



Review Paper / Derleme Makalesi
PSEUDO DYNAMIC TESTING METHODOLOGY AND ITS AN APPLICATION

Ercan YÜKSEL*, Hasan ÖZKAYNAK, Melih SÜRMEİ

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak-İSTANBUL

Received/Geliş: 08.10.2009 Accepted/Kabul: 30.12.2009

ABSTRACT

Pseudo dynamic testing methodology which aims to simulate earthquake behavior of structures or particular structural components subjected to dynamic loads consists of both the analytical and experimental analyses in a coupled interaction. The test specimen is idealized as a spring-mass discrete system, hydraulic actuators are positioned to the lumped mass levels, and the test specimen is deformed up to the target displacement which is extracted from the analytical calculation. The reaction forces measured from the load cells attached to the hydraulic actuators; are the terms of the stiffness matrix of the test specimen. Based on the experimentally obtained stiffness matrix and the prescribed mass and damping matrices, the dynamic equilibrium equation is generated and the displacement vector to be applied to the specimen in the next step is calculated by using a proper numerical integration technique. This process is repeated for the whole seismic event. Due to application of the loading function in a quasi-static manner, local behavior and damage propagation of the test structure could be traced. Within the context of this study, a pseudo-dynamic testing algorithm for single degree of freedom systems was developed and a computer code was produced. In order to verify the developed algorithm, a steel column was tested under different acceleration levels in the linear and non-linear regions and the test results were compared with the analytical ones.

Keywords: Pseudo dynamic test, dynamic loading, earthquake simulation.

BENZEŞİK DİNAMİK DENEY TEKNİĞİ VE BİR UYGULAMASI

ÖZET

Benzeşik dinamik deney tekniği, yapı sistemlerinin veya yapısal elemanların dinamik karakterli yükler etkisindeki davranışının belirlenmesi için, etkileşimli olarak gerçekleştirilen deneysel ve analitik çözümü içermektedir. İncelenecek sistem yığılı kütleli olarak idealleştirilmekte; yığılı kütle konumlarına hidrolik verenler bağlanarak, numune kuramsal hesapta elde edilen yerdeğiştirme durumuna itilmektedir. Hidrolik verenlere bağlı yük ölçerlerden okunan reaksiyon kuvvetleri deney numunesinin rijitlik matrisinin terimlerine karşı gelmektedir. Deneysel olarak belirlenen rijitlik matrisi ile kuramsal olarak oluşturulan kütle ve sönüm matrisleri kullanılarak, dinamik denge denklemleri kurulmakta ve seçilmiş bir sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesabın bir sonraki adımında numuneye etkilenecek yerdeğiştirme vektörü belirlenmektedir. Bu işlem dinamik yükleme fonksiyonu sona erene kadar sürdürülmektedir. Yükleminin duraklamalı olarak uygulanması sebebiyle numune üzerinde hasar oluşumu ve gelişimi izlenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, tek dinamik serbestlik dereceli sistemler için bir benzeşik dinamik deney algoritması geliştirilmiş ve programlanmıştır. Geliştirilen algoritmanın doğrulanması amacı ile bir çelik kolon farklı genliklerdeki ivme kayıtları etkisinde doğrusal ve doğrusal olmayan bölgelerde denenmiş elde edilen sonuçlar kuramsal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Benzeşik dinamik deney, dinamik yükleme, deprem simülasyonu.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: yukselerc@itu.edu.tr, tel: (212) 285 67 61

1. GİRİŞ

Yapı taşıyıcı sisteminin bütünü ya da seçilmiş bazı elemanlarının deprem etkisindeki davranışı statik ve dinamik karakterli deneyler ile belirlenebilmektedir, [1]. Statik deneylerde, numunenin doğrusal ve/veya doğrusal ötesi bölgedeki davranışı hakkında genel bilgi edinilmekte; ancak gerçek deprem durumunda oluşan yük ve yerdeğiştirme geçmişi ile statik deney sonuçlarının ilişkilendirilmesi güç olabilmektedir. Statik deneyde numune yük ve/veya yerdeğiştirme kontrollü olarak; statik karakterli yükleme etkisinde adım adım yüklenmektedir. Yükleme biçimi, deneyin amacına bağlı olarak, monotonik, tekrarlı ya da tersinir tekrarlı biçimde olabilmektedir. Genel olarak, incelenen sisteme ait dayanım, rijitlik, enerji tüketim kapasitesi, göçme biçimi gibi yapısal performans özellikleri belirlenebilmektedir. Sarsma tablası üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile gerçek deprem durumunda ulaşılabilecek yapısal davranış özelliklerine en yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Numune istenilen yer hareketi etkisinde incelenmek üzere rijit masaya bağlanmakta; atalet kuvvetleri ile yapısal sönüm etkileri doğrudan davranışa katılmaktadır. Kapasite sınırlamaları, yüksek kurulum ve işletme maliyetleri dolayısıyla daha çok tercih edilen küçük boyutlu sarsma tablaları, genelde benzerlik ve ölçek kuralları kullanılarak tasarlanan numunelerin denenmesinde kullanılmaktadır. 1970 lardan günümüze kadar gelişimini sürdürmüş bir başka deneysel yöntem de *benzeşik dinamik deney (pseudo dynamic test)* tekniğidir. Seçilmiş bir ivme kaydı etkisinde numunenin deneysel ve analitik çözümünün etkileşimli olarak birlikte gerçekleştirildiği hibrit bir yöntemdir. Numunenin değişen rijitlik özellikleri doğrudan deneyden alınmakta, dinamik denge denklemi analitik olarak çözülmektedir. Sarsma tablası deneylerine göre oldukça ekonomik ve kolay uygulanabilen bir yöntem olduğundan, farklı özellik ve boyutlardaki yapıların deprem etkisindeki davranışlarının belirlenmesinde tercih edilmektedir. Bu deney tekniğinde, sarsma tablası deneylerinde karşılaşılan sınırlamalar bulunmamakta, statik deneylerde kullanılan yükleme ve ölçüm aletleri kullanılabilir. Benzeşik dinamik deney tekniğinde yükleme ve duraklama adımları birbirini izlediğinden, numunede hasar oluşumu ve takibi mümkün olmaktadır.

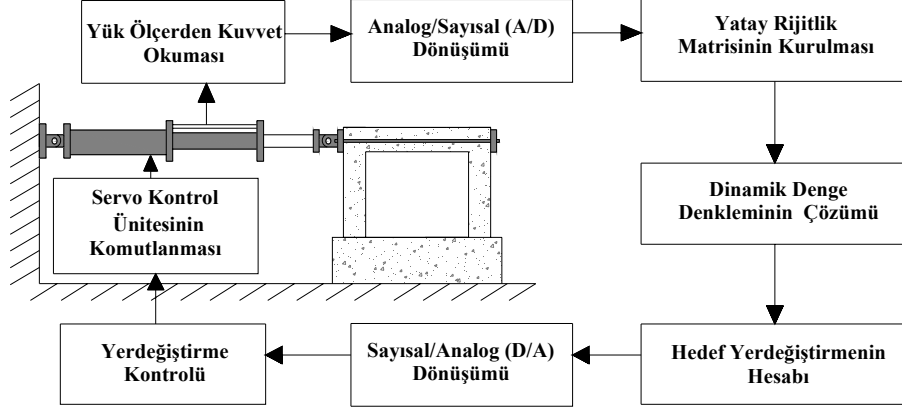
Benzeşik dinamik deney tekniği 1969 yılında, tek serbestlik dereceli bir sistemin deprem yükleri etkisinde incelenmesi ile gelişmeye başlamıştır, [2]. Bu deneyde dinamik denge denkleminin çözümü için analog bilgisayar, yükleme için de elektromanyetik hidrolik veren kullanılmıştır. Sayısal bilgisayarların ve servo-kontrol sistemlerinin ortaya çıkmasından sonra Takanashi [3] benzeşik dinamik deney tekniğini bugünkü haline yaklaştırmıştır. Sonraki dönemde yapılan çalışmalar ile benzeşik dinamik deney tekniğinin, sarsma tablası deney tekniğine karşı etkin ve güçlü bir alternatif olması sağlanmıştır, [4].

