



TEK KATLI TEK AÇIKLIKLI DÜZLEM ÇERÇEVENİN HİBRİT DİNAMİK BENZERİ TESTİ

Cenk Aksoylar¹, Nihan Doğramacı Aksoylar², Ömer Güzel³ ve Ebubekir Koç⁴

^{1,2,4} Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul

³ Yapı Merkezi İnşaat San. A.Ş., İstanbul

ABSTRACT

Hybrid pseudo dynamic simulation is a technique that combines the advantages of mathematical modeling and laboratory tests. The structural system is separated into sub-structures. The components whose seismic behavior are well known, behave elastically or cannot be physically tested in the laboratory because of geometrical sizes are modelled mathematically. On the other hand, the components whose seismic behavior are the main focus of the research or behave non-linearly are tested physically in the laboratory. In the framework of this study a small-scaled, single story, single span plane frame is tested with hybrid pseudo-dynamic simulation in “Structural Mechanics and Earthquake Research Laboratory” of Fatih Sultan Mehmet Vakıf University under Elcentro earthquake ground motion record. The results are compared with hybrid simulations having mathematical models only. According to the results of the simulations with physical specimens, the hybrid pseudo-dynamic simulation gives satisfactory results within the required precision.

ÖZET

Hibrit dinamik benzeri simülasyon, matematiksel modellemenin ve laboratuvar testlerinin avantajlarını birleştiren bir yöntemdir. Hibrit dinamik benzeri simülasyonda araştırılacak yapı, alt yapı parçalarına bölünür. Bu alt yapılardan deprem davranışı daha iyi bilinen, elastik sınırlarda davranan veya geometrik boyutları nedeniyle laboratuvar ortamında fiziksel olarak test edilmesi mümkün olmayanlar matematiksel olarak modellenir. Deprem davranışları asıl araştırma konusu olan ve doğrusal olmayan davranışların yoğunlaştığı alt yapılar ise laboratuvarda fiziksel olarak test edilirler. Bu çalışma kapsamında küçük ölçekli, tek katlı tek açıklıklı bir düzlem çerçevenin hibrit dinamik benzeri testi Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi “Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı”nda elcentro depremi ivme kaydı altında gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar tamamen matematiksel modeller kullanılarak yapılan sayısal çözümlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında gerçekleştirilen fiziksel numuneli hibrit dinamik benzeri testin yeterli ve istenilen hassasiyette sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

GİRİŞ

Yapıların deprem davranışlarının öğrenilmesi ve belirlenmesinde kullanılan üç ana yöntem: i) depremlerden sonra yapılan saha incelemeleri, ii) matematiksel modellemeler ve iii) laboratuvar testleridir. Saha incelemeleri, depremin yapılar üstündeki etkilerinin incelenmesindeki en gerçekçi yöntemdir. Ancak her deprem kaydının, yapının, zemin koşullarının vb. özellikleri incelenen duruma özel olması nedeniyle elde edilen sonuçlar kısıtlı olmaktadır. Matematiksel modelleme, yapıların düşük maliyetle birçok deprem senaryosuna göre incelenmesine imkân tanıdığı için en çok kullanılan yöntemdir. Ancak bu yöntemde de kullanılan analiz metoduna, malzeme ve yapı modelleri vb. kabullere göre elde edilen sonuçlarda büyük değişiklikler olabilmektedir. Laboratuvar testleri ise yapıların deprem davranışının ve kapasitesinin belirlenmesindeki en etkili yöntemdir. Saha incelemelerinin aksine araştırmacının incelemek istediği yapı tipinde ve deprem senaryosunda tam kontrolü vardır. Ayrıca laboratuvar testlerinde malzeme ve geometrik davranışına ait ön kabuller yapılmadığından elde edilen sonuçlar analitik modellemeye göre daha gerçekçi olmaktadır.

