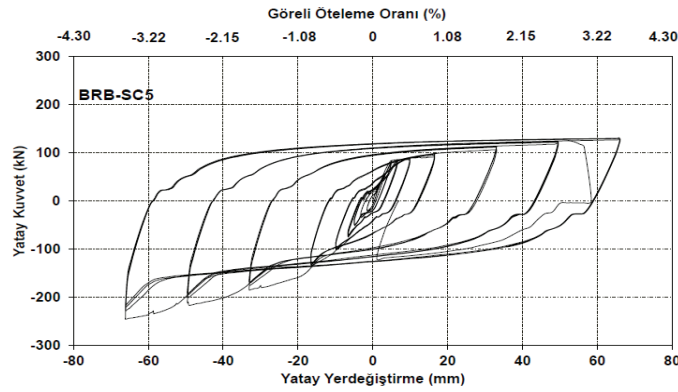
(c)

Şekil 7 - Ön Numunelere İlişkin Deneysel Histeretik Eğriler ve Deney Sonrası Ulaşılan Maksimum Çekme ve Basınç Piklerinde Uç Fotoğrafları:

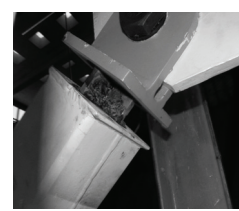
(a): BRB-SC1, (b): BRB-SC2, (c): BRB-SC3



(a)



(b)



Şekil 8. Esas numunelere ilişkin deneysel histeretik eğriler ve deney sonrası ulaşılan maksimum çekme ve basınç piklerinde uç fotoğrafları: (a): BRB-SC4, (b): BRB-SC5

3.5. Ön Çalışmalar (BRB-SC1, BRB-SC2, BRB-SC3)

3.5.1. BRB-SC1 Numunesi

Ön çalışmalar için üretilen ilk çelik BÖÇ'tür. Numunenin statik itme analizi ile tahmin edilen akma yerdeğiştirmesi $+5.41mm$ 'dir. Çekme yüklemesinde $\Delta_{by} = 5.91mm$ yerdeğiştirmesinde (%0.32 göreli öteleme oranı) akma gözlenmiştir. Akma yerdeğiştirme seviyesinin ilk çekme pikinde BRBKN $+1533\mu$, T5 düzlem dışı yerdeğiştirme $+0.15mm$ 'dir. İlk basınç pikinde BRBKN'nin -1156μ , T5'in $-0.12mm$ olduğu görülmüştür. $\pm\Delta_{by}$ seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+98.62kN$, maksimum basınç kuvveti ise $-165.90kN$ 'dur. $\pm 2.5\Delta_{by}$ ($\pm 14.78mm$ yerdeğiştirme, %0.79 göreli öteleme oranı) seviyesinin ilk çekme pikinde maksimum kuvvet $+102.50kN$, BRBKN $+4000\mu$, basınç pikinde ise maksimum kuvvet $-248.00kN$ elde edilmiştir. Bu seviyenin ikinci çekme pikinde actuator kapasitenin basınç yüklemelerinde aşılabacağı tahmin edilerek yükleme protokolü yeniden düzenlenmiştir. Düşük çevrimli/devirli yorulma yükleme protokolüne

(Low Cycle Fatigue) göre öncelikle numunenin $\pm 2.03\Delta_{by}$ seviyesinde ve $\pm 12.00mm$ yatay yerdeğiştirmede (%0.65 görelî öteleme oranı) η kümülatif plastik yerdeğiştirmesinin toplamda $200\Delta_{by}$ olmasını sağlayacak çevrim sayısı bulunmuştur. Sonuçta 96 çevrimin gerekli olduğu hesaplanmıştır. $\pm 12.00mm$ yatay yerdeğiştirmede ($\pm 2.03\Delta_{by}$) çekme kuvvetlerinin $+103.20kN \sim 112.30kN$, basınç kuvvetlerinin ise $-220.00kN \sim -248.99kN$ arasında değiştiği gözlenmiştir. BRBKN değerleri ise çekme yüklemelerinde $+4200\mu \sim 5405\mu$, basınç yüklemelerinde $-1250\mu \sim 1400\mu$ aralığındadır. 96. çevrimin sonunda elde edilen η kümülatif plastik yerdeğiştirme $201.76\Delta_{by}$ 'dir. Numunede düşük çevrimli yorulma yükleme protokolü sonunda herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. BRB-SC1 numunesine düşük çevrimli yükleme sonrasında, yakın fay (near-fault) etkisini dikkate alan yükleme protokolü de uygulanmıştır [20]. BRB-SC1'in birleşimlerinde ve deney düzeneğinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Yakın fay yükleme protokolü sonunda BRB-SC1 numunesinin η kümülatif inelastik yerdeğiştirmesi toplamda $381.56\Delta_{by}$ 'dir. Uygulanan yükleme protokollerini geçen numunede kopma gerçekleşmemiştir.

3.5.2. BRB-SC2 Numunesi

BRB-SC2'nin statik itme analizi ile tahmin edilen çekme akma yerdeğiştirmesi $\pm 6.62mm$ (%0.36 görelî öteleme oranı)'dir. Numunede çekme yüklemesinde $\pm \Delta_{by}$ için $+6.98mm$ yerdeğiştirmesinde (%0.38 görelî öteleme oranı) akma gerçekleşmiştir. Metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden ilk çekme pikinde $+2170\mu$, basınç pikinde -4800μ birim şekildeğiştirme okuması yapılmıştır. Akma yüklemesinin 2. çekme pikinde $+3350\mu$, ikinci basınç pikinde -5700μ değerine ulaşılmıştır. Bu değerler kupon deneylerinde elde edilen akma yerdeğiştirmesi birim şekildeğiştirme değerlerine yakındır. Akma yerdeğiştirmesinde, bayrak plakalarında, birleşimlerde, çaprazın genel durumunda herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. $\pm \Delta_{by}$ seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+93.00kN$, maksimum basınç kuvveti $-105.00kN$ 'dur. Bu seviyede T5 düzlem dışı yerdeğiştirmenin $-0.02mm \sim -0.32mm$ arasında değiştiği gözlenmiştir. $\pm 2.5\Delta_{by}$ seviyesinin ilk çekme pikine giderken $+99.57kN$ kuvvetine karşı gelen $+6881\mu$ 'de BRBKN hasar görmüştür. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı $1.15 \sim 1.23$ arasındadır. T5 düzlem dışı yerdeğiştirme bu seviyenin son çekme pikinde $-0.42mm$ olarak not edilmiştir. Bu seviyede bayrak plakalarında, birleşimlerde ve çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. $\pm 5\Delta_{by}$ ($\pm 34.90mm$ yerdeğiştirme, %1.88 görelî öteleme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+123.00kN$, maksimum basınç kuvveti $-154.00kN$ 'dur. Bu seviyede β basınç dayanımı düzeltme katsayısı $1.22 \sim 1.32$ arasındadır. T5 düzlem dışı yerdeğiştirmesi seviyenin 2. çekme pikinde $-0.44mm$ olarak ölçülmüştür. $\pm 7.5\Delta_{by}$ ($\pm 52.35mm$ yerdeğiştirme, %2.82 görelî öteleme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+135.50kN$, maksimum basınç kuvveti $-176.70kN$ 'dur. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı $1.17 \sim 1.37$ arasındadır. Numune $\pm 7.5\Delta_{by}$ ve %2.82 görelî öteleme oranı seviyesinde 4. ve son çekme pikine giderken $-41.18mm$ yerdeğiştirme ve $+28.03kN$ 'da çekirdekten kopmuştur. Kopma sonrasında yapılan incelemelerde bayrak plakalarında, birleşim elemanlarında herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Bu ikinci numunede maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %28 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Deneysel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı ortalama olarak 1.47, β basınç dayanım düzeltme katsayısı ise 1.28'dir.

3.5.3. BRB-SC3 Numunesi

BRB-SC3 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen akma yerdeğiştirmesi $+5.41mm$ (%0.29 görelı öteleme oranı)'dır. Numunede çekme yüklemesinde $\pm\Delta_{by}$ için $+5.50mm$ yerdeğiştirmede (%0.30 görelı öteleme oranı) akma gözlenmiştir. Akma yerdeğiştirme seviyesinin ilk çekme pikinde BRBKN $+1119\mu$, ilk basınç pikinde BRBKN -950μ 'dir. $\pm\Delta_{by}$ seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+88.06kN$, maksimum basınç kuvveti $-81.00kN$ 'dur. $\pm5\Delta_{by}$ seviyesinde ($\pm27.50mm$ yerdeğiştirmede %1.48 görelı öteleme oranı) belirlenen ilk çekme pikine ilişkin kuvvet $+88.89kN$, ilk basınç pikindeki kuvvet $-27.50kN$ 'dur. Numune yatay kuvvet- yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisinde çekme kuvveti $+18.00kN$ olduktan sonra $\pm5\Delta_{by}$ seviyesinde 2. basınç pikine giderken üst uçtan kopmuş ve deney sona ermiştir. Çaprazda çekirdeğin rijitleştirilmiş bölgeye geçişinde serbest bırakılan bölüm tüm davranışı olumsuz yönde etkilemiştir. Elastik çevrimlerde çekme ve basınç pikleri birbirine yakın değerler almasına karşın, inelastik çevrimlere girdikçe bu serbest uç bölümlerinde çekirdek kesitinin zayıf ekseni etrafında aşırı eğilmeler oluşmuş ve böylece basınç kuvvetlerinde düşüşler yaşanmıştır; ikinci mertebe etkilerinin artması ile BÖÇ davranışı klasik çapraz davranışına yakın bir duruma gelmiştir. Yine de burkulması önlenmemiş bir çaprazla karşılaştırıldığında önemli miktarlara ulaşan histeretik enerji elde edilmiştir. Bu durum, görelı olarak daha dolu olan histeretik eğriden de anlaşılmaktadır.

3.6. Esas Çalışmalar

3.6.1. BRB-SC4 Numunesi

Esas çalışmalar kapsamında önceki çaprazların olumsuzlukları giderildikten sonra üretilen BÖÇ'tür. BRB-SC4 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm1/4$ 'ündeki (%0.07 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm1.35mm$ olan 2 çevrimde, $\pm2/4$ 'ündeki (%0.15 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm2.71mm$ olan 2 çevrimde, $\pm3/4$ 'ündeki (%0.22 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm4.08mm$ olan 2 çevrimde elastik olarak davranmıştır. Elastik bölgede BRBKN şekildeğiştirmesi ilk çevrimde çekme etkisi altında $+1000\mu$, basınç etkisinde -455μ , ikinci elastik çevrimde çekme etkisinde $+1000\mu$, basınç etkisinde -430μ , üçüncü elastik çevrimde çekme etkisinde $+1300\mu$, basınç etkisinde -400μ değerleri elde edilmiştir. BRB-SC4'ün histeretik eğrisindeki gözle görölür akmanın oluştuğu nokta akma yerdeğiştirmesi olarak varsayılmıştır. BRBKN'nin erken hasar görerek okuma almamasının nedeni sonradan yapılan kesit açılımı ile anlaşılmıştır. Çekirdek, merkez noktadan koptuğundan, akma yerdeğiştirmesi piklerinde BRBKN öngörölenden erken hasar görmüştür; yapılan çekme deneylerinde de benzer bir durumla karşılaşılmıştır. BRB-SC4 numunesi statik itme analizi ile tahmin edilen akma yerdeğiştirmesi $+5.41mm$ (%0.29 görelı öteleme oranı)'dır. İlk çekme yüklemesinde tahmin edilen akma yerdeğiştirmesine çok yakın bir yerdeğiştirme değerinde akma gerçekleşmiştir. Numunede çekme yüklemesinde $\pm\Delta_{by}$ için $+5.90mm$ (%0.32 görelı öteleme oranı) akma yerdeğiştirmesi olarak alınmıştır. Akma yerdeğiştirmesinde, bayrak plakalarında, birleşimlerde, çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. $\pm1.5\Delta_{by}$ ($\pm8.85mm$ yerdeğiştirme, %0.48 görelı öteleme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+102.00kN$, maksimum basınç kuvveti $-103.00kN$ 'dur. $\pm2.5\Delta_{by}$ ($\pm14.75mm$ yerdeğiştirme, %0.79 görelı öteleme oranı) seviyesinde elde edilen

maksimum çekme kuvveti $+107.00kN$ ve basınç kuvvetleri sırasıyla $-120.00kN$ olarak elde edilmiştir; bu düzeyde β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.12'dir. T5 düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer bu seviyede batı doğrultusunda $-0.48mm$ değerine ulaşmıştır. $\pm 5\Delta_{by}$ ($\pm 29.50mm$ yerdeğiştirme, %1.59 görelî öteleme oranı) seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+128.00kN$ olup maksimum basınç kuvveti ise $-172.00kN$ 'dur; β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.34 olup basınç piklerinde basınç dayanımının artmaya başladığı gözlenmiştir. $\pm 7.5\Delta_{by}$ ($\pm 44.25mm$ yerdeğiştirme, %2.38 görelî öteleme oranı) seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+142.00kN$, maksimum basınç kuvveti $-203.00kN$ olarak elde edilmiştir; β değeri 1.43'dür. $\pm 10\Delta_{by}$ ($\pm 59.00mm$ yerdeğiştirme, %3.17 görelî öteleme oranı) seviyesinde maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+152.00kN$ ve $-249.00kN$ olarak tespit edilmiş olup β değeri 1.64'e ulaşmıştır. Numune $\pm 12.5\Delta_{by}$ ve %4.00 öteleme oranı seviyesindeki ilk çekme pikine gidilirken $+50.14mm$ yerdeğiştirme düzeyinde ve $+120.12kN$ yatay yükte beklediği üzere çekirdekten kopmuştur. Kopma sonrası çaprazın bayrak plakalarında herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Bu da numunenin tasarlandığı şekliyle davranış gösterdiğini ortaya çıkarmaktadır. Deneysel çalışma sonucunda BRB-SC4'ün maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %65 daha büyük olduğu belirlenmiştir; $\omega = 1.47$, $\beta = 1.65$ bulunmuştur.