Benzeşik dinamik deney tekniğinde, yapı sistemi zaman tanım alanında ayrık yay-kütle sistemine dönüştürülmekte, gerçek zamanlı yükleme yerine adım adım çözüm yapılmaktadır. Dinamik denge denkleminin adım adım sayısal çözümü ve deneyin uygulanması işlemleri birlikte ve etkileşimli olarak gerçekleştirilmektedir. Deney numunesinin kütle ve viskoz sönüm özellikleri analitik olarak modellenmektedir. Sayısal integrasyon ile hesaplanan hedef yerdeğiştirme, hassas optik yerdeğiştirme ölçer kontrolünde numuneye tatbik edilmektedir. Numunenin uygulanan yerdeğiştirmeye cevabı da hidrolik veren gövdesine bağlı olan yük ölçer ile okunup, kontrol ünitesi üzerinden bilgisayar yazılımına gönderilmektedir, [5]. Şekil 1 de, benzeşik dinamik deneyde yer alan önemli bileşenler görülmektedir, [6].

Elektronikte, kontrol-bilgisayar sistemlerinde ve hesap yöntemlerinde sağlanan ilerlemeler doğrultusunda benzeşik dinamik deney tekniğinde zaman içinde önemli gelişmeler olmuş; yöntem çok sayıda araştırmada farklı özellik ve boyutlardaki numuneler üzerinde uygulanmıştır, [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15].

2. BENZEŞİK DİNAMİK DENEY TEKNİĞİ – DÜZENEK VE UYGULAMA YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Benzeşik dinamik deney tekniğinde izlenen genel yol, *sonlu fark metodu* ile gerçekleştirilen sayısal integrasyon durumu için anlatılacaktır, [7].



Şekil 1. Benzeşik dinamik deney uygulamasındaki önemli işlemler

İncelenecek yapı sistemine ait dinamik denge denklemi matris formunda (1) de verilmiştir.

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + \{\bar{f}\} = -[m]\{1\}\ddot{x}_g \quad (1)$$

Bu denklemde x , m , c , \bar{f} ve \ddot{x}_g sırası ile yerdeğiştirme, kütle, viskoz sönüm, reaksiyon kuvveti ve zemin ivmesine karşı gelmektedir. Bu denklem takımı Δt hesap adım aralıkları için adım adım çözülmektedir. (i). adıma ait olan denklem takımı yazılacak olursa;

$$[m]\{\ddot{x}_i\} + [c]\{\dot{x}_i\} + \{\bar{f}_i\} = -[m]\{1\}\ddot{x}_{g_i} \quad (2)$$

Bu adımdaki hız ve ivme büyüklükleri, sonlu fark ifadeleri ile yerdeğiştirmelere bağlı olarak (3) ve (4) nolu denklemlerden hesaplanabilir.

$$\{\dot{x}_i\} = \frac{\{x_{i+1}\} - \{x_{i-1}\}}{2\Delta t} \quad (3)$$

$$\{\ddot{x}_i\} = \frac{\{x_{i+1}\} - 2\{x_i\} + \{x_{i-1}\}}{(\Delta t)^2} \quad (4)$$

(3) ve (4) numaralı denklemler (2) de yerine konulduğunda (i+1). adıma ait yerdeğiştirme büyüklüğü hesaplanabilmektedir.

(5) nolu denklemden görüleceği gibi, (i+1). adıma ait yerdeğiştirme büyüklüğü o adıma kadar hesaplanmış büyüklüklere bağlı olarak belirlenebilmektedir. Böylelikle denklem takımının artımsal formda oluşturulmasına ve ardışık yaklaşıma gerek kalmamaktadır. Özellikle

doğrusal ötesi davranışta bu özellik önem kazanmaktadır. Hesaplanan x_{i+1} yerdeğiştirmesi, çok hassas optik yerdeğiştirme ölçer kontrolünde numuneye tatbik edilmektedir. Hedef yerdeğiştirmeye ulaşıldığında, yapıdaki reaksiyon kuvvetleri okunmaktadır. Oluşan reaksiyon kuvvetlerine karşı gelen yatay rijitlik matrisi doğrudan deneyden alındığı için, yapısal elemanların tersinin tekrarlı yükler etkisindeki davranışını temsil edebilecek bir davranış modeli seçimine gerek kalmamaktadır. Bunun sonucu olarak da, kuramsal hesapta yaşanan davranış modeli seçimiyle ilgili yaklaşıklık ortadan kalkmaktadır.

$$\{x_{i+1}\} = \frac{2[m]\{x_i\} + \left(\frac{\Delta t}{2}[c] - [m]\right)\{x_{i-1}\} - (\Delta t)^2 \left(\{\bar{f}_i\} + [m]\{1\}\ddot{x}_{gi}\right)}{[m] + \frac{\Delta t}{2}[c]} \quad (5)$$

Doğrusal olmayan davranıştan kaynaklanan çevrimsel sönüm deneysel olarak dikkate alındığı için, c sönüm matrisi sadece viskoz sönüm kuvvetlerini ifade etmektedir, [1].

Geliştirilen benzeşik dinamik deney algoritmasına ait genel akış diyagramı Şekil 2 de verilmiştir. Deneyin uygulanması için gereken toplam süre, her adımda harcanan zamanların toplamı kadardır. Her adım, hareket zamanı ve bekleme zamanından oluşmaktadır. Her adımda gerçekleştirilen görevler; bir önceki adımın hareket bitiminin beklenmesi, tanımlanmış bazı özel görevlerin gerçekleştirilmesi, veri kaydının alınması, hareket sınırlarının kontrol edilmesi, hareket denkleminin çözülmesi, hidrolik verenin hedefe gitmesi şeklinde sıralanabilir. Benzeşik dinamik deney tekniği uygulamasında, uzunluğu saniyeler mertebesinde olan bir deprem kaydı numuneye saatler mertebesinde etkililmektedir, [16].

Geliştirilen benzeşik dinamik deney yazılımına giriş bilgisi olarak; kütle, viskoz sönüm oranı, ilk yatay rijitlik, deprem ivme kaydı, hesap adım aralığı bilgileri girilmektedir. Deney süresince uygulanacak olan hidrolik veren etkime hızı da giriş bilgileri arasında bulunmaktadır.

3. BENZEŞİK DİNAMİK DENEY TEKNİĞİNDE GELİŞEN KONULAR

3.1. İntegrasyon Tekniği

Benzeşik dinamik deney tekniği algoritmasında, dinamik denge denkleminin çözümü için kullanılan integrasyon tekniği en önemli bileşendir. Sayısal integrasyon yöntemlerinin çoğu Newmark yöntemine [17] dayanmaktadır. İvmenin hesap adımı süresince sabit, doğrusal vb. biçimlerde değiştiği varsayımına dayalı olarak, hız ve yerdeğiştirme ivmenin integrasyonu ile elde edilir. Yerdeğiştirme ve hız hesabında kullanılan ifadeler (6) da verilmiştir.