Yapıların deprem davranışlarının ve performanslarının belirlenmesinde kullanılan üç ana laboratuvar testi yöntemi: i) quasi statik testler, ii) dinamik benzeri testler ve iii) sarsma tablası / gerçek zamanlı testlerdir. Sarsma tablası testleri hem yapıların kapasiteleri açısından hem de depremlerin istemleri açısından en güvenilir sonuçları veren yöntemdir. Ancak özellikle çok serbestlik dereceli sarsma tablaları çok yüksek maliyetli yatırımlardır ve üzerlerindeki yapı ağırlığına ait kısıtlamalar yüzünden genellikle ölçeklendirilmiş yapılara ait testler gerçekleştirilebilmektedir. Quasi-statik testler ekonomikliği ve basitliği nedeniyle özellikle gerçek ölçekli yapıların incelenmesinde en çok kullanılan yöntemdir. Ancak bu yöntemde yapının dinamik davranışı göz ardı edilir ve yapının daha önceden belirlenmiş bir deplasman profilini gerçekleştirmesi sağlanır. Bu şekilde yapının kapasitesine ait bazı bilgiler elde edilebilse de, deprem istemi ile ilişkilendirilmesi deneyden sonra analitik olarak yapılır. Dinamik benzeri testlerde ise hem yapının kapasitesine hem de deprem istemine ait bilgiler test sırasında elde edilir. Ana prensip olarak, yapı adım adım integrasyon yöntemi ile incelenir. Simülasyon gerçek zamanlı olmayan düşük hızlarda gerçekleştirilir. Her zaman adımında yapının fiziksel testinden elde edilen reaksiyon kuvvetleri bir bilgisayar modelinde yapının atalet ve sönüm etkileri ile matematiksel olarak birleştirilir ve depremin bir sonraki zaman adımında yapıdan istediği deplasman değerleri belirlenir. Bu deplasman değerlerinin fiziksel yapıya etkilmesi ile test devam eder.

Hibrit dinamik benzeri simülasyon, matematiksel modellemenin ve laboratuvar testlerinin avantajlarını birleştiren bir yöntemdir. Bu yöntemde araştırılacak yapı, alt yapı parçalarına bölünür. Bu alt yapılardan deprem davranışı daha iyi bilinen, elastik sınırlarda davranan veya geometrik boyutları nedeniyle laboratuvar ortamında fiziksel olarak test edilmesi mümkün olmayanlar matematiksel olarak modellenir. Deprem davranışları asıl araştırma konusu olan ve doğrusal olmayan davranışların yoğunlaştığı alt yapılar ise laboratuvarda fiziksel olarak test edilirler.

Bu çalışma kapsamında küçük ölçekli, tek katlı tek açıklıklı bir düzlem çerçevenin hibrit dinamik benzeri testi Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi “Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı” nda gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar tamamen matematiksel modeller kullanılarak yapılan sayısal çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Ülkemizde daha önce dinamik benzeri testler yapılmıştır [1,2], ancak hibrit dinamik benzeri test halen dünyada çok sınırlı sayıda üniversitede gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışma, yazarların bilgisi dahilinde, ülkemizde yapılmış olan ilk hibrit dinamik benzeri testtir.

HİBRİT DİNAMİK BENZERİ TEST

Hibrit simülasyon ana mantık olarak; incelenecek tüm sistemin fiziksel ve/veya matematiksel alt yapı parçalarına ayrılmasını ve tüm sistemin rijitlik matrisinin atalet kuvveti içeren, altyapı bölümlenmesi yapılan ve deplasman sonuçları istenilen serbestlik derecelerine indirgenme işlemi yapılmasını içerir. Hareket denklemi (1)'de verilen sistemde i, j ve k alt indisleri sırasıyla, atalet kuvveti içeren serbestlik derecelerini, altyapı bölümlenmesi yapılan ve deplasman sonuçları istenilen serbestlik derecelerini ve ilgi odağı olmayan diğer serbestlik derecelerini içermektedir. Bu sistemde, ilgi odağı olmayan serbestlik dereceleri indirgenerek (2)'de verilen hareket denklemi üzerinden çözümler gerçekleştirilir.

$$\begin{bmatrix} M_i & & \\ & 0_j & \\ & & 0_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_j \\ \ddot{x}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} & K_{ik} \\ K_{ji} & K_{jj} & K_{jk} \\ K_{ki} & K_{kj} & K_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \\ x_k \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_i & & \\ & 0_j & \\ & & 0_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \\ I_k \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} M_i & \\ & 0_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_j \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ik} \\ K_{jk} \end{bmatrix} [K_{kk}]^{-1} \begin{bmatrix} K_{ki} \\ K_{kj} \end{bmatrix}^T \right) \begin{bmatrix} x_i \\ x_j \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_i & \\ & 0_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2)$$

İndirgenmiş rijitlik matrisi üzerinden gerçekleştirilen dinamik benzeri test gerçek zamanlı olmayan hızlarda yürütülür.

Dinamik benzeri test ana mantık olarak bir zaman integrasyon şeması kullanarak hareket denkleminin adım adım çözülmesini içerir. Her adımda, rijitlikle ilgili terimler fiziksel testten ve/veya matematiksel modelden alınır, üzerine atelet ve sönüm matrisleri sayısal olarak ilave edilerek hareket denklemi çözülür. Bu çalışmada iterasyonsuz örtük bir yöntem olan α -OS [3] zaman integrasyon şeması kullanılmıştır. Bu yöntemde (3)'de verilen α katsayısı ile değiştirilmiş hareket denklemi, yer değiştirme ve hız bileşenlerinin (4), belirleyici ve düzeltici bileşenlerine ayrılmasıyla çözülür.

