

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPISAL ELEMANLARIN DEPREM ETKİSİNDEKİ
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİNDE
BENZEŞİK DİNAMİK DENEY TEKNİĞİ UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Aslı CEYHAN**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

**YAPISAL ELEMANLARIN DEPREM ETKİSİNDEKİ
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİNDE
BENZEŞİK DİNAMİK DENEY TEKNİĞİ UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Aşlı CEYHAN
(501061202)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Yard. Doç.Dr. Ercan YÜKSEL
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Alper İLKİ (İ.T.Ü.)
Yard. Doç.Dr. Şevket ÖZDEN (K.Ü.)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, benzeşik dinamik deney yöntemi anlatılmış; yöntemin kullanılmaya başlanmasından günümüze kadar olan süreçte literatürde yer almış olan önemli benzeşik dinamik deney çalışmalarına ve integrasyon tekniklerinin detaylı anlatımına yer verilmiştir. Deney numunesi olarak seçilen çelik konsol kolon elemanının verilen sinüzoidal ve gerçek ivme kayıtları altında analizi yapıp; SAP2000 programı sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmamda bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan, değerli danışman hocam Yard. Doç. Dr. Ercan Yüksel'e, Y.Müh. Hasan ÖZKAYNAK'a ve de Yapı ve Deprem mühendisliği laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Benzeşik dinamik deney algoritmasının geliştirilmesinde sağladıkları destekten dolayı Teknik Destek Grubu'na (TDG) en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK 106M050 ve İTÜ BAP 31966 numaralı araştırma projelerinin sağladığı imkanlarla gerçekleştirilmiştir.

HAZİRAN, 2008

Aslı CEYHAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI	1
1.1. Konu	1
1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	1
2. YAPI SİSTEMLERİNİN DAVRANIŞINI BELİRLEMeye YÖNELİK DENEYSEL YÖNTEMLER	3
2.1. Mevcut Yöntemler	3
2.1.1. Statik Deneyler	3
2.1.2. Sarsma Tablası Deneyleri	4
2.1.3. Benzeşik Dinamik Deney Tekniğı	4
2.1.4. Gerçek Zamanlı Deney Yöntemleri	6
2.2. Benzeşik Dinamik Deney (PSD) Tekniğinin Ayrıntılı İncelenmesi	6
2.2.1. Benzeşik Dinamik Deney Yöntemi Konusunda Önemli Çalışmalar	8
2.2.2. Benzeşik Dinamik Deney Tekniğine Ait Donanımlar	10
2.2.2.1. Dijitalden Analoga Dönüştürücü (D/A)	11
2.2.2.2. Analogtan Dijitale Dönüştürücü (A/D)	12
2.2.2.3. Yerdeğıştirme Ölçer	12
2.2.2.4. Kuvvet Ölçerler	16
2.2.3. Benzeşik Dinamik Deney Yönteminin Güvenirliğı	16
2.2.3.1. İçsel Hata Kaynakları	16
2.2.3.2. Deneysel Hata Kaynakları	17
2.2.4. Hareket Denklemi ve Sayısal Teknik	24
2.2.4.1. Hareket Denkleminin Genelleştirilmesi	26
2.2.4.2. Benzeşik Dinamik Deney Algoritması	27
2.2.5. Benzeşik Dinamik Deney Yönteminin İntegrasyon Teknikleri	27
2.2.6. İntegrasyon Tekniklerinin Anlatılması	28
2.2.6.1. Sonlu Farklar İntegrasyon Yöntemi	29
2.2.6.2. Newmark İntegrasyon Yöntemi	29
2.2.6.3. Düzeltilmiş Newmark İntegrasyon Açık Yöntemi	30

2.2.6.4. Operator Splitting Yöntemi	30
3. GELİŞTİRİLEN BENZEŞİK DİNAMİK DENEY ALGORİTMASI	33
3.1. Sonlu Farklar İntegrasyon Tekniği	33
3.2. Benzeşik Dinamik Deney (PSD) Programının Yapısı	35
3.3. Benzeşik Dinamik Deney (PSD) Programının Anlatılması	37
4. DENEYSEL ve ANALİTİK ÇALIŞMALAR	40
4.1. Genel	40
4.2. Deney Düzeneği ve Deney Numunesi	40
4.3. Deney Numunesinin Genel Özellikleri	44
4.4. Analitik Çalışmalar	45
4.4.1.SAP2000 Programı ile Çözümler	45
4.4.2.Benzeşik Dinamik Deney Simülasyon Programı ile Çözümler	46
4.4.3.Benzeşik Dinamik Deney Simülasyon Sonuçları ve SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması	46
4.4.3.1. Sonuçların Değerlendirilmesi	53
4.5. Sönüm, Kütle ve Yatay Rijitlik Büyüklükleri Üzerinde Gerçekleştirilen Duyarlık Analizi	54
4.5.1. Farklı Sönüm Oranları	54
4.5.2. Farklı Kütle Oranları	54
4.5.3. Farklı Rijitlik Oranları	54
4.6. Benzeşik Dinamik Deney Uygulaması	58
4.6.1. Benzeşik Dinamik Deney Programının Veri Girişi	58
4.7. DeneySEL ve Analitik Sonuçlarının Karşılaştırılması	58
5. GENEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	66