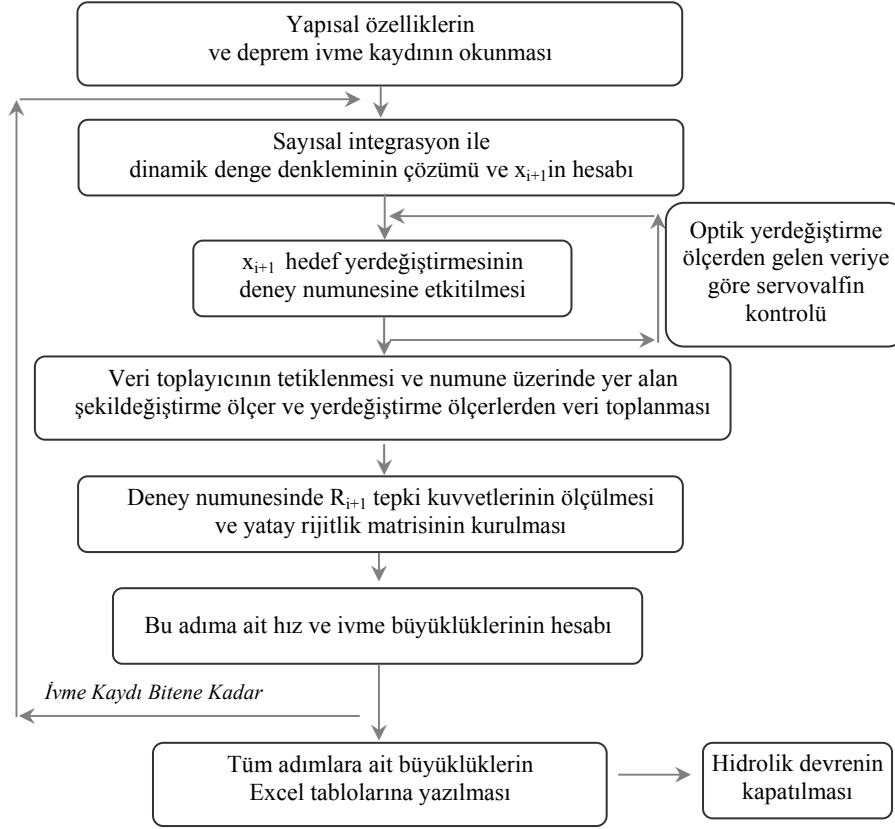
$$x_{i+1} = x_i + \Delta t \dot{x}_i + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right) \ddot{x}_i + \beta \ddot{x}_{i+1} \right] \quad (6)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \Delta t \left[(1 - \gamma) \ddot{x}_i + \gamma \ddot{x}_{i+1} \right]$$

Denklemden yer alan β ve γ değişkenleri Newmark integrasyon parametreleri adını alırlar. Sayısal çözümün kararlılığını ve doğruluğunu kontrol ederler. Bu değişkenlere farklı değerler verilerek farklı yöntemler ortaya çıkmıştır.

$\beta = 0$ ve $\gamma = 1/2$ olması durumunda, bu çalışma kapsamında geliştirilen algoritmada da kullanılan *sonlu fark metodu* elde edilmektedir. Sonlu fark metodunun en önemli üstünlüğü *açık integrasyon tekniği* olmasıdır. Yani deneyin bir sonraki adımında gerekli olan yerdeğiştirme büyüklüğü o adım ve önceki adımlarda elde edilen büyüklüklere bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu integrasyon tekniğinin kararlı olması için, $\omega \Delta t \leq 2$ koşulu sağlanmalıdır. ω incelenen sistemin en büyük açılal frekansına karşı gelmektedir. Yapı doğal

titreşim periyoduna göre küçük seçilmesi gereken hesap adım aralığı, toplam deney süresinin uzamasına sebep olmaktadır.



Şekil 2. Sonlu fark metodunun kullanıldığı benzeşik dinamik deney algoritması

$\beta = 1/4$ ve $\gamma = 1/2$ olması durumunda, *sabit ortalama ivme metodu* elde edilmektedir. Bu metod, *kapalı integrasyon tekniği olup*, mutlak olarak kararlıdır. Çözümüne ardışık yaklaşım ile ulaşılır. Bu durum deneysel çalışmada az istenir. Ardışık yaklaşım sırasında hedefin aşılma olasılığı bulunduğu gibi, ardışık yaklaşım için harcanan süre gerçek zamanda uygulanan benzeşik dinamik deneylerde kullanımı güçleştirmektedir.

Newmark tipi yöntemlerin önemli bir üstünlüğü de γ değişkeni yardımıyla sayısal sönümün davranışa yansıtılmasıdır. $\gamma = 1/2$ durumunda sayısal sönüm sıfırken, $\gamma < 1/2$ durumunda negatif, $\gamma > 1/2$ durumunda da pozitif sayısal sönüm elde edilmektedir. Yüksek frekanslı modlar deneysel hatalara daha duyarlı olduğu için, [5] de benzeşik dinamik deneyde bu modların sayısal olarak sönümlenmesinin önemini vurgulanmıştır.

Hilber vd., [18], Newmark yöntemini revize ederek yeni bir metod geliştirmiştir. *HHT- α metodu* olarak adlandırılan bu yöntem, Newmark tipi yöntemlerin üstünlüklerini taşımakta ve doğrulukta azalma olmadan sayısal sönümün uygulanabilmesini mümkün kılmaktadır. Sayısal sönümün kontrol edilmesi için α değişkeni tanımlanmıştır.

$$M\ddot{x}_{i+1} + (1 + \alpha)C\dot{x}_{i+1} - \alpha C\dot{x}_i + (1 + \alpha)R_{i+1} - \alpha R_i = (1 + \alpha)F_{i+1} - \alpha F_i \quad (7)$$

(7) ifadesindeki yerdeğiştirme ve hız (6) denklemleri ile; β, γ, α değişkenleri ise (8) denklemleri ile hesaplanmaktadır.

$$\beta = \frac{1}{4}(1 - \alpha^2) \quad \gamma = \frac{1}{2}(1 - 2\alpha) \quad -1/3 \leq \alpha \leq 0 \quad (8)$$

HHT- α metodu mutlak olarak kararlı olup, $\alpha = 0$ olduğunda *sabit ortalama ivme metoduna* dönüşmektedir.

Nakashima vd.,[19], benzeşik dinamik deneyde sayısal integrasyon için *OS metodunu* önermiştir. Metod; davranışın doğrusal bölümü için açık, doğrusal olmayan bölümü için de kapalı bir integrasyon tekniğini kullanmaktadır. Yapıdan alınacak tepki kuvveti için, aşağıdaki yaklaşım izlenmektedir.

$$m\ddot{x}_{i+1} + c\dot{x}_{i+1} + f_{i+1}^* + k(x_{i+1} - x_{i+1}^*) = -mx_{g_{i+1}} \quad (9)$$

(9) ifadesinde, x_{i+1}^* öncü yerdeğiştirmeyi, f_{i+1}^* öncü yerdeğiştirmeye karşı gelen tepki kuvvetini, k ise elastik rijitliği göstermektedir. Öncü yerdeğiştirme x_{i+1}^* , düzeltilmiş yerdeğiştirme x_{i+1} ve hız \dot{x}_{i+1} büyüklükleri (10) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} x_{i+1}^* &= x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{1}{4} \Delta t^2 \ddot{x}_i \\ x_{i+1} &= x_{i+1}^* + \frac{1}{4} \Delta t^2 \ddot{x}_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} &= \dot{x}_i + \frac{1}{2} \Delta t (\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1}) \end{aligned} \quad (10)$$

Yöntemin ($i+1$). adımında yapılan işlemler; $i+1$ adıma ait öncü yerdeğiştirmenin hesabı, numuneye x_{i+1}^* yerdeğiştirmesinin uygulanması ve karşı gelen f_{i+1}^* tepki kuvvetinin ölçülmesi, düzeltilmiş yerdeğiştirme ile hız ve ivme büyüklüklerinin hesabı şeklinde sıralanabilir, [20]. Yöntemin kararlılığı tek ve çok serbestlik dereceli sistemler için araştırılmıştır. Yapı mühendisliği uygulamalarının pek çoğunda karşılaşıldığı gibi, sistem rijitliğinin giderek azaldığı durumlarda yöntemin mutlak kararlı olduğu tesbit edilmiştir.

3.2. Deneysel Hatalar

Deneysel hatalar; kullanılan deney aletlerinin hassasiyeti, numunedeki ön kusurlar ve deneyin ideal şartlarda gerçekleştirilememesi gibi sebeplerle ortaya çıkabilmektedir. Benzeşik dinamik deney tekniğinin kapalı döngü içinde adım adım uygulanıyor olması sebebiyle hatalar yığışımli olarak artabilmekte ve doğruluk bundan etkilenmektedir, [6].

Benzeşik dinamik deney tekniği, hesaplanan yerdeğiştirme vektörünün numuneye etkilmesi sırasında oluşabilecek küçük hatalara duyarlıdır, [21], [22]. Oluşabilecek deneysel hatalar uygun sayısal integrasyon yöntemi ve hesap adım aralığı kullanılarak kabul edilebilir seviyede tutulabilir.

