

OPENSEES VE SEISMOSTRUCT PROGRAMLARININ YAPILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DEPREM ANALİZLERİ İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI*

Ergül Ş. C.¹ ve Erkuş B.²

¹Yüksek Lisans Öğr., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

²Dr. Öğr. Üye., İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Email: bariserkus@itu.edu.tr

ÖZET:

Bu bildiride, OpenSees ve SeismoStruct programları, doğrusal olmayan deprem analizleri için karşılaştırılmıştır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesi, doğrusal olmayan analiz yapabilen akademik ve ticari programların artması ve mevcut programların daha da gelişmesi sayesinde, bu tür analizler hem mühendislik uygulamalarında hem de akademik çalışmalarda daha sıklıkla kullanılır olmuştur. Bu programların aynı yapı modelleri için karşılaştırmalı olarak incelenmesi, programların doğruluğu, kapasiteleri, uygulanabilirliklerinin anlaşılması oldukça faydalı bilgiler sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında da, birçok yönden benzer olan OpenSees ve SeismoStruct programları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, ilk önce bu iki programda bulunan malzeme ve eleman modelleri hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Daha sonra beton ve çelik malzeme modelleri irdelenmiş ve tüm çalışma boyunca kullanılacak birer adet beton ve çelik modeli karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde, malzeme iskelet eğrilerinin ve çevrimsel davranışlarının benzer olduğu ancak bazı farklılıkların bulunduğu görülmüştür. Daha sonra yapı modellerinde karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır. Çalışma kapsamı yapı tipi çubuk sistemler olarak belirlenmiştir. Karşılaştırılan yapılar betonarme konsol kolon ve tek-açıklıklı tek-katlı çerçeve yapı olmak üzere iki tanedir. Doğrusal olmayan elemanlar, moment-dönme yayı ve fiber çubuk olarak seçilmiştir. Her iki yapı tipi, iki farklı doğrusal olmayan eleman modeli kullanılarak modellenmiştir. Yapı modellerinin doğrusal halleri, uygulamada sıkça kullanılan ticari bir analiz programında da modellenmiş ve temel özellikler karşılaştırılarak doğrusal olmayan programlarda geliştirilen modellerin doğruluğu teyit edilmiştir. Doğrusal olmayan modeller her iki analiz programında statik itme ve zaman-tanım alanı analizlerine tabi tutulmuştur. Bu analizler sonucunda elde edilen taban kesme kuvvetleri, tepe yerdeğiştirme-leri, eleman kesit tesirleri gibi temel eleman ve yapı tepkileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde; yay modellerinde analiz sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu, fiber modellerde ise bazı farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu farklılığın, malzeme modellerindeki farklılıktan, kesit fiberlerinin tanımlanmasından ve zaman-tanım alanı analizlerinde kullanılan sönmüleme modelinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Analiz süreleri incelendiğinde OpenSees programının tüm analizleri SeismoStruct programına göre daha kısa sürede gerçekleştirdiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER: OpenSees, SeismoStruct, doğrusal olmayan davranış, statik itme analizi, zaman-tanım alanında analiz, deprem, fiber çubuk eleman.

COMPARISON OF OPENSEES AND SEISMOSTRUCT PROGRAMS FOR NONLINEAR SEISMIC ANALYSIS OF STRUCTURES

ABSTRACT:

In this paper, OpenSees and SeismoStruct programs compared for nonlinear seismic analysis of structures. In the recent years, owing to the development of computer technology, increase in the number of academic and commercial programs that are capable of nonlinear analysis and improvement in the existing programs, nonlinear analyzes have been used more frequently in engineering applications and academic research. Comparative

*Bu çalışma Ergül (2018)'den alınmıştır.

investigation of these programs for same structural models provide very useful information for understanding the capacity, applicability and accuracy of these programs. In this study, OpenSees and SeismoStruct programs, that have similar properties, are investigated and compared. For this purpose, first, theoretical information about material properties and element models that are available in these programs are given. Then, concrete and steel material models are investigated, and one concrete and one steel model that are used throughout this study are compared. This comparison shows that while the backbone curves and cyclic behavior are similar, there are some differences. Comparison studies at structure level are conducted next. Frame structures are selected as the scope of this study. Two reinforced concrete structures are compared: a cantilever column and a single-story and single-span frame. Moment-rotation spring and fiber beam-column elements are selected as the nonlinear elements. Both structures are modeled using the two different nonlinear element models. Linear version of the structure models are established in a frequently-used commercial analysis program, and correctness of the models established in the nonlinear analysis programs is confirmed by comparing the fundamental properties of the structures. Nonlinear pushover and time-history analyses are performed on the nonlinear models in both analysis programs. Basic element and structural responses such as base shear, top displacements and element forces obtained from these analyses are compared. It is observed results obtained from the programs are very close each other for the structures with moment-rotation springs, while there are some differences in the results obtained from the models with fiber elements. These differences are attributed to the differences in element constitutive models, fiber definitions and damping models used. Analysis time durations of OpenSees are observed to be less than the durations of SeismoStruct.

KEYWORDS: OpenSees, SeismoStruct, nonlinear analysis, static pushover, time-history, earthquake, fiber beam-column element.

1. GİRİŞ

Yapısal deprem mühendisliğinde doğrusal olmayan analiz yöntemleri, son yıllarda, hem mühendislik uygulamalarında hem de bilimsel çalışmalarda çok daha sıklıkla kullanılır olmuştur. Mühendislik uygulamalarında performansa dayalı tasarım ve değerlendirme kapsamında yapıların performansının ölçülmesi amacı ile doğrusal olmayan analiz yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır. Yapısal performans genelde yapıda oluşan hasar ile, yapısal hasar ise genelde plastik şekildeğiştirmeler ile tanımlanmaktadır. Plastik şekildeğiştirmelerin etkin hesabı ise doğrusal olmayan analizler ile mümkün olmaktadır. Uzun yıllardır geliştirilen karmaşık matematiksel modellerin yazılım olarak geliştirilmesi ve uygulanabilir hale gelmesi doğrusal olmayan analizlerin akademik çalışmalarda da daha fazla ve etkin kullanılmasını sağlamıştır. Tüm bunlara ek olarak, bilgisayar teknolojilerinin hız, kapasite açılarından gelişmesi, analizleri süre açısından pahallı olan büyük ölçekli ve karmaşık modellerin analizini daha kolay hale getirmiştir.