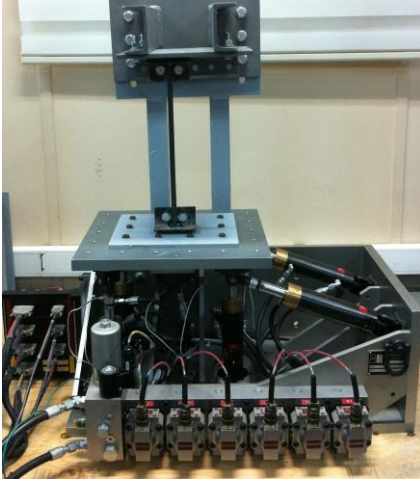
$$M\ddot{x}_{n+1} + (1+\alpha)C\dot{x}_{n+1} - \alpha C\dot{x}_n + (1+\alpha)r_{n+1} - \alpha r_n = (1+\alpha)f_{n+1} - \alpha f_n \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + \Delta t \dot{x}_n + \frac{1}{2} \Delta t^2 (1-2\beta) \ddot{x}_n + \Delta t^2 \beta \ddot{x}_{n+1} \\ \dot{x}_{n+1} &= \dot{x}_n + \Delta t (1-\gamma) \ddot{x}_n + \Delta t \gamma \ddot{x}_{n+1} \end{aligned} \quad (4)$$

Hibrit dinamik benzeri simülasyonda Illinois Üniversitesi, Urbana-Champaign'de (UIUC) geliştirilen ve açık kaynak kodlu olarak literatürde bulunan UI_Simcor yazılımı [4,5,6,7], Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'nde bulunan altyapıya göre düzenlenerek kullanılmıştır.

DENEY DÜZENEGİ VE TEST NUMUNESİ

Hibrit dinamik benzeri simülasyonda, matematiksel model ve fiziksel test altyapılarının birleşim noktalarında hesaplanan sınır koşullarını, fiziksel test numunesine etkitebilecek yük ve deplasman hücrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sınır koşulları incelenecek sistemdeki serbestlik derecesine göre tek eksenli olabileceği gibi, en genel halde altı eksenlidir. Bu çalışmada Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi "Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı"nda bulunan altı eksenli yük ve deplasman hücresi kullanılmaktadır. Altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresi her üç eksen doğrultusunda öteleme veya kuvvet ve her üç eksen etrafında dönme veya moment olarak aldığı komutları deney numunesine yansıtabilmektedir. Laboratuvarda kullanılan hücrenin fotoğrafı ve teknik kapasitesi Şekil 1'de verilmiştir.



Teknik Kapasitesi			
	X	Y	Z
Yer Değiştirme	± 50 mm	± 25 mm	± 25 mm
Dönme	± 11.6°	± 9.4°	± 20.4°
Kuvvet	18.6/31 kN (B/Ç)	9.3/15.6 kN (B/Ç)	27.9/46.8 kN (B/Ç)
Moment	2.2 kN.m	2.6 kN.m	2.2 kN.m

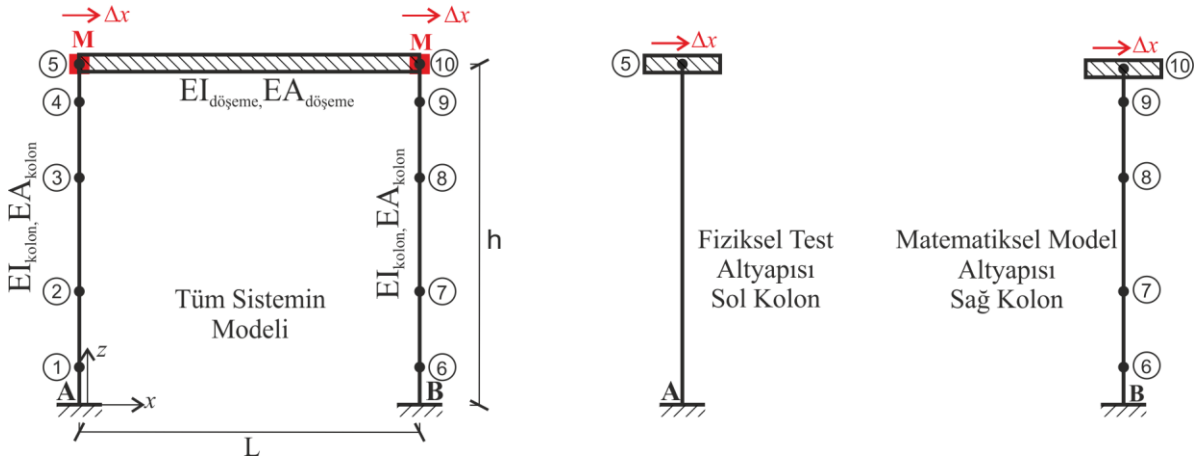
Şekil 1. Altı Serbestlik Dereceli Yük ve Deplasman Hücresi ve Teknik Kapasitesi