Numuneden alınan tepki kuvvetleri hesabın sonraki adımında uygulanacak yerdeğiştirmelerin hesabında kullanıldığı için; sistematik hatalar deneyin, ilerleyen adımlarda farklı bir yörüngeye oturmasına sebep olabilir. Hidrolik verenin hedefe üstten yaklaşması gerçekleşen sönümün büyümesine, alttan yaklaşması ise sönümün küçülmesine ve davranış

genliklerinin büyümesine sebep olabilmektedir. Hedefe alttan yaklaşma ile ilgili hataları küçültmek için, uygun algoritma oluşturulması ya da çok hassas yerdeğiştirme kontrolü yapılması gerekmektedir. Genel olarak çok rijit deney numuneleri için, benzeşik dinamik deneyin doğruluğu sınırlı olabilmektedir.

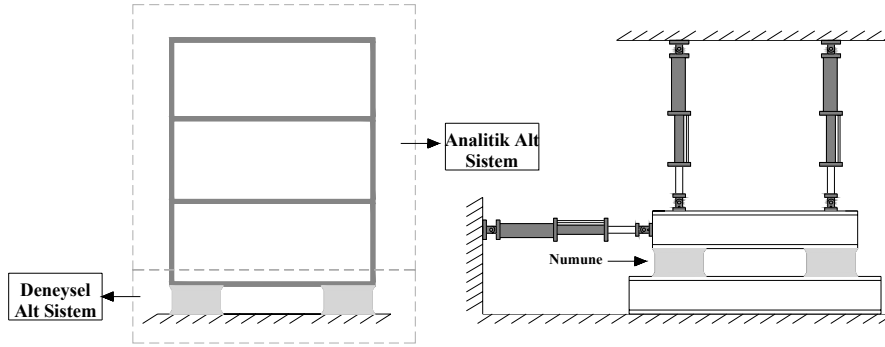
Uygulanan yerdeğiştirmelerden kaynaklanan hataların küçültülmesi için pek çok yaklaşım denenmiştir. Shing ve Mahin [23] ileri mod etkilerinin olumsuzluklarını gidermek için viskoz sönüm matrisini kullanmış ancak bu uygulamanın ilk modlar üzerinde olumsuz etki yapabileceği görülmüştür. Sayısal integralin, deneyden ölçülen yerdeğiştirmeler yerine hesaplanan yerdeğiştirmeler kullanılarak yapılması önerilmiştir. Ancak bu yaklaşımın, yerdeğiştirme okumalarından kaynaklanacak hataları engellese de, numuneden ölçülen reaksiyon kuvvetlerindeki hatayı engelleyemediği belirtilmiştir.

Benzeşik dinamik deneydeki bir başka hata kaynağı ise yöntemin adım adım ilerliyor olmasıdır. Bir yerdeğiştirme artımının numuneye uygulanmasından sonra sistemin farklı kesitlerindeki şekil değiştirme ve yerdeğiştirmelerin okunması ve kaydedilmesi için, ölçüm sisteminin hızına bağlı olarak, belirli bir süre beklenilmesi gerekmektedir. Eğer numune akma bölgesinde ise bekleme süresince dayanımda önemli düşüşler görülebilmektedir. Bu problemin önüne geçebilmek için bekleme sürelerinin kısaltılması önerilebilir. Limit durumda bekleme süreleri sıfıra indirilerek, sürekli formda benzeşik dinamik deney uygulanabilir, [24].

3.3. Yeni Uygulamalar

Benzeşik dinamik deney tekniğindeki en önemli gelişmelerden birisi alt sistem kullanımınıdır. 1980 lerde gerçekleştirilen benzeşik dinamik deney uygulamalarında yapı sistemi bütün olarak denenmekte, bu sebeple deney maliyetleri yükselmekte ve büyük kapasiteli laboratuvar donanımlarına gereksinim duyulmaktaydı. Alt sistem uygulamasında ise yapı sistemi birkaç parçaya ayrılmakta, analitik olarak modellenmesi güç olan parçalar deneysel olarak, diğer parçalar da kuramsal olarak incelenmektedir. Şekil 3 de gösterilen numune iki alt parçaya ayrılmıştır. Sismik yalıtım elemanları deneysel alt sistemi, üst yapı ise analitik alt sistemi oluşturmaktadır. Her iki alt sistem, deney süresince etkileşimli olarak çalışmaktadır. Üst yapının etkisi, arayüzde yerleştirilen hidrolik verenerler ile temsil edilmektedir.

Nakashima ve Takai, [25], alt sistem kullanımı durumunda uygun sayısal integrasyon tekniğini araştırmış, açık ve kapalı integrasyon tekniklerinin birlikte kullanıldığı karma bir tekniği önermişlerdir. Daha sonraki dönemde, benzeşik dinamik deney tekniğinde deneysel ve kuramsal alt sistemlerin birlikte kullanımı mümkün olmuştur, [10].



Şekil 3. Benzeşik dinamik deney tekniğinin hibrit testde kullanımı [6]

Elektronikte yaşanan gelişmelere paralel olarak ortaya çıkan yüksek kapasiteli sayısal kontrol üniteleri ve bilgisayarlar kullanılarak, benzeşik dinamik deney tekniği Nakashima ve Masaoka tarafından gerçek zamanda uygulanabilmiştir, [26]. Yapılan ilk deneylerde tek serbestlik dereceli esnek numuneler kullanılmıştır.

Benzeşik dinamik deney tekniğinde gelinen bir diğer nokta da *parçalı deney* uygulamasıdır. İncelenecek numunenin bağımsız alt sistemlerinin deneyleri farklı laboratuvarlarda gerçekleştirilmekte, parçalara ait sonuçlar internet üzerinden değişilmektedir. Deneyi kontrol eden bilgisayarın laboratuvar ortamında bulunması gerekmemekte, süper bilgisayarların deney kontrolünde kullanılımı mümkün olmaktadır, [27].

Benzeşik dinamik deneyin kullanıldığı bir diğer yeni teknik de *peer-to-peer (P2P)* adıyla Japonya'da geliştirilmiştir, [28], [29]. Deney tekniği internet üzerinden gerçek zamanlı olarak uygulanmaktadır. Alt sistemler paralel olarak, hem kuramsal hesapta hemde deneyde kullanılmaktadır. Alt sistemler bağımsız olarak ele alınmakta, önceki yöntemlerden farklı olarak dinamik denge denklemi her alt sistem için bağımsız çözülmektedir. Alt sistemlerin birleşim bölgelerindeki yerdeğiştirmeler ile karşı gelen kuvvetler, koordinasyonu sağlayan ana bilgisayara aktarılmaktadır. Bağımsız alt sistemler arasında bilgi alışverişine gerek bulunmamaktadır. Koordinasyonu sağlayan yazılım, tahmin etme-düzeltilme esaslı bir yaklaşımı kullanarak alt sistem sınırları boyunca uygunluk koşullarını ve denge denklemlerini sağlamaktadır.