3.6.2. BRB-SC5 Numunesi

BRB-SC5 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/4$ 'ündeki (%0.09 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 1.65mm$ olan 2 çevrimde, $\pm 2/4$ 'ündeki (%0.18 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 3.29mm$ olan 2 çevrimde, $\pm 3/4$ 'ündeki (%0.27 görelî öteleme oranı) $\pm 4.94mm$ olan 2 çevrimde elastik davranmıştır. Elastik bölgede ilk çevrimde çekme yüklemesi altında BRBKN $+1500\mu$, basınç etkisinde -740μ , ikinci elastik çevrimde çekme yüklemesinde $+1588\mu$, basınç yüklemesinde -1000μ , üçüncü elastik çevrimde çekme etkisinde $+1600\mu$, basınç etkisinde -1450μ değerleri okunmuştur. BRB-SC5'in statik itme analizi ile tahmin edilen çekme akma yerdeğiştirmesi $\pm 6.62mm$ 'dir. Numunede çekme yüklemesinde $+\Delta_{by}$ için $+6.61mm$ yerdeğiştirmesinde (%0.36 görelî öteleme oranı) akma gerçekleşmiştir. Akma sırasında metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden $+1923\mu$, basınç yüklemesinde -1021μ okumaları yapılmıştır. Akma yüklemesinin 2. çekme pikinde BRBKN $+2100\mu$ değerinde okunmuştur. Bu değerler kupon deneylerinden elde edilen akma şekildeğiştirme değerlerine çok yakındır. Bu yolla, deneyde net bir şekilde akma yerdeğiştirmesi belirlenmiştir. Akma yerdeğiştirmesinde, bayrak plakalarında, birleşimlerde, çaprazın genel durumunda herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. $\pm \Delta_{by}$ seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+87.00kN$, maksimum basınç kuvveti ise $-75.00kN$ 'dur. $\pm 1.5\Delta_{by}$ ($\pm 9.92mm$ yerdeğiştirme, %0.53 görelî öteleme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+88.00kN$, maksimum basınç kuvveti ise $-99.50kN$ 'dur. Bu seviyede BRBKN'de çekme piklerinde $3500\mu \sim 3680\mu$ arasında değerler okunmuştur. $\pm 2.5\Delta_{by}$ ($\pm 16.53mm$ yerdeğiştirme, %0.89 görelî öteleme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+99.00kN$, maksimum basınç kuvveti ise $-132.00kN$ 'dur. BRBKN okuması bu seviyenin ilk çekme pikine giderken $+3082\mu$ 'de hasar görmüştür; β 1.33 değerine ulaşmıştır. $\pm 5\Delta_{by}$ ($\pm 33.05mm$ yerdeğiştirme, %1.78 görelî öteleme oranı) seviyesinde elde

edilen maksimum çekme kuvveti $+111.00kN$, maksimum basınç kuvveti ise $-165.00kN$ 'dur; β değeri 1.49 olarak elde edilmiştir. Bu seviyede basınç dayanımında görelî artış gözlenmiştir. $\pm 7.5\Delta_{by}$ ($\pm 49.58mm$ yerdeğiştirme, %2.67 görelî öteleme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+121.00kN$ ve $-189.00kN$ 'dur; $\beta = 1.56$ 'dır. $\pm 10\Delta_{by}$ ($\pm 66.10mm$ yerdeğiştirme, %3.55 görelî öteleme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+130.00kN$, maksimum basınç kuvveti $-210.00kN$ 'dur; β değeri 1.62'ye ulaşmıştır. Numune $\pm 12.5\Delta_{by}$ ve %4.44 görelî öteleme oranı seviyesinde ilk çekme pikine gidilirken $+56.51mm$ yerdeğiştirme ve $+112.53kN$ 'da çekirdek bölgesinden kopmuştur. Kopma sonrası bayrak plakalarında herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Deneysel çalışma sonucunda BRB-SC5'in maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %76 daha büyük olduğu bulunmuştur; sonuç olarak $\omega = 1.46$, $\beta = 1.76$ 'dır.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ön numunelerden (BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-SC3) elde edilen sonuçların sonraki numuneler için yol gösterici olduğu, pek çok çalışmada buna benzer öncü numunelerin kullanıldığı ve yukarıda detaylı olarak açıklanan davranış özellikleri nedeniyle önemli sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu bölümde esas çalışmalar kapsamında olan çelik BÖÇ numunelerinin (BRB-SC4 ve BRB-SC5) daha başarılı olan deneylerinden elde edilen histeretik davranış özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4.1. Histeretik Davranışa İlişkin Bulgular

İncelenen numunelerin deneylerde yön değiştiren tekrarlı yükler altında yerdeğiştirme genlikleri (Δ_{by}) ve yerdeğiştirmelere karşı gelen ortalama maksimum çekme (T_{max}) ve basınç kuvvetleri (P_{max}) ile standart yükleme protokolü sonucunda elde edilen ω çekme ve β basınç dayanımı düzeltme katsayıları BRB-SC4 için Çizelge 3a'da, BRB-SC5 için Çizelge 3b'de özetlenmiştir. BRB-SC5 numunesinde, diğer numuneye göre daha büyük β değerleri elde edilmiştir. Her iki numunede β değerindeki artışların sürünmesiz yüzey oluşturma tekniği ile ilgili olduğu, sonrasında yapılan kesit açılımlarında anlaşılmıştır. Histeretik eğrilerde basınç bölgesinde %2 görelî öteleme oranından sonraki değerlerde izlenen sivrileşmenin nedeni de budur. Numunelere ilişkin kümülatif enerji yutma kapasiteleri histeretik eğri altında kalan toplam alanın hesaplanmasıyla elde edilmekte olup Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Numunelerin davranışını gösteren önemli parametrelerle birlikte deneysel iki doğrulu yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme eğrileri de elde edilmiş ve Şekil 10'da verilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen BÖÇ'lerden en başarılı olanlarda azaltılmamış kesit bölgesinde göçme öncesi ulaşılan maksimum eksenel yerdeğiştirme değerleri de hesaplanmıştır. Bu değerler BRB-SC4 ve BRB-SC5'de sırasıyla %3.17 ve %3.60 olarak hesaplanmıştır. Literatürdeki benzer diğer BÖÇ'lerle karşılaştırıldığında, BRB-SC4 ve BRB-SC5'in göçme öncesinde görelî olarak yüksek şekildeğiştirme değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Yön değiştiren tekrarlı yükler/yerdeğiştirmeler altında numunelerin sönmüledikleri enerji miktarını ifade etmenin bir diğer yolu etkili sönmü oranının (ζ_{effb}) hesaplanmasıdır. Bu değer

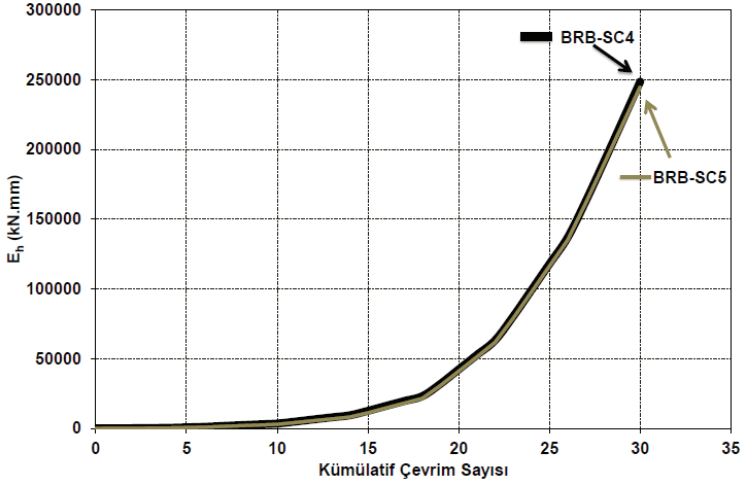
özellikle deprem etkileri altındaki bu tür sistemlerin performansı bakımından önemlidir. Numunelerin enerji sönmüleme miktarları uygulanan çevrim sayısı ile orantılıdır. BRB-SC4 numunesi normal akma dayanımlı (S235JR), BRB-SC5 numunesi yüksek akma dayanımlı (S355JR) çelik malzemesinden üretilmiştir. Şekil 9'dan görüleceği üzere BRB-SC4'ün enerji yutma kapasitesi ve kopma ömrü az da olsa BRB-SC5'den fazladır. Numunelerin η kümülatif inelastik yerdeğiştirmeye, E_h enerji yutma miktarları, ξ_{effb} etkili sönmü oranları ve maksimum görelî öteleme oranları hesaplanmış ve Çizelge 4'de özetlenmiştir. Buradaki kümülatif inelastik yerdeğiştirme değerleri deney boyunca son çevrimlerden elde edilmiştir. Tüm çevrimler göz önünde bulundurulduğunda kümülatif inelastik yerdeğiştirmeler her iki numune için de $1360\Delta_{by}$ olarak elde edilmiştir. Enerji yutma miktarları karşılaştırıldığında ise BRB-SC4/BRB-SC5 oranı 1.02'dir. En yüksek etkili sönmü oranı BRB-SC4 numunesinden ve %39.89 olarak elde edilmiştir. Deney sırasında numunelerin kaynaklı birleşimlerinde, bayrak plakasına olan bulonlu birleşimlerinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. BÖÇ'lü çerçeve sistemlerde genelde sorun yaşanan bölgeler uç bayrak levhalarının olumsuz performanslarıdır. Bu çalışmada, bayrak plakalarının performansı yeterli görülmüştür.

Çizelge 3a - BRB-SC4 Numunesi Davranış Özellikleri

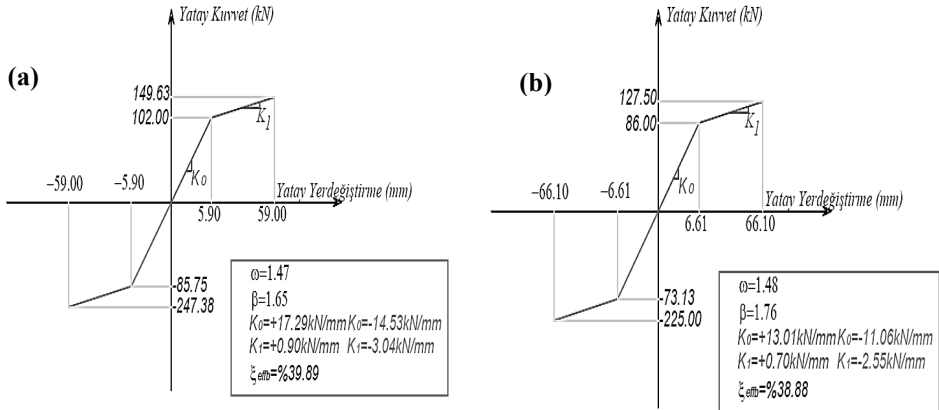
Δ/Δ_{by}	Δ_{by} (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	ω	β
4x1.0 Δ_{by}	±5.90	102.00	-85.75	1.00	0.84
4x1.5 Δ_{by}	±8.85	101.75	-102.75	1.00	1.01
4x2.5 Δ_{by}	±14.75	104.50	-117.50	1.02	1.12
4x5 Δ_{by}	±29.50	123.75	-172.00	1.21	1.39
4x7.5 Δ_{by}	±44.25	138.25	-203.00	1.37	1.47
4x10 Δ_{by}	±59.00	149.63	-247.38	1.47	1.65

Çizelge 3b - BRB-SC5 Numunesi Davranış Özellikleri

Δ/Δ_{by}	Δ_{by} (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	ω	β
4x1.0 Δ_{by}	±6.61	86.00	-73.13	1.00	0.86
4x1.5 Δ_{by}	±9.92	87.13	-98.78	1.01	1.13
4x2.5 Δ_{by}	±16.53	94.13	-130.75	1.09	1.39
4x5 Δ_{by}	±33.05	109.88	-165.00	1.28	1.50
4x7.5 Δ_{by}	±49.58	119.75	-189.00	1.39	1.58
4x10 Δ_{by}	±66.10	127.50	-225.00	1.48	1.76



Şekil 9 - BRB-SC4 ve BRB-SC5 Numunelerinin Kümülatif Histeretik Enerji Eğrileri



Şekil 10 - Numunelerin Deneysel İki Doğrulu Yatay Kuvvet-Yatay Yerdeğiştirme Eğrileri, (a): BRB-SC4, (b): BRB-SC5

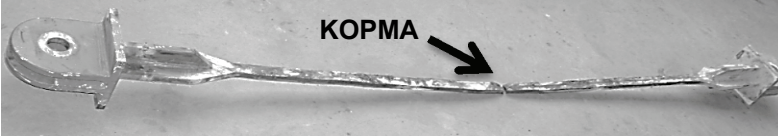
Çizelge 4 - η Kümülatif İnelastik Yerdeğiştirme, E_h Enerji Yutma Miktarları, ξ_{effb} Etkili sönüm ve maks. Göreli öteleme oranları.

Numuneler	η	E_h (kN.mm)	ξ_{effb} (%)	Maks. göreli öteleme oranı (%)
BRB-SC4	$172\Delta_{by}$	248,507.90	39.89	3.17
BRB-SC5	$172\Delta_{by}$	244,763.50	38.88	3.55

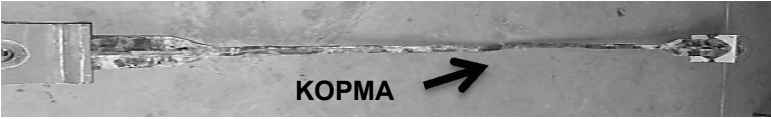
5. OLUŞAN HASARIN VE GÖÇMENİN BELİRLENMESİ

Her numune deneyden sonra yarı boyu kesitinde açılarak oluşan hasarın ve göçme modunun belirlenmesi için gözlem ve incelemelerde bulunulmuştur. Kesit açılım fotoğrafları BRB-SC4 numunesi için Şekil 11a'da, BRB-SC5 numunesi için Şekil 11b'de verilmiştir. Kuramsal olarak tahmin edilen davranışla, deneysel davranışın uyum/uyumsuzluk durumu, deneysel gözlemlerin nedenleri yapılan kesit açılımları ile anlaşılmuştur. Numunelerde, yüksek dayanımlı dolgu harcında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Bu durum dolgu malzemesinin yük aktarmadığını da kanıtlamaktadır. Genel olarak gözlemler ve bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- BRB-SC4 numunesi, beklenildiği üzere, çekirdek orta noktasından kopmuştur. İnelastik şekilde değişimler strain-gauge civarında yoğunlaştığından ve kopma bu bölgede olduğundan metal yüzeyine yerleştirilen strain-gauge erken hasar görmüştür. Numunenin çelik çekirdekte zayıf eksen doğrultusunda çok modlu (dalgalı) burkulmaların olduğu görülmüştür. Bu hasar ve göçme modu dışında, çekirdek bölgesinin ötesinde bir sorun görülmemiştir.
- BRB-SC5 numunesi çekirdek orta noktasına çok yakın bir noktadan kopmuştur. Benzer şekilde, çok modlu bir burkulma biçimi vardır. Yine çelik çekirdek dışında kalan uç bölgelerde herhangi bir sorun yaşanmamıştır.