KISALTMALAR

PSD	: Pseudo Dynamic Test
CDM	: Central Difference Method
SDOF	: Single Degree of Freedom System
OS	: Operator Splitting Method
FFT	: Fast Fourier Transform
PTA	: Posterior Time-step Adjustment Technique
MPTA	: Modified Posterior Time-step Adjustment Technique

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Benzeşik dinamik deneyin her adımında uygulanan görevler.....	7
Şekil 2.2 : Kavramsal akış diyagramı	9
Şekil 2.3 : Nakajima'nın deney düzeneği.....	10
Şekil 2.4 : Benzeşik dinamik deney sisteminin bileşenleri.....	10
Şekil 2.5 : Benzeşik dinamik deneydeki bileşik dijital – analog prosedürleri.....	13
Şekil 2.6 : Analog servo – kontrol döngüsünün şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.7 : Dijital kontrol sisteminin diyagramı.....	15
Şekil 2.8 : Eksik kalan yerdeğiştirme artımının sebep olduğu yerdeğiştirme genliği oluşumu.....	20
Şekil 2.9 : Tek serbestlik dereceli sistem	24
Şekil 2.10 : Benzeşik dinamik deneyin genel akış şeması.....	27
Şekil 2.11 : OS algoritmasının detayı.....	32
Şekil 3.1 : Benzeşik dinamik deneyin kullanılan temel algoritması ve akış diyagramı.....	33
Şekil 3.2 : Deney düzeneği ve deneyin akış diyagramı	36
Şekil 4.1 : Deney ve yükleme düzeneği	41
Şekil 4.2 : Numunenin A-A kesit detayı.....	42
Şekil 4.3 : Numunenin B-B kesit detayı.....	42
Şekil 4.4 : Çelik konsol kolon numunesi ve deney düzeneği	43
Şekil 4.5 : Deney düzeneğine yerleştirilmiş tek serbestlik dereceli çelik konsol kolon sistemi.....	43
Şekil 4.6 : Numune kesiti.....	44
Şekil 4.7 : Yatay yerdeğiştirme-kesme kuvveti arasındaki ilişki.....	44
Şekil 4.8 : $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{hesap} = 0.02$ için taban kesme kuvveti – zaman grafiği	48
Şekil 4.9 : $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{hesap} = 0.02$ için yerdeğiştirme – zaman grafiği	48
Şekil 4.10 : $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{hesap} = 0.01$ için taban kesme kuvveti – zaman grafiği	49
Şekil 4.11 : $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{hesap} = 0.01$ için yerdeğiştirme – zaman grafiği	49
Şekil 4.12 : $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{hesap} = 0.005$ için taban kesme kuvveti – zaman grafiği	50
Şekil 4.13 : $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{hesap} = 0.005$ için yerdeğiştirme – zaman grafiği	50
Şekil 4.14 : $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta t_{hesap} = 0.005$ iken; PSD_see.m $\Delta t_{hesap} = 0.001$ için taban kesme kuvveti-zaman grafiği.....	51
Şekil 4.15 : $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta t_{hesap} = 0.005$ iken; PSD_see.m $\Delta t_{hesap} = 0.001$ için yerdeğiştirme-zaman grafiği.....	51