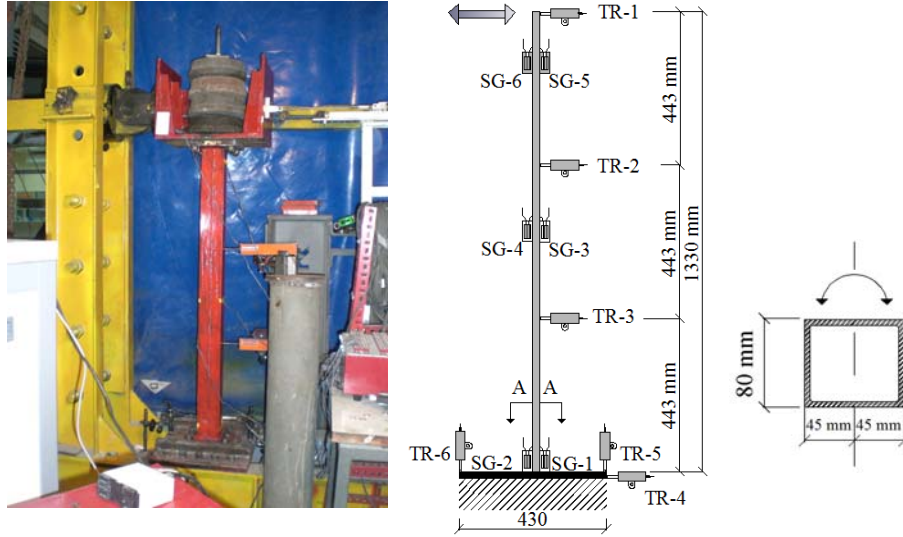
4. BİR UYGULAMA

Geliştirilen benzeşik dinamik deney algoritması, bir çelik kolon üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile doğrulanmıştır, [14]. Deneyler iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, numunenin doğrusal davranış göstermesi amaçlanmıştır. IDARC2D [30] yazılımı kullanılarak oluşturulan matematik model kuramsal olarak çözülmüş, elde edilen kuramsal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde aynı çelik kolon, daha büyük genlikli bir ivme kaydı etkisinde denenmiştir. Bu deneyde doğrusal ötesi davranış gerçekleşmiştir. IDARC2D yazılımında uygun olan davranış modellerinden biri seçilerek, zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yapılmıştır. Elde edilen deneysel ve kuramsal sonuçlar karşılaştırılarak, geliştirilen benzeşik dinamik deney algoritması ile üretilen sonuçların doğruluğu irdelenmiştir.

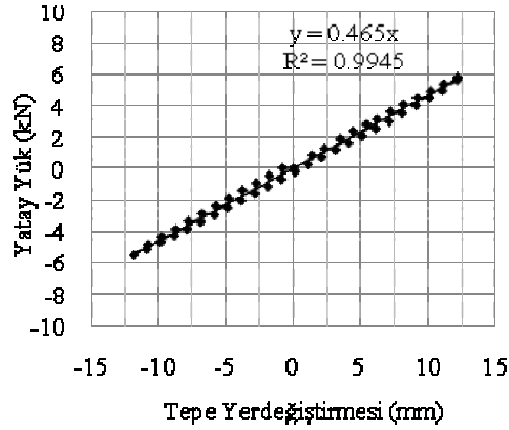
Çelik kolon 1330 mm yüksekliğinde olup, 2 adet NPU 80 hadde profilinin kutu kesit oluşturacak biçimde kaynaklanması ile elde edilmiştir. Kolonun iki ucuna; deney çerçevesine ve hidrolik verene bağlantıyı sağlamak üzere çelik levhalar kaynaklanmıştır. Taban levhası 10 adet M18 bulon ile test çerçevesine bağlanmıştır. Numune öz ağırlığına ek olarak, özel çelik elemanlar ile 70 kg lık bir ilave tepe kütlesi oluşturulmuştur. Hazırlanan deney düzeneği Şekil 4 de görülmektedir.

Tabanda meydana gelecek yerdeğiştirme bileşenlerinin kaydedilmesi için, yatay ve düşey konumlu yerdeğiştirme ölçerler (TR-4, TR-5, TR-6) yerleştirilmiştir, Şekil 4. Numune yüksekliğinin üçte bir seviyelerine yerleştirilen yatay konumlu üç adet yerdeğiştirme ölçer (TR-1, TR-2, TR-3) ile yatay ötelenmeler ölçülmüştür. Ayrıca çelik kolonun alt, orta ve üst kesitlerine yapıştırılan toplam 6 adet şekil değıştirme ölçer (SG-1, SG-2, SG-3, SG-4, SG-5, SG-6) ile bu kesitlerde oluşan şekil değıştirmelerin değışimi izlenmiştir.

Numunenin ilk yatay rijitliğini tespit etmek üzere, çelik kolona statik olarak tersinir yerdeğiştirme çevrimleri uygulanmış, oluşan tepki kuvvetleri ölçülmüştür. Elde edilen tepki kuvveti-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi Şekil 5 de verilmiştir. Görüldüğü gibi, incelenen yerdeğiştirme aralığında deney numunesi doğrusal elastik olarak davranmaktadır. Korelasyon analizi ile belirlenen numune yatay rijitliği 0.465 kN/mm dir. Statik tersinir yerdeğiştirme çevrimleri etkisinde elde edilen tepki kuvveti-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi, viskoz sönüm açısından değerlendirildiğinde ulaşılan kritik sönüm oranı %2.5 olarak belirlenmiştir, [31].



Şekil 4. Çelik kolon deneyinde benzeşik dinamik deney düzeneği (SG: Şekil değıştirme , TR: Yerdeğıştirme Ölçerler)

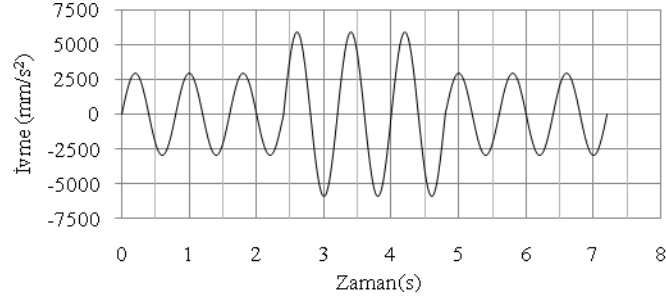


Şekil 5. Numune başlangıç yatay rijitliğinin belirlenmesi

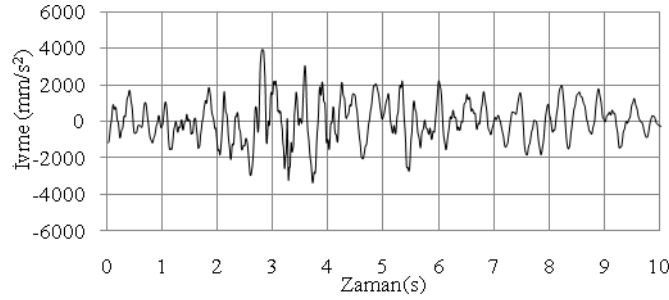
Deneyel ve kuramsal çözümlerde iki farklı ivme kaydı kullanılmıştır, Şekil 6. *SINUS* olarak adlandırılan ilk ivme kaydı seçilmiş bir sinüs ivme fonksiyonudur. *SINUS*, 0.02 saniye aralıklı 360 noktadan oluşmakta olup, toplam kayıt süresi 7.2 saniyedir. *DUZCE-R* olarak adlandırılan ikinci kayıt ise, *DÜZCE/BOL090* [32] deprem kaydının 8-18 saniyeler arasındaki 10 saniyelik bölümünün alınıp, deprem yönetmeliğinde [33] tanımlı tasarım ivme spektrumuna benzer elastik ivme spektrumu verecek biçimde değıştirilmesi ile elde edilmiştir. *DUZCE-R*, 0.01 saniye aralıklı 1000 noktadan oluşmakta olup, toplam kayıt süresi 10 saniyedir.

Gerçekleştirilen tüm benzeşik dinamik deneylerde, numune tabanına yerleştirilen yerdeğıştirme ölçerlere (TR-4, TR-5, TR-6) ait kayıtlardan, numune tabanındaki genel ötelenme ve dönme büyüklükleri hesaplanmış, bu büyüklüklerin çelik kolon üzerinde oluşan büyüklüklere

göre ihmal edilebilecek düzeyde küçük olduğu anlaşılmıştır. Bu deneysel sonuca dayalı olarak, kuramsal hesaplarda çelik kolon alttan ankastre olarak idealleştirilmiştir.



