Üç Katlı Betonarme Bir Çerçevenin Dinamik Benzeri Deneyleri ve Sayısal Simülasyonları

M. B. Mutlu, M.E. Ayatar, B. Binici, O. Kurç, E. Canbay, H. Sucuoglu, G. Ozcebe

Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü, Ankara

ÖZET:

Deney numunesi, Türk Deprem Şartnamesine göre tasarlanmış üç katlı bir prototip binadan seçilen ½ ölçekli tipik bir betonarme iç çerçevedir. Çerçeve, Duzce merkez için üretilmiş 3 adet deprem kaydına dinamik benzeri deney sistemi kullanılarak tabi tutulmuştur. Depremler, kaya zemin üzerinde 50 yılda %50 (D1) ve 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip (D2) iki tehlike seviyesi ile yumuşak zemin üzerinde 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip (D3) koşul için sentetik olarak üretilmiştir. Üretilen deprem kayıtları ardışık olarak sürekli dinamik benzeri deney metodu ile yapıya uygulanmıştır. Deneylerde, kat ötelenmeleri, kuvvetleri, birinci kat kolon alt dönmeleri ve iç kuvvetleri ile bir ve ikinci kat kiriş uç dönmeleri ölçülmüştür. Yapılan gözlemler ve elde edilen sayısal sonuçlar ışığında, D1 depreminde neredeyse hasar gözlemlenmediği, D2 depreminde kolon, kiriş ve birleşim bölgesi çatlama hasarı ile bazı elemanlarda donatı akması, D3 depreminde ise çatlama ve donatı akmasının yanı sıra beton ezilme hasarı olduğu belirlenmiştir. Deney çerçevesi iki değişik yöntem ile sayısal olarak modellenmiştir. Model 1, Opensees Simulasyon platformu ile çubuk elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. Model 2 ise iki boyutlu sonlu eleman modeli olup tüm çerçevenin düzlemsel gerilme elemanları ile sonlu eleman ağına bölünmesyle elde edilmiştir. Bu modelde betonarme döner çatlak modeli ile ele alınmış, çelik donatı çubukları ise standart plastisite ile modellenmiştir. Yapılan analiz sonuçları birinci modelin deney sonuçlarına göre oldukça rijit bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. İkinci model sonuçları ise deney sonuçları ile kabul edilebilir şekilde örtüşmektedir. Bu sonuçların en büyük sebebi düğüm noktalarının deformasyonlarının kat ötelenmelerine olan katkısının Model 1 ile dikkate alınmaması Model 2 ile ise daha doğru bir şekilde yansıtılmasıdır. Sonuçlar, hem yerel hem global eleman istemleri bazında tartışılmıştır.

1.GİRİŞ:

Çalışma, betonarme yapıların performans seviyelerini dinamik benzeri deney sonuçlarını kullanarak irdelemeyi ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) 'te önerilen performans değerlendirme yöntemlerini geliştirmeyi amaçlayan bir proje kapsamında elde edilen ilk deney sonuçlarını ve ilgili sayısal simülasyonları sunmaktadır. 2007 yılında yürülüğe giren yeni deprem yönetmeliği ile ülkemizde performansa dayalı tasarım kurallarına geçiş yapılmıştır. Bu bağlamda hem yeterli hem de yetersiz yapılar için yönetmelikte önerilen yöntemler ile uyumlu performans sınırlarının deneysel veriler ışığında irdelenmesi gerektiği düşünülmüştür. 2010 yılında bir TÜBİTAK projesi kapsamında başlatılan ve ODTÜ-AFAD işbirliği ile yürütülen bu çalışmada, betonarme çerçeve-duvar sistemleri üzerinde dinamik benzeri deneyler gerçekleştirilmektedir. Burada sonuçları ve detaylı irdelemesi sunulan deneyler proje kapsamında gerçekleştirilen ilk deney numunesini içermektedir.