Şekil 4.16 : $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta_{thesap} = 0.005$ iken; PSD_see.m $\Delta_{thesap} = 0.001$ için taban kesme kuvveti-zaman grafiği.....	52
Şekil 4.17 : $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta_{thesap} = 0.005$ iken; PSD_see.m $\Delta_{thesap} = 0.001$ için yerdeğiştirme-zaman grafiği.....	52
Şekil 4.18 : %2 ve %5 Sönüm Oranları için yerdeğiştirme - zaman karşılaştırması.....	55
Şekil 4.19 : %2 ve %10 Sönüm Oranları için yerdeğiştirme - zaman karşılaştırması.....	55
Şekil 4.20 : $m = 0.7$ kN ve $m = 1.05$ kN için yerdeğiştirme - zaman karşılaştırması.....	56
Şekil 4.21 : $m=0.7$ kN ve $m=1.4$ kN için yerdeğiştirme - zaman karşılaştırması.....	56
Şekil 4.22 : $k = 0.46380$ ve $k = 0.37104$ için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırması.....	57
Şekil 4.23 : $k = 0.46380$ ve $k = 0.55656$ için yerdeğiştirme-zaman karşılaştırması.....	57
Şekil 4.24 : PSD_run.m programının veri girişi.....	58
Şekil 4.25 : El Centro ivme kaydı için deneysel ve analitik yerdeğiştirme- zaman sonuçlarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.26 : ElCentro deprem kaydı için deneysel ve analitik taban kesme kuvveti-zaman sonuçlarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.27 : Harmonik formdaki ivme kaydı için deneysel ve analitik yerdeğiştirme – zaman sonuçlarının karşılaştırılması.....	60
Şekil 4.28 : Harmonik formdaki ivme kaydı için deneysel ve analitik taban kesme kuvveti – zaman sonuçlarının karşılaştırılması.....	60

SEMBOL LİSTESİ

ϕ	: Donatı çapı
ϵ	: Şekil değiştirme
c	: Viskoz sönüm
k	: Sistemin rijitliği
E	: Elastisite modülü
δ	: Eksik kalan yerdeğiştirme değerlerinin toplamı
m	: Kütle
$\ddot{}$	: İvme
$\dot{}$	: Hız
$\ddot{}$	: Yerdeğiştirme
$\ddot{}$	: Reaksiyon kuvveti
$\ddot{}$	: Zemin ivmesi
ω_n	: Yapının doğal frekansı
T	: Yapının doğal periyodu
d	: Yerdeğiştirme davranışından dolayı oluşan hata genliği
e	: Analiz edilen sistemin doğal periyodu
Δ_n	: Zaman adımı
M	: Kütle matrisi
C	: Viskoz sönüm matrisi
B	: Yer ivmesi dönüştürme matrisi
$\{ \}$	: Yük matrisi
$ $	: Herhangi bir zamandaki zemin ivmesi
r	: Yapı çevrimsel yükü

YAPISAL ELEMANLARIN DEPREM ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİNDE BENZEŞİK DİNAMİK DENEY TEKNİĞİ UYGULAMALARI

ÖZET

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, benzeşik dinamik deney (pseudo dynamic test) tekniği detaylı olarak incelenmiş ve geliştirilen bir algoritmanın doğruluğu deneysel ve analitik olarak irdelenmiştir. Bu konuda oluşturulan algoritmayla, benzeşik dinamik deneyi gerçekleştirmek, deney öncesinde simülasyonunu yapmak için MATLAB ortamında bir yazılım geliştirilmiştir. Laboratuvar koşullarında uygulanabilecek numune boyut ve detayları bu simülasyon programı yardımıyla elde edilmiştir. Kontrol numunesi olarak kullanılan çelik konsol elemanının IDARC2D programı ile farklı deprem ivme kayıtları etkisindeki analizleri yapılmış ve elastik analiz sonuçları benzeşik dinamik deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Birinci bölümde, tez çalışmasının konusu, genel amacı ve kapsamı anlatılmıştır.

İkinci bölümde, yapısal elemanların davranışını belirlemeye yönelik deneysel yöntemler kısaca gözden geçirilmiş ve benzeşik dinamik deney tekniği yöntemi detaylı olarak anlatılarak; diğer yöntemlere göre olan avantajları ortaya konmuştur. Bu yöntemin kullanılmaya başlanmasından günümüze kadarki süreçte literatürde yer almış önemli çalışmalar ile yöntemin güvenilirliğini etkileyen hata analizi çalışmaları anlatılmıştır. Ayrıca, bu deney yönteminde önemli yeri olan integrasyon teknikleri de bu bölümde anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde geliştirilen benzeşik dinamik deney algoritması ve yazılımı anlatılmıştır. Algoritma içinde önemli bir işlevi olan sonlu farklar integrasyon yöntemi de bu bölümde anlatılmıştır. Oluşturulan iki yazılımdan PSD_see.m istenilen ivme kayıt etkisinde sistemin davranışının simülasyonunu yapmak üzere geliştirilmiştir. PSD_run.m yazılımının algoritması genel olarak PSD_see.m yazılımıyla aynı olmakla birlikte, eş zamanlı olarak deneyin gerçekleştirilmesini sağlayan kontrol komutlarını da içermektedir.