(a)



(b)

Şekil 11 - Numunelerin Kesit Açılım Fotoğraflar; (a): BRB-SC4, (b): BRB-SC5

6. SONUÇLAR

Türkiye'deki olanaklarla tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen farklı kalitedeki çelik çekirdekli ve dış tüplü iki adet gerçeğe yakın boyutlardaki BÖÇ'ün, yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle tasarım aşamasına detaylı olarak değinilmiş, malzeme araştırması, malzeme deneyleri kapsamlı biçimde açıklanmıştır. Çalışmada aynı akma dayanımlı, basit uç detaylarına sahip 5 çelik çekirdekli ve çelik dış tüplü BÖÇ ele alınmıştır. Birinci grup BÖÇ serisi ön çalışmalar başlığı altında değerlendirilmiş olup 3 BÖÇ'ten (BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-SC3) oluşmuştur. Çalışmadaki deneysel bulgular ağırlıklı olarak esas çalınmalar kapsamında değerlendirilen 2

BÖÇ'ten (BRB-SC4 ve BRB-SC5) elde edilen sonuçlardır. Bu deneysel çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Üretilen BÖÇ'lerde pek çok önceki deneysel çalışmalarda karşılaşılan ve en büyük sorun olan herhangi bir tümsel burkulma sorunu gözlenmemiştir. Bayrak plakaları, kolon ve kiriş şeklindeki değişime okumaları deney düzeneğinin deney boyunca elastik kaldığını göstermektedir. Bayrak plakalarının elastik davranışı, akmanın yalnızca çekirdek akma bölgesi uzunluğu boyunca oluştuğunu, çekirdek güçlendirme ve birleşim bölgelerinin elastik kaldığını ortaya koymaktadır.
- BRB-SC4 numunesi $\pm\%3.17 (10\Delta_{by})$, BRB-SC5 numunesi ise $\pm\%3.55 (10\Delta_{by})$ göreli öteleme oranında göçmüştür. En yüksek β ve ω katsayıları BRB-SC5 numunesinde elde edilmiş olup sırasıyla 1.76 ve 1.48'dir. Her iki numunede de göçmeye yakın yüksek öteleme oranlarında $\beta > 1.3$ elde edilmiştir. β katsayısını arttıran faktörlerin başında sürtünmesiz yüzey oluşturma kusur ve eksiklikleri ile iç boşluk verme şekli olduğu düşünülmektedir.
- Deney boyunca son çevrimlerden elde edilen η kümülatif inelastik yerdeğıştirmeler her iki numunede de $172\Delta_{by}$ olarak elde edilmiştir. Tüm çevrimler göz önünde bulundurulduğunda ise kümülatif inelastik yerdeğıştirme değeri her iki numune için $1360\Delta_{by}$ 'dir.
- Numunelerde elde edilen etkili sönüm oranlarının büyük değeri $\%39.89$ ile BRB-SC4 numunesine aittir.
- BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekildeğıştirme ölçümlerinin yapılması için metal yüzeyine açılan kanallara strain-gauge yerleştirilmiştir. Bu uygulama bilindiği ve ulaşıldığı kadarıyla BÖÇ teknolojisi için yeni bir uygulama olmuştur. BÖÇ'lerin deneyde akma yerdeğıştirmesinin net bir şekilde belirlenmesi bu yöntemle gerçekleştirilmiştir.
- Ön çalışmalar kapsamındaki numunelerde akma bölgesinden çekme bölgesine geçişte kullanılan berkitme plakalarının kaynak uç noktası numunelerde kesitin genişlediği noktaya çekilmiştir. kaynak köşelerinin dönülmesi kesitin en dar olduğu yerden ısıdan etkilenen bölge (HAZ) nedeniyle çekirdeğin kopmasına yol açmıştır. Ön çalışmalarda görülen bu olumsuzluk esas çalışmalar kapsamındaki BÖÇ'lerin üretiminde dikkate alınarak yeniden güçlendirme bölgesi tasarımı gerçekleştirilmiş, plastik mafsal oluşumu akma bölgesi orta noktasına taşınmıştır.
- Çalışmada üretilen BÖÇ'ler içerdikleri detaylar gereği ilk defa Türkiye'de uygulaması yapılmış, yeni ve farklı yönleri olan BÖÇ'ler olup davranış özellikleri ileride yapılabilecek ek çalışmalarla daha da iyileştirilebilir potansiyeline sahiptir. Bu yapıldığında mevcut Bu çalışma ileride yeni çalışmaların yapılmasına temel oluşturma potansiyeline sahiptir.

Semboller

A_{con} : Çekirdek elemanın birleşim bölgesi enkesit alanı

A_{sc} : Çekirdek elemanın akma bölgesi net enkesit alanı

- A_{tr} : Çekirdek elemanın güçlendirme bölgesi enkesit alanı
- b_{ysc} : Çekirdek elemanın akma bölgesi genişliği
- b_{con} : Çekirdek elemanın birleşim bölgesi genişliği
- b_{tr} : Çekirdek elemanın güçlendirme bölgesi genişliği
- E : Elastisite Modülü
- E_c : Dolgu malzemesi Elastisite Modülü
- E_h : BÖÇ enerji yutma miktarı
- $(f_c)_{28}$: 28 günlük beton basınç dayanımı
- f_{ctk} : 28 günlük eğilmede beton çekme dayanımı
- F_u : Çelik çekirdek kopma gerilmesi
- F_{yc} : Çekirdek elemanın belirlenen minimum akma gerilmesini ya da kupon deneylerinden elde edilen gerçek akma gerilmesini
- K : Çaprazın tahmin edilen etkin burkulma boyu katsayısı
- L : Çapraz toplam uzunluk
- L_{con} : Çaprazın birleşim bölgesi uzunluğu
- L_{tr} : Çaprazın güçlendirme bölgesi uzunluğu
- L_{yc} : Çaprazın maksimum akma bölgesi boyu
- P_e : Euler burkulma yükü
- P_{max} : BÖÇ maksimum basınç kuvveti
- P_{yc} : Çekirdek elemanın aksenal akma kuvveti
- R_y : Malzeme dayanım faktörü
- t : Çapraz çekirdek kalınlığı
- T_{max} : BÖÇ maksimum çekme kuvveti
- β : Basınç dayanım düzeltme faktörü
- Δ_{by} : Deney numunesinin ilk akmadaki aksenal yerdeğiştirme miktarı
- ε_y : Çaprazın akma şekildeğiştirilmesi
- ε_u : Çaprazın maksimum uzama şekildeğiştirilmesi
- η : Kümülatif inelastik yerdeğiştirme
- ν : Poisson oranı
- ξ_{effb} : Etkili sönüm oranı
- ω : Çekme dayanımı düzeltme faktörü

Teşekkür

Bu çalışma, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL), Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)-1002-110M776 ve İTÜ-BAP 33459 araştırma projelerinin sağladığı olanaklarla gerçekleştirilmiştir. Yazarlar malzeme-işçilik konularında destek sağlayan ÇİMTAŞ, FİBERFLON, KÖSTER, As Civata'ya teşekkürlerini sunarlar. Sistem deneyleri İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında yapılmış, Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarları çalışanlarından numunelerin üretiminde kısmen de destek alınmıştır. Tüm sonuçlar, öneriler yazarların sorumluluğunda olup destek veren kuruluşları ve kişileri bağlamamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Morisono, T. and Yokoyama, H., Experimental Study of the Elastoplastic Behavior of Braces Enclosed by Precast Concrete Panels Under Horizontal Cyclic Loading, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan (AIJ), 1041-4, 1973.
- [2] Kimura, K., Yoshioka, K., Takeda, T., Fukuya, Z., Takemoto, K., Tests on Braces Encased by Mortar in-filled Steel Tubes, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan (AIJ), 1041-2, 1976.
- [3] Watanabe, A., Hitomi, Y., Yaeki, E., Wada, A., Fujimoto, M., "Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube", In: Proceedings of 9th world conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 719-724, 1988.
- [4] Gheidi, A., Mirtaheri, M., Zandi, A. P., Alanjari, P., "Effect of filler material on local and global behaviour of buckling-restrained braces", The Structural Design of Tall and Special Buildings, 10.1002/tal.555, 2009.
- [5] Berman, J. W., and Bruneau, M., "Cyclic testing of a buckling restrained braced frame with unconstrained gusset connections", Journal of Structural Engineering, ASCE, 135(12), 1499-1510, 2009.
- [6] Celik, O. C., Berman, J. W., Bruneau, M., "Cyclic testing of braces laterally restrained by steel studs", Journal of Structural Engineering, ASCE, 131(7), 1114-1124, 2005.
- [7] Celik, O. C., Bruneau, M., "Skewed slab-on-girder steel bridge superstructures with bidirectional-ductile end diaphragms", Journal of Bridge Engineering, ASCE, 16(2), 207-218, 2011.
- [8] Zhao, J., Wu, B., Li, W., Ou, J., "Local buckling behavior of steel angle core members in buckling-restrained braces: Cyclic tests, theoretical analysis, and design recommendations", Engineering Structures, 66, 129-145, 2014.
- [9] Takeuchi, T., Matsui, R., Mihara, S., "Out-of-Plane stability assessment of buckling-restrained braces with chevron configurations", 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas Shanghai, China, July 1-3, 2015.
- [10] Fujishita, K., Bal, A., Sutcu, F., Celik, O. C., Takeuchi, T., Matsui, R., and Terashima, M., "Comparing hysteretic behavior of buckling restrained braces (BRBs) with bolted

- and welded end connections”, In: 8th international symposium on steel structures (ISSS). Nov. 5-7, Jeju, Korea; 2015.
- [11] Bazaez, R., Dusicka, P., “Cyclic behavior of reinforced concrete bridge bent retrofitted with buckling restrained braces”, *Engineering Structures*, 119, 34-48, 2016.
- [12] Chou, C. C., Tsai, W. J., Chung, P. T., “Development and validation tests of a dual-core self-centering sandwiched buckling-restrained brace (SC-SBRB) for seismic resistance”, *Engineering Structures*, 121, 30-41, 2016.
- [13] Eryaşar, M. E., Topkaya, C., “An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(5), 561-581, 2010.
- [14] Bozkurt, M. B., Topkaya, C., “Development of welded overlap core steel encased buckling-restrained braces”, *Journal of Constructional Steel Research*, 127, 151-164, 2016.
- [15] Özcelik, R., Dikiciasik, Y., Erdil, E. F., “The development of the buckling restrained braces with new end restrains” *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 208-220, 2017.
- [16] ASTM A 370-08a- Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 2008.
- [17] AISC 341-10- Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction AISC, Chicago, IL, 2010.
- [18] AISC 360-10- Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2010.
- [19] ANSI/AWS D1.1/D1.1M-Structural Welding Code-Steel, American Welding Society, Miami, 2008.
- [20] Haydaroglu, C., Taskin, K., Celik, O. C., “Ductility enhancement of round HSS braces using CFRP sheet wraps”, In: 6th european conference on steel and composite structures (Eurosteel), Budapest, Hungary, 2011.
- [21] CSI SAP 2000 V-14, Integrated software for structural analysis and design, analysis reference manual. Berkeley (CA): Computer and Structures Inc., 2009.
- [22] FEMA-356- Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, In: Prepared by American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington (DC), 2000.
- [23] Uang, C. M., Yu, Q. S., Gilton, C. S., “Effects of loading history on cyclic performance of steel RBS moment connections”, *Proceedings of the 12th WCEE*, Upper Hutt, New Zealand, 2000.

U Şekilli Betonarme Perdelerin Farklı Yatay Yük Etkileri Altında Doğrusal Olmayan Davranışı

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU¹

ÖZ

Betonarme perde elemanları yatay yük etkisi altında kat yer değiştirmelerini sınırlandırması bakımından oldukça büyük öneme sahiptir. Deprem bölgelerinde hem yapının güvenliğini sağlamak hem de yer değiştirmeleri sınırlandırarak yapısal olmayan elemanlarda meydana gelecek hasarları azaltması bakımından etkili davrandıkları belirlenmiştir. Bu çalışmada sonlu eleman modeli yapılan U şekilli betonarme perdenin, on adet değişik yön ve değerdeki yatay yük etkileri altında doğrusal olmayan analizleri yapılmış, perdeye ait deformasyon şekilleri, yük-ötelenme eğrileri ve moment-eğrilik ilişkileri verilerek doğrusal olmayan davranışı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: U şekilli perde, eğilme, burulma, sonlu eleman analizi, modelleme, doğrusal olmayan davranış.

ABSTRACT

Nonlinear Behavior of U Shaped Reinforced-Concrete Shear Walls Under Different Horizontal Loads

Reinforced-concrete shear walls have significant importance in terms of limiting floor displacements under the effects of horizontal loads. It has been determined that in earthquake zones reinforced-concrete shear walls are effective in increasing safety of a construction and decreasing the damage of non-structural elements by restraining displacements. In the current study, nonlinear behavior of U shaped reinforced-concrete shear walls are investigated by performing nonlinear analysis under the effect of ten different types of horizontal loads. Deformation behaviors, load-displacement curves and moment-curvature relations of reinforced-concrete shear walls are also shown in the study.

Keywords: U-shaped shear wall, bending, torsion, finite element analysis, modeling, nonlinear behavior.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 17 Ekim 2017 günü ulaşmıştır. 4 Temmuz 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.344813

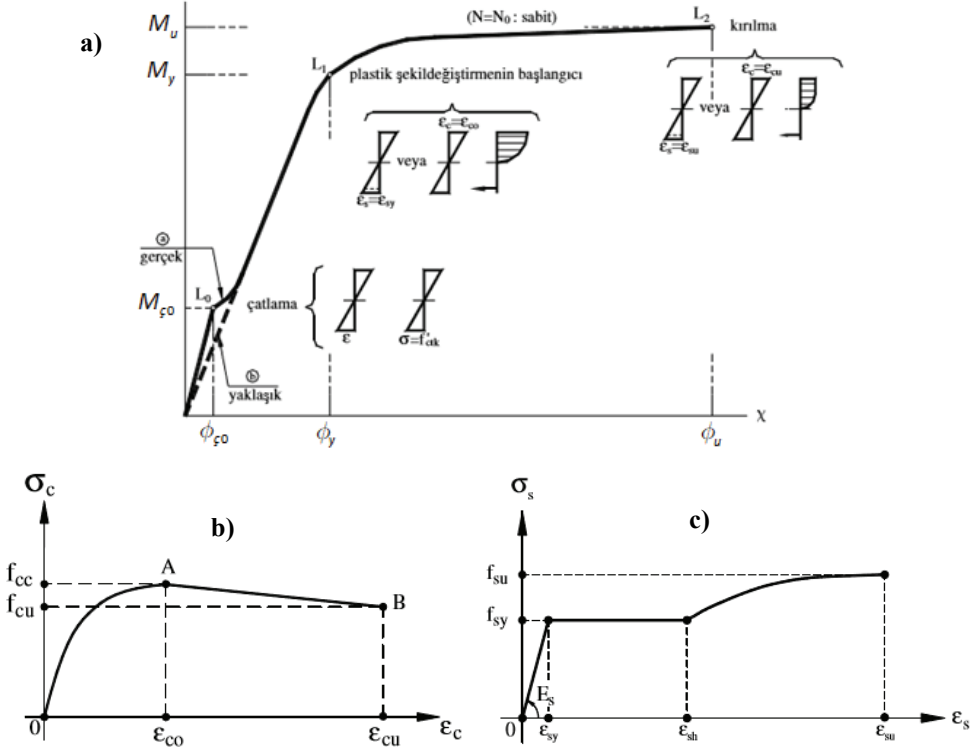
1 Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, Giresun - haliterdemcolakoglu@gmail.com

1. GİRİŞ

Deprem açısından aktif bölgelerde yapılan yapılarda betonarme perdelerin kullanımı oldukça yaygındır. Betonarme perdeler yapıda deprem etkisi altında meydana gelecek burulma etkisini en aza indirmesi bakımından önemlidir. Burulma etkisinde yapının maruz kalacağı zararın boyutu perdelerin plandaki yerleşimi, kesiti ve daha birçok etkene bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle betonarme perdelerin farklı yön ve değerlerdeki yatay yük etkileri altında incelenerek doğrusal olmayan analizlerle davranışlarının belirlenmesi günümüz yapı teknolojisinin gelişmesinde oldukça önemli bir paya sahiptir. Bu çerçevede yapı elemanları ve yapı sistemlerinin çeşitli yüklemeler altındaki davranışının incelenmesi için deneysel çalışmaların gerekliliği tartışılmazdır. Ancak, deneysel çalışmalara ait bilgisayar modellerinin oluşturulması ve model analizden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla yapılan deneylerin tahkik edilmesi de sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, U şekilli betonarme perdenin sonlu eleman metodu ile modellenmesi yapılarak farklı yön ve değerlerde yatay yük etkisi altında doğrusal ötesi analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen veriler, kesit analizi verileri ile karşılaştırılarak U şekilli perdelerin doğrusal olmayan davranışı araştırılmıştır.