Bu çalışmada, Şekil 2.a'da verilen tek katlı tek açıklıklı düzlem çerçeve sistemi incelenmiştir. Çerçeve kat döşemesinin rijit diyafram olarak davrandığı düşünülerek, tüm kolon üst uçlarının yapacağı yatay deplasmanların aynı olacağı kabul edilmiştir. Ayrıca kolon üst uçlarındaki dönme değerlerinin sıfır olduğu kabul edilmiş ve tüm sistem tek serbestlik dereceli bir sisteme indirgenmiştir.

Bu kabuller altında, 5 ve 10' nolu düğüm noktalarının yapacağı tüm deplasman ve dönme değerleri aynı olacağından, tüm sistem bu noktadan iki ayrı alt yapı parçasına ayrılmıştır. Bu alt yapılardan sol kolon fiziksel test altyapısı olarak belirlenmiş ve 5 nolu düğüm noktasının bulunduğu noktadan Yük ve Deplasman Hücresine bağlanarak fiziksel olarak test edilmiştir. Sağ kolonun bulunduğu alt yapı ise sayısal olarak ZeusNL isimli sonlu elemanlar programı ile modellenmiş ve çözümleri yapılmıştır.

Kolonlar 12x12mm boyutlarında dolu gövdeli St37 çeliğinden imal edilmiştir. Kat yüksekliği 430mm, kat kütlesi 200kg olarak alınmıştır. Kolonların üretildiği St37 çelik malzemesinin elastisite modülü universal basma çekme cihazında üç adet deney yapılarak ve ortalaması alınarak 180GPa olarak belirlenmiş ve sayısal analizlerde kullanılmıştır.

Bu noktada belirtmekte fayda gördüğümüz bir diğer husus da; incelenen sistemin öncelikli amacının üniversitemizdeki hibrit dinamik benzeri test sisteminde bulunan makine, teçhizat ve yazılımların doğru ve hassas çalıştığının gösterilmesi olduğudur.

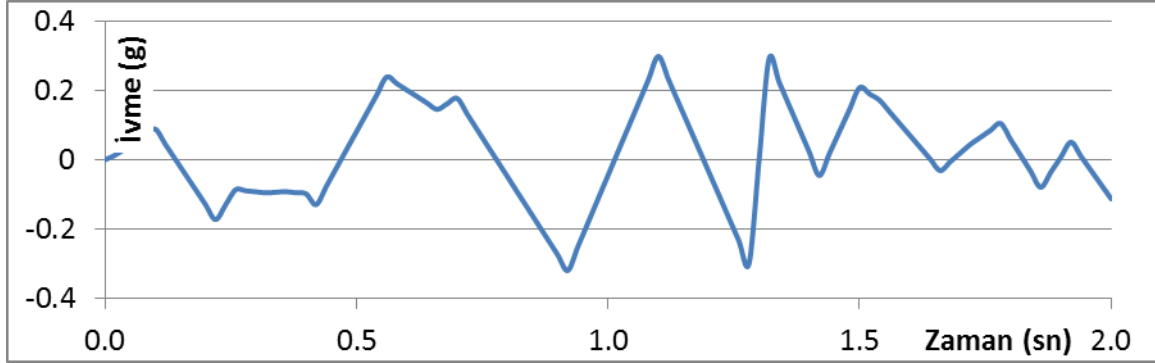


Şekil 2. a) incelenen tüm sistem b) fiziksel test ve c) matematiksel model altyapısı

SAYISAL SONUÇLAR

Tek katlı tek açıklıklı düzlem çerçevenin dinamik davranışı, karşılaştırma yapmak amacıyla, iki farklı şekilde incelendi. İlk incelemede gerçekleştirilen hibrit dinamik benzeri testte, sol kolonun bulunduğu alt yapı fiziksel test, sağ kolonun bulunduğu altyapı ise matematiksel model olarak ele alındı. İkinci incelemeye ait hibrit dinamik benzeri testte ise her iki alt yapı da matematiksel olarak modellendi.