(a) SINUS ivme kaydı



(b) DUZCE-R ivme kaydı

Şekil 6. Deneysel ve kuramsal analizlerde kullanılan ivme kayıtları

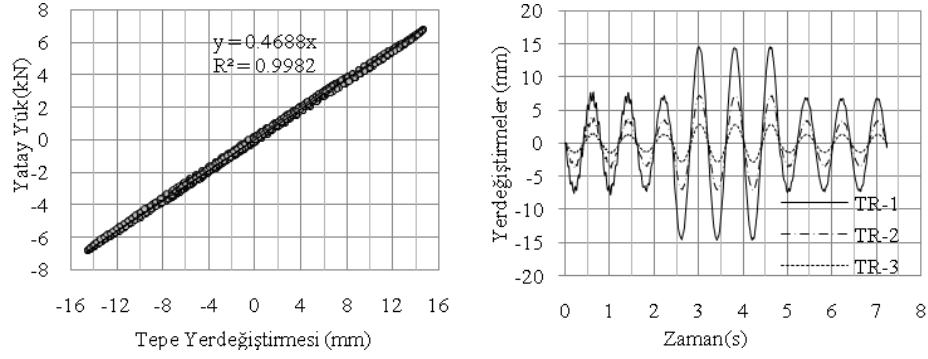
Uygulanan benzeşik dinamik deneyde; çelik kolona ait kütle, viskoz sönüm ve başlangıç rijitliği sırası ile $m=7.13E-5 \text{ kNsn}^2/\text{mm}$, $\xi=\%2.5$, $k= 0.465 \text{ kN/mm}$ olarak alınmıştır. Sayısal integrasyonda hesap adım aralığı olarak, ivme kaydı adım aralığının dörtte biri yani 0.005 saniye değeri kullanılmıştır.

Doğrusal malzeme davranışının hedeflendiği birinci grup deneylerde, Şekil 6a da verilen SINUS ivme kaydı 16, Şekil 6b de verilen DUZCE-R ivme kaydı ise 18 çarpanı ile büyütülerek kullanılmıştır. İncelenen numunenin yatay yük-tepe yerdeğiştirme ilişkisi ile numune yüksekliği boyunca üç farklı seviyede kaydedilen yatay ötelenme geçmişleri; SINUS için Şekil 7 de, DUZCE-R için de Şekil 8 de verilmiştir. Korelasyon analizi ile SINUS için bulunan numune yatay rijitliği 0.4688 kN/mm , DUZCE-R için bulunan numune yatay rijitliği de 0.4676 kN/mm dir. Bu iki değer, yapılan ön statik deneyde elde edilen 0.4650 kN/mm lik yatay rijitliğe oldukça yakındır. Bu durumda numunenin doğrusal elastik davrandığı söylenebilir.

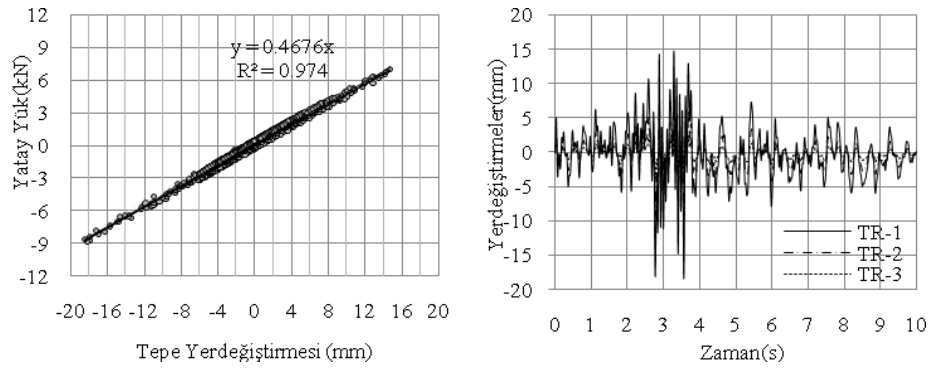
Çelik kolon alt ucuna yapıştırılan şekil değiştirme ölçerlerden (SG-1, SG-2), Şekil 4, elde edilen şekil değiştirme geçmişleri Şekil 9 da SINUS ve DUZCE-R deneyleri için ayrı ayrı verilmiştir. Grafiklerden izlendiği gibi, çelik kolon taban kesitinde gerçekleşen en büyük boyuna şekil değiştirme $\varepsilon=0.0008$ düzeyindedir. Bu değer, malzeme akma şekil değiştirme değeri $\varepsilon_y=0.0012$ den küçüktür.

İncelenen deney numunesinin matematik modeli oluşturulup, IDARC2D yazılımında iki farklı ivme kaydı için zaman tanım alanında doğrusal hesap yapılmıştır. Hesap adım aralığı olarak, 0.002 saniye değeri kullanılmıştır. SINUS ve DUZCE-R ivme kayıtları için kuramsal olarak elde edilen tepe yerdeğiştirme geçmişleri benzeşik dinamik deneyde bulunanlar ile üst üste konulup karşılaştırma yapılmıştır, Şekil 10. SINUS ve DUZCE-R durumlarında deneysel ve

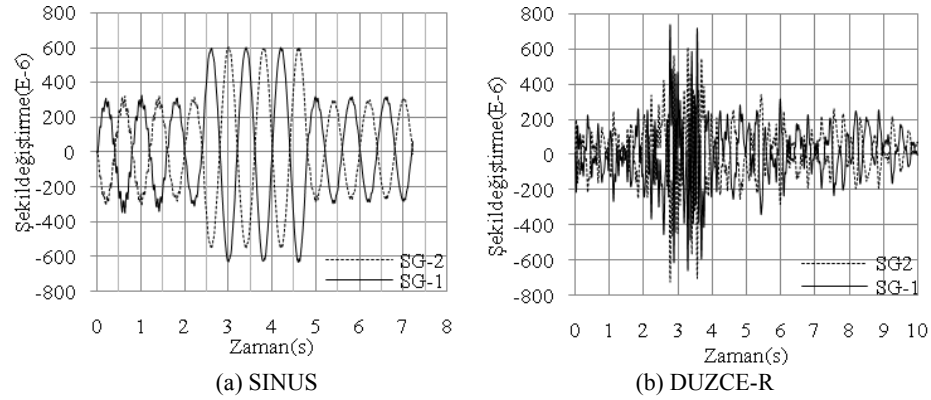
kuramsal eğrilerin üst üste oturduğu, ancak bazı çevrimlere ait en büyük genliklerde küçük farklılıklar olduğu gözlenmektedir.



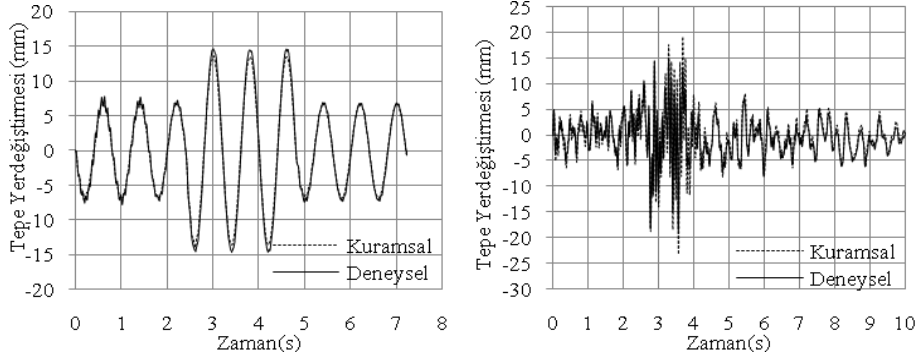
Şekil 7. SINUS için yataay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi ve yataay yerdeğiştirme geçmişi



Şekil 8. DUZCE-R için yataay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisi ve tepe yerdeğiştirmesi geçmişi



Şekil 9. Kolon alt ucunda gerçekteşen boyuna Şekil değiştirme geçmişleri



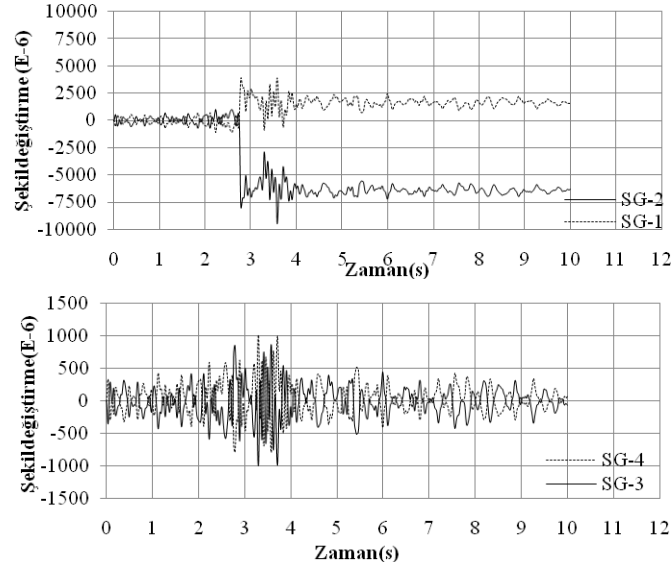
Şekil 10. Kuramsal ve deneysel tepe yerdeğiştirmesi geçmişlerinin karşılaştırılması

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde; elik kolon aynı kötü ve *DUZCE-R* ivme kaydının 40 çarpanı ile byltldğ durum için, malzeme bakımından doğrusal olmayan bölgeye de girecek biçimde deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir. elik kolona ait kötü, viskoz sönüm ve başlangıç rijitliği sırası ile $m=7.13E-5 \text{ kNsn}^2/\text{mm}$, $\xi=\%2.5$, $k=0.465 \text{ kN/mm}$ olarak alınmıştır. Hesap adım aralığı; benzeşik dinamik deneyde ivme kaydı adım aralığının yarısı yani 0.005 saniye, kuramsal hesapta ise 0.00005 sn olarak seçilmiştir.