Dördüncü bölümde ise; genel olarak çelik konsol kolon sistemi üzerinde harmonik formdaki ivme kaydı ve gerçek ivme kaydı etkisinde geliştirilen deneysel ve analitik hesap anlatılmıştır ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Beşinci ve son bölümde, karşılaştırma sonuçlarına bağlı olarak genel sonuç ve değerlendirme yapılmıştır.

PSEUDO DYNAMIC TEST APPLICATIONS to DETERMINE the EARTHQUAKE RESPONSE OF STRUCTURAL MEMBERS

SUMMARY

The study which is presented as Ms.S. Thesis is aimed to understand the pseudo-dynamic test technique in details. The study consists of theoretical and experimental parts. Detailed literature survey about the test technique and the integration method of the dynamic equilibrium equation which is the most critical component of the technique has been made and presented.

The method consists of two main parts. Dynamic equilibrium equation is kept and solved in the test computer. The next step's target displacement value is commanded to the servovalve by the controller. The structural load response which corresponds to lateral stiffness matrix is measured by the load cell mounted on the body of the actuator.

A computer program to perform the pseudo dynamic test method for single degree of freedom systems (SDOF) has been created in MATLAB. There exists virtual and executable versions of the program.

To perform correctness and sensitivity analysis of the produced computer program, a steel cantilever column was used in the laboratory tests. To simplify the comparison, only elastic response of the steel column was taken into consideration. Not only the simple harmonic acceleration records but also the real earthquake records were used in analytical and experimental works. The "exact solution" of the elastic column subjected to different acceleration records were obtained from the software of IDARC2D which is very well known computer program for elastic and inelastic analyses of plane frames.

In the first chapter; aim and content of the study are presented generally.

In the second chapter, the existing experimental methods which are used to determine the response of structural elements, are presented briefly. Pseudo-dynamic test technique has been explained extensively and the advantages over the other techniques are listed. The literature survey about the technique and studies on the error analysis that is effective on the accuracy of the method are presented for the period from the past to the present. The alternative integration techniques which are crucial in pseudo-dynamic test method are also explained.

In the third chapter, the use of central difference method as a solution technique for the differential equation of motion is explained extensively. The developed computer program to perform pseudo-dynamic test in the laboratory is presented. The two related softwares, namely PSD_see.m and PSD_run.m are explained in details.

In the fourth chapter, the analytical and experimental results of an elastic steel cantilever column subjected to harmonic and real acceleration records are compared and made some interpretaions.

In the fifth chapter, the obtained general results are presented.

1. GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

1.1 KONU

Benzeşik dinamik deney tekniği; yapı elemanına ait rijitlik matrisinin deneysel olarak belirlendiği dinamik denge denkleminin adım adım çözülerek, numunenin elde edilen hedef yerdeğiştirmelere itildiği karma bir yöntemdir.

Bir deney adımı sonunda numunenin yatay rijitlik matrisi yük ölçerler yardımıyla belirlenerek; bir sonraki deney adımında gidilecek hedef yerdeğiştirme değerleri analitik olarak hesaplanıp, numuneye aktarılır ve deney döngüsü tekrarlanır.

Bu yöntemle ait deney süresi, gerçek dinamik deney yöntemlerine göre daha uzun olmakla beraber, daha ucuz deney ekipmanı kullanımını ve deney sırasında hasarın izlenebilmesi imkanını sağlamaktadır.

Benzeşik dinamik deney tekniği konusunda, ülkemizdeki deneysel tecrübenin sınırlı olması dolayısıyla, ilk etapta tek dinamik serbestlik dereceli sistemlerle çalışılması, yeterli düzeyde bilgi ve tecrübe birikimi sağlandıktan sonra söz konusu tekniğin çok serbestlik dereceli deney numunelerine uygulanmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir.