Beton malzemenin yüklemeye altındaki (bir eksenli, iki eksenli ve üç eksenli) davranışı oldukça karmaşıktır. Çatlama, ezilme, gerilme sertleşmesi, basınç azalması, aderans yapışması gibi beton davranışları doğrusal olmayan malzeme modeli ile verilmektedir. Betonun doğrusal olmayan davranışının iki önemli sebebi; donatının plastik davranışı ve betonun yük altında çatlamasıdır. Çekme çatlağı betonun rijitliğini azaltır ve genellikle, iki eksenli çekme-basınç gerilmeleri taşıyan duvar, panel veya perde gibi elemanlar betonarme yapının doğrusal olmayan davranışını büyük oranda etkiler. Bu tür yapılar için betonun çatlama davranışını doğru modellemek, hiç şüphesiz ki en büyük zorluklardan biridir. Betonarme yapılarda eğilme momentinin küçük değerleri için betonda basınç ve çekme gerilmeleri meydana gelirken, donatı elastik davranır. Bütün beton kesiti davranışa etkili olduğu için donatının katkısı bu devrede sınırlı olur. Kesitin eğilme rijitliğine beton kesitin elastiklik modülü ve brüt atalet momenti etkili olur. Momentin artmasıyla çekme bölgesindeki beton çatlak ve çatlak tarafsız eksene doğru ilerler. Betonun çatlaması moment-eğrilik değişiminde küçük de olsa ilk doğrusal davranıştan ayrılmayı doğurur (Şekil 1). L_0 anında betonarme kesitin dış çekme lifinde normal gerilme, eğilmedeki betonun çekme dayanımına eşit olunca betonda çatlaklar meydana gelir. L_0 çatlama noktasına karşı gelen M_{c0} eğilme momentinin hesabında beton kesitin homojen olduğu varsayılmakta ve betonun $\sigma - \varepsilon$ bağıntısı doğrusal elastik olarak alınmaktadır. Gerçekte betonun doğrusal olmayan davranışı artan gerilmelerle yavaş yavaş belirgin duruma gelir. L_1 anında betonun dış basınç lifinde veya çekme donatısında plastik şekil değiştirme başlar. Plastik şekil değiştirmelerin betonda ε_{c0} birim kısılmasında, çelikte ise ε_{sy} akma sınırında başladığı göz önünde tutulmaktadır. Eğilme momenti artarken, beton basınç gerilmeleri dağılışı doğrusal olmayan bir değişimle oluşur ve donatı akma gerilmesine ulaşır. Momentin bu değeri M_y akma momenti olarak bilinir. M_y eğilme momentinin hesabında betonun çekme dayanımı hesaba katılmaz. L_2 anında eğilme momenti artarak kesitin taşıma kapasitesi adı verilen M_u değerine eşit olunca basınç bölgesindeki beton ezilerek kırılır veya çekme donatısı kopar. Basınç bölgesindeki betonun

ezilerek kırılması birim kısalmanın ε_{cu} sınır değerine erişmesi suretiyle meydana gelir. Genellikle donatının uzama kapasitesi büyük olduğu için, güç tükenmesi betonun en büyük kısalma kapasitesine erişmesiyle ortaya çıkar ve kesit taşıma gücüne erişir [1].



Şekil 1 - a) Betonarme Kesitte Eğilme Momenti-Eğrilik İlişkisi b) Betonun Gerilme-Birim Şekil Değiştirme İlişkisi c) Beton Çeliğinde Gerilme-Birim Şekil Değiştirme İlişkisi

Beyer ve diğerleri [2] yaptıkları çalışmada, ETH Zürih’de tamamlanmış bir deneysel programdan yola çıkarak, iki adet U şeklindeki perde yarı statik tekrarlı yüklemeye tabii tutmuşlardır. Bu çalışmada, bu iki adet deney sistemi için doğrusal olmayan geniş kolon modelleri geliştirilmiştir. Çalışma, literatürde bulunan tavsiyelere göre inşa edilmiş geniş kolon modellerinin analizi ile başlamaktadır. Bu tavsiyeler elastik sistemlerin analizi ile elde edilmiş olup, geniş kolon modellerinin doğrusal olmayan davranış üzerindeki etkileri farklı modelleme varsayımları yapılarak araştırılmıştır. Son olarak yapılan testlerden elde edilen deneysel sonuç ile sayısal sonuçlar karşılaştırılarak büyük doğrusal olmayan deformasyonlara maruz U şeklindeki perdelerin geniş kolon modellerini kurmak için pratik öneriler verilerek çalışma sonlandırılmaktadır.

Brueggen ve diğerleri [3] yaptıkları çalışmada, altı katlı bir ofis binasında yer alan T şekilli perdelerin tasarımında karşılaşılan sorunları araştırmışlardır. Bu sorunlar, iki eksenli

yükleme durumunda bir kat seviyesindeki perdeler arasındaki kuvvet dağılımını ve ACI 318-02 [4] ye göre perdelerin detaylandırılmasını içermektedir. Yapılan çalışmalar T şekilli perdelerin tasarımının dikdörtgen şekilli perdelerin tasarımında kullanılan yöntemlere benzer yöntemler kullanılarak yapılabileceğini göstermiştir.

Maruta ve diğerleri [5] yaptıkları çalışmada, aynı anda yatay yük ve burulmaya maruz kalan H şekilli betonarme perdelerde deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Burulma dayanımının, bir tarafı açık (OSCW) olan perdelerde, kapalı olanlara (CSCW) göre daha az olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumda OSCW perdelerde elasto-plastik kapasitenin, CSCW perdelerine göre daha az olduğunu tahmin etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada dokuz adet H şeklindeki perde, aynı anda yatay yük ve burulma altında test edilmiş, yatay yük ile H şeklindeki duvarın yatay yük yönündeki burulma oranı incelenmiştir. Tüm örnekler, H şekilli betonarme perdelerin öncelikle eğilme mukavemetine ulaşması böylece kesmeden kaynaklı deformasyonların iyi bir şekilde gösterilmesi için tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri test sonuçlarını doğrulamak ve denenmemiş durumların verilerini elde etmek için yapılmıştır.

Wallace ve Moehle [6] yaptıkları çalışmada, betonarme perdelerin deprem performansının belirlenmesi için perdelerde deprem sonucu oluşan ötelenme talebi ve mevcut kapasiteyi karşılaştırarak perde uç bölgesinde gerekli olan süneklik ve donatı detaylandırmasını incelemiş, deprem etkisine maruz kalmış binalardaki betonarme perdelerin donatı gereksinimlerini belirlemek adına analitik bir yöntem kullanmıştır.

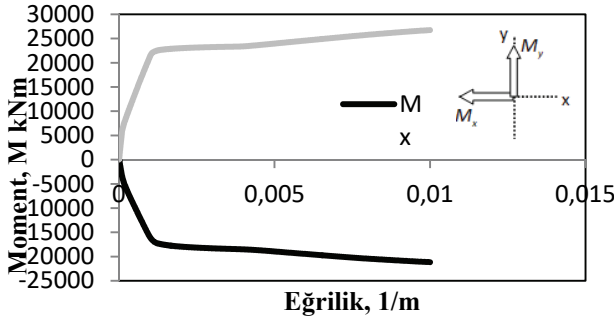
Abdulkerim ve Atımtay [7] yaptıkları çalışmada, tünel kalıp tekniği ile inşa edilen çok katlı yapıların deprem yükleri altındaki dayanım ve davranışlarını araştırmışlardır. Bu amaçla, tünel kalıp teknolojisi uygulamalarında yatay elemanlar olan döşemeler ile düşey elemanlar olan perdelerin birleşim bölgelerinden oluşan bir kesit modellemiştir. Modellenen yapı sistemi, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında çelik profillerden imal edilmiş yatay yük çerçevesinde tersinir-tekrarlanır yük altında denenmiştir. Modeller üzerindeki tersinir-tekrarlanır yatay yük uygulaması; perde ve döşeme boyutları sabit olmak üzere, perdelerdeki donatı miktarlarına ait parametreler değiştirilerek 4. kat, 3. kat ve 2. katlardan uygulanmıştır. Betonarme perdelerde yatay ve düşey donatı aralıklarının etkisinin belirlenmesi için TGPA, TGPB ve TGPC olmak üzere üç çeşit model üzerinde deneyler yapılmıştır. Numunelerde kullanılan donatı düzenine göre moment-eğrilik, yük-şekil değiştirme ve perde tabanında meydana gelen yük-ötelenme grafikleri hazırlanmıştır. Bu değerler kendi içlerinde ve teorik araştırmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca perde kesitinin, yerleştirilen donatıların kopma anındaki moment kapasiteleri deneysel ve teorik olarak irdelenerek çalışma sonlandırılmıştır.

Ormancı ve Saygun [8] yaptıkları çalışmada, betonarme perdelerin anizotropik malzeme davranışı esas alınarak çözümlendiği bir sonlu eleman geliştirilmişlerdir. Çözümde sonlu elemanın, kesitte çekme veya basınç bölgesinde kalmış olmasına göre, farklı eleman rijitlik matrisleri kullanılmıştır. Betonarme perde modelinin yatay yükler altında doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Bu davranış çubuk sistemlerdeki plastik mafsal hipotezinin benzeri olarak, düğüm noktaları arasında sonlu elemanın doğrusal elastik davrandığı, plastik şekil değiştirmelerin düşey plastik yer değiştirmeler olarak düğüm noktalarında toplandığı kabulü ile tanımlanmıştır. Bu kabule göre betonarme perdede plastikleşme, düşey doğrultudaki birim şekil değiştirmenin, elastik şekil değiştirme sınırına erişmesi ile gerçekleşir. Sonlu elemanın

tanımında perdenin sadece kat hizalarında bölünmesinin, çözüm için yeterli olduğu yer değiştirme fonksiyonları seçilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar farklı bir bilgisayar programı ile elde edilen çözümler ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

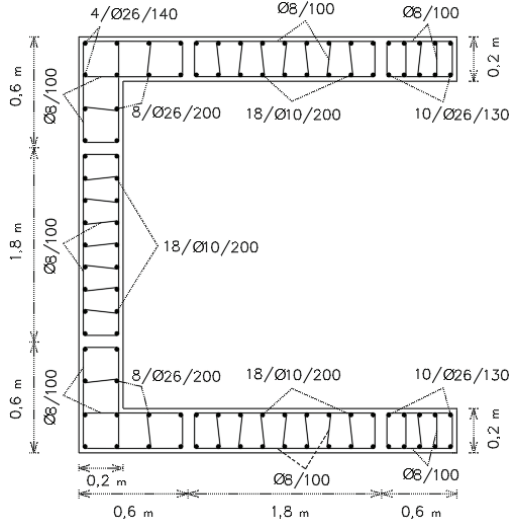
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, 8 katlı 24 m yüksekliğinde, taşıyıcı sistemi perdeli-çerçeve olarak tasarlanmış, kolonları 50x50 cm boyutlarında olan, 1.derece deprem bölgesinde yer alan ve yerel zemin sınıfı, DBYBHY-07 [9]'ye göre Z4 olarak belirlenmiş bir bina kullanılmıştır. Binanın taşıyıcı sistemi içerisinde bir adet U şekilli betonarme perde de mevcuttur. Mevcut binanın SAP2000 programında eşdeğer deprem yükü analizi yapılarak, U şekilli betonarme perdenin aldığı toplam kesme kuvveti ve eksenel kuvvet ile eğilme ve burulma momentleri belirlenmiştir. Perdenin donatı hesabı SAP2000 programı bünyesindeki yapılmıştır. Bunun için eşdeğer deprem yükü analizinden belirlenen eksenel kuvvet değeri kullanılarak, perdenin moment-eğrilik ilişkisi çizilmiştir (Şekil 2). Perdede Şekil 3'de gösterilen donatılar kullanıldığında oluşan moment taşıma kapasitesi M , eşdeğer deprem yükü analizinden elde edilen maksimum moment değerinden büyük olduğundan kesit donatı durumu yeterlidir.



Şekil 2 - Kesit Analizinden Elde Edilen Moment-Eğrilik İlişkisi

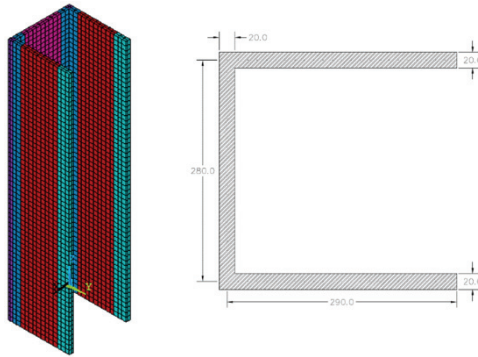
Perde modelinin kol uçlarında ve gövde-kol birleşim bölgelerinde boyuna $\phi 26$ donatı, kol ve gövde ortasında boyuna $\phi 10/200$ mm donatı kullanılmıştır. DBYBHY-07 [9]'ye göre düşey doğrultuda etriye ve/veya çiroz aralığı perde kalınlığının yarısından ve 100 mm'den fazla, 50 mm'den daha az olmayacağından, hesaplarda etriye olarak $\phi 8/100$ mm donatı tercih edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada incelenen perde elemanların DBYBHY-07 [9]'ye göre süneklik düzeyi yüksek elemanlar olduğu söylenebilir.



Şekil 3 - U Şekilli Perdenin Donatı Planı

DBYBHY-07 [9]'ye göre perde uç bölgesinin uzunluğu ℓ_u , perdenin toplam uzunluğu ℓ_w 'nin 0,2 katına eşit ya da daha büyük olmalıdır. Bu nedenle U şekilli betonarme perdenin uç ve gövde-kol birleşim kısımlarındaki sargı bölgesi $0,2\ell_w$ olarak alınmıştır.

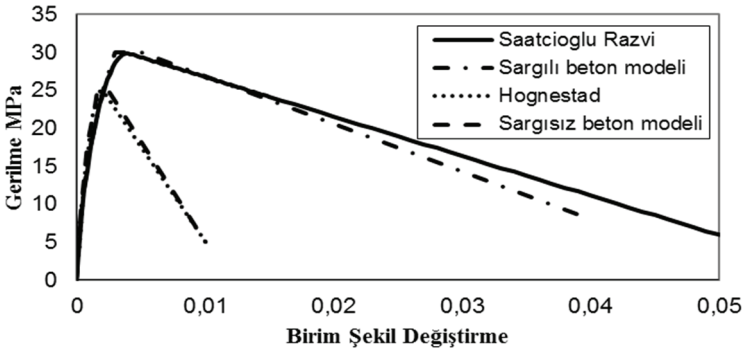
Tasarımda kullanılacak veriler elde edildikten sonra ANSYS yazılımı kullanılarak U şekilli betonarme perdenin sonlu eleman modeli yapılmıştır. Modelin oluşturulmasında 8-düğüm noktalı katı eleman SOLİD65 kullanılmış, en az sayıda sonlu eleman oluşturacak şekilde düzenleme yapılarak çözüm süresinin kısaltılmasına dikkat edilmiştir. Şekil 4'de U şekilli perdenin boyutları ile sonlu eleman görüntüsü gösterilmiştir. Perde uç bölgelerinde perde kalınlığı, DBYBHY-07 [9] ye uygun olarak 200 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4 - U Şekilli Perdenin Boyutları ve Sonlu Eleman Modeli

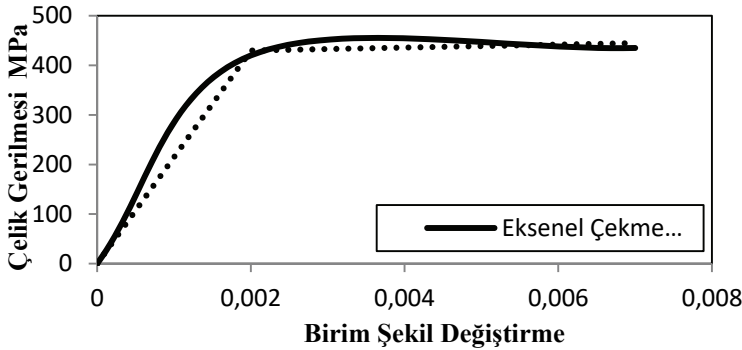
DBYBHY-07 [9], sargılı veya sargısız beton gerilme-birim şekil değiştirme malzeme modelleri için Mander [10] vb. modelini önermiştir. Saatçioğlu ve Razvi [11] modeli, Mander [10] modeliyle tepe gerilmesi benzer eğriler vermekle birlikte, yumuşama bölgesinde daha gerçekçi bir davranış sergilemektedir [12]. Dolayısıyla hesaplarda sargılı betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Saatçioğlu ve Razvi [11] modeliyle, sargısız betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ise Geliştirilmiş Hognestad modeliyle hesaplanmıştır [13].