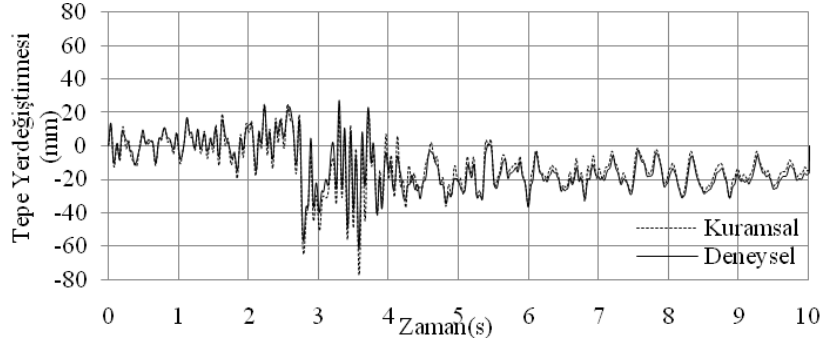
elik kolon taban kesitine (SG-1, SG-2) ve kolon yarı yüksekliğine (SG-3, SG-4) yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden, şekil 4, elde edilen şekil değiştirme geçmişleri şekil 11 de verilmektedir. Grafiklerden izlendiği gibi, $t=2.8$ saniye civarında SG-1, SG-2 şekil değiştirme ölçerlerinde doğrusal sınır aşılmış ve akma gözlenmiştir. SG-3, SG-4 şekil değiştirme ölçerlerinde gerçekleşen en büyük şekildeğiştirme ise $\epsilon_y=0.0010$ düzeyinde olmuştur. Bu değer, malzeme akma şekildeğiştirmesi $\epsilon_y=0.0012$ den kktr.

IDARC2D yazılımında bulunan *PHM çevrimsel davranış modeli* kullanılarak; elik kolonun *DUZCE-R* ivme kaydı etkisinde, doğrusal ötesi davranışı kuramsal olarak belirlenmiştir. PHM çevrimsel modelinde yer alan davranış değişkenleri; rijitlik azaltma faktörü 200, süneklilik esaslı dayanım azaltma faktörü 0.01, enerji esaslı dayanım azaltma faktörü 0.01 ve kayma oyulması faktörü 1.0 olarak seçilmiştir. Kuramsal olarak elde edilen tepe yerdeğiştirmesi-zaman ve taban kesme kuvveti-zaman ilişkileri, benzeşik dinamik deneyde elde edilenler ile st üste konularak şekil 12 ve şekil 13 de gösterilmiştir.

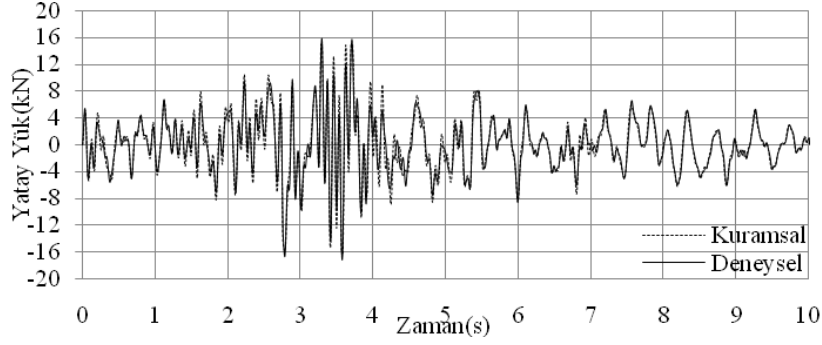
Deneysel ve kuramsal yolla belirlenen eğrilerin genel olarak birbirlerinin üzerine oturduğu, ancak bazı çevrimlerde genliklerde farklılıklar oluştuğu gözlenmektedir. $t=2.8$ saniyede, 15.2 mm lik kalıcı tepe yerdeğiştirmesi oluştuğu tesbit edilmiştir. $t=3.6$ saniyede oluşan en büyük çevrimde; benzeşik dinamik deneyde 62.1 mm, kuramsal hesapta ise 77.3 mm tepe yerdeğiştirmesi gerçekleşmiştir. Bu fark, doğrusal malzeme davranışının esas alındığı birinci grup deneylerde gözlenenlere göre büyüktür. Deneysel ve kuramsal sonuçlar arasındaki farkın muhtemel sebeplerinin; *i.* kuramsal hesapta kullanılan matematik modelin getirdiği yaklaşıklık, *ii.* benzeşik dinamik deney algoritmasında uygulanan sayısal integrasyon hesap adım aralığının yetersiz kalması, *iii.* Benzeşik dinamik deneyde viskoz sönüm oranının %2.5 dan daha fazla gerçekleşmesi, olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 11. DUZCE-R için kolon alt (üstteki grafik) ve orta (alttaki grafik) kesitlerinde okunan boyuna şekil değişimi geçmişleri

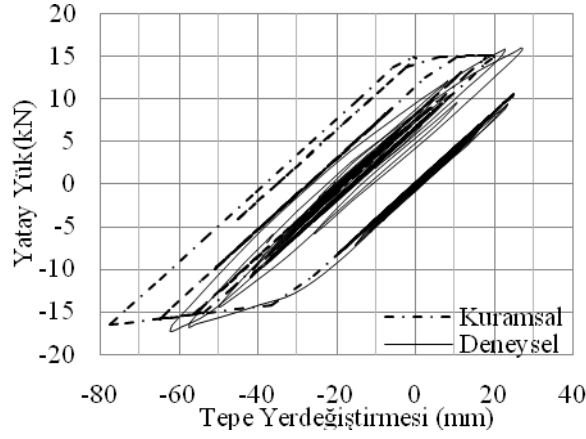


Şekil 12. DUZCE-R için kuramsal ve deneySEL tepe yerdeğiştirmesi geçmişleri



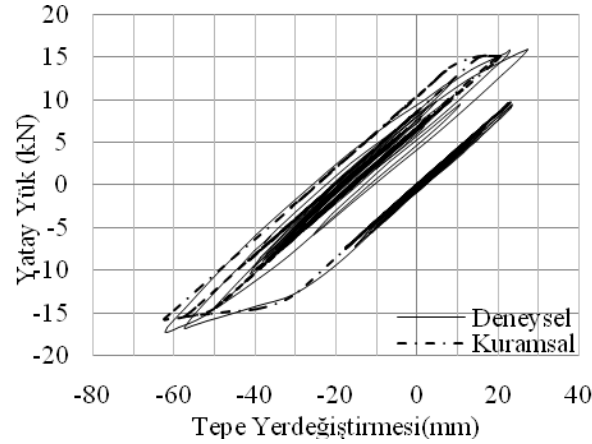
Şekil 13. DUZCE-R için kuramsal ve deneySEL taban kesme kuvveti geçmişleri

Deneyel ve kuramsal olarak elde edilen tepe yerdeğiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi Şekil 14 de verilmiştir.