Tüm dinamik analizlerde, maksimum yer ivmesi 0.319g olan elcentro deprem kaydının 2 saniyelik kısmı, 0.02 saniyelik zaman adımları ile kullanıldı (Şekil 3). Analizler boyunca malzeme davranışının lineer elastik bölgede kalması için deprem kaydı 0.5 katsayısı ile ölçeklendirildi.

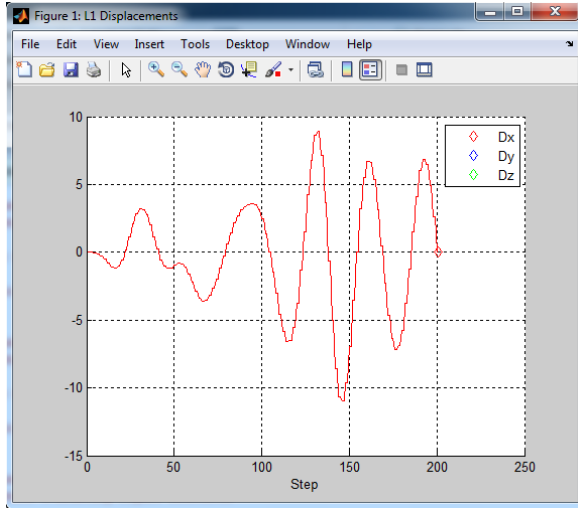


Şekil 3. Elcentro Depremi Yer İvmesi Kaydı

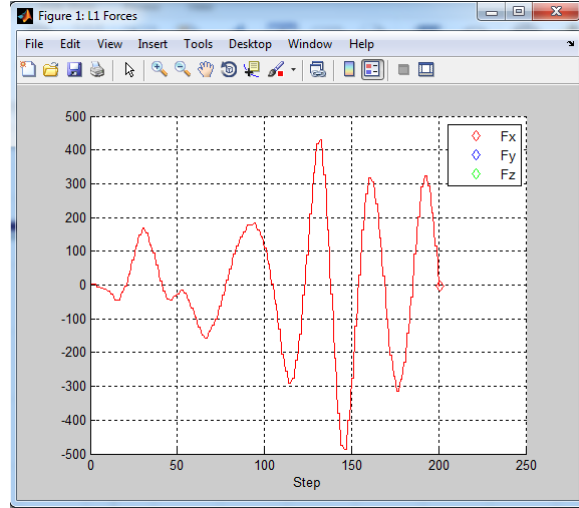
Fiziksel ve matematiksel modeller kullanılarak yapılan hibrit dinamik benzeri test sırasında fiziksel test kolonunun üst ucunda bulunan yük ve deplasman hücresinde gerçekleşen i) yatay deplasman, ii) yatay reaksiyon kuvveti, iii) dönme ve iv) reaksiyon momenti değerleri Şekil 4’de verilmiştir. Bu değerlerden de görüleceği gibi sıfır olması gereken kolon üst ucu dönmesi 1×10^{-4} rad mertebelerinde gerçekleştirilmiş ve kolon üst ucunda oluşması gereken moment değerleri oluşmuştur.

Fiziksel numuneli hibrit dinamik benzeri test sırasında alt yapılara gönderilen yatay deplasman istemleri ve elde edilen yatay reaksiyon kuvvetleri Şekil 5’de verilmiştir. Çerçeve tek serbestlik dereceli sisteme indirildiği için her iki alt yapıya da gönderilen deplasman istemleri aynıdır. Bunun yanında her iki yapıdan elde edilen yatay reaksiyon kuvvetleri birbirine çok yakındır. İlgili grafiklerden de görüleceği gibi her iki alt yapı da lineer elastik sınırlarda davranış göstermiştir. Her iki yapıdan elde edilen yatay deplasman – yatay reaksiyon kuvveti grafikleri Şekil 6’da karşılaştırılmıştır. Matematiksel modele ait grafiğin rijitliği 46.7 N/mm olarak gerçekleşirken fiziksel modele ait rijitlik değeri ise 44.9 N/mm olarak ölçülmüştür. Hesaplanan rijitlik değerleri arasındaki %4’lük fark kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