U şekilli betonarme perdenin sonlu eleman modelinde, kolların uç kısımları ve gövde-kol birleşim bölgelerinde sargılı beton modelleri, diğer kısımlarında ise sargısız beton modelleri kullanılmıştır. Sargılı ve sargısız betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile bunların modellemede kullanılan çok doğrulu halleri Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5 - Sargılı ve Sargısız Beton Modelleri

U şekilli betonarme perdenin sonlu eleman ile modellenmesinde kullanılan beton malzemenin dayanım sınıfı C25/30 olarak belirlenmiş, betonun elastisite modülü ise 31000 MPa olarak alınmıştır. Donatı çeliği elastik modülü 200000 MPa, akma dayanımı 420 MPa ve akma sonrası teğet modülü 550 olacak şekilde iki doğrulu model olarak alınmıştır (Şekil 6).

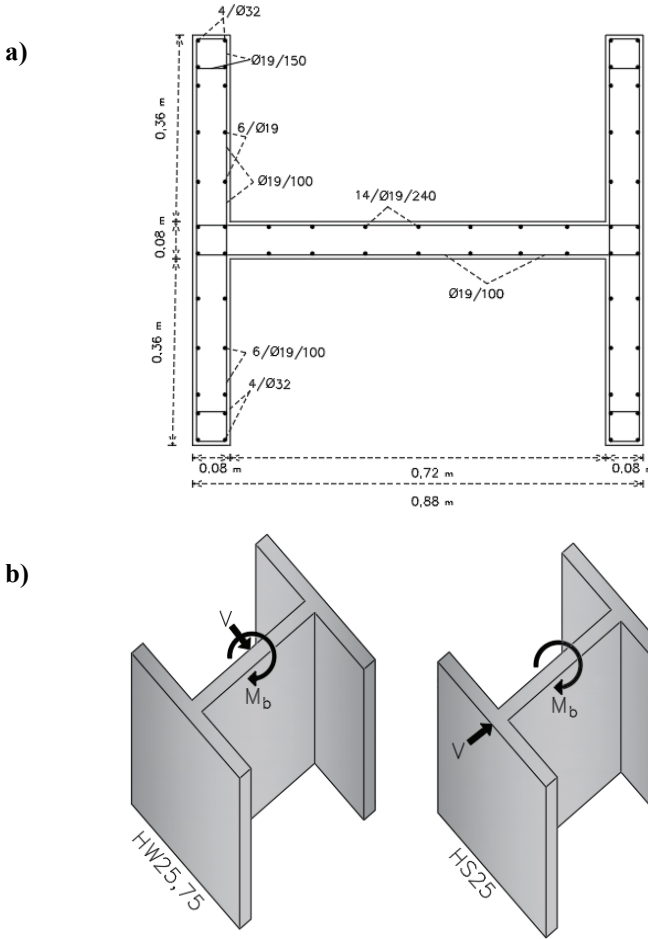


Şekil 6 - Çelik İçin Kullanılan Malzeme Modeli

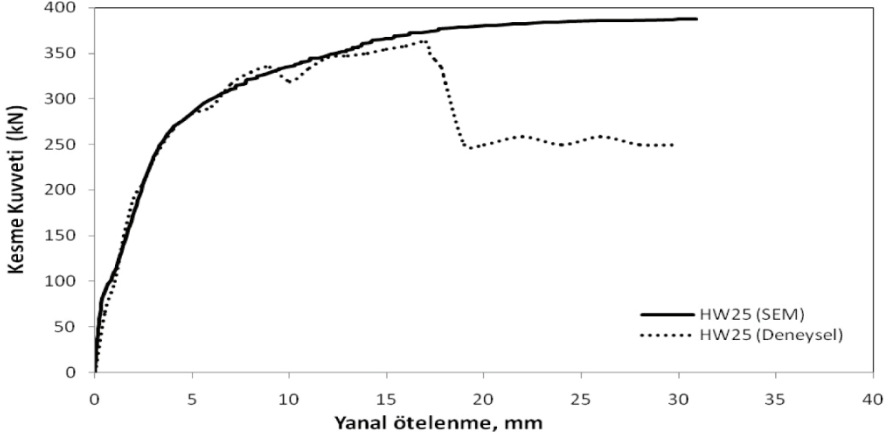
2.1. Kullanılan Sonlu Eleman Modelleme Yönteminin Güvenilirliği

U şekilli betonarme perdenin modellenmesinde kullanılan sonlu eleman modelleme yönteminin güvenilirliğinin gösterilmesi ve uyumluluğunun yapılması bu çalışma için oldukça büyük önem taşımaktadır. Bu bakımdan Maruta ve arkadaşlarının [5], aynı anda yatay yük ve burulmaya maruz bırakılan H şekilli betonarme perde için yaptıkları deneysel çalışma verilerinden yola çıkarak, perdenin sonlu eleman modellemesi yapmıştır. Deneysel veriler ile sonlu eleman analizlerinden elde edilen eğilme momenti-yanal ötelenme ilişkisi belirlenmiştir.

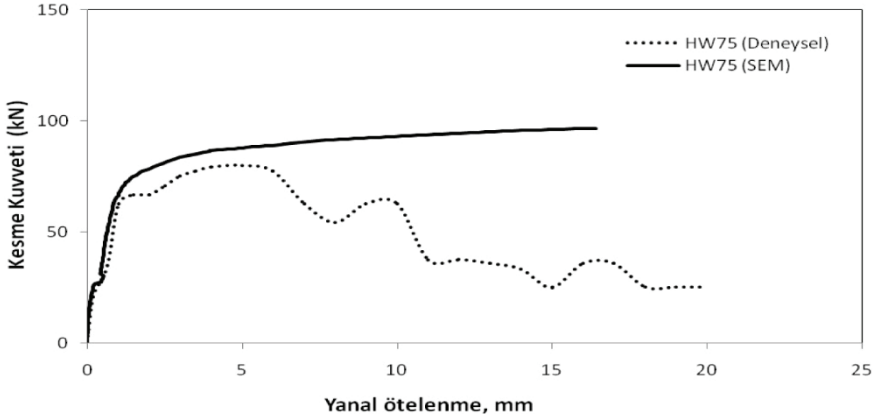
Maruta ve arkadaşları [5]'nin yaptıkları çalışmada HW25, HW75 ve HS25 olmak üzere 3 adet H şekilli betonarme perdeye ait olan donatı planı ile kesit geometrisi ve boyutları Şekil 7a'da, perdeye uygulanan eğilme ve burulma momentlerinin uygulanma yön ve doğrultuları ise Şekil 7b'de gösterilmiştir.



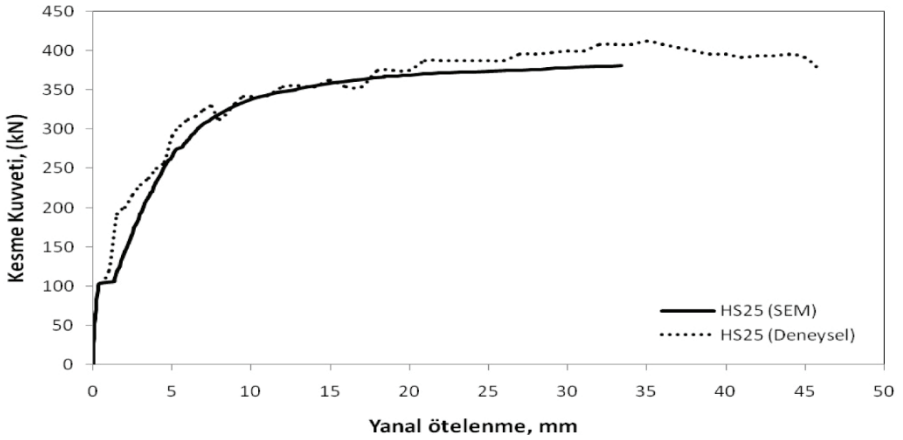
Şekil 7 - a) H Şekilli Perdenin Donatı Planı Ve Kesit Geometrisi[5] b) Eğilme Ve Burulma Momentlerinin Yön ve Doğrultuları



Şekil 8 - Kesme Kuvveti-Yanal Ötelenme İlişkisi (HW25)



Şekil 9 - Kesme Kuvveti-Yanal Ötelenme İlişkisi (HW75)

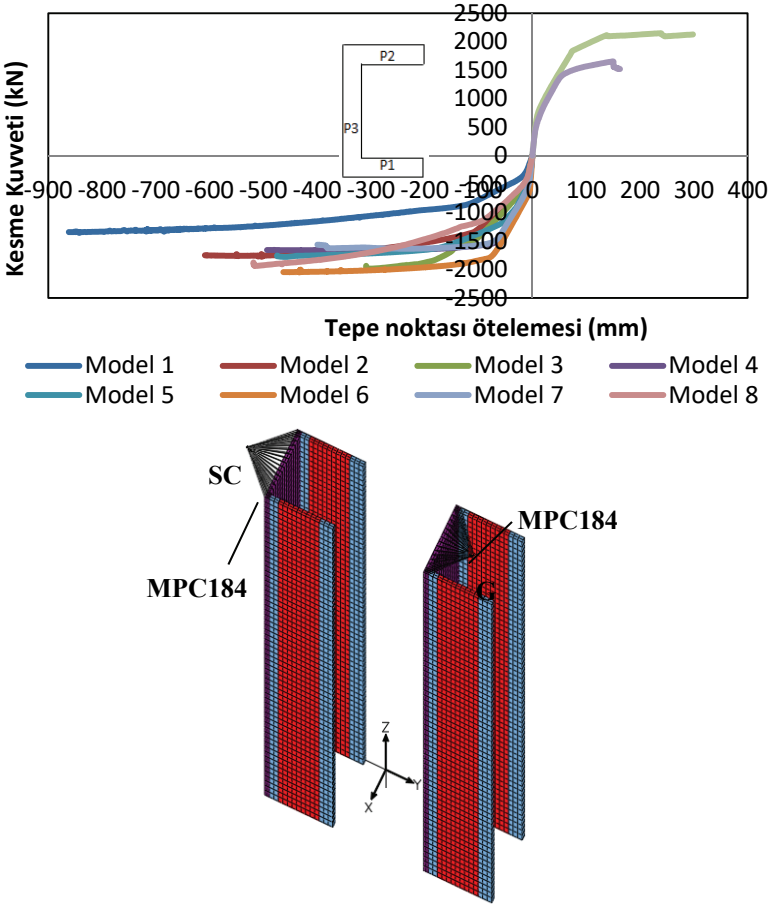


Şekil 10 - Kesme Kuvveti-Yanal Ötelenme İlişkisi (HS25)

Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da görüldüğü gibi HW25, HW75 ve HS25 perdelerinin hepsinde ulaşılan kesme kuvveti kapasitesi, deneysel verilerden elde edilen kesme kuvveti kapasitesine çok yakın sonuçlar vermektedir. Bu nedenle sonlu eleman modelleme yönteminin güvenilir olduğu ve U şekilli betonarme perdenin doğrusal ötesi analizlerinde gerçeğe yakın sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

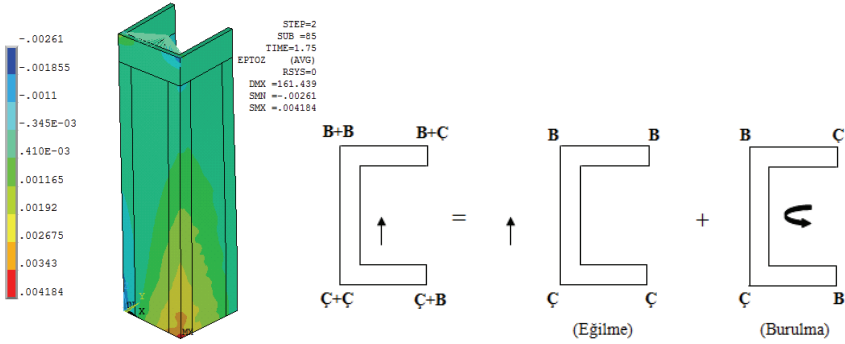
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

U şekilli betonarme perdenin en üst ucunda MPC184 uyum elemanının rijit kiriş özelliğinden faydalanılarak Şekil 11b'de gösterilen şekilde perdenin gövdesine kesit ağırlık merkezi ve kesit kayma merkezinden uygulanan kesme kuvveti ve eksenel kuvvet etkileri altında yapılan doğrusal olmayan analizler neticesinde her bir model için kesme kuvveti-tepe noktası ötelenme eğrileri çizilmiştir. Şekil 11a'daki ötelenme eğrileri, perdenin en üst ucunda yükün uygulandığı nokta için hesaplanmıştır.



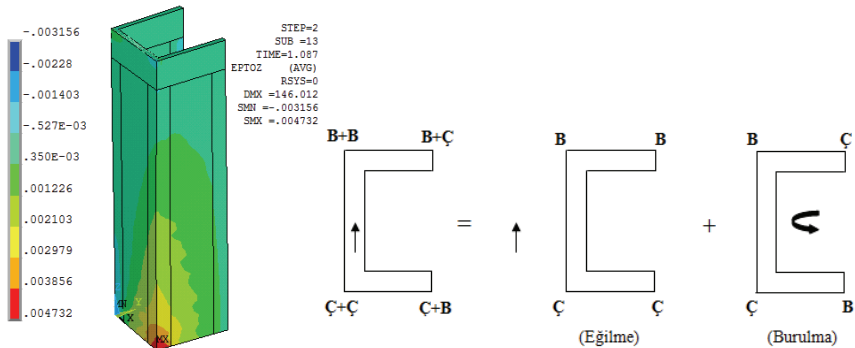
Şekil 11 - a) Model Yüklemelere Ait Kesme Kuvveti-Deformasyon Eğrileri
b) Kesme Kuvvetinin Perdeye Uygulanma Düzeni

Model 9 ve Model 10 yüklemelerinde uygulanan kesme kuvveti +y yönünde, Model 4 ve Model 5 yüklemelerinde -y yönünde, Model 1,2 ve 6 yüklemelerinde ise -x yönünde olmasından dolayı Şekil 11a'daki grafik elde edilmiştir. Model 1'de u şekilli betonarme perdenin en üst ucunda kesit ağırlık merkezine uygulanan kesme kuvveti, kesitte hem eğilme hem de burulma etkisi meydana getirmiştir. Yapılan doğrusal ötesi analiz sonucunda perdenin en alt kısmında P1 kolunun P3 gövdesi ile birleştiği bölgede birim şekil değiştirmenin 0,0041 değerine ulaştığı ve bu bölgede çekmeden dolayı donatıların aktığı belirlenmiştir. P2 kolunun P3 gövdesi ile birleştiği bölgede ise birim şekil değiştirmenin 0,0026 değerine ulaştığı, basınç etkilerinin yoğun olduğu ve bölgedeki betonun ezilme sınırına yaklaştığı görülmektedir (Şekil 12).