1.2 ÇALIŞMANIN AMAÇ ve KAPSAMI

Deprem, dünyada ve ülkemizde yapıların hasar görmesi ve çökmesi sonucu insanların ölümüne neden olan doğal bir afettir. Yapı sisteminin bütününe ve/veya yapısal elemanların deprem sırasında nasıl davranacağı uygun deneysel yöntemler ile önceden belirlenebilir. Bu amaçla kullanılan pekçok deneysel yöntem mevcuttur, [1]. Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir;

- Statik deneyler
- Sarsma tablası deneyleri
- Benzeşik dinamik deneyler

- Gerçek zamanlı dinamik deneyler

Bu tez çalışmasının amacı; sıralanan deneysel yöntemleri kısaca inceledikten sonra, 1971 yılında Tokyo Üniversitesinde geliştirilmiş olan ve daha sonra dünyada pek çok araştırmacı tarafından kullanılan benzeşik dinamik deney tekniğinin detaylı olarak çalışılmasıdır. Benzeşik dinamik deney tekniğinin tek serbestlik dereceli sistemlere (SDOF) uygulanması için bir algoritma geliştirilmesi ve bu algoritmanın doğruluğunun deneysel ve analitik olarak araştırılması çalışmanın ana amacını oluşturmaktadır. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında mevcut olan bir dinamik veren, gerekli donanım ve yazılım ilaveleri yapıldıktan sonra bu amaçla tek serbestlik dereceli bu deneysel çalışmada kullanılmıştır.

Çalışmada izlenecek yöntem iki ana bölümde anlatılabilir.

Birinci aşamada; İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında mevcut olan ± 200 kN yükleme kapasiteli ve yüksek vuruş hızlı bir hidrolik veren ile donanım ve yazılım özellikleri geliştirilerek benzeşik dinamik deney yapma imkanı yaratılmıştır.

Deneysel olarak incelenecek yapı sistemi, seçilen El Centro deprem kaydı etkisinde numunenin yerdeğiştirme karşılığı, ilgili dinamik denge denkleminin adım adım çözülmesi ile belirlenir. Deney sırasında yapı üzerinde ölçülen kuvvet bileşenleri ile öngörülen atalet ve sönüm özellikleri etkisinde her adımdaki yerdeğiştirme miktarları hesaplanıp hidrolik verenler yardımıyla numuneye etkitilir. Bu işlemler tüm deprem kaydı tamamlanana kadar yinelenir. Dinamik denge denkleminin çözüleceği bir bilgisayar ile yükleme ve ölçüm sisteminin kontrolünü sağlayan ikinci bir bilgisayarın sürekli etkileşim halinde çalışması söz konusudur.

2. YAPI SİSTEMLERİNİN DAVRANIŞINI BELİRLEMeye YÖNELİK DENEYSEL YÖNTEMLER

2.1 Mevcut Yöntemler

Mevcut yöntemler statik ve dinamik karakterlidir. Statik ve dinamik karakterli olan bu deney yöntemlerinde gerekli olan laboratuvar ekipmanları arasında sarsma aletleri, hareketli platformlar, ivme ölçerler, hızlı veri toplama sistemleri yer almaktadır. Bu tip deneyler açık döngü (open-loop) biçiminde tatbik edilmektedir. Deney başladıktan sonra, ara verilmeksizin devam edilmektedir. Genelde dinamik deneyde çatlak oluşumlarının başlangıçları çalışma sırasında fark edilememektedir, [2].

Benzeşik dinamik deney tekniğinde ise ilerlemeler yükleme ve duraklama çevrimleri şeklinde olmaktadır ve istenilen aşamada yükleme durdurulabilmektedir. Bu durum çatlak oluşumlarının ve hasar gelişiminin adım adım izlenmesi imkanını vermektedir.

2.1.1 Statik Deneyler

Statik deneyler, elemanların doğrusal olmayan davranışları ile ilgili bilgi vermektedir. Fakat deprem etkisinde, yük ve/veya yerdeğiştirme geçmişiyle bunu ilişkilendirmek oldukça güç olmaktadır.

Deney, numunenin yerdeğiştirme ya da yük kontrollü olarak ayırık statik yüklerin etkisinde yavaş yavaş yüklenmesi biçiminde uygulanmaktadır. Yükleme monotonik, tekrarlı veya tersinir tekrarlı biçimde uygulanabilmektedir. Bu deney yöntemi kullanılarak, dayanım, rijitlik, enerji dağılımı, göçme biçiminin izlenmesi gibi yapısal performans özellikleri anlaşılabilmektedir.

Yarı statik deney tekniği, hareket denkleminin sadece rijitlik bileşenini dikkate aldığından, (2.1)'de gösterildiği üzere dinamik davranışı ifade edememektedir.

$$\cancel{M} \cdot \ddot{x} + \cancel{C} \dot{x} + Kx = f(x) \quad (2.1)$$

Yüklemenin yavaş karakterde olması dolayısıyla ivme, hız ve bunlarla birlikte sönüm deney döngüsü içerisinde etkili olmamaktadır.