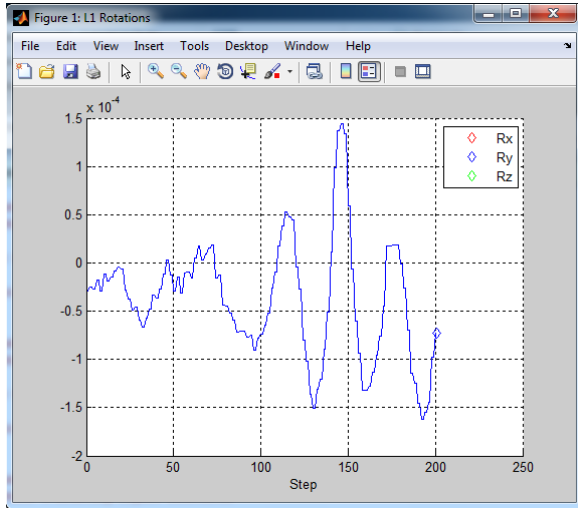
Hem fiziksel numuneli hem de tamamen matematiksel modelli gerçekleştirilen hibrit dinamik benzeri testler sonucunda, çerçevenin kat deplasmanlarına ait elde edilen değerler Şekil 7’de verilmiş ve karşılaştırılmıştır. Her iki analiz sonucunda elde edilen kat deplasmanlarının zaman içindeki davranışı birbirleri ile beklenenin üzerinde uyumlu gerçekleşmiştir. Mutlak değer olarak maksimum deplasman, fiziksel testli ve tamamen matematiksel modelli analizlerde sırasıyla -10.5mm ve 10.0mm olarak gerçekleşmiştir. Değerler arasındaki %5’lik fark kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar ışığında gerçekleştirilen fiziksel numuneli hibrit dinamik benzeri testin yeterli ve istenilen hassasiyette sonuçlar verdiği görülmüştür.



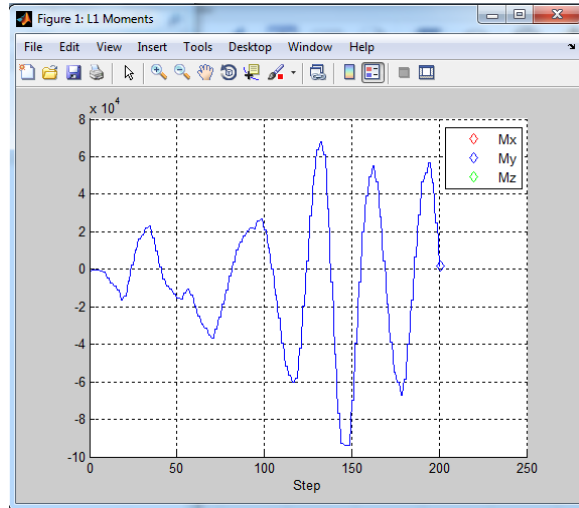
a) Yatay Deplasman (mm)



b) Yatay Reaksiyon Kuvveti (N)

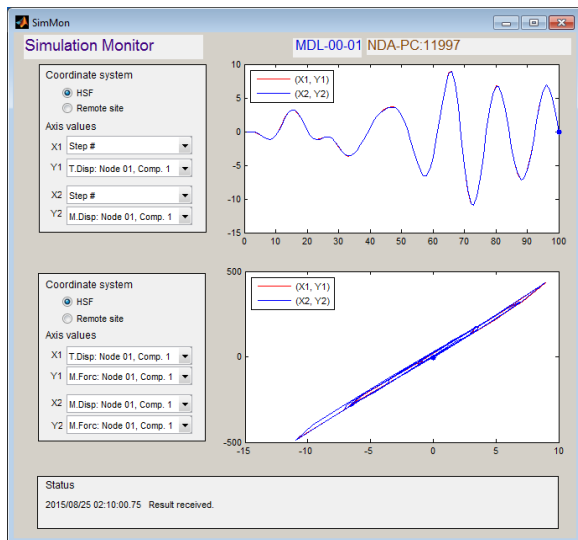


c) Dönme (rad)

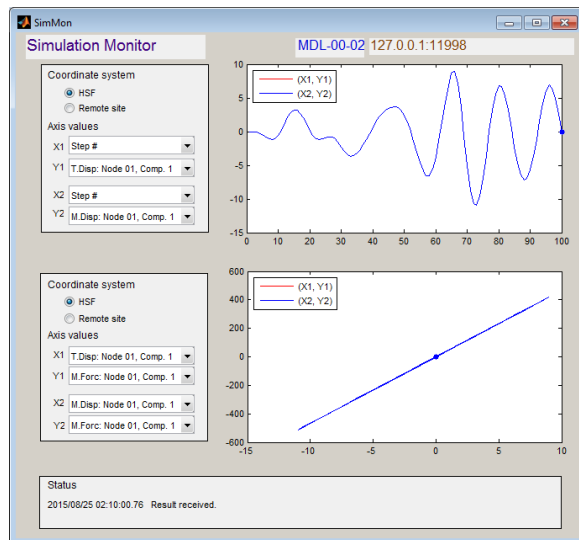


d) Reaksiyon Momenti (N)