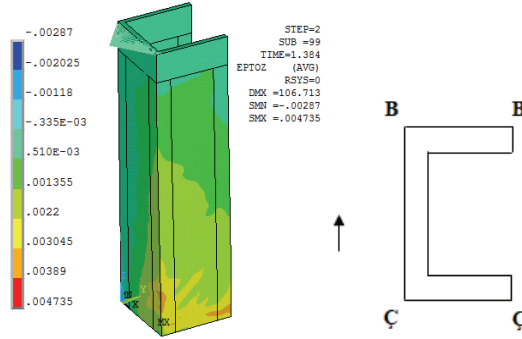
Şekil 12 - Yükleden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 1)

Model 2'de U şekilli betonarme perdenin en üst ucunda gövde kısmının tam ortasında bir noktadan uygulanan kesme kuvveti, kesitte çatlak oluşumu başlatmıştır. Perdenin en alt kısmında P1 kolunun P3 gövdesi ile birleştiği bölgede 0,0047 olan birim şekil değiştirme değeri çekme etkilerinin yoğun olduğunu göstermektedir. Bu bölgede donatılar akmıştır. P2 kolunun P3 gövdesi ile birleştiği bölgede ise basınç etkileri oluşmuş, birim şekil değiştirme değeri 0,0031 e ulaşarak betonun ezilme anına yaklaştığı görülmektedir. Kesitte oluşan burulma momentinin yönüne bağlı olarak P1 ve P2 kollarındaki basınç ve çekme bölgeleri değişim göstermektedir (Şekil 13).



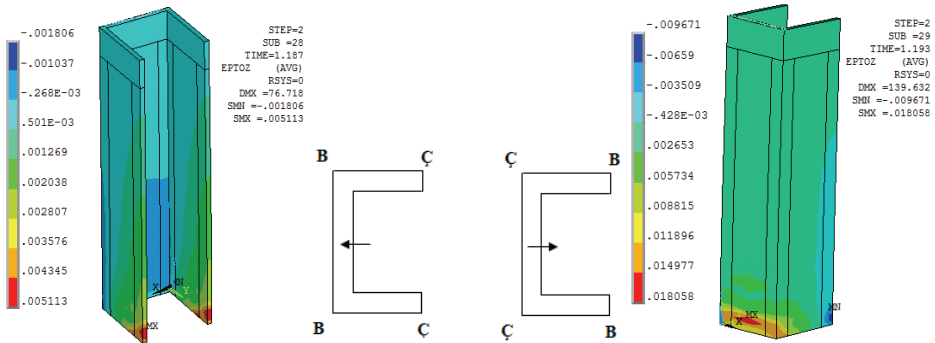
Şekil 13 - Yükleden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 2)

Model 6'da U şeklindeki betonarme perde, perdenin en üst ucunda, kesit kayma merkezinden -x yönünde kesme kuvveti etkisine maruz bırakılmıştır. Birim şekil değiştirme değeri perdenin en alt kısmında P1 kolunun P3 gövdesi ile birleştiği bölgede 0,0047 ye ulaşarak donatılar akmıştır. Bu bölgede çekme etkileri ön plana çıkmıştır. Perdenin P2 kolunun P3 gövdesi ile birleştiği bölgede ise birim şekil değiştirme değerinin 0,0028 olduğu görülmektedir. Bu bölgede basınç etkileri yoğun olarak görülmekte, beton ezilme sınırına henüz ulaşmamıştır. Model 6'da kesme kuvveti perdenin kayma merkezinden uygulanmış olması burulma etkisinin oluşmamasını sağlamıştır. Burulma etkisinin olmaması çekme ve basınç bölgelerinin daha düzenli dağıldığını göstermektedir. Kesitte sadece düz eğilme etkisi vardır (Şekil 14).



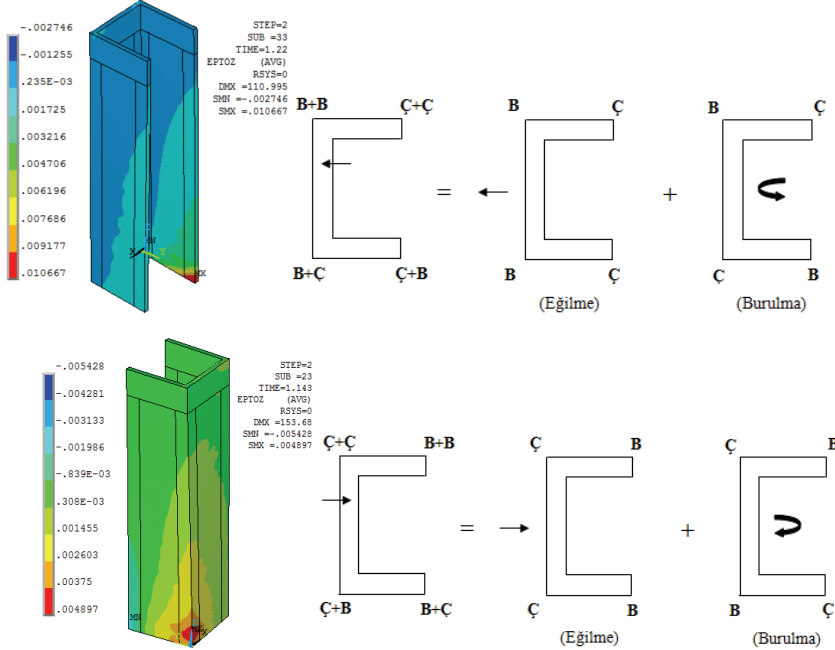
Şekil 14 - Yüklemeden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 6)

Model 4 ve Model 9'daki yüklemeler perdenin en üst ucunda tersinir olacak şekilde yapılmıştır. Model 4'de uygulanan kesme kuvveti -y yönünde etki etmekte ve perdenin en alt kısmında birim şekil değiştirme değeri 0,0051 değerine ulaştığı görülmektedir. P1 ve P2 kollarının uç kısımlarında çekme etkilerinin yoğun olduğu ve donatıların aktığı görülmektedir. Model 9'da ise kesme kuvveti y yönünde etki etmekte ve kol uçlarında basınç, gövde bölgesinde ise çekme etkileri oluşmaktadır. Birim şekil değiştirme perdenin P1 ve P2 kolu uç bölgesinde 0,0096 'ya ulaştığı ve betonun ezildiği belirlenmiştir. (Şekil 15).



Şekil 15 - Yüklemeden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 4 ve Model 9)

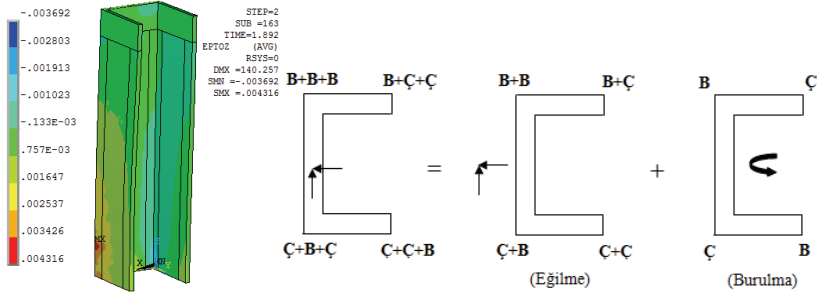
Model 5 ve Model 10'daki yüklemeler perdenin en üst ucunda tersinir olacak şekilde yapılmış ve kesitte burulma etkisi oluşması için kesme kuvveti perdenin ağırlık merkezinden $-x$ yönünde 1 m çekilerek uygulanmıştır. Model 5'de U şeklinli betonarme perdede $-y$ yönündeki kesme kuvveti etkisinde perdenin en altında P2 kolunun uç kısmında yoğun olmak üzere çekme etkileri oluşmaktadır. Burada birim şekil değiştirmenin 0,01 ile donatının akma sınırını aştığı görülmektedir. Model 10'da kesme kuvvetinin y yönünde uygulanması halinde perdenin en alt kısmında P2 kolu ile P3 gövde birleşim bölgesinde çekme etkileri oluşmakta, burulma momentinin etkisi ile çekme etkisi daha da artmaktadır (Şekil 16).



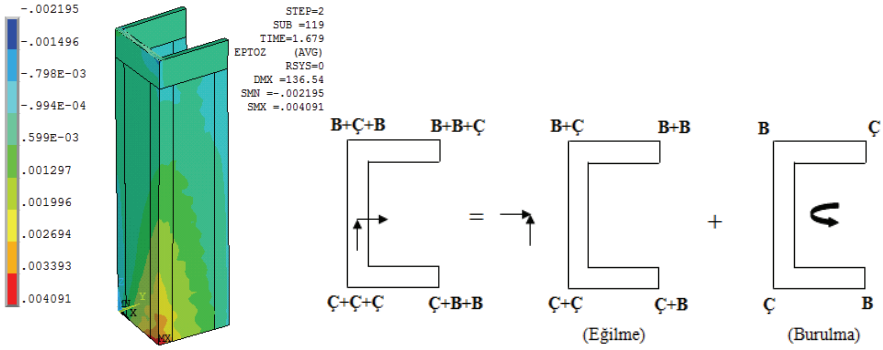
Şekil 16 - Yüklemeden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 5 ve Model 10)

Model 3'de perde kesitinde hem eğik eğilme durumu hem de burulma etkisi söz konusudur. Perdenin en alt kısmında P1 ve P2 kolu uç bölgesinde yoğun olmak üzere çekme etkileri oluşurken, birim şekil değiştirmenin 0,0016 olduğu belirlenmiştir. Bu anda uç bölge donatılarının akmadığı anlaşılmaktadır. (Şekil 17).

Model 8'in Model 3'den tek farkı y doğrultusunda uygulanan yükün yönüdür. U şeklinli perdenin en üst ucundan $-x$ yönündeki kesme kuvveti etkisi altında perdenin en alt kısmında P1 kolu ile P3 gövdesinin birleştiği bölgede çekme etkileri oluşmakta, birim şekil değiştirmenin 0,004 değerine ulaşması ile donatının aktığı belirlenmiştir. P2 kolu ile P2 kolunun P3 gövdesi birleşim bölgesinde basınç etkileri ön plandadır. Burada birim şekil değiştirme değeri 0,0021 olması betonun çatladığı ancak henüz ezilme sınırına ulaşmadığını göstermektedir (Şekil 18).

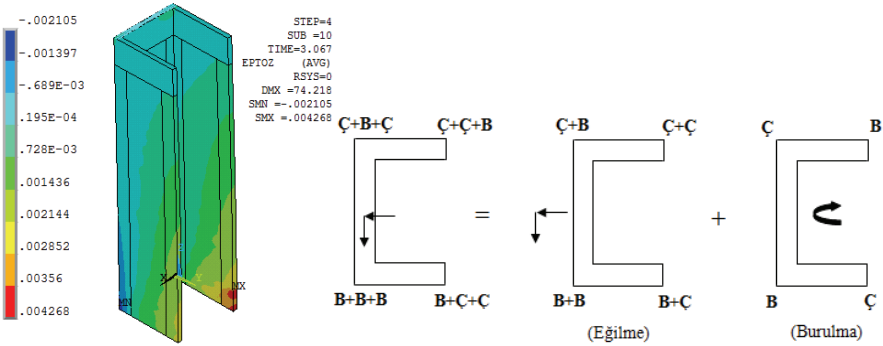


Şekil 17 - Yüklemeden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 3)



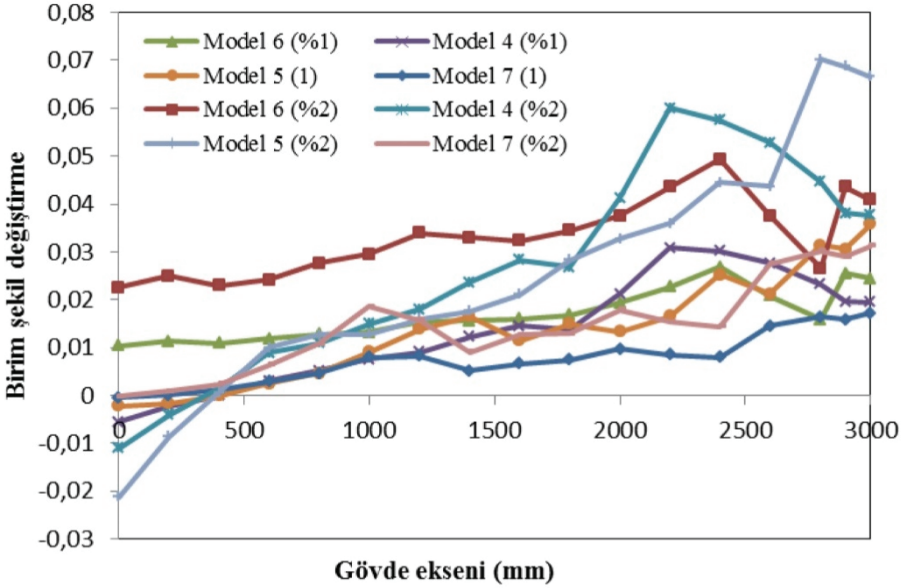
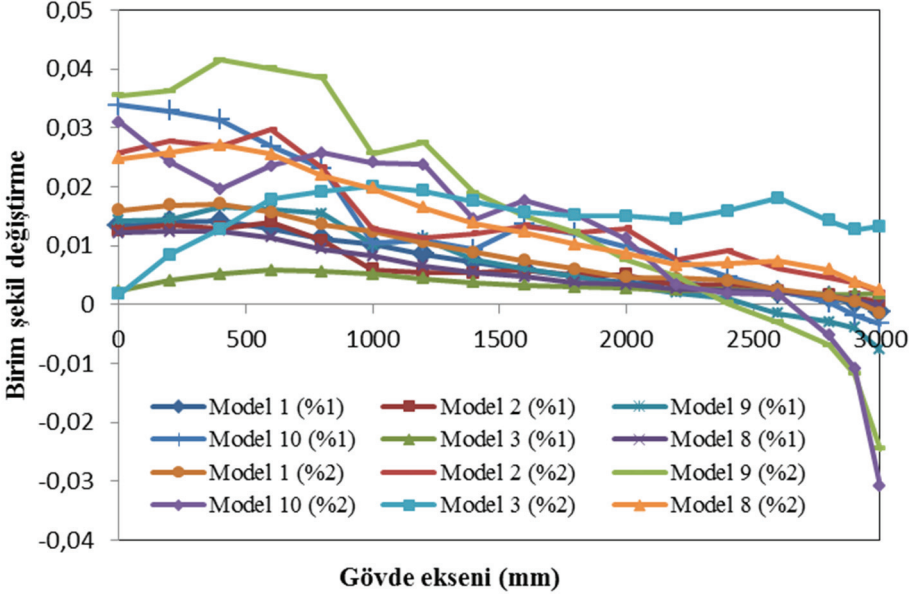
Şekil 18 - Yüklemeden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 8)

Model 7'de u şekilli betonarme perdenin en üst ucundan +x yönündeki kesme kuvveti etkisi altında P2 kolunda çekme etkisi oluşurken, P1 kolunun gövde ile birleştiği bölgede basınç etkisi meydana gelmektedir. -y yönündeki kesme kuvveti perdenin kol uçlarında çekme etkisi oluştururken, birim şekil değiştirmenin 0,0042 olması donatının aktığını göstermektedir (Şekil 19).