Şekil 14. DUZCE-R için kuramsal ve deneyel yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri

Viskoz sönüm oranının %2.5 yerine %5 alınması halinde, kuramsal olarak elde edilen tepe yerdeğiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi Şekil 15 de deneyel sonuçla karşılaştırılmıştır. Şekil 14 ve Şekil 15 de yer alan grafikler karşılaştırıldığında; viskoz sönüm oranının %5 alındığı kuramsal çözümün, akma sonrasında deneyel sonuçlara çok daha yakın olduğu görölmektedir. Bu durum, numunede gerçekteşen hasar durumuna bağlı olarak, benzeşik dinamik deney içinde viskoz sönüm matrisinin değiştirilmesinin gerekli olabileceğini göstermektedir.



Şekil 15. DUZCE-R için kuramsal hesapta viskoz sönüm oranı %5 alınarak elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi ilişkisinin deneyel sonuçla karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapı sistemi veya yapısal elemanların deprem etkisindeki davranışlarının daha gerçekçi olarak belirlenmesi için kullanılan benzeşik dinamik deney tekniği ayrıntılı olarak incelenmiştir. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında oluşturulan ve yeni araştırmalarda etkin olarak kullanılan benzeşik dinamik deney düzeneğinin genel yapısı anlatılmıştır.

Özel bir çelik kolon üzerinde farklı karakterli ve genlikli ivme kayıtları etkisinde malzeme bakımından doğrusal ve doğrusal olmayan davranışı içerecek biçimde gerçekleştirilen benzeşik dinamik deneylerde elde edilen sonuçlar, kuramsal olarak elde edilenler ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, geliştirilen benzeşik dinamik deney algoritmasının ve deney düzeneğinin kontrolü ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

Çelik kolon örneğinde irdelendiği gibi değişken sönüm matrisinin kullanılabilmesi ve toplam deney süresinin kısaltılabilmesi için sayısal integrasyonda *sonlu fark metodu* yerine *OS metodunun* kullanılması geliştirilen algoritmaya eklenebilecek iki önemli özelliktir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamındaki deneyler; 106M050 nolu TÜBİTAK ve 31966 nolu İTÜ-BAP projelerinin sağladığı maddi imkanlar ile güncellenen Dartec hidrolik veren sistemi kullanılarak, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. İlgili kurumlara desteklerinden ötürü şükranlarımızı sunarız. Benzeşik dinamik deney uygulama yazılımının geliştirilmesindeki katkılarından dolayı TDG firmasına teşekkür ederiz.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Williams, M.S., Blakeborough, A., 2001, "Laboratory Testing of Structures Under Dynamic Loads: An Introductory Review", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 359: 1651-1669.
- [2] Hakuno, M., Shidawara, M., Hara, T., 1969, "Dynamic Destructive Test of a Cantilever Beam, Controlled by an Analog-Computer", Transactions of the Japan Society of Civil Engineers. 171:1-9.
- [3] Takanashi, K., 1975, "Non-linear Earthquake Response Analysis of Structures by a Computer Actuator on-line System", Transactions of the Architectural Institute of Japan. 229: 77-83.
- [4] Shing, P.B., Nakashima, M., Bursi, O.S., 1996, "Application of Pseudodynamic Test Method to Structural Research", Earthquake Spectra, 12(1):29-56.
- [5] Mahin, S.A., Shing, P.B., 1985, "Pseudodynamic method for seismic testing", Journal of Structural Engineering, 111(7):1482-1503.
- [6] Nakashima, M., McCormick, J., Wang, T., 2008, "Hybrid Simulation: A Historical Perspective", Hybrid Simulation, Theory, Implementation and Application, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 3-13.
- [7] Takanashi, K., Nakashima, M. 1987, "Japanese Activities on On-Line Testing", Journal of Engineering Mechanics", 113(7):1014-1032.
- [8] Takanashi, K., Nakashima, M., 1988, "On-line Computer Test Control Methods and Its Application to Earthquake Response Simulation of Steel Structural Models", Journal of Constructional Steel Research 11:27-40.
- [9] Seible, F., Hegemier, G.A., Igarashi, A., Kingsley, G.R., 1994, "Simulated Seismic-Load Tests on Full Scale Five-storey Masonry Building", Journal of Structural Engineering, 120(3), 903-924.

- [10] Shing, P.B., Bursi, O.S., Vannan, M.T., 1994, "Pseudodynamic Tests of Concentrically Braced Frame Using Substructuring Techniques", *Journal of Constructional Steel Research*, 29:121-148.
- [11] Thewalt, C.R. Mahin, S.A., 1995, "Nonplanar Pseudodynamic Testing", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24: 733-746.
- [12] Molina, F.J., Verzeletti, G., Magonette, G., Buchet, P., Geradin, M., 1999, "Bi-directional Pseudo-Dynamic Test of a Full-Size Three Storey Building", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (28):1541-1566.
- [13] Pinto, A.V., Verzeletti, G., Molina, J., Varum, H., Pinho, R., Coelho, E., 2002, "Pseudo-Dynamic Tests on Non-Seismic Resisting RC Frames (bare and selective retrofitted frames)", ELSA, European Commission Joint Research Centre, Report No. EUR 20244, EN, Ispra, Italy.
- [14] Ceyhan, A., 2008, "Yapısal Elemanların Deprem Etkisindeki Davranışlarının Belirlenmesinde Benzeşik Dinamik Deney Tekniği Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [15] Tako, E.S. 2009, "Bölme Duvarlı Betonarme Çerçevesinin Deprem Davranışlarının Belirlenmesinde Statik ve Benzeşik Dinamik Deney Karşılaştırmaları", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Magonette, G., 1991, "Digital Control of Pseudo-Dynamic Tests", *Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering*, Donea J, Jones PM (eds), Kluwer: Dordrecht, The Netherlands, 63-69.
- [17] Newmark, N.M., 1959, "A Method of Computation for Structural Dynamics", *ASCE Journal of the Engineering Mechanics*, 85(3), 67-94.
- [18] Hilber, H.M., Hughes, T.J.R., Tayloe, R.L., 1977, "Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 5(3):283-292.
- [19] Nakashima, M., Kaminosono, T., Ishida, I., Ando, K., 1990, "Integration Techniques for Substructure Pseudo Dynamic Test", *Proceedings, Fourth US National Conference on Earthquake Engineering*, Vol.2, EERI, Palm Springs, CA.
- [20] Kabayama, K., Toyoshima, M., Kumazawa, F., Nakano, Y., Okada, T., 1993, "On-line Tests of Frame Structures", *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, 26.
- [21] Shing, P.B., Mahin, S.A., 1987a, "Cumulative Experimental Errors in Pseudodynamic Tests", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15(4):409-424.
- [22] Yamazaki, Y., Nakashima, M., Kaminosono, T., 1989, "Reliability of Pseudodynamic Test in Earthquake Response Simulation", *Journal of Structural Engineering*, 115, 2098-2112.
- [23] Shing, P.B., Mahin, S.A., 1987b, "Elimination of Spurious Higher Mode Response in Pseudodynamic Tests", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15, 425-445.
- [24] Casciati, F., Magonette, G., 1999, "Testing Facilities and Laboratory Validation", In *Advances in Structural Control*, pp. 1-23, Barcelona, CINME.
- [25] Nakashima, M., Takai, H., 1985, "Computer-actuator Online Testing Using Substructure and Mixed Integration Techniques", *Proc. of the 7th Symposium on the Use of Computers in Building Structures*, Architectural Institute of Japan. Tokyo, Japan, 205-210.
- [26] Nakashima, M., Masaoka, N., 1999, "Real-time On-line Test for MDOF Systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 28: 393-420.
- [27] Tsai, K., 2003, "Network Platform for Structural Experiment and Analysis (I)", NCREE-03-021, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taiwan.
- [28] Pan, P., Tada, M., Nakashima, M., 2005, "Online Hybrid Test by Internet Linkage of Distributed Test-Analysis Domains", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1407-1425.

- [29] Takahashi, Y., Fenves, G., 2006, "Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35: 267-291.
- [30] Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Valles, R.E., 1994, IDARC2D V6.1, "A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, USA.
- [31] Chopra, A., 2001, "Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering", Second Edition, Prentice Hall
- [32] PEER Strong Motion Data Base <http://www.peer.berkeley.edu/smcat/search.html>
- [33] TDY, 2007, "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.