Bu deney yönteminde, numune rijit bir laboratuvar döşemesine bağlanmaktadır. Yükleme değişik biçimlerdeki verenler vasıtasıyla numuneye tatbik edilmektedir. Bu kuvvetler genel olarak, deprem ivmesinden dolayı gelişen kütle atalet kuvvetlerini temsil etmektedir.

Bu yöntem, gerçek ölçülerdeki sistemlerin bir bölümünden oluşan numunelere, ölçeklendirilmiş numunelere ve seyrek olarak da gerçek ölçekli numunelere uygulanabilmektedir, [3].

2.1.2 Sarsma Tablası Deneyleri

Sarsma tablası deneyleri; gerçek dinamik yüklemelerdir. Sarsma tablası deneylerinde yapı veya yapı elemanı istenilen yer hareketi etkisinde incelenmek üzere rijit döşeme üzerine bağlanır. Yapının atalet kuvvetleri ve bunlara karşı gelen tepkiler, dikkate alınabilmektedir. Sarsma tablası kapasitelerindeki sınırlar dolayısı ile genelde küçük ölçekli model numuneler kullanılmaktadır.

Sarsma tablası deneylerinde, yapıların deprem sırasındaki davranışları hakkında çok değerli bilgiler üretilmekle birlikte, deney maliyetleri oldukça yüksektir. Benzerlik/ölçek yasaları kullanılarak oluşturulan ölçekli yapı modelleri daha kısıtlı imkana sahip sarsma tablaları üzerinde test edilebilmektedir.

Sarsma tablaları tahrik mekanizmaları açısından elektrik motorlu ve hidrolik sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunların her ikisinin de avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Modern sarsma tablası deneylerinde servo-hidrolik veren sistemleri kullanılmaktadır, [1].

2.1.3 Benzeşik Dinamik Deney Tekniği

Benzeşik dinamik deney tekniği 1960'ların sonuna doğru, Hakuno ve arkadaşları [4] tarafından 1969 yılında önerilmiş, 1971 yılından itibaren de Tokyo Üniversitesinde pek çok deneysel çalışmada kullanılmıştır. Servo – kontrol hidrolik veren sistemiyle aynı zamanda doğmuştur. Japonlar bu tekniği ilk olarak kullanmış ve de yapı mühendisliği problemlerine uygulamışlardır.

Dinamik yükler etkisindeki davranışı analiz etmek üzere geliştirilen benzeşik dinamik deney yöntemi, analitik ve deneysel çalışmayı bilgisayar yardımıyla kombine eden ve ikisinin de iyi taraflarından faydalanan bir tekniktir, [2].

Geniş zaman aralığına yayılarak icra edilen benzeşik dinamik deney tekniğinde, dinamik denge denklemi bilgisayarda çözülmekte, yapıya ait rijitlik matrisi deneyden alınmaktadır. Gerçek dinamik deneylere göre daha ekonomik ve daha kolay uygulanabilen bir yöntem olduğundan, yapıların deprem esnasındaki davranışları analiz etmek üzere tercih edilmektedir. Bu deney tekniği, sarsma tablası deneylerinde karşılaşılabilecek pek çok sınırlamayı bulundurmeyen, statik karakterli yükleme ve ölçüm aletlerinin kullanılabilirdiği, yapı sistemlerinin veya bölümlerinin dinamik yükler etkisindeki davranışlarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu sebeple sarsma tablası deneylerine alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Benzeşik dinamik deney tekniği yapı sistemlerinin dinamik etkiler altındaki davranışının deneysel olarak belirlenmesi konusunda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. İlk yatırım ve işletme maliyetinin düşük olması, sarsma tablası deneylerine göre önemli olan üstünlükleridir. Bu deney tekniğinde göreceli olarak daha basit ve ucuz aletler kullanıldığı söylenebilir.

Sarsma tablası deney yöntemine göre deprem hareketinin simülasyonu açısından birçok üstünlüğü vardır. Yükleme yarı-statik yani yavaş karakterlidir. Bu durumda aynı numunenin deprem performansının belirlenmesi için sarsma tablası deneyine göre daha düşük kapasiteli bir hidrolik veren yeterli olabilmektedir. Benzeşik dinamik deney yönteminde, deney tekrarlı olarak yükleme ve duraklama biçiminde ilerlemektedir. Sarsma tablası deneylerinde hesap yöntemi olarak daha karmaşık eşzamanlı ve sürekli hesap uygulamaları gerekirken, benzeşik dinamik deney yönteminde bilinen geleneksel hesap yöntem ve cihazlarının kullanılması yeterlidir.