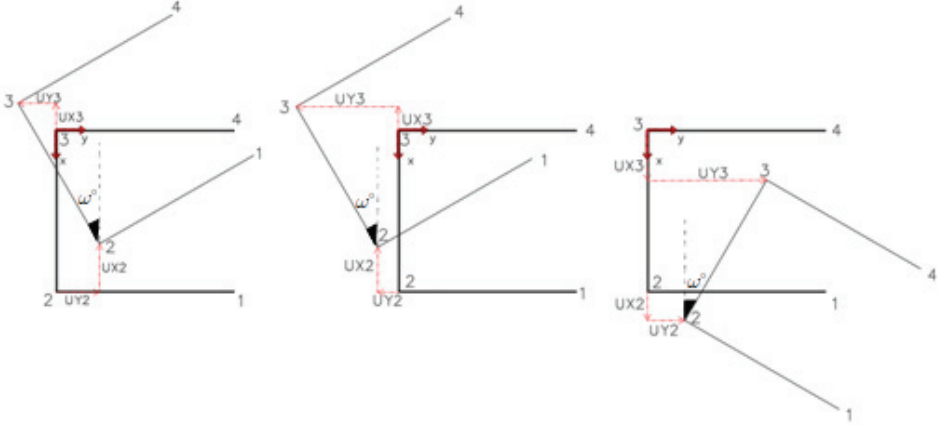
Şekil 19 - Yüklemeden Doğan Eğilme ve Burulma Etkileri (Model 7)

U şekilli betonarme perdelerin ANSYS'de yapılan doğrusal ötesi analizleri sonucunda perdede meydana gelen deformasyon şekillerini açıklamak bakımından her bir modelin perde en alt noktasından itibaren 200 mm yüksekliğindeki bölge üzerinde ölçülen ve hesaplanan birim şekil değiştirme dağılımları, %1 ve %2 ötelenme oranları için belirlenmiştir.



Şekil 20 - Birim Şekil Değişirme Dağılımları (%1 ve %2 Ötelenme Oranında)

U şekilli betonarme perdenin en üst kısmında Şekil 21'de gösterilen 1, 2, 3 ve 4 nolu düğüm noktalarında belirlenen ortalama ötelenmeler ile burulmada dönme açıları, ω° (ötelenmeler perdenin en alt kısmından itibaren 200 mm yüksekliğindeki P3 gövde bölgesinde birim şekil değiştirmenin 0,0038 değerine ulaştığı anda hesaplanmıştır) Tablo 1'de gösterilmektedir.



Şekil 21 - Ortalama Ötelenmelerin Doğrultuları ve Burulmada Dönme Açısı

Tablo 1 - Burulmada Dönme Açıları ve Ortalama Ötelenmeler

Model Adı	Burulma Dönme Açısı (ω°)	Ortalama Ötelenme (mm)		
		UX	UY	UZ
Model 1	1,613	-109,60	16,89	0,97
Model 2	1,210	-111,76	17,91	1,77
Model 6	0,55	-80,27	-5,34	6,06
Model 4	0	0,00	-74,77	6,37
Model 9	0	0,00	141,66	4,60
Model 5	1,253	-33,22	-55,77	4,23
Model 10	1,600	79,69	60,88	0,57
Model 3	1,015	-116,27	-3,50	3,28
Model 8	1,161	-99,77	27,47	1,30
Model 7	0,268	64,88	-244,10	23,57

3.1. Sonlu Eleman Modelinde Eğriliğin Tanımı

Eğilme ve eksenel kuvvet ya da yalnız eğilme etkisi altındaki bir kesitin davranışını belirlemek için gerçek malzeme davranışını temel alarak modellenmiş bir elemanın moment-eğrilik ilişkisi elde edilebilir.

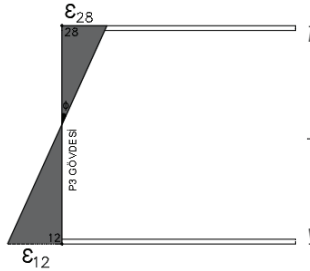
Moment-eğrilik ilişkisini oluşturan M_i ve K_i değerlerini iterasyon metoduyla hesaplayabilmek için denge ve uygunluk denklemlerinden faydalanılır.

Bir kiriş kesitinden faydalanılacak olursa, c (tarafsız eksen derinliği) değeri için varsayımlar yapılır, c değeri kuvvetler dengesi sağlanıncaya kadar değiştirilir. En dış liftteki beton birim kısalması, ε_{ci} için bir değer seçilir. Bilinen ε_{ci} ve c için çelik birim deformasyonları, ε_{si} bulunur. Bulunan ε_{si} değerlerinden donatıdaki gerilmeler ve donatı kuvvetleri tespit edilir. Beton basınç bileşkesi F_c hesaplanır. Dengeye ulaşıldıktan sonra, iç kuvvetlerin ağırlık merkezi etrafındaki momenti hesaplanarak M_i bulunur. Eğrilik ise Denklem (1) de belirtilen şekilde belirlenir.

$$K_i = \frac{\varepsilon_{ci}}{c} \quad (1)$$

U şekilli betonarme perdenin Şekil 22'de gösterilen sonlu eleman modelinde perde tabanında her bir yatay sıra katı eleman için hesaplanan eğrilik, P3 gövdesi boyunca gövde uç noktalarında 12 ve 28 nolu düğüm noktaları için belirlenen birim şekil değiştirme değerleri kullanılarak Denklem (2)'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

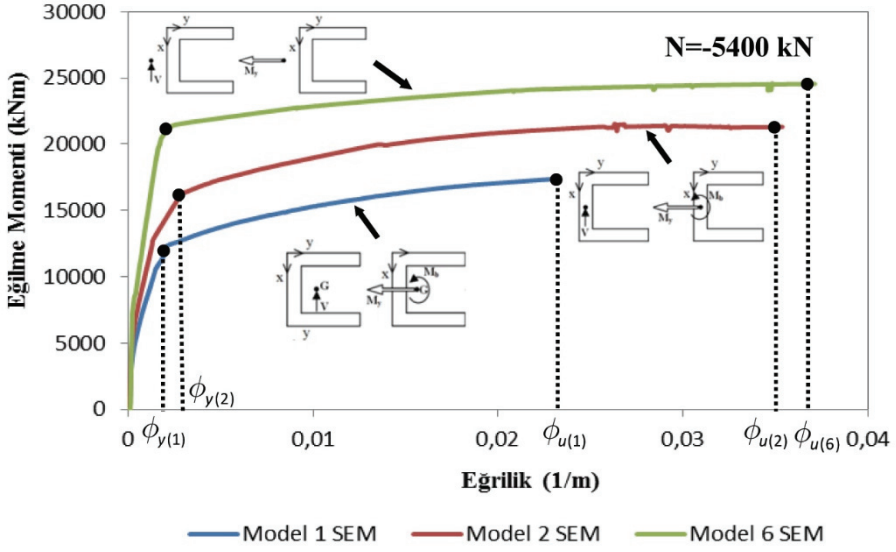
$$\phi = (|\varepsilon_{28}| + |\varepsilon_{12}|) / L \quad (2)$$



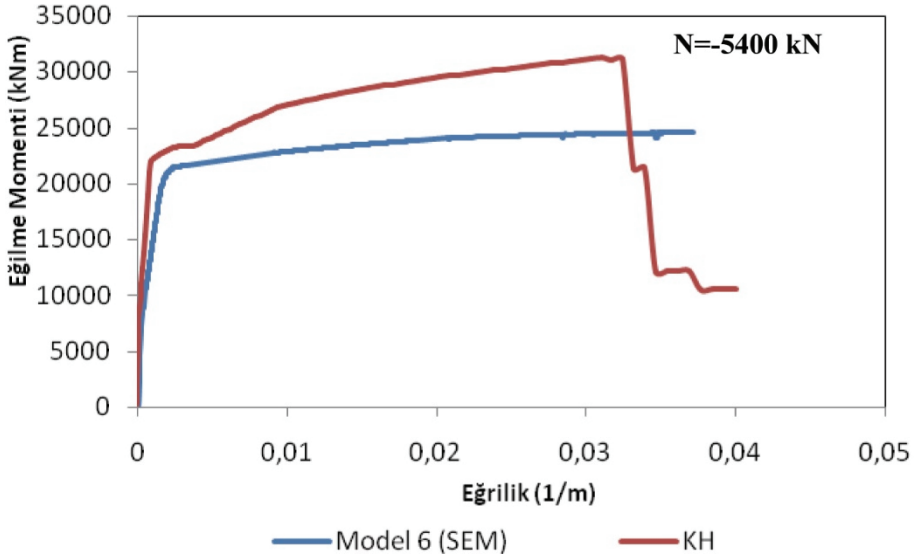
Şekil 22 - Sonlu Eleman Modelinde Eğrilğin Tanımlanması

Şekil 23, Şekil 24, Şekil 25, Şekil 26 ve Şekil 27' de model analizlere ait moment-eğrilik ilişkileri verilmiştir. Modellerin tümünde aksenal kuvvet ($N=5400$ kN) olarak $-z$ yönünde alınmıştır. Sonlu eleman analizinden elde edilen moment-eğrilik grafikleri (SEM), burulma etkisinin olmadığı modeller için kesit analizinden elde edilen moment-eğrilik grafikleri (KH) ile karşılaştırılmıştır. Burulma momenti sonucu kesitte meydana gelen çarpılma etkisinden dolayı “şekil değiştirmeden önce düzlem olan kesitin şekil değiştirmeden sonra düzlem kalması” hipotezi geçerliliğini kaybetmektedir. Bu sebepten dolayı düzlem kesit hipotezi kullanarak burulma momentinin olduğu modellerde eğrilik elde etmek kesit çarpılmasından dolayı uygun olmamaktadır. Sonlu eleman analizinden elde edilen değerlerin, kesit analizi ile elde edilenden farklı olması beklenen bir sonuçtur. Çünkü sonlu eleman modellemesinde

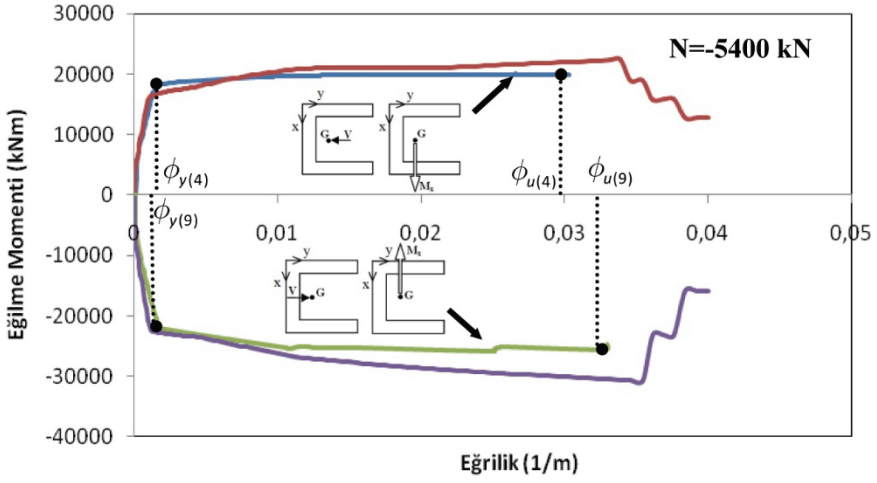
kullanılan Solid65 betonarme elemanı çatlama özelliğine sahiptir ve kesitin çatlama davranışından dolayı, taşıyabileceği maksimum moment değeri daha düşük olmaktadır.



Şekil 23 - Model Analizlere Ait Moment-Eğrilik İlişkileri

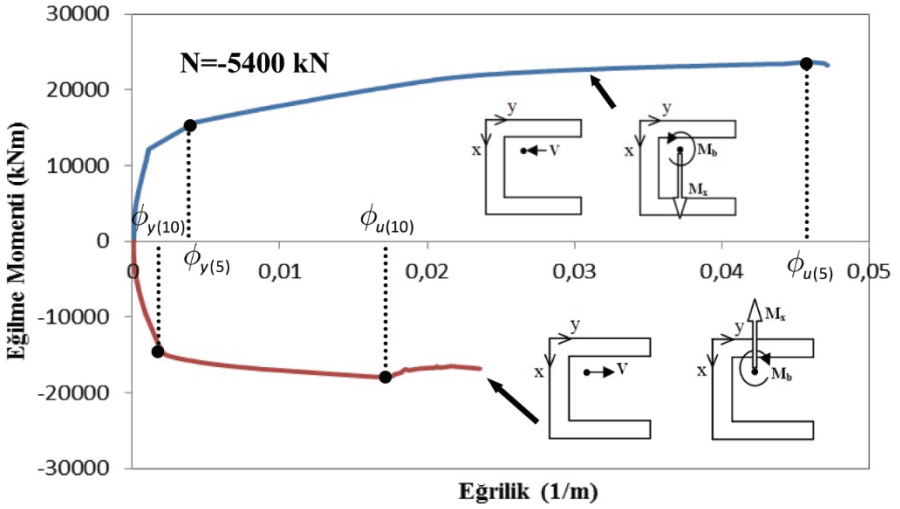


Şekil 24: Model analizlere ait moment-eğrilik ilişkileri



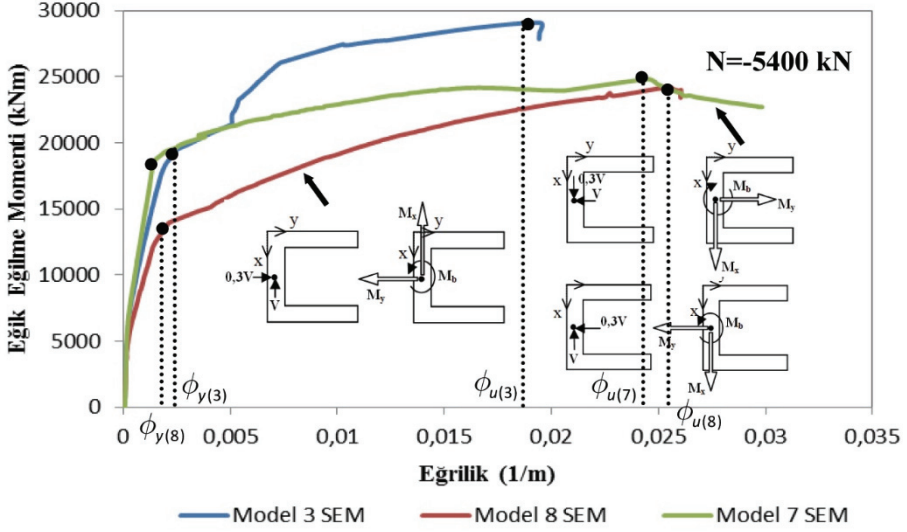
— Model 4 (SEM) — KH (Model 4 için) — Model 9 (SEM) — KH (Model 9 için)

Şekil 25: Model analizlere ait moment-eğrilik ilişkileri



— Model 5 SEM — Model 10 SEM

Şekil 26: Model analizlere ait moment-eğrilik ilişkileri



Şekil 27: Model analizlere ait moment-eğrilik ilişkileri

U şekilli betonarme perdenin doğrusal ötesi analizleri neticesinde sonlu eleman analizi ve kesit analizinden elde edilen eğrilik değerleri burulmanın olmadığı modeller için Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2 - Perdelerde Eğrilik Değerlerinin Karşılaştırılması

	SEM	KH	Model Adı
ϵ	$\epsilon_c = 0,046$		
Eğrilik (1/m)	0,030	0,033	Model 4
	0,035	0,037	Model 6
	0,033	0,035	Model 9

Eğilme etkisindeki bir kesitte, kesitin dayanımında önemli bir azalma meydana gelmeden oluşan en büyük eğrilik (ϕ_u), doğrusal davranışa yakın davranışın bitimi sayılan çekme donatısında akmanın meydana geldiğindeki eğrilik (ϕ_y) oranı, eğilme sünekliği olarak tanımlanır. Eğilme sünekliği Denklem (3)'de gösterilen şekilde hesaplanır [1].