Şekil 4. Yük ve Deplasman Hücresinde Oluşan Değerler

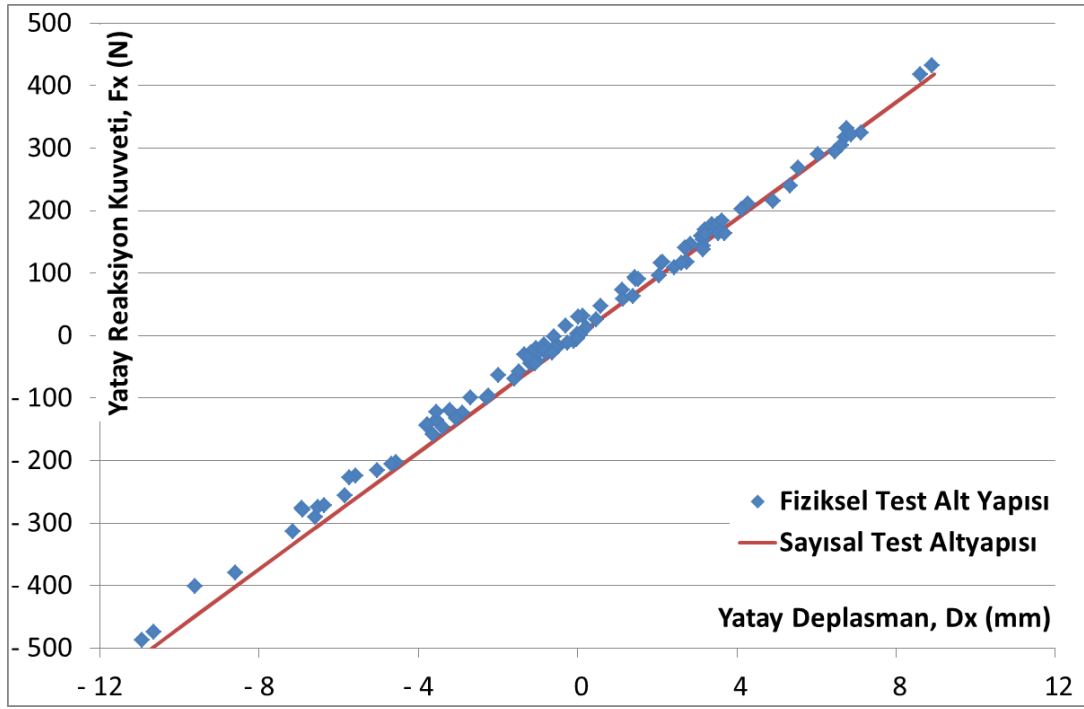


a) Fiziksel Test Alt Yapısı

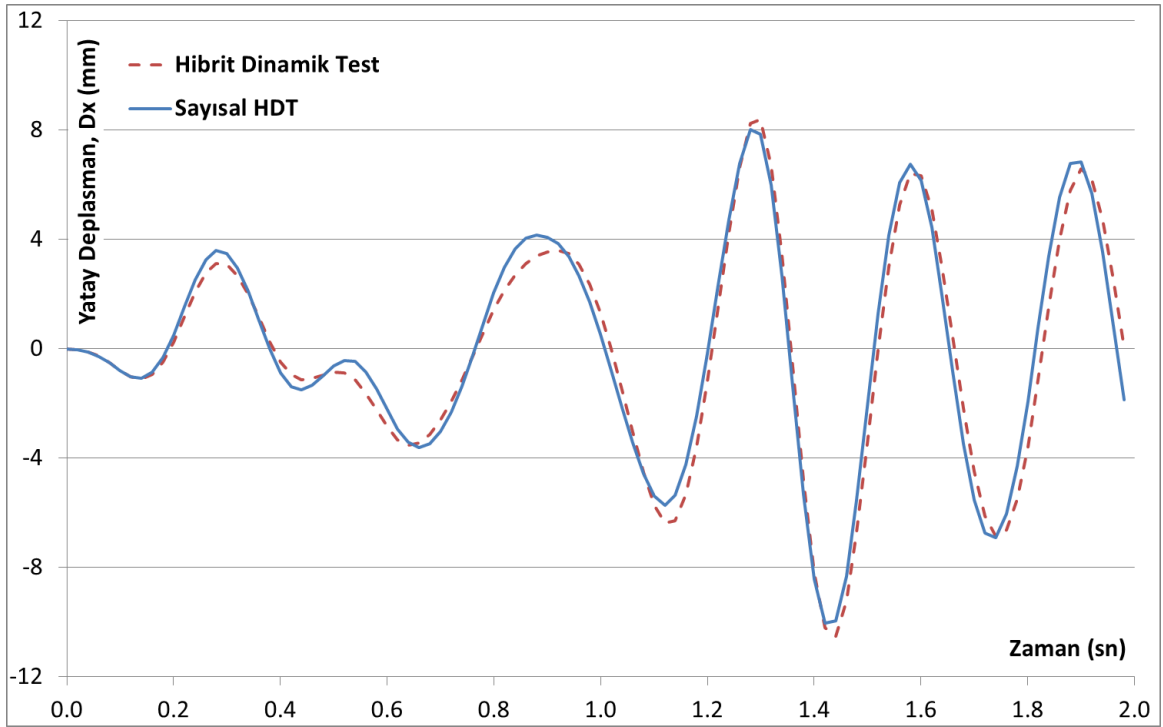


b) Sayısal Alt Yapı

Şekil 5. Alt Yapılarda Oluşan Yatay Deplasmanlar ve Yatay Reaksiyon Kuvvetleri



Şekil 6. Yatay Deplasman-Reaksiyon Kuvveti (Fiziksel ve Sayısal Test Alt Yapıları)



Şekil 7. Yatay Deplasman Karşılaştırması

SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Tek katlı tek açıklıklı düzlem çerçevenin dinamik davranışı, fiziksel test numuneli hibrit dinamik benzeri test ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar tamamen matematiksel modelli hibrit dinamik benzeri test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan incelemeler sonucunda, kullanılan yük ve deplasman hücresinin istenilen deplasman ve dönme değerlerini yeterli hassasiyette gerçekleştirebildiği görülmüştür. Ayrıca fiziksel test numunesinden elde edilen yatay rijitlik değeri, matematiksel olarak hesaplanan değerle %96'dan büyük oranda uyumludur. Son olarak elcentro deprem kaydı altında elde edilen maksimum yatay deplasmanlar arasındaki fark %5 civarında oluşmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında gerçekleştirilen fiziksel numuneli hibrit dinamik benzeri testin yeterli ve istenilen hassasiyette sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Sonuçların hassasiyetinin artırılması için, güçlü duvar olarak çalışan çelik reaksiyon yapısının etkilerinin de dikkate alınması planlanmaktadır.

Ülkemizde hibrit dinamik benzeri test yapılabilmesinin en büyük avantajı, coğrafik olarak dağınık bulunan yapı mekaniği laboratuvarlarının internet üzerinden eş zamanlı olarak ortak deney yapabilmesine imkan sağlıyor olmasıdır. Bu sayede daha önce gerek laboratuvarların yükleme kapasiteleri, gerekse fiziksel mekân sınırları dolayısıyla yapılamayan testlerin önü açılacaktır.