2.DENEY NUMUNESİ

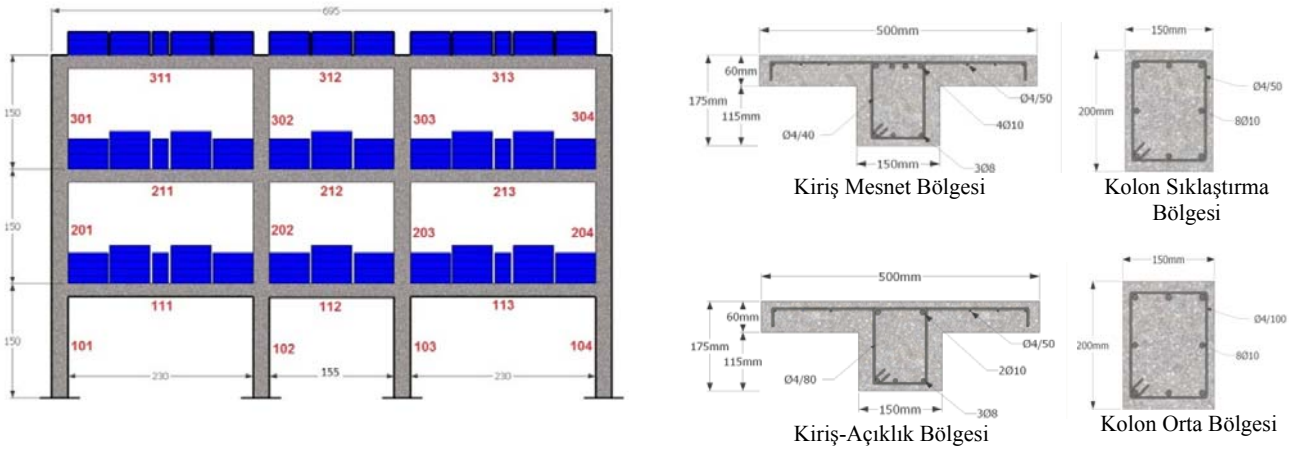
Deney numunesi birinci deprem bölgesinde yer alan üç katlı bir betonarme prototip bina tipik iç açıklığının ½ oranında ölçeklendirilmesi ile elde edilmiştir. Prototip binada kolon ve kirişlerin boyutlandırılması ile boyuna donatı miktarları 2007 Türk Deprem Yönetmeliğine göre yapılmıştır. Ayrıca, kiriş enine donatı oranları Deprem Yönetmeliği kurallarını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Kolon enine donatı deyatları ise Deprem Yönetmeliğindeki kurallara nazaran iki önemli farkla tasarlanmıştır. Birinci fark, sargı bölgelerinde etriye aralığının yönetmelikte sunulan azami aralığa uyumlu olmasına karşın deprem çirozlarının kullanılmamasıdır (Şekil 1). İkinci önemli fark ise kolon orta açıklığındaki kesme kapasitesinin eğilme kapasitesi ile uyumlu kesme kuvveti isteminin %75'i olmasıdır. Deprem Yönetmeliğine göre enine donatı

miktarı açısından yetersiz olan kolonlar gevrek olarak sınıflandırılmaktadır. Buna karşın ASCE-SEI-41 (2006), benzer durumdaki kolonlar için orta sünekliğe sahip eğilme-kesme göçmesine maruz kalacak kolon tanımı getirmektedir. İşte bu bağlamda, bu numunenin denenmesindeki amaçlar: 1- Boyut açısından yeterli ancak kesme donatısı açısından yetersiz kolonlara sahip bir betonarme çerçevenin süneklik düzeyini incelemek, 2- Deprem çirozlarının sargı etkilerinin sistem davranışına katkılarını belirlemek, 3- Deprem seviyeleri, deformasyon ve hasar ilişkilerine dair deprem yönetmeliğini gerçeklemede kullanılabilecek deneysel veri oluşturmak olarak sıralanabilir.

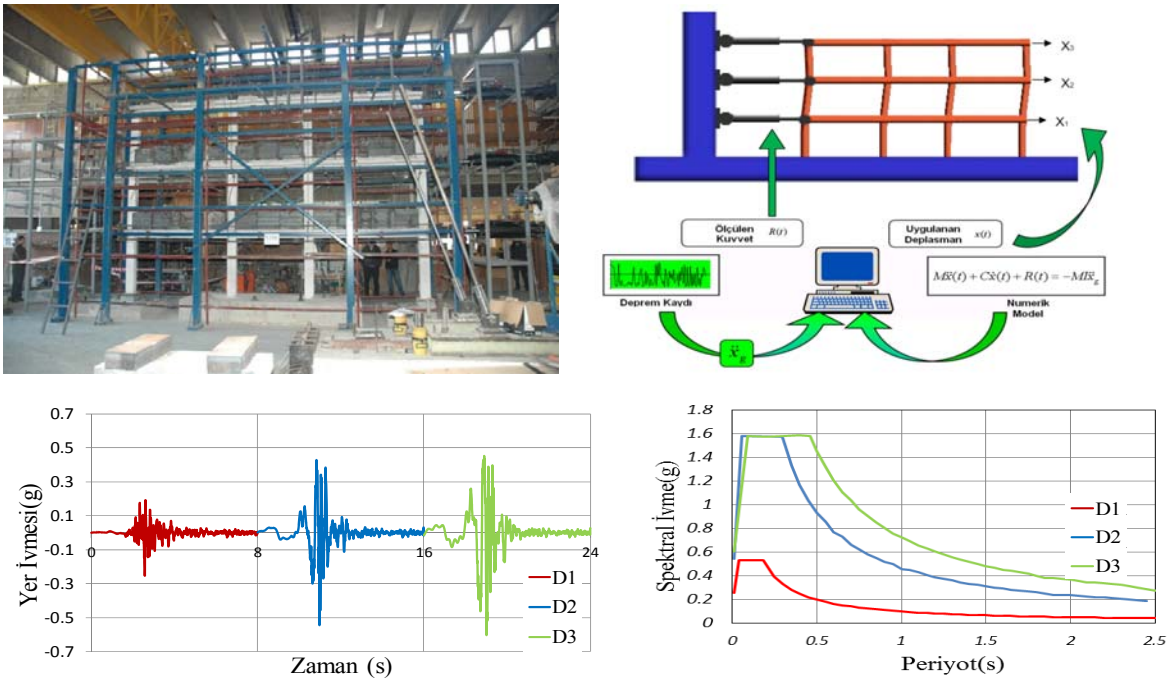
Test edilen çerçeve ve eleman detayları Şekil 1'de sunulmaktadır. Tüm elemanlardaki ortalama beton basınç dayanımı 20 MPa, ortalama boyuna donatı akma dayanımı 434 MPa, kopma dayanımı 630 MPa, enine donatı akma dayanımı 250 MPa, kopma dayanımı ise 370 MPa'dır. Üç yatay serbestlik dereceli düzlem çerçeve deneyi Molina ve diğ. (1999) tarafından önerilen sürekli dinamik benzeri deney sistemi ile denenmiştir. Dinamik benzeri deney yaklaşım özeti Şekil 2'de sunulmaktadır. Buna göre, uygulanan ivme zaman kaydı için üç serbestlik dereceli sistemin dinamik denge denklemi adım adım integrasyon metodu ile numerik olarak çözülmüş ve deplasman talepleri hidrolik krikolar vasıtasıyla yapıya uygulanmıştır. İvme-zaman serileri Düzce merkez için hazırlanmış sahaya özel deprem spektrumlarına uygunlaştırılmış deprem kayıtlarıdır. Deprem kayıtları (Şekil 2), kaya zemin üzerinde 50 yılda aşılma olasılığı %50 (D1) ve %10 (D2) olmak üzere iki tehlike seviyesine ek olarak yumuşak zemin üzerinde 50 yılda aşılma olasılığı %10 (D3) olan tehlike seviyesi için belirlenmiştir.

Düşey yükler yapı üzerine çelik bloklar vasıtası ile uygulanmıştır. Dinamik benzeri deneyler için kullanılan numerik kütle matrisi bu yük miktarları ile uyumlu olarak her kata konsantre olarak düşünülmüştür. Deney numunesi çevresindeki çelik çerçeve sistemi, numunenin düzlemsel olarak davranmasını zorlamak ve eksenel göçme anında düşey blokların devrilmesini engellemek maksatları ile inşa edilmiştir.

Deneylerde ilk kat kolon alt uç dönmeleri (iki adet LVDT yardımı ile), bir ve ikinci kat kiriş uç dönmeleri, kat deplasmanları ve kat kuvvetleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları aşağıdaki bölümde detaylı olarak sunulmakta olup deney çerçevesinin performans değerlendirmesinde büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. *Deney Çerçevesi ve Kesit Detayları*



Şekil 2. *Deney Yöntemi, Deprem Kayıtları ve İvme Spektrumları*

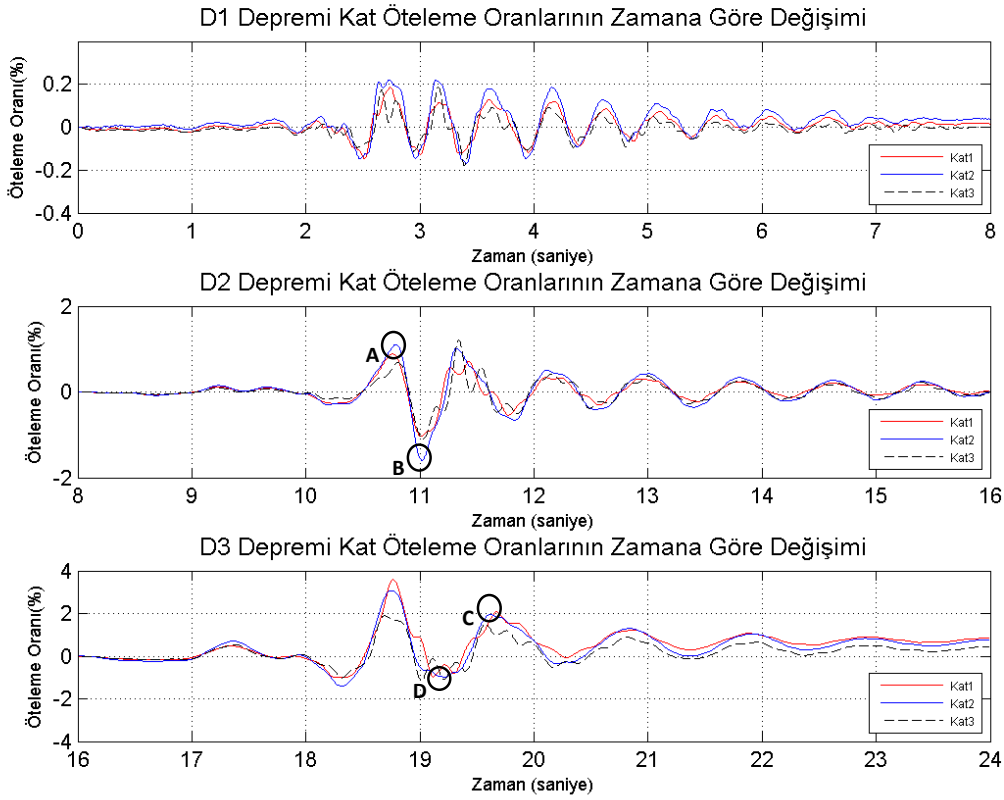
3.DENEY SONUÇLARI

Numuneye ardışık olarak uygulanan D1, D2 ve D3 depremleri sonucunda elde edilen kat öteleme oranlarının zamana göre değişimi Şekil 3'te, her bir deneyde gözlemlenen kritik hasar fotoğrafları Şekil 4'te, kat kesme kuvveti-kat ötelenme grafikleri Şekil 5'te, eleman uçlarında ölçülen maksimum dönme istemleri ise Şekil 6'da sunulmaktadır.

Uygulanan D1 depremi sonrası, numune üzerinde herhangi bir hasar gözlemlenmemiş, maksimum çatı deplasmanı 8 mm olarak ölçülmüştür. Yapının elastik limitler içerisinde davrandığı söylenebilir. Bu nedenle, bu deney için numunenin hasarsız olduğu ve hemen kullanım performans kriterini sağladığı belirtilebilir.

Gerçekleştirilen D2 deprem deneyi, azami % 1.5 kat ötelemesi talebi yaratarak numuneye bir miktar hasar vermiştir. Gözlemlenen en önemli hasar, kolonlarda meydana gelen eğilme çatlakları ve birleşim bölgelerinde oluşan eğik çatlaklardır (Şekil 4). Bu hasar, yapının D2 depremi altında sınırlı hasar aldığını göstermektedir. Gözlemlenen çatlak genişlikleri donatı akması meydana gelmiş olabileceği izlenimi uyandırmamaktadır. Eleman uçlarında oluşan dönme istemleri (Şekil 6) % 0.7 seviyesinin altında kalmakta olup herhangi bir plastik mafsallaşma gözlemlenmediğine işaret etmektedir. Gözlemlenen hasar yapıda ciddi bir talep yaratmadığından yapının hemen kullanım performans seviyesini sağladığı söylenebilir.

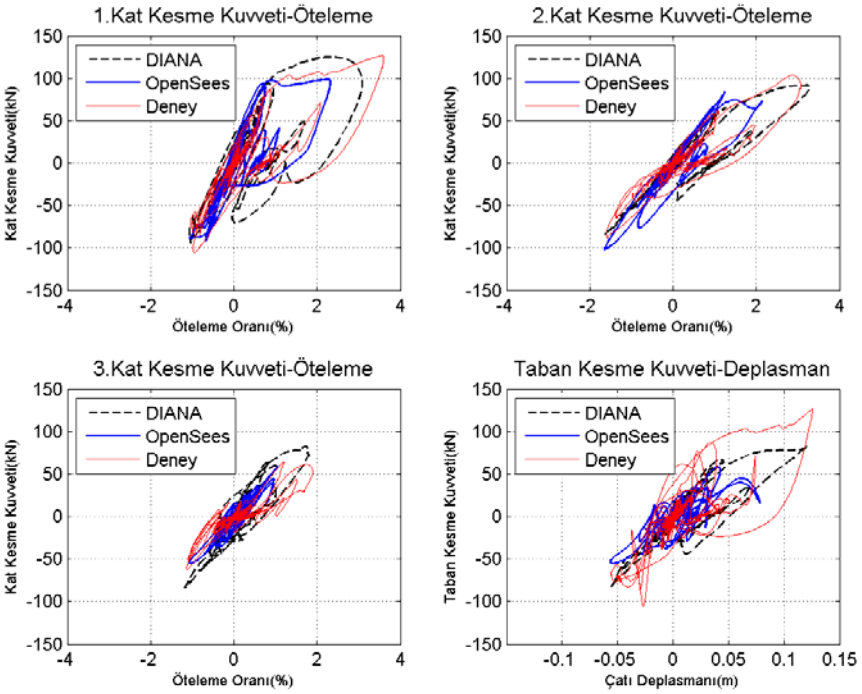
Gerçekleştirilen D3 deprem deneyi azami %3.5 kat ötelemesi talebi yaratarak numuneye ciddi biçimde hasar vermiştir. Gözlemlenen en önemli hasar, kolonlarda meydana gelen eğik çatlaklar, birinci kat kolon alt uçlarında gözlemlenen beton kabuk dökülmesi, birleşim bölgelerinde oluşan eğik çatlaklar ve mevcut çatlakların genişlemesidir (Şekil 4). Eleman uçlarında oluşan dönme istemleri azami %4 seviyesine ulaşmakta olup elemanlarda ciddi plastk dönme talebi olduğuna işaret etmektedir. Bu bağlamda yapının ileri hasar bölgesinde olup göçmeye gelmediği ancak can güvenliği performans seviyesini geçtiği söylenebilir.



Şekil 3. *Kat Ötelemelerinin Zamana Göre Değişimi (D1,D2 ve D3 Depremleri)*

- A - - B - - C - - D -

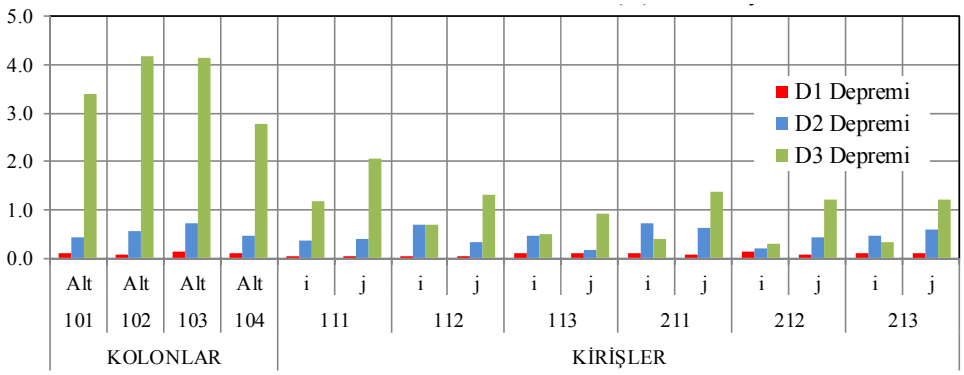
Şekil 4. *Gözlemlenen Hasarlar (D2 ve D3 Depremleri)*



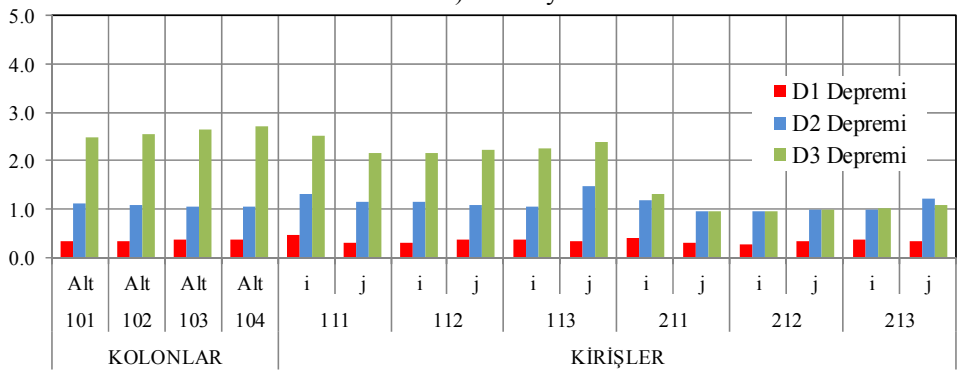
Şekil 5. *Kat Kesme Kuvvetleri-Öteleme Oranları*

4.SAYISAL SİMÜLASYONLAR

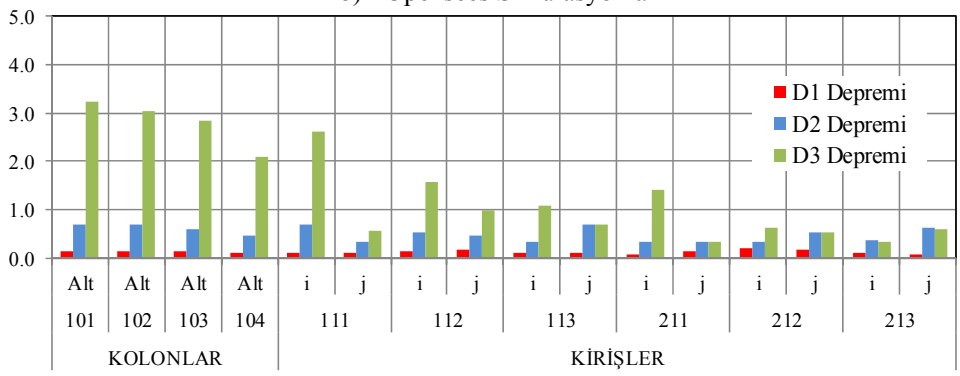
Deney sonuçlarının daha iyi irdelenebilmesi ve ölçüm alınamayan bölümlerdeki davranışın sayısal simulasyonlarda ne derece başarılı tahmin edilebileceğinin gözler önüne serilebilmesi amacıyla, deney elemanının, iki farklı yöntemle sayısal modelleri oluşturularak yapılan deneylerle uyumlu olarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Birinci model, OpenSees Simulasyon Platformu kullanılarak, integrasyon noktalarında doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ile tariflenmiş liflere bölünmüş, ve Bernoulli-Euler hipotezine göre davranan kuvvet bazlı formüle edilmiş çubuk elemanlarıyla oluşturulmuştur. Beton ve çelik için tersinir doğrusal olmayan davranış, sırasıyla Kent-Park beton sargılı modeli ve kinematik pekleşme modelleri ile dikkate alınmıştır (Şekil 7). Analizler ardışık deprem hareketleri için gerçekleştirilmiş ve deneysel olarak ölçülen tüm istem parametreleri analizlerle belirlenerek karşılaştırma yapılmıştır. Çerçeve elemanlarının kullanıldığı bu analizlerdeki en önemli sınırlama, eleman ve birleşim bölgelerindeki kayma deformasyonlarının ihmal edilmesidir. Kayma deformasyonlarının numune davranışı üzerindeki etkilerini dikkate almak maksadıyla izlenecek iki önemli yol bulunmaktadır. Bunlardan ilki çerçeve elemanlarının kayma deformasyonlarını hesaba katan Timoshenko kiriş teorisi ile modellenmesi ve basitleştirilmiş bir boyutlu plastisite modellerinin bünye denklemi olarak kullanılması (örneğin Sarıtaş 2006), diğer yöntem ise iki veya üç boyutlu sonlu eleman analizleri ile geometrik etkilerin doğrudan modellere dahil edilmesidir (örneğin Noguchi, H. and Kashiwazaki T. 2007). Bu çalışmada ikinci metot seçilerek doğrudan iki boyutlu sonlu eleman analizleri Diana (2008) programı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Analizlerde düzlemsel gerilme elemanları ile yedirilmiş donatı modellemesi tekniği kullanılmıştır. Beton davranışı döner çatlak modeli (Selby ve Vecchio 1991) ile ifade edilmiş beton çekme davranışı için elastik gevrek, basınç davranışı için ise nonlineer parabolik model kullanılmıştır. Sargı etkisi Hsieh-Ting-Chen akma kriteri ile dikkate alınmıştır. Basınç ve çekmede beton için yükleme boşaltmalar orijin noktasına dönen sekant modellemesi ile gerçekleştirilmiştir. Çelik donatı için ise 3 doğrulu kinematik pekleşme modeli tercih edilmiştir. Her iki modelde de deneyle uyumlu olarak %5 sönüm kullanılmıştır.



a) Deney

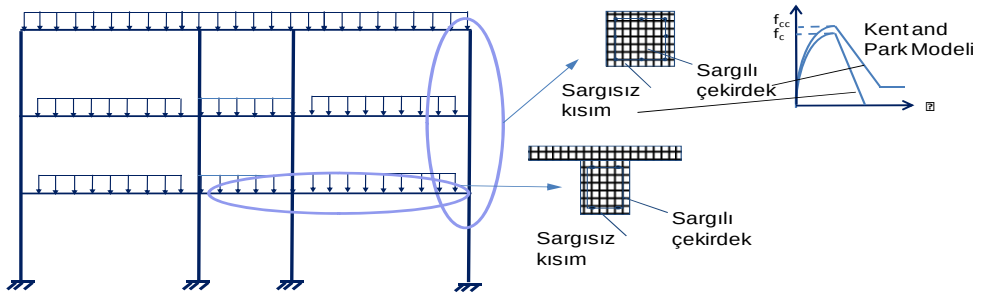


b) Opensees Simulasyonları

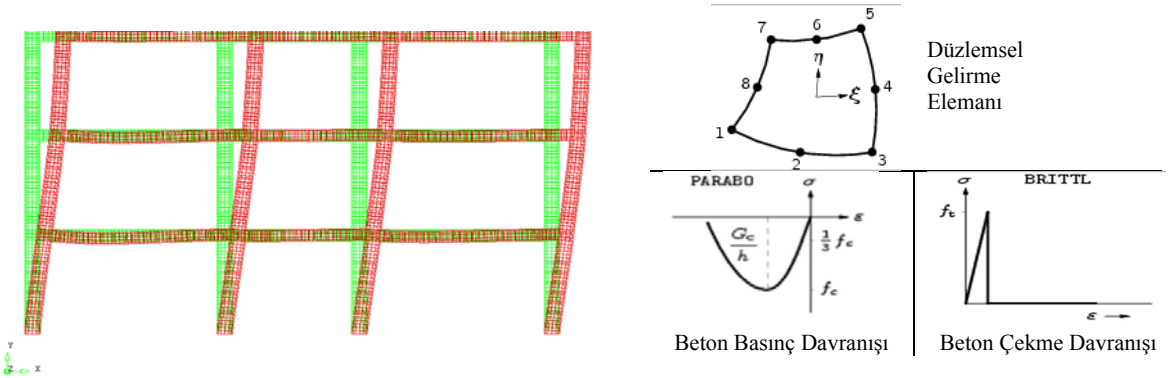


c) Diana Simulasyonları

Şekil 6. *Eleman Uç Dönme İstemleri*

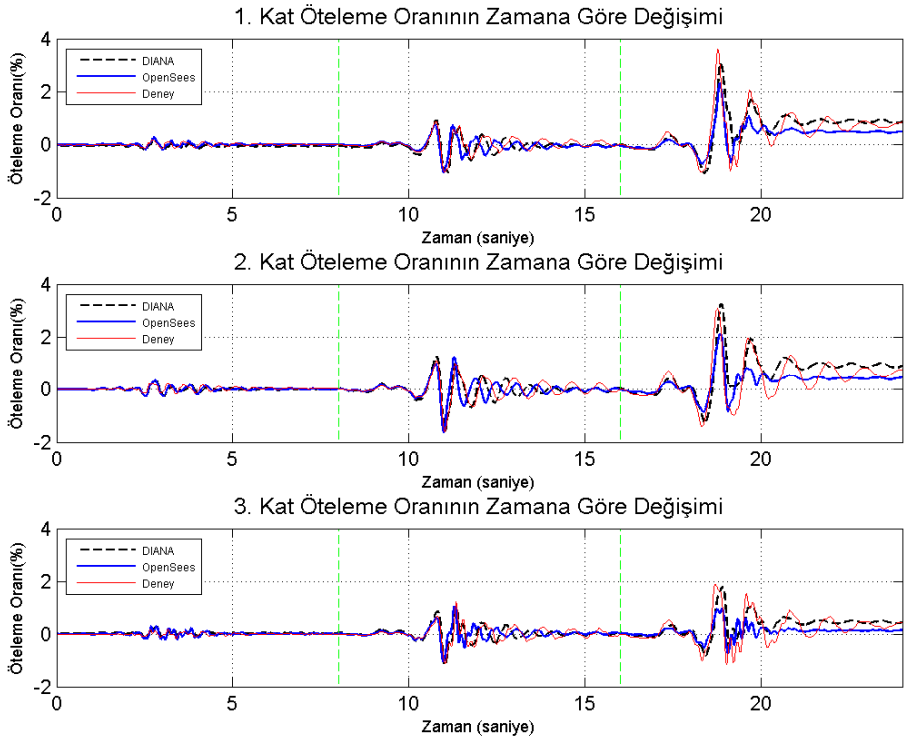


Şekil 7. *OpenSees Çubuk Eleman Modeli*



Şekil 8. DIANA Sonlu Eleman Modeli

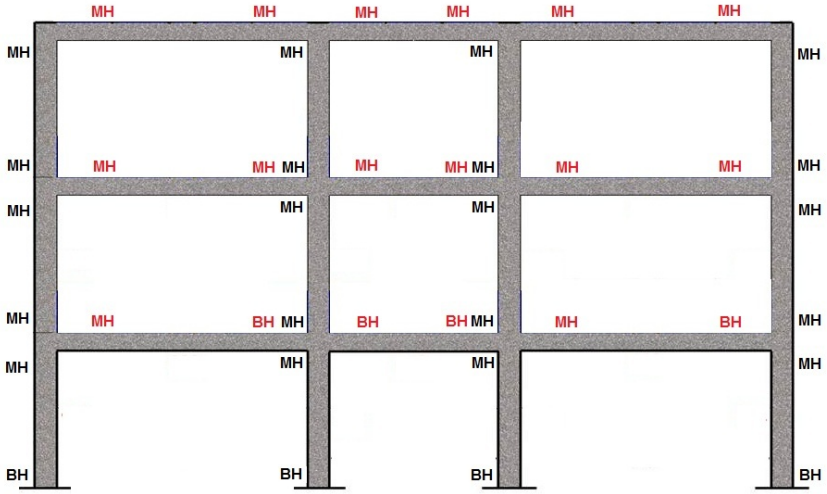
Kat ötelenme oranlarının zaman bağlı değişimi deney sonuçları ve analiz neticeleri için Şekil 9'da karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır. Kat kesme kuvveti kat ötelenme tarihçesine ait karşılaştırmalar Şekil 5'te sunulmaktadır. Eleman uçlarında tespit edilen azami dönme istemlerine ait özet sonuçlar ise Şekil 6'da verilmektedir. Görüldüğü üzere deplasman tarihçesinin tahminini sonlu eleman modeli çerçeve modeline göre daha başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Özellikle D3 deneyinde azami deplasman ve kalıcı deplasman tahminleri Opensees modelinde deneye göre düşük tarafta kalmaktadır. Bu sonuç özellikle düğüm noktası ve kayma deformasyonlarının ihmalinden kaynaklanmaktadır. Daha yerel bir parametre olan eleman uç dönme talepleri incelendiğinde her iki modelinde azami istemleri tahmin etme konusunda pek de başarılı olmadığı söylenebilir. Kolon uçlarında D3 depremi için azami %4 olarak tespit edilen dönme talebi Opensees modelinde %2.5, Diana modelinde ise %3 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 9. *Kat Ötelemeleri-Zaman (Deney ve Analizler)*

5. DEPREM YÖNETMELİĞİNE GÖRE PERFORMANS DEĞERLENDİRMELERİ

Deney numunesindeki kiriş ve kolon elemanlarının performans değerlendirmesi 2007 Deprem Yönetmeliği Bölüm 7.6.9'da tanımlanan birim şekildeğiştirme limitleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birim şekildeğiştirme istemleri OpenSees analiz platformunda gerçekleştirilen doğrusal olmayan dinamik analizlerden elde edilmiştir. Bu şekildeğiştirme istemleri, yönetmelikte verilen birim şekildeğiştirme limitleriyle karşılaştırılarak her bir eleman uç bölgesinin bulunduğu hasar bölgesi belirlenmiştir. Deprem Yönetmeliği eğilme kapasitesi ile uyumlu kesme kapasitesinin kesme istemlerinden az olması durumunda değerlendirilen kolonun gevrek olarak kabul edilmesi gerektiğine işaret edilmektedir. Sistem performansı incelendiğinde böyle bir gevrek davranış ile karşılaşılmadığından performans değerlendirilmesinde birim şekil değiştirme limitleri tüm elemanlar sünek kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme sonuçlarına göre D1 depremi için tüm kolon ve kirişler minimum hasar seviyesindedir. D2 depreminde ise 112 numaralı kiriş ucunda tespit edilen belirgin hasar seviyesi hariç tüm elemanlar minimum hasar seviyesindedir. Görüldüğü gibi gözlemlenen hasar ile tahmin edilen hasar seviyeleri D1 ve D2 depremleri için oldukça uyumludur. D3 depremi için tahmin edilen hasar seviyeleri Şekil-10'da sunulmaktadır. Sonuçlar birinci kat kolonlarında belirgin hasar seviyesinin tespit edildiğini ve bu hasar durumunun gözlemlenen hasar ile uyumlu olduğunu belirtmektedir. Değerlendirmeye göre tahmin edilen kiriş hasarlarının bir miktar güvenli tarafta olduğu söylenebilir. Genel olarak yönetmelik nonlineer performans değerlendirme kriterleri başarılı sonuçlar vermektedir. Benzer sonuçlar yönetmelikte sunulan global kat ötelemesi limit değerlerinin kontrolü ile de ortaya çıkmaktadır. Deprem yönetmeliği sırasıyla hemen kullanım, can güvenliği ve göçme sınırı için %1, %3 ve %4 kat ötelemesi oranlarını önermektedir. Deneysel ve analitik kat ötelenme değerleri incelendiğinde, D1 depreminde azami değer % 0.5, D2 depreminde % 1.5, D3 depreminde ise %3.5 civarındadır. Bu sonuçlar, D2 depremi için tahmin edilen belirgin hasar bölgesi sonucu hariç, yönetmelik kat ötelenme oranlarının deneylerde ölçülen kat öteleme-hasar ilişkisine uyumlu olduğunu göstermektedir. Ancak, yönetmelik ile ilgili güncellenmesi gereken en önemli mevzu, eğilme-kesme göçmesine maruz kalan, tamamen gevrek olmayıp bir miktar sünekliğe sahip yapı elemanlarının keskin bir şekilde gevrek veya sünek olarak ayrıştırılmadan değerlendirilmesine imkan verecek performans limitlerinin ortaya konmasıdır.



MH : *Minimum Hasar Bölgesi;* ***BH :*** *Belirgin Hasar Bölgesi;* ***İH :*** *İleri Hasar Bölgesi;* ***GÇ :*** *Göçme Bölgesi*

Şekil 10. *D3 Depremi Sonrasında Eleman Uçlarındaki Hasar Seviyeleri*

7.SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç katlı bir betonarme çerçeve üzerinde gerçekleştirilen dinamik benzeri deneyler ve simulasyon sonuçları sunulmuştur. Çerçevenin performans değerlendirilmesi Türk Deprem Yönetmeliğine göre gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan önemli sonuçlar aşağıda verilmektedir:

1- Deney çerçevesi, Duzce merkez için kaya zemin koşulu için üretilmiş 50 yılda aşılma olasılığı %50 ve %10 olan depremlerde oldukça az hasar alarak hemen kullanım performans düzeyinde kalmıştır. 50 yılda %10 geçilme olasılığına sahip yumuşak zemin durumu için üretilmiş deprem, yapıda ciddi hasara sebep olmuştur. Bu durum, zemin koşullarının yapı performansı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.
2- 50 yılda %10 geçilme olasılığına sahip yumuşak zemin durumu için kullanılan deprem ilk kat kolonlarında kesme çatlaklarına, kolon alt uçlarında ise kabuk betonu dökülmesine sebep olmuştur.
3- Kolon kesme kapasitesinin eğilme kapasitesi ile uyumlu kesme istemlerinden düşük olması kesme hasarına sebep olmuştur. Ancak yapının bir miktar sünekliğe sahip olduğu söylenebilir.
4- Düğüm noktaları ve eleman boyunda kesme deformasyonlarını dikkate alan sonlu eleman modeli deplasman tahminlerinde çubuk elemanlarının kullanıldığı simulasyonlara göre daha başarılı bulunmuştur.
5- Her iki modelleme tekniği de yerel uç dönme istemlerini tam olarak tahmin edememektedir.
6- Deprem yönetmeliğine göre gerçekleştirilen performans değerlendirmesi, gözlemlenen hasarı oldukça iyi bir şekilde tahmin etmektedir. Ancak, kolonların gevrek veya sünek davranışının tahmini için yönetmelikte mevcut bulunan kriter bu değerlendirmede kullanılmamıştır.
7- Kısmi sünekliğe sahip eğilme-kesme göçme moduna maruz kalacak kolonlar için deprem yönetmeliğinde sunulan gevrek tanımı üzerinde araştırma yapılması ve güncellemeler gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 108G034 sayılı TÜBİTAK projesi aracılığıyla sağlanan fon ile gerçekleştirilmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a en içten teşekkürlerini sunmayı borç bilirler.

REFERANSLAR

Molina, F.J., Verzeletti, G., Magonette, G., Buchet, P.H., Géradin, M. (1999). Bi-Directional Pseudodynamic Test of a Full-Size Three-Storey Building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **28**, 1541-1566.

Selby, R.G., Vecchio, F.J. (1993). Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, dept. Civil Eng., Toronta, Canada.

DBYBHY, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

A.Saritas, (2007). "Mixed Formulation Frame Element for Shear Critical Steel and Reinforced Concrete Structural Members", Ph.D. Dissertation, University of California at Berkeley.

Noguchi, H. and Kashiwazaki T. (2009). "FEM Analysis of Interaction Effects of 3-D RC Members Subjected to Multi-Directional Cyclic Loading." Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role Proceedings of the 2009 Structures Congress.