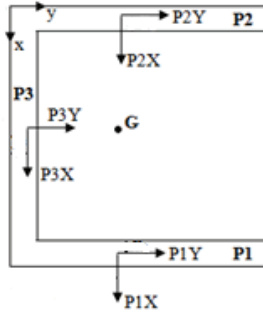
$$\mu = \phi_u / \phi_y \quad (3)$$

Sonlu eleman modeli yapılan U şekilli betonarme perdenin doğrusal ötesi analizleri neticesinde hesaplanan ve çizilen moment-eğrilik ilişkisi incelenerek her bir model için belirlenen eğilme sünekliği Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3 - SEM İçin Eğilme Sünekliğinin Karşılaştırılması

Model Adı	ϕ_y	ϕ_u	$\mu = \phi_u / \phi_y$
Model 1	0,0021	0,023	10,9
Model 2	0,0028	0,035	12,5
Model 6	0,0023	0,037	16,1
Model 4	0,0015	0,030	20
Model 9	0,0016	0,033	20,6
Model 5	0,0043	0,045	10,5
Model 10	0,0022	0,017	7,7
Model 3	0,0022	0,019	8,6
Model 8	0,0019	0,026	13,7
Model 7	0,0017	0,024	14,1

U şekilli betonarme perdenin verilen yükleme şekillerine göre yapılan doğrusal ötesi analizleri sonucunda perdenin kol ve gövde kısımlarının aldıkları kesme kuvvetleri ve bu kuvvetlerin pozitif yönleri Şekil 28'de gösterilmiştir (Tablo 4).



Şekil 28 - Kesme Kuvvetleri ve Yerlerinin Gösterilmesi

Deprem bölgelerinde gerek yapının güvenliğini sağlamak gerekse yer değiştirmeleri sınırlandırarak yapısal olmayan elemanlarda meydana gelecek hasarları azaltmak için perde elemanlara etkileyen yatay yüklerin perdenin kayma merkezlerinden uygulanması burulma etkisini ortadan kaldırması bakımından önemlidir. Bu açıdan U şekilli betonarme perdenin teorik olarak hesaplanan kayma merkezi ile farklı yatay yük ve burulma etkisi altında yapılan

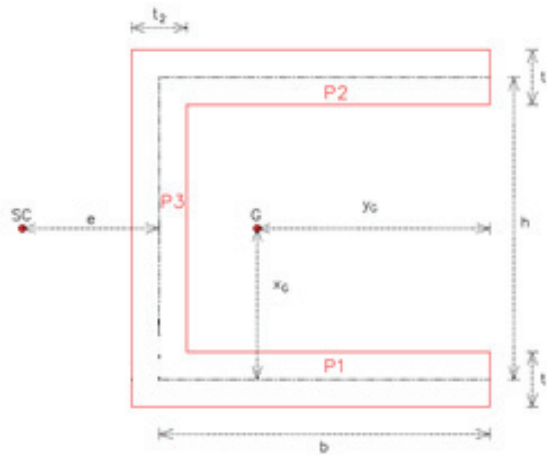
doğrusal ötesi analizler sonucunda hesaplanan kayma merkezi farklı ötelenme oranları için karşılaştırılmış (Tablo 5) ve Şekil 30'de gösterilmiştir.

Tablo 4 - SEM İçin Perde Kol ve Gövdesindeki Toplam Kesme Kuvvetleri

$\sum V_x$ (kN)			$\sum V_y$ (kN)			$\sum V_z$ (kN)			Tür
P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
2,01	46,85	1277,20	-262,3	23,54	238,74	-1297	5886,31	810,67	M1
100,32	107,50	1550,35	-108,26	-37,99	146,49	-2871,2	8618,02	-386,73	M2
-84,76	54,97	2064,43	484,39	-937,37	452,98	-4658,2	9474,16	584,02	M6
-33,97	33,97	0,0	670,54	670,54	322,44	-4295,8	-4295,85	13952,84	M4
-12,63	12,63	0,0	-1067,3	-1067,3	7,20	5138,44	5138,44	-4916,89	M9
51,92	147,8	-199,76	253,95	1206,04	294,23	-4250,6	-4870,33	14482,06	M5
-18,86	92,92	-74,06	-231,50	-1405,4	23,75	4427,22	4825,72	-3891,78	M10
-20,18	276,7	1709,94	361,16	259,33	452,48	-4283,	5431,83	4212,41	M3
51,0	147,7	1687,4	19,18	43,60	176,5	-3389	8124,6	620,02	M8
591,29	734,52	239,93	591,29	734,52	239,93	-1168,9	-4552,44	11082,5	M7

U şekilli betonarme perdenin kayma merkezi (SC)' nin teorik olarak hesabı Denklem (4)' e göre hesaplanmıştır [14] (Şekil 29).

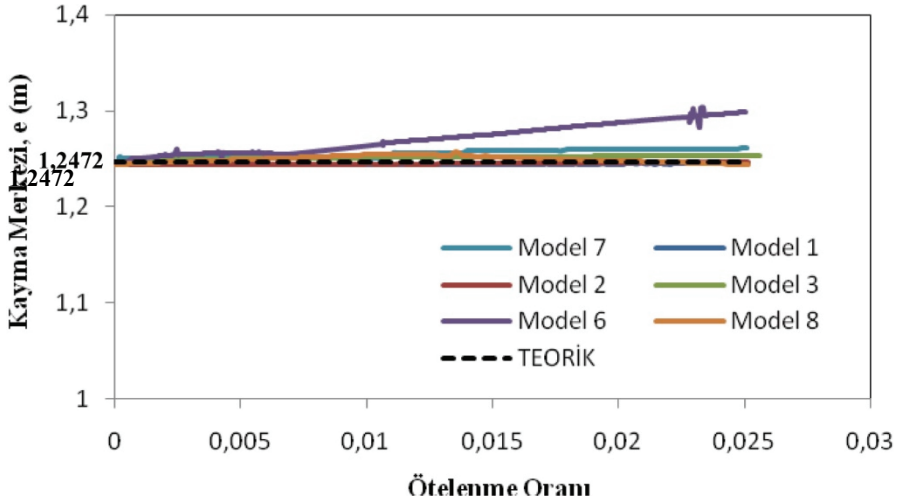
$$e = \frac{b^2 \cdot h^2 \cdot t_1}{4 \cdot I_x} \quad (4)$$



Şekil 29 - U Şekilli Betonarme Perde ve Kayma Merkezi

Tablo 5 - Kayma merkezinin değişimi

Model Adı	Teorik Kayma Merkezi (e), m	SEM Kayma Merkezi			
		%0,5 Ötelenme Oranı	%1 Ötelenme Oranı	%1,5 Ötelenme Oranı	%2 Ötelenme Oranı
Model 1	1,2472	1,2440	1,2441	1,2442	1,2445
Model 2		1,2441	1,2446	1,2447	1,2460
Model 6		1,2557	1,2657	1,2752	1,2874
Model 3		1,2504	1,2515	1,2526	1,2535
Model 7		1,2512	1,2611	1,2665	1,2725
Model 8		1,2489	1,2542	1,2523	1,2478



Şekil 30 - Kayma Merkezi-Ötelenme Oranı İlişkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada U şekilli betonarme perdelerde farklı yön ve değerlerdeki yatay yüklerin etkisi altında yapılan doğrusal olmayan analizlerin neticesinde meydana gelen deformasyon şekilleri araştırılmış, tasarımı etkileyen faktörler belirlenmiştir. Araştırmada sonlu eleman metodu kullanılarak modellenen perdelerin ANSYS yazılımında doğrusal ötesi analizleri yapılmış, elde edilen veriler SAP2000 programında yapılan kesit analizleri ile karşılaştırılmıştır. Araştırmada elde edilen bilgiler aşağıda açıklanmıştır.

Yalnız eğilme momenti etkisindeki U şekilli betonarme perdelerde (Model 6, Model 4 ve Model 9) doğrusal olmayan analizlerde meydana gelen deformasyon durumu, kesit analizi ile karşılaştırılabilirken, burulma momentinin de olduğu durumlarda kesit analizi perdedeki

deformasyon durumunu yansıtmakta yetersiz kalmaktadır. Şekil değiştirmeden önce düzlem olan kesitin şekil değiştirdikten sonra da düzlem kalması hipotezi burulma momentinin olduğu modellerde geçerliliğini kaybetmektedir. Birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde kesitte burulma momentinden dolayı çarpılma meydana gelmektedir. Bu nedenle kesit analizleri sadece eğilme etkisindeki perdeler için yapılabilir.

U şekilli betonarme perdelerde uygulanan yatay yük kayma merkezinden uzaklaştıkça kesitte oluşan burulma momenti artar. Burulma momentinin artması kesitin eğilme momenti kapasitesini azaltır. Model 6'da yatay yük perdenin kayma merkezinden uygulandığı için burulma momenti oluşmaz, bu nedenle eğilme momenti kapasitesi Model 1 ve Model 2' ye göre daha yüksektir.

Burulma etkisinin olmadığı yalnızca eğilme momenti etkisindeki U şekilli perdelerde (Model 6, Model 4 ve Model 9) sonlu eleman metodu (SEM) ile ulaşılan eğilme momenti kapasitesi, kesit hesabı (KH)'dan elde edilen eğilme momenti kapasitesine kıyasla çok yakın ya da biraz düşük olarak elde edilmiştir. Düşük olmasındaki sebep sonlu eleman modellemesinde kullanılan Solid65 betonarme elemanın yük altında çatlama özelliğine sahip olması ve betonun çatlama davranışdır.

Burulma etkisinin olmadığı perdeler için sonlu eleman metodu (SEM) ile elde edilen eğrilik değerleri kesit hesabı (KH) ile elde edilen eğrilik değerlerine kıyasla daha küçüktür. Yani; sonlu eleman metodu daha düşük süneklik kapasitesi vermektedir.

Burulma etkisinin olmadığı yalnızca eğilme momenti etkisindeki U şekilli perdelerde (Model 4 ve Model 9), perdeye etkiyen yatay yük, perdenin yatay yüke paralel doğrultudaki P1 ve P2 kolları tarafından eşit biçimde taşınmaktadır. Ancak burulma momentinin de etkili olduğu durumlarda, burulmanın yönüne bağlı olarak perde kol ve gövdesinin taşıyacağı kesme kuvvetleri değişim göstermektedir. Bu değişim sonlu eleman metodunda ölçülebilirken, kesit analizi ile belirlenememektedir.

U şekilli betonarme perdelerin farklı kesme kuvvetleri etkisi altında yapılan doğrusal ötesi analizlerinde de teorik durumda olduğu gibi perdenin kayma merkezi yeri değişmemektedir. Teorik olarak hesaplanan kayma merkezi yeri ile doğrusal olmayan analizlerde hesaplanan kayma merkezi yeri birbiri ile aynıdır. Şekil 30'da bazı model yüklemelerde kesitlerin kayma merkezlerinde görülen küçük değişikliklerin sebebinin sonlu eleman modelinde analiz sırasında yakınsama kriterine yapılan müdahaleden dolayı olduğu düşünülmektedir.

Doğrusal olmayan durumda uygulanan kesme kuvveti etkisinde meydana gelen eğilme ve burulma etkilerinden dolayı kesit geometrisi değişmesine rağmen kayma merkezi teorik durumda olduğu gibi sabit kalmaktadır. Buna göre kayma merkezi kesitin eğilme ve burulma davranışına bağlı olmayan bir konumdur.

Semboller

A_0 Etkin yer ivme katsayısı

$A(T)$ Spektral ivme katsayısı

B Basınç bölgesi

\mathcal{C}	Çekme bölgesi
e	Kayma merkezinin perde gövdesine uzaklığı
G	Perde ağırlık merkezi
I	Bina önem katsayısı
I_x	x yönündeki atalet momenti
KS	Kesit hesabı
ℓ_u	Perde uç bölgesinin uzunluğu
ℓ_w	Perdenin toplam uzunluğu
M	Perde moment kapasitesi
M_b	Burulma momenti
N	Normal (eksenel) Kuvvet
R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_a	Deprem yükü azaltma katsayısı
SEM	Sonlu eleman metodu
SC	Perde kayma merkezi
$S(T)$	Spektrum katsayısı
T_A, T_B	Spektrum karakteristik periyodları
T_1	Doğal titreşim periyodu
V	Perdeye etki eden kesme kuvveti
V_t	Toplam eşdeğer deprem yükü
W	Bina toplam ağırlığı
ε	Birim şekil değiştirme
ε_s	Donatı çeliği birim şekil değiştirmesi
ε_c	Beton birim şekil değiştirmesi
ω°	Burulmada dönme açısı
ϕ_u	Maksimum eğrilik
ϕ_y	Akma anındaki eğrilik

Kaynaklar

- [1] Celep Z., Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [2] Beyer K., Dazio A., Priestley M.J.N., Quasi-static cyclic tests of two u shaped reinforced concrete walls, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(7), 1023-1053, 2008b.
- [3] Brueggen B., Waugh J., Aaleti S., Johnson B., French C., Sritharan S., Nakaki S., Tests of structural walls to determine deformation contributions of interest for performance-based design, *Structural Engineering Research*, (249), 6, 1-16, 2007.
- [4] ACI 318-02, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2008
- [5] Maruta M., Suzuki N., Miyashita T., Nishioka T., Structural capacities of H-shaped RC core wall subjected to lateral load and torsion, *12WCEE2000*, 2000.
- [6] Wallace J.W., Moehle J.P., Ductility and detailing requirements of bearing wall building, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 118(6), 1625-1644, 1992.
- [7] İlgün A., Atımtay E., Çok katlı betonarme panel yapıların yatay yük altında davranışı: teorik ve deneysel araştırma, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 22(4), 11-28, 2007.
- [8] Ormancı D.D., Saygun A.I., Betonarme perdeli sistemlerin itme analizi için özelleşmiş yeni bir sonlu eleman, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3), 142-153, 2016.
- [9] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, 2007.
- [10] Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R., Observed stress-strain behaviour of confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 114 (8), 1827-1849, 1988.
- [11] Saatcioglu M., Razvi S.R., Strength and ductility of confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 118 (6), 1590-1607, 1992.
- [12] Kazaz İ., Gülkan P., Süneklik düzeyi yüksek betonarme perdelerdeki hasar sınırları, *İMO Teknik Dergi*, 387, 6113-6140, 2012.
- [13] Ersoy U., Özcebe G., Betonarme, Evrim Yayınevi, İstanbul, 59, 2001.
- [14] Bakioğlu M., Cisimlerin Mukavemeti, Beta Yayınevi, İstanbul, 2001.