Ayrık formatta yükleme yapıldığından, istenen anda yükleme durdurulabilmektedir. Bu durum yapısal elemanların ayrı ayrı davranışlarının gözlenebilmesi ve hasarın izlenmesi imkânını vermektedir, [2].

Yöntem, pek çok araştırmacı tarafından yapı sistemleri ya da yapı elemanları üzerinde deprem davranışlarının belirlenmesi için kullanılmıştır, [5], [6], [7], [8]. Karşılaşılan bazı zorlukların; rijit çok serbestlik dereceli sistemlerde kuvvetlerin

dalgalanması, davranış üzerinde ileri modların etkili olması, hedef yerdeşistirmelerin tam olarak verilememesi gibi konular olduğu belirtilmiştir.

Benzeşik dinamik deney tekniğinin ürettiği sonuçların güvenirliği üzerinde etkili olabilecek parametreler ve deneysel hataların yayılması konuları irdelenmiştir, [9], [10], [11].

Yöntemde kullanılan integrasyon tekniğinin genel sonuçlar üzerindeki etkisi de pek çok araştırıcı tarafından incelenmiştir, [12], [13], [14].

2.1.4 Gerçek Zamanlı Deney Yöntemleri

Gerçek zamanlı deney tekniğine duyulan ihtiyaç, hıza bağlı etkilerin gerekli olduğu durumlarda özellikle önem kazanmaktadır. Bu tür etkiler,  elik yapılar da daha az; betonarme yapılar da ise daha çok önemlidir, [15].

Bu yöntem de, benzeşik dinamik deney yöntemi gibi fiziksel deney ile analitik     mlenin kombinasyonu olarak uygulanmaktadır. Ancak; deneysel bölüm, numunenin dinamik davranışını göstermek üzere, benzeşik dinamik deney yönteminden farklı olarak gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir.

2.2 Benzeşik Dinamik Deney (PSD) Tekniğinin Ayrıntılı  ncelenmesi

Benzeşik dinamik deney tekniği, yapının dinamik denge denkleminin sayısal integrasyonu ile deneysel çalışmayı kombine eden karma bir yöntemdir. Dinamik denge denkleminde yer alan sönüm matrisi için varsayım yapılması gerekmektedir. Dinamik denge denkleminin     m  ile elde edilen hedef yerdeğiştirme hassas optik yerdeğiştirme ölçer yardımıyla numuneye tatbik edilir. Numunenin uygulanan yerdeğiştirmeye cevabı da y k h resi yardımıyla numuneden okunup, kontrol  nitesi üzerinden bilgisayar yazılımına gönderilir, [2].

Yöntemin başlıca adımları şöyle sıralanabilir.

- a) Yapısal  zelliklerin (kütle, sönüm, ilk rijitlik) ve ivme kaydının girilmesi
- b) Bir sonraki adıma ait yerdeğiştirmenin hesaplanması
- c) Hesaplanan yerdeğiştirmenin deney numunesine bilgisayar kontrollü elektro-hidrolik verene etkitilmesi

- d) Yükleme adımının tamamlanmasının ardından yerdeğiştirmeye bağlı olarak deney numunesinden tepki kuvvetinin ölçülmesi
- e) Bu tepki kuvvetinin hareket denkleminde sistemin rijitlik matrisi olarak kullanılması ve bir sonraki adımın yerdeğiştirme değerinin elde edilmesi
- f) Elde edilen bu yeni yerdeğiştirme değeri kullanılarak döngünün tekrarlanması