TEŞEKKÜRLER

Bu bildiri TÜBİTAK tarafından desteklenen 212M006 nolu “Hibrit Dinamik Benzeri Simülasyon ve Test İçi Model Güncellemesi” projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan hazırlanmıştır. Ayrıca yazarlar desteklerinden ötürü Yapı Merkezi Prefabrikasyon A.Ş.’ye, Akkon Çelik Yapı Sistemleri San. ve Tic. A.Ş.’ye, TCS Çelik Yapı ve Taahhüt San. Tic. Ltd. Şti.’ne ve 2012BİL151 nolu İSTKA projesine teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

- [1] Yüksel, E., Yalçın, C., “*Benzeşik dinamik deney tekniği kullanılarak karbon liflerle güçlendirilmiş bölme duvarlı betonarme çerçevelerin incelenmesi*”, MAG Proje No: 106M050, TÜBİTAK, Ankara, 2008.
- [2] Özcebe, G., Canbay, E., Binici, B., Kurç, Ö., Burak, B., “*Dinamik benzeri deneylerle yapı güçlendirme tekniklerinin irdelenmesi*”, MAG Proje No: 106M451, TÜBİTAK, Ankara, 2010.
- [3] Combescure, D., Pegon, P., Alpha-Operator Splitting Time Integration Technique for Pseudodynamic Testing Error Propagation Analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(7-8): 427-443, (1997).
- [4] Kwon, O.S., Elnashai, A.S., Spencer, B., A framework for distributed analytical and hybrid Simulations, *Structural Engineering and Mechanics*, 30(3), 331-350, (2008).
- [5] Kwon, O.S., Nakata, N., Elnashai, A.S., Spencer, B., A Framework for multi-site distributed simulation and application to complex structural systems, *Journal of Earthquake Engineering*, 9(5), 741-753, (2005).
- [6] Kwon, O.S., Nakata, N., Park, K.S. Elnashai, A.S., Spencer, B. *UI-Simcor user manual and examples for UI-SimCor v2.6 and NEES-SAM v2.0*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, February, 2007.
- [7] M. Bletzinger, 2014, *LBCB Operations Manager*, <https://nees.org/resources/lbcbom>.