Yapıların deprem yükleri altında doğrusal olmayan analizleri için günümüzde çeşitli programlar kullanılmaktadır. Bunların bazıları daha çok mühendislik uygulamalarında kullanılırken (SAP2000, ETABS, PERFORM3D, ABAQUS, LS-Dyna) diğerleri daha çok bilimsel çalışmalar için kullanılmaktadır (OpenSees, SeismoStruct). Bu programlar, doğrusal olmayan modelleme ve analiz konularında son yıllardaki gelişmeleri de yansıtabilecek şekilde güncellenmektedir. İşte bu noktada bu programları örnek bazı yapı ve doğrusal olmayan malzeme ve eleman modelleri için karşılaştırmak, programların, doğruluğu ve genel performansı hakkında yararlı olmaktadır. Bu tür çalışmalardan Gencer (2015)'de PERFORM3D (Computers and Structures, Inc. 2005) ve SAP2000 (Computers and Structures, Inc. 2009) ile bazı karşılaştırmalar yapılmıştır. Gharakhanloo (2014), Cemalovic (2015) ve Nastri ve Ilenia Palese (2017)'de ise OpenSees (Pacific Earthquake Research Center 2008) ve SeismoStruct (Seismosoft, Inc. 2014) programları karşılaştırılmıştır ancak kapsamlı bir karşılaştırma mevcut değildir. OpenSees ve SeismoStruct programlarının daha kapsamlı olarak karşılaştırılmasının literatüre önemli bir katkı olacağı düşünülmektedir.

Bu bildiriye OpenSees ve SeismoStruct programları betonarme çubuk yapıların doğrusal olmayan deprem analizleri için karşılaştırılmıştır. Bu amaçla ilk önce bu programlar bünyesinde bulunan malzeme modelleri incelenmiş ve her iki programdan birbirine en yakın davranışı gösteren modeller seçilerek karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan eleman modelleri için yayılı ve yığılı plastisite modellerinden moment-dönme yayı ve fiber

Tablo 1. Beton ve donatı modellerinin özellikleri.

Sembol	Açıklama	Değer	Sembol	Açıklama	Değer
fc, fpc, fpec	28 günlük beton basınç dayanımı (MPa)	-30	Fy, fy	Akma dayanımı (MPa)	420
Ec	Betonun elastisite modülü (MPa)	32000	E0	Elastisite modülü (MPa)	200000
fc1c, ec	Maksimum beton basınç dayanımı (MPa)	-37.5	b	Elastisite modülünün sekant modülüne oranı	0.00664
eps1C, epsc0, e0, epsc, epcc	Maksimum dayanımdaki beton b.ş.d.*	-0.00234	a1, a2, a3, a4	İzotropik pekleşme parametreleri	Değişken
eps1C04	Maksimum dayanımdaki beton b.ş.d.*	-0.00352	a	Akma noktası (Ramberg Osgood modeli)	0.0021
fc2c, fpcu	Kırılma dayanım (MPa)	-5.25	n	Elastik eğriden plastiğe geçişteki deneysel param.	14.2227
eps2C, epsu, ecu	Kırılma dayanımdaki beton b.ş.d.*	-0.0117	R0, R		10-20
eps2C04	Kırılma dayanımdaki beton b.ş.d.*	-0.0468	cR1		0.925
ftc, ft, fcr, fct	Çekme dayanımı (MPa)	5.25	cR2		0.15
Ets, ecr, et, epst	Çekme rijitliği (MPa)	2100			

eleman modelleri kullanılmıştır. Fiber modeller için ilk bölümde seçilen malzeme modelleri kullanılmıştır. Bu modeller kullanılarak oluşturulan betonarme konsol kolon yapı sistemi ve betonarme tek katlı-tek açıklı yapı sistemi için çubuk modeller oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan modeller üzerinde statik itme analizi ve zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. OpenSees ve SeismoStruct programlarından elde edilen analiz sonuçları grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

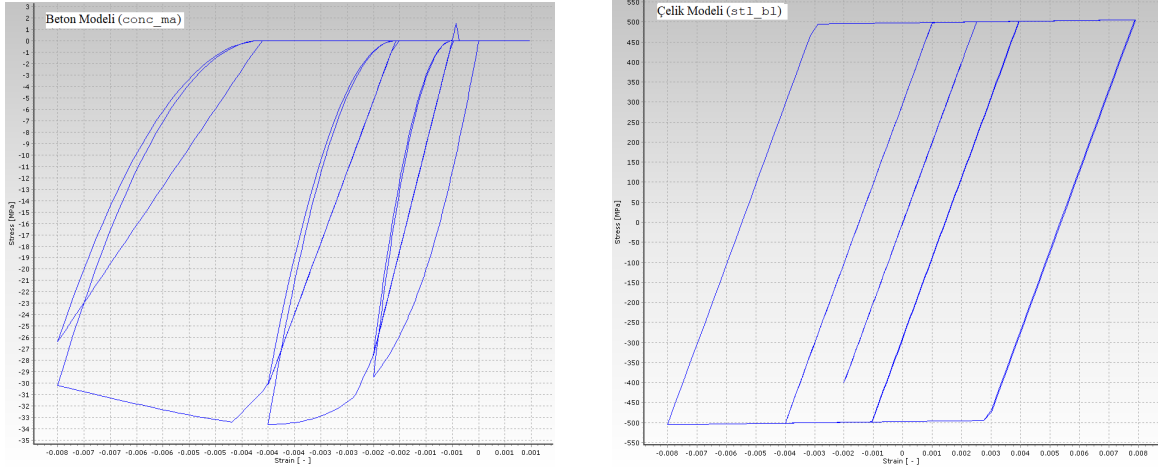
2. MALZEME MODELLERİ

Beton modeli olarak Mander modeli (Mander 1983) literatürde sıklıkla kullanılan bir modeldir. Bu model sargısız ve sargılı betonun davranışı için kullanılmaktadır. Mander modeli daha sonra Mander-Piestley-Park (Mander v.d. 1988) tarafından dairesel, kare ve dikdörtgen sargılı beton kesitler için deneysel çalışmalar kullanılarak geliştirilmiştir. Daha sonra Chang ve Mander (Chang ve Mander 1994) çekme ve basınç çevrimsel yüklemelerde, yüksek dayanımlı ve normal dayanımlı olmak üzere, sargılı ve sargısız betonlar için çevrimsel davranışı simule ederek, monotonik ve çevrimsel malzeme model parametrelerini tanımlamışlardır. Bu çalışmada OpenSees'te Chang-Mander modeli (ConcreteCM), SeismoStruct'ta ise Mander modeli (conc_ma) kullanılmıştır. Donatı çeliği için ise OpenSees ve SeismoStruct programlarında da çeşitli çelik modelleri mevcut olmakla beraber, bu çalışmada izotropik pekleşmeli çift doğrusal model (Steel01 ve stl_b1) kullanılmıştır.

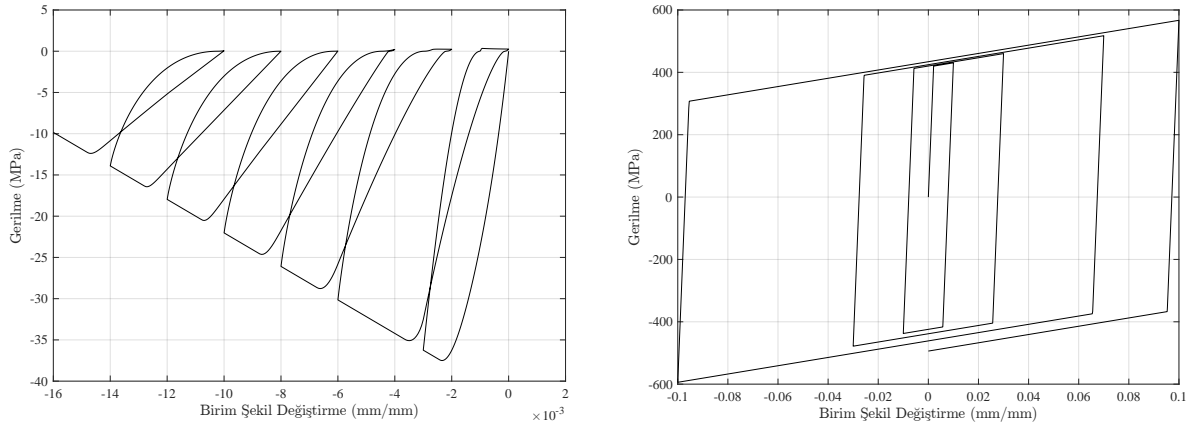
OpenSees ve SeismoStruct programlarında seçilen beton ve çelik malzeme özellikleri Tablo 1'de verilen özellikler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Şekiller 1 ve 2, sırası ile SeismoStruct ve OpenSees'te seçilen beton ve çelik malzemelerinin örnek çevrimsel davranışlarını göstermektedir. Bu malzeme modelleri daha sonra Şekil 3'te karşılaştırılmıştır. Beton modellerinin karşılaştırılmasında, çevrimsel davranış öncesinde iskelet eğrilerinin hemen hemen birbirleri ile aynı olduğu, çevrimsel davranış sonrasında ise, davranışın farklılaşmaya başladığı, her yeni çevrim ile bu farklılığın arttığı görülmektedir. Çelik modellerinin karşılaştırılmasında ise akma sonrası rijitliklerde farklılıklar, çevrimsel döngü birim şekildeğiştirme değerlerinde bazı farklılıklar görülmektedir.

3. DOĞRUSAL OLMAYAN ELEMAN MODELLERİ

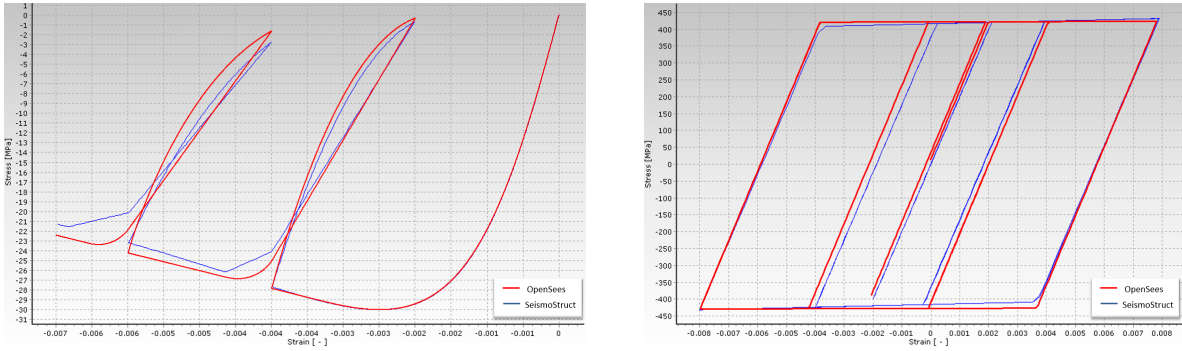
Bu çalışma kapsamında, moment-dönme yay ve çubuk fiber eleman modelleri kullanılmıştır (Şekil 4). Moment-dönme yayı, rijit-plastik mafsaldan farklı olarak başlangıç rijitliği bulunan bir yaydır. Bu yayın kullanılması durumunda yay rijitliği ve üreteceği kuvvetler, analizin en başında rijitlik matrisine ve kuvvet vektörüne yansıtılır. Çubuk fiber modelinde doğrusal olmayan sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılmaktadır (Spacone v.d. 1996; Scott v.d. 2004). Çubuk eleman uç yerdeğiştirmeleri için şekil fonksiyonları ve elemanın uzunluğu boyunca belirli sayıda integrasyon noktaları tanımlanır. Bu noktalarda kesit fiberlere bölünür ve her fiber için ilgili malzeme bünye fonksiyonları kullanılır. Artımsal doğrusal olmayan analiz sırasında eleman uç kuvvet ve yerdeğiştirmeleri eleman bazında yapılan sonlu elemanlar bazlı ve yinelemeli bir yaklaşım ile elde edilir. Her artımda tanjant rijitlik yine sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilerek, yapı bazında yinelemeli bir yaklaşımla dengelenmemiş kuvvetler dengelenir.



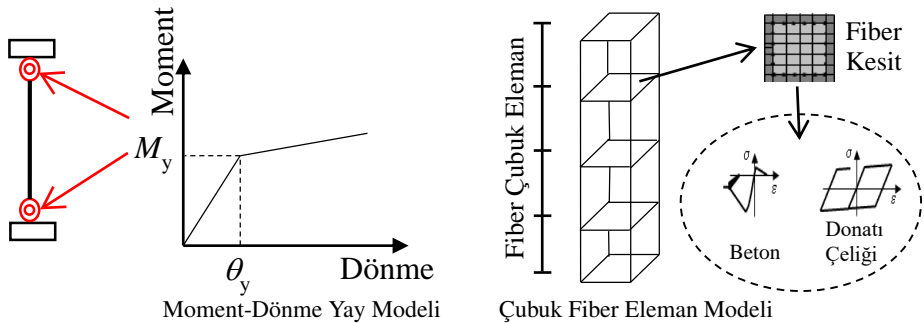
Şekil 1. SeismoStruct beton (conc_ma) ve çelik (st1_b1) malzeme örnek davranışları.



Şekil 2. OpenSees beton (ConcreteCM) ve çelik (Stee101) malzeme örnek davranışları.



Şekil 3. OpenSees ve SeismoStruct'ta beton ve çelik modellerinin karşılaştırılması

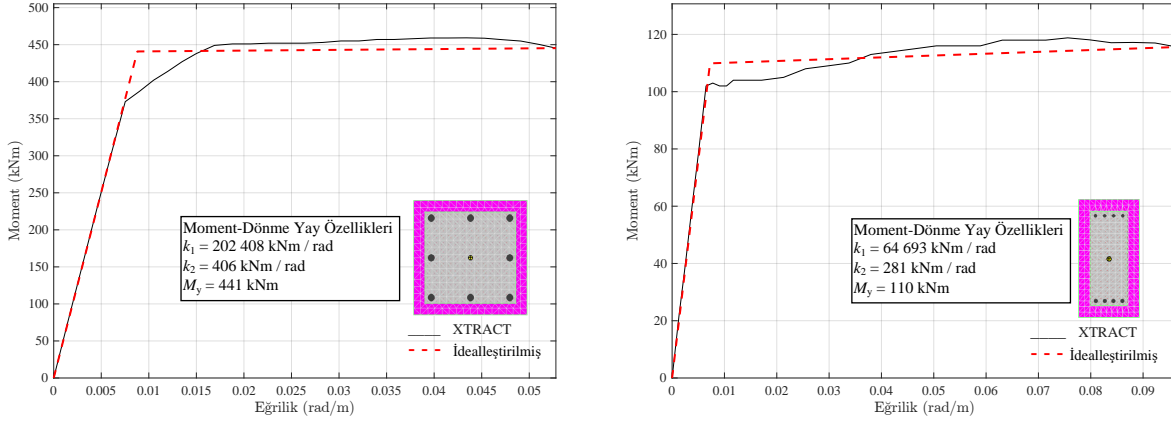


Şekil 4. Eleman modelleri.

Tablo 2. Karşılaştırılan modellerde kullanılan malzeme modelleri.

Malzeme	Moment-Dönme Yayı*	Fiber - OpenSees**	Fiber - SeismoStruct**
Beton Modeli	Mander (XTRACT Program Modeli)	Chang-Mander (ConcreteCM)	Mander (conc_ma)
Çelik Modeli	Konvansiyonel (XTRACT Program Modeli)	Çift-Doğrusal (Steel101)	Çift-Doğrusal (stl_b1)

*Moment-dönme yayı için XTRACT programı kullanılmıştır. Malzeme modelleri bu programda bulunan modellerdir.
**OpenSees ve SeismoStruct programında 2. Bölüm'de verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır.



Şekil 5. Kolon ve kiriş moment-eğrilik ilişkileri ve yay özellikleri.

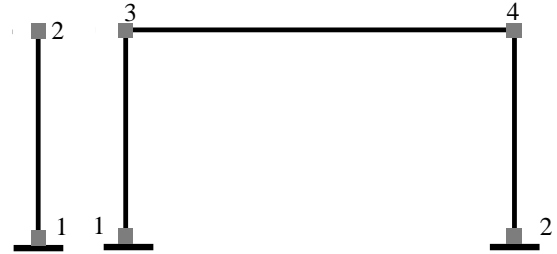
4. KARŞILAŞTIRILAN YAPILAR

Bu bölümde karşılaştırılan yapılar açıklanmıştır. Bu amaçla ilk önce kullanılan malzeme modelleri, daha sonra sırası ile karşılaştırılan yapı ve eleman modellerinin özellikleri, sönümlenme modeli ve deprem kaydı hakkında bilgiler verilmiştir. Yapısal modellerde kullanılan malzeme modelleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu malzeme modellerine ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada betonarme konsol kolon ve çerçeve tipi olmak üzere iki yapı karşılaştırılmıştır (Şekil 6). Bu yapılarda kolon yüksekliği 3 m, kiriş açıklığı 5 m'dir. Kolon ve kiriş enkesitleri sırası ile 50 cm × 50 cm ve 50 cm × 25 cm'dir. Konsol kolon tepe noktası ve çerçevede kolon/kiriş düğüm noktalarına 50 ton kütle atanmıştır. Kolonlarda boyuna donatı 8φ30, etriye φ12/10 cm, kirişlerde ise boyuna donatı 4φ14 (üst), 4φ16 (alt) ve etriye φ12/10 cm'dir.

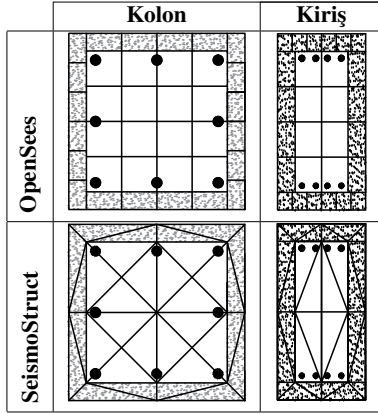
Bu çalışma kapsamında iki tip doğrusal olmayan eleman modeli kullanılmıştır: Moment-dönme yayı (MDY) ve çubuk fiber eleman (Fib). Moment-dönme yaylarını tanımlanması için kesitlerin moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiş, bu ilişkiler idealleştirilerek çiftdoğrusal moment-eğrilik ilişkisi, daha sonra plastik mafsal boyuna denk gelen moment-dönme ilişkileri elde edilmiştir (Şekil 5). Kesit analizleri için XTRACT programı (TRC Software, Inc 2004) kullanılmış olup, beton ve çelik malzeme modelleri için bu programdaki malzeme modelleri kullanılmıştır (Tablo 2).

Fiber eleman için beton ve çelik malzeme modelleri için Tablo 2'de gösterilen modeller kullanılmıştır. Şekil 7'de OpenSees ve SeismoStruct programlarında tanımlanan fiber kesitler gösterilmiştir. SeismoStruct'ta kesitlerin sayısı girilmekte ve fiber kesitler programın kendisi tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında tamamen aynı fiber tanımlaması yapılmamıştır. Yapı sistemlerinin içsel sönümlemesini yansıtabilmek için Rayleigh sönümlenme modelinden yararlanılmıştır. Bu modelde kütle ve rijitlik matrislerinin doğrusal birleşimi ile sönüm matrisi elde edilmektedir. Şekil 8'da 1. ve 2. salınım modlarına

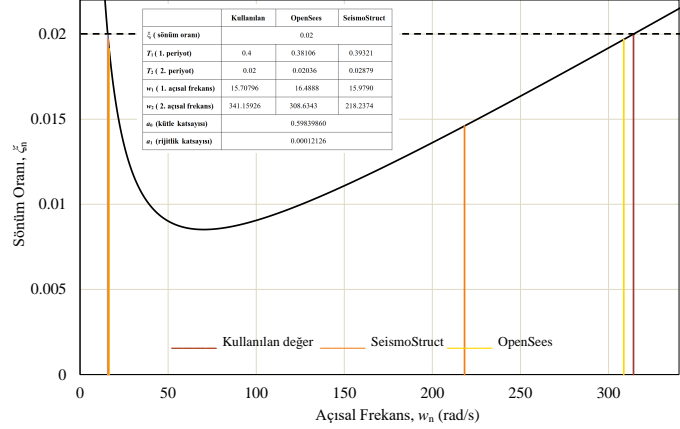


Yapı	Tipi	Doğrusal Olmayan El.
KK-MDY	Konsol	Moment-Dönme Yayı
KK-Fib	Kolon	Çubuk Fiber
Ç-MDY	Çerçeve	Moment-Dönme Yayı
Ç-Fib	Yapısı	Çubuk Fiber

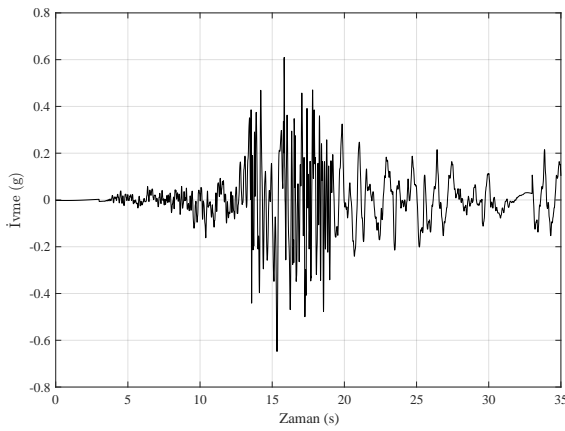
Şekil 6. Karşılaştırılan yapılar



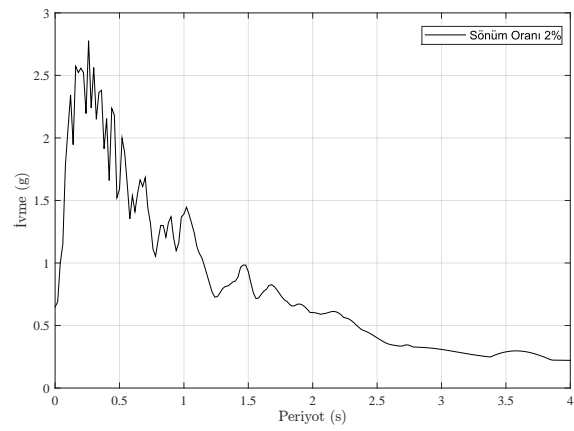
Şekil 7. Kolon ve kiriş fiber kesitleri



Şekil 8. Çerçeve modeli için Rayleigh sönüm grafiği



Şekil 9. 1999 Kocaeli Depremi ölçeklendirilmiş yer ivme kaydı



göre moment-dönme yaylı çerçeve yapısı için eşdeğer sönüm oranının %2 alındığı Rayleigh sönüm grafiği gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, modal frekanslardaki farklılıktan dolayı, modellerde aynı sönümleme matrisinin oluşturulabilmesi mümkün olamamaktadır. Bu farklılığın sonuçlara etki edebileceği değerlendirilmektedir. Sönümleme oranı olarak tipik %5 değeri yerine %2 seçilmesinin bir nedeni bu etkilerin az olmasını sağlamaktır.

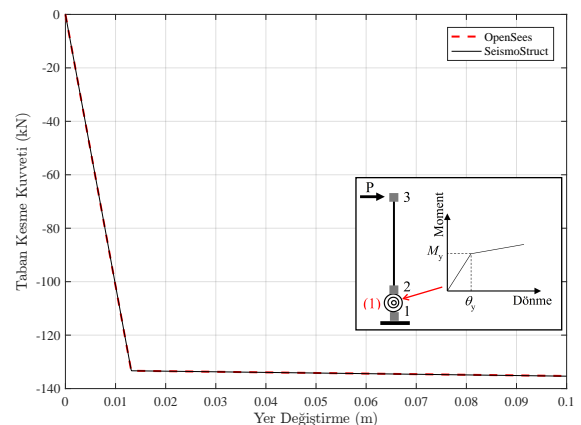
Zaman-tanım alanı analizlerinde kullanılacak deprem kaydı, PEER veri tabanından, ölçeklendirilmiş Kocaeli Depremi (8/17/1999) kaydı olup, RSN1166 numaralı İz-nik Doğu-Batı bileşeni (180 derece) olan ivmeölçer kaydı kullanılmıştır (Şekil 9).

5. PROGRAMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

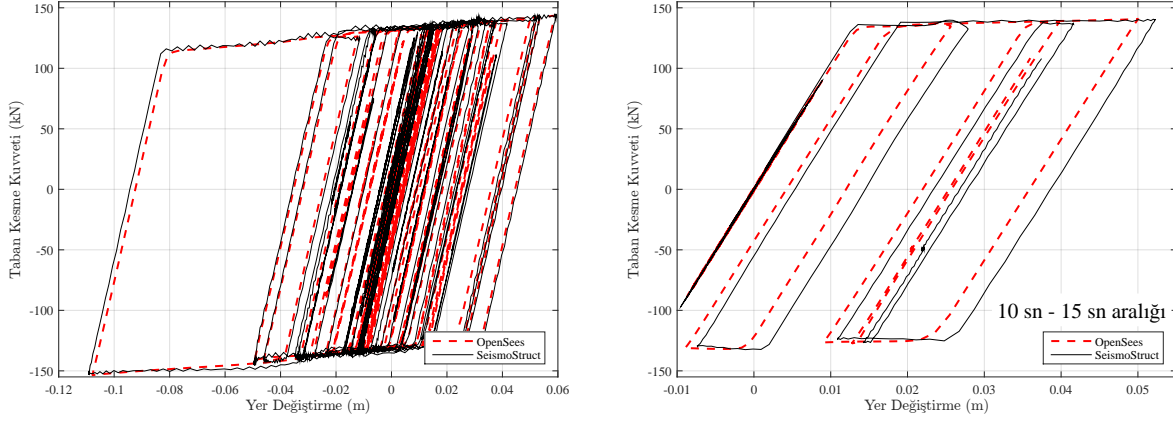
Bu bölümde ilk önce moment-dönme yaylı daha sonra çubuk fiber elemanlı konsol kolon ve çerçeve yapı modellerinin itme ve zaman-tanım alanında doğrusal olmayan analizleri karşılaştırılmıştır. Tüm zaman-tanım alanı analizlerinde Newmark- β ortalama ivme yöntemi ($\alpha = 1/2$ ve $\beta = 1/4$), dengelenmemiş bünye kuvvetleri için Newton-Raphson algoritması kullanılmıştır.

5.1. Moment-dönme yaylı modellerin karşılaştırılması (KK-MDY ve Ç-MDY)

KK-MDY modelinde konsolun üst ucuna yatay doğrultuda kuvvet uygulanarak hedef yerdeğiştirme değeri 0.1 m olacak şekilde statik itme analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 10). Görüldüğü üzere OpenSees ve SeismoStruct programları hemen hemen aynı sonuçları vermektedir.



Şekil 10. KK-MDY modelinin statik itme analizi.

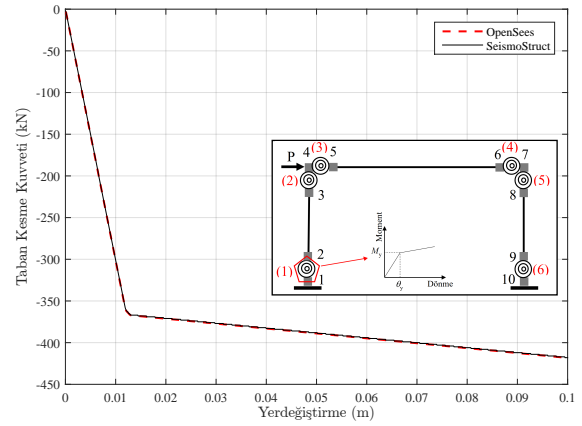


Şekil 11. KK-MDY modelinin zaman-tanım alanı analiz sonuçları.

KK-MDY modeli seçilen deprem kaydı için zaman-tanım alanında analizlere tabi tutulmuştur (Şekil 11). Bu analizlerde Sönüm oranı %2 alınmıştır. Tepe noktası en büyük yerdeğiştirme OpenSees'de 0.1079 m, SeismoStruct'ta ise 0.1092 m elde edilmiştir. En büyük taban kesme kuvveti, OpenSees'de 143.494 kN, SeismoStruct'ta 144.984 kN olarak bulunmuştur. Çevrimsel davranışlarda küçükte olsa farklılık gözlemlenmiştir. Bu farklılığın doğrusal elemanın rijitlik tanımlamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Ç-MDY modeli için benzer şekilde itme analizi yapılmıştır (Şekil 12). Çerçevenin 3 numaralı düğüm noktasına hedef yer değiştirme 0.1 m olacak şekilde artırsal kuvvet uygulanmıştır. Bu yerdeğiştirme anında oluşan taban kesme kuvvetleri OpenSees'de 418.315 kN, SeismoStruct'ta ise 418.312 kN'dur. Bu analiz sonucunda kiriş elemanındaki moment-dönme yayları plastikleşmiş ancak kolonlarda plastik mafsal görülmemiştir.

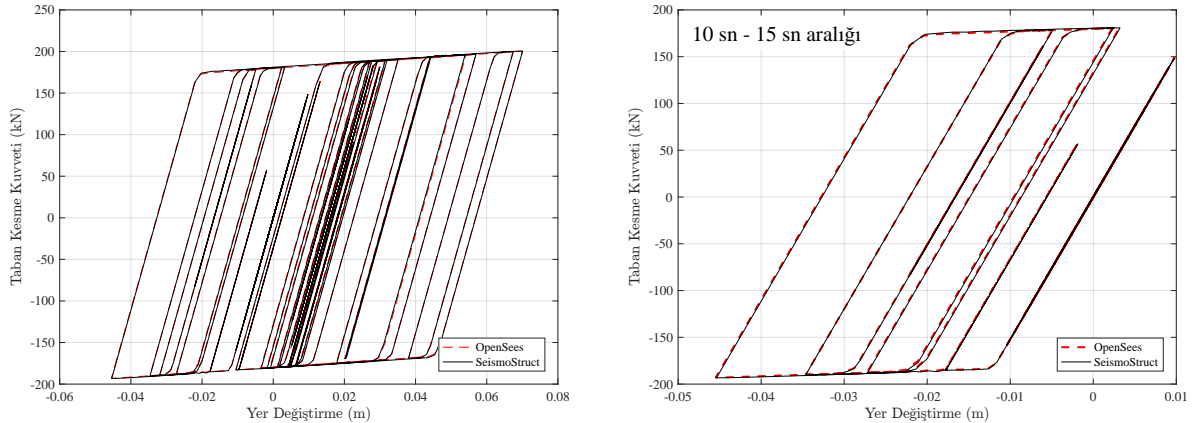
Ç-MDY modelinin zaman-tanım alanı analizleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 13). İçsel sönüm oranı %2 alınarak alınmıştır. Görüldüğü üzere, her iki programdan elde edilen Ç-MDY yapısının taban kesme kuvveti tepe yerdeğiştirme ilişkisi birbirlerine çok yakındır.



Şekil 12. Ç-MDY modelinin statik itme analizi.

5.2. Fiber modellerin karşılaştırılması (KK-Fib ve Ç-Fib)

KK-Fib modeli itme analizlerine tabi tutulmuştur (Şekil 14). Taban kesme kuvveti - tepe yerdeğiştirme grafiğinin doğrusal bölgesinde analiz sonuçlarının eşleştiği fakat doğrusal olmayan bölgede kuvvet değerlerinde küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. 0.1 m değerindeki tepe yer değiştirmesine karşılık taban kesme kuvvetleri, OpenSees'te 146.9 kN, SeismoStruct'ta ise 148.5 kN olarak elde edilmiştir.

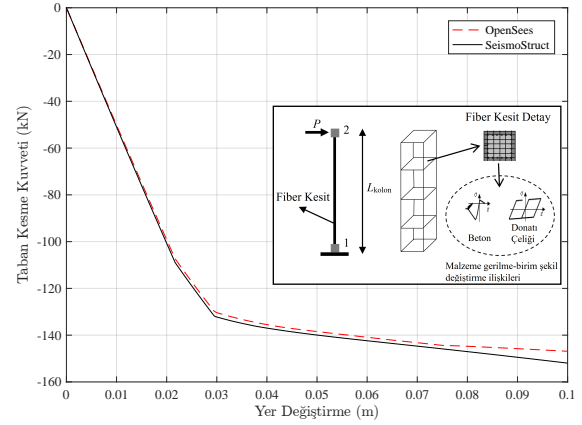


Şekil 13. Ç-MDY modelinin zaman-tanım alanı analiz sonuçları.

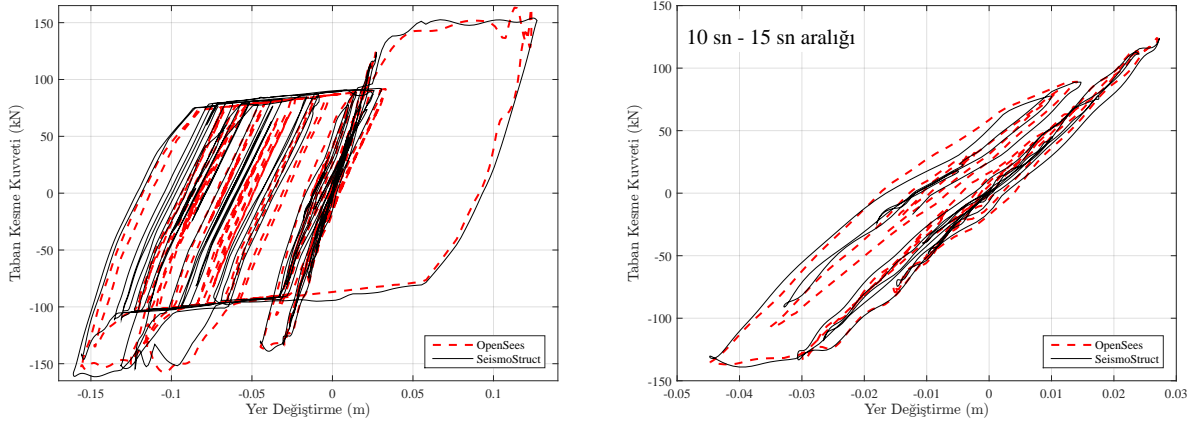
KK-Fib modeli üzerinde zaman-tanım alanı analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 15). İçsel sönüm oranı %2 olarak alınmıştır. Tepe en büyük yerdeğiştirmesi OpenSees'de 0.1271 m, SeismoStruct'ta 0.1092 m'dir. En büyük taban kesme kuvveti OpenSees'te 157.678 kN, SeismoStruct'ta 161.444 kN olarak bulunmuştur. Taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirme çevrimleri birbirlerine çok yakındır.

Ç-Fib modelinin itme analiz sonuçları Şekil 16'de gösterilmiştir. Hedef tepe yerdeğiştirmesi anındaki taban kesme kuvvetleri OpenSees'te 384.669 kN, SeismoStruct programında ise 420.078 kN'dır. KK-Fib modelinden farklı olarak eğrinin doğrusal bölgesinde de bazı farklılıklar gözlemlenmektedir. ayrıca, ileri evrelerdeki farklılıkta KK-Fib modeline göre daha fazladır.

Ç-Fib modelinde zaman-tanım alanı analizleri de gerçekleştirilmiştir. (Şekil 17). Sönümlenme için Ç-MYD modelinde olduğu gibi %2 sönümlenmeye denk gelen Rayleigh sönümlenme matrisi kullanılmıştır. Taban kesme kuvveti -tepe yerdeğiştirme çevrimlerinde oluşan farklılık, KK-Fib modelinde oluşan farklılığa göre daha yüksektir. Kullanılan malzeme modellerinde (Şekil 3), fiber tanımlamalarında (Şekil 7) bazı farklılıkların olduğu belirtilmiş idi. Bu farklılıkların analiz sonuçlarına etkisi yapı serbestlik derecesi arttıkça daha da artmaktadır.



Şekil 14. KK-Fib modelinin statik itme analizi.



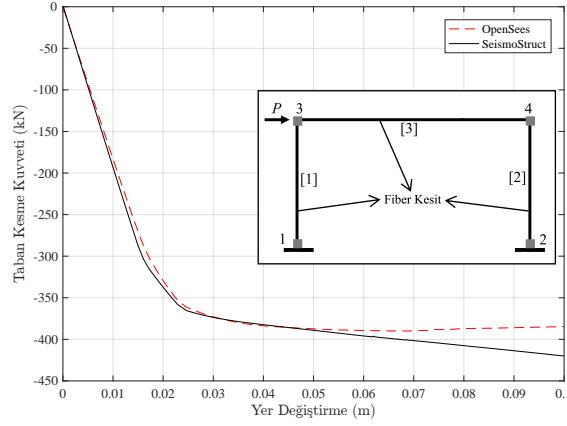
Şekil 15. KK-Fib modelinin zaman-tanım alanı analiz sonuçları.

Tablo 3. Çok katlı-çok açıklı çerçeve için analiz sürelerinin karşılaştırılması.

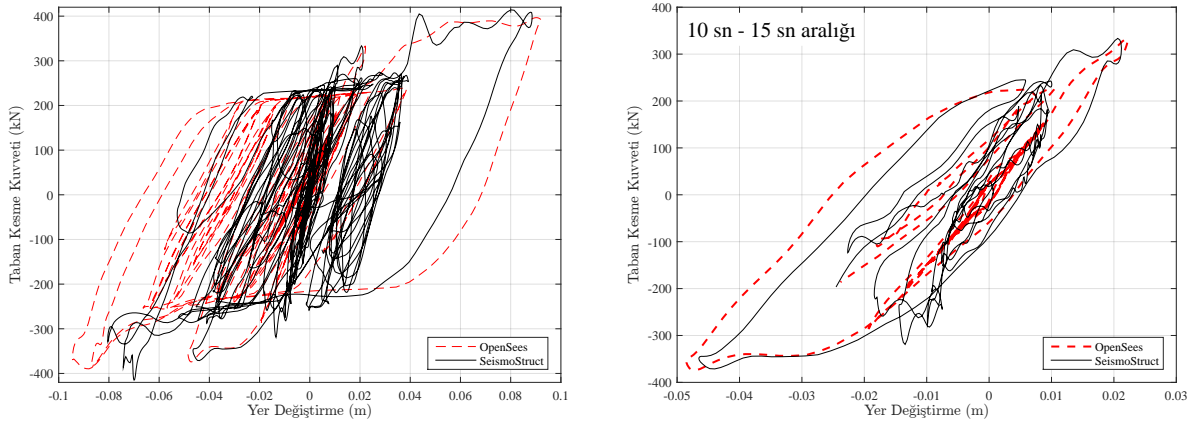
Analiz →	Statik İtme Analizi		Zaman-Tanım Alanında Analiz	
	OpenSees	SeismoStruct	OpenSees	SeismoStruct
Moment-Dönme Yayı	1 s	64 s	12 s	485 s
Fiber Model	18 s	93 s	80 s	564 s

5.3. Analiz Süreleri

OpenSees ve SeismoStruct programında gerçekleştirilen analizlerin süreleri karşılaştırılmıştır, süre farklılıkları kat yüksekliği arttıkça belirginleştii gözlemlenmiştir. Bundan dolayı çerçeve yapı elemanları kullanılarak 4 katlı 5 açıklıklı bir yapı tipi oluşturulmuştur. Bu yapı için analiz süreleri verilmiştir (Tablo 3). Bu sonuçlardan görüldüğü üzere OpenSees programının analizleri çok daha kısa süresi gerçekleştirilmektedir. Ancak, analiz sürelerindeki bu belirgin farklılığın, SeismoStruct programını görsel bir program olması ve analiz modelini oluşturmak için ek süre ihtiyacı gibi nedenlerden dolayı da olabileceği değerlendirilmektedir. Benzer şekilde, yakınsama ile ilgili kriterler nedeni ile de bu farklılığın oluşabileceği düşünülmektedir.



Şekil 16. C-Fib modelinin statik itme analizi.



Şekil 17. Ç-Fib modelinin zaman-tanım alanı analiz sonuçları.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma ile OpenSees ve SeismoStruct programlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Kapsam olarak betonarme çubuk konsol kolon ve tek açıklıklı ve tek katlı bir çerçeve yapı sistemleri seçilmiştir. Doğrusal olmayan elemanlar olarak temel doğrusal olmayan moment-dönme yayı ve çubuk fiber eleman modelleri seçilmiştir. Konsol kolon ve çerçeve yapıları her iki türlü doğrusal olmayan eleman modelleri kullanılarak elde edilmiş ve dört adet yapı statik itme ve seçilen bir deprem kaydı için zaman-tanım alanı analizlerine tabi tutulmuştur. Moment-dönme yaylı modellerin her iki program ile yapılan itme analizleri hemen hemen aynı sonuçları vermiştir. Moment-dönme yaylı modellerin zaman-tanım alanında analizleri ise düşük mertebelerde farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıkların doğrusal elemanlardaki rijitlik farklılıklarından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Fiber elemanlı modeller ile yapılan karşılaştırmada ise statik itme ve zaman-tanım alanında analizlerinde çok küçük mertebelerde farklılıklar gözlenmektedir. Bu farklılıkların model büyüdükçe arttığı görülmüştür. Farklılıkların kaynağının, beton ve çelik malzeme modellerindeki farklılıklarından, fiber kesitlerin iki programdaki farklı tanımlanmasından ve sönümlenme modelindeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Hız bakımından, OpenSees programının SeismoStruct programına göre daha hızlı olduğu görülmekle beraber bu farklılığın SeismoStruct programının görsel olması gibi nedenlere de bağlı olabileceği düşünülmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda, içsel sönümlenmenin olmadığı, perde duvar elemanlarının da kullanıldığı yapı modelleri üzerinde çalışılması önerilmektedir. Ayrıca süre karşılaştırılmasının daha gerçekçi olarak yapılabilmesi için, programların model oluşturma dışında kalan gerçek analiz süreleri incelenmeli, yakınsama kriterlerinin etkileri araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Cemalovic M (2015). *Earthquake analysis of structures using nonlinear models*. Yüksek Lisans Tezi. Norwegian University of Science ve Technology.
- Chang GA ve Mander JB (1994). *Seismic Energy Based Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part-I Evaluation of Seismic Capacity*. Teknik Rapor. NCEER-94-0006.
- Computers and Structures, Inc. (2005). *Nonlinear Analysis and Performance Assessment of 3D Structures*. Berkeley, CA: Computers ve Structures Inc. Berkeley, California.
- Computers and Structures, Inc. (2009). *Integrated Software for Structural Ananlysis and Design*. Berkeley, CA: Computers ve Structures Inc. Berkeley, California.
- Ergül ŞC (2018). *Ortak Yalıtım Düzleminde Bulunan Sismik Yalıtımlı İki Bağımsız Yapının Kapsamlı Parametrik İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Gencer I (2015). *Dogrusal Olmayan Analiz Yöntemleri için Kullanılan Ticari Programların Çerçeve Sistemler için Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Gharakhanloo A (2014). *Distributed and Concentrated Inelasticity Beam-Column Elements used in Earthquake Engineering*. Yüksek Lisans Tezi. Norwegian University of Science ve Technology.
- Mander JB, Priestley MJN, ve Park R (1988). "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **114 (8)**: 1804–1826.
- Mander JB (1983). *Seismic Design of Bridge Piers*. Doktora Tezi. University of Canterbury.
- Nastri E ve Ilenia Palese M (2017). "Preliminary comparison between different software modeling of confined concrete". *6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Rodos Adası, Yunanistan.
- Pacific Earthquake Research Center (2008). *Open System for Earthquake Engineering Simulation*. Berkeley, CA: Pacific Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Scott MH, Franchini P, Fenves GL, ve Filippou FC (2004). "Response Sensitivity for Nonlinear Beam–Column Elements," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **130 (9)**: 1281–1288.
- Seismosoft, Inc. (2014). *A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures*. Pavia, İtalya: SeismoSoft.
- Spacone E, Filippou FC, ve Taucer FF (1996). "Fibre Beam-Column Model for Non-linear Analysis of RC Frames : Part I. Formulation," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **25 (7)**: 711–725.
- TRC Software, Inc (2004). *Cross-Section Analysis Program for Structural Engineers*. Rancho Cordova, CA: Imbsen Software Systems.