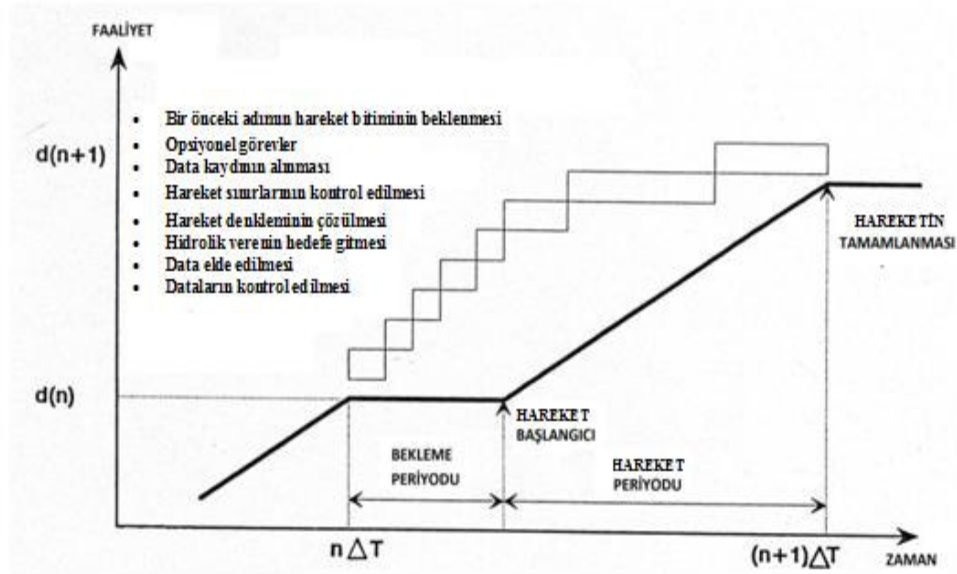
Deney akışı her adımda aynı sırayla tekrarlanır. Tek bir deney için gereken toplam zaman, her adımın zaman artımı Δt 'lerin toplamı kadardır. Her zaman artımı iki alt bölüme ayrılabilir.

Bu alt bölümler;

- Bekleme Periyodu
- Hareket Periyodu

olarak isimlendirilir.

Şekil 2.1'de her zaman artımında gerçekleştirilen görevler ifade edilmiştir.



Şekil 2.1: Benzeşik Dinamik Deneyin Her Adımında Uygulanan Görevler

Gerçekleştirilen görevler;

- Bir önceki adımın hareket bitiminin beklenmesi
- Opsiyonel görevler
- Data kaydının alınması

- Hareket sınırlarının kontrol edilmesi
- Hareket denkleminin çözülmesi
- Hidrolik verenin hedefe gitmesi
- Data elde edilmesi
- Dataların kontrol edilmesi

Yukarıda bahsedilen her görev adımı için belirli bir süre harcanmaktadır. Genelde saniyeler bazında oluşan bir deprem benzeşik dinamik deney ile saatler bazında numuneye etkitilmektedir, [16].

2.2.1 Benzeşik Dinamik Deney Yöntemi Konusunda Önemli Çalışmalar

1969'da Hakuna tarafından benzeşik dinamik deney tekniği ortaya atılmıştır. Tek serbestlik dereceli numune, analog bilgisayar kontrollü elektro-hidrolik veren kullanılarak test edilmiştir. Sistemin dinamik denge denklemi analog bilgisayarda çözülmüş; deprem yükü etkisindeki tepki davranışı gerçek zamanlı olarak incelenmiştir, [2].

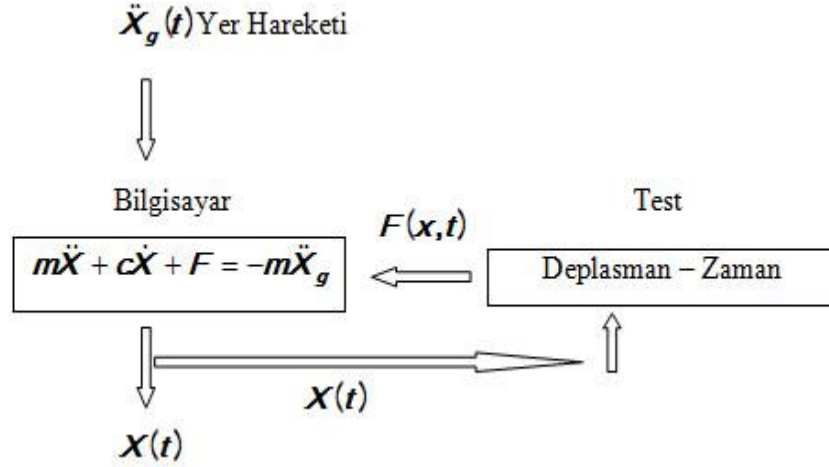
O dönemin imkanları ile sarsma tablası kullanmadan deprem tepki simülasyonunu elde etmek çok önemli bir gelişme olarak kaydedilmiştir.

1974 yılında, Hakuna ve ekibinin ilk olarak ortaya attığı fikri, Takanashi geliştirmiş ve daha pratik bir hale dönüştürmüştür. Daha önceki çalışmada kullanılan analog bilgisayar yerine, daha sessiz bir dijital bilgisayar kullanmıştır. Hareket denklemi de zamana bağlı bir fark denklemi olarak düzenlenmiştir. Bu değişikliklerle, yüklemenin gerçek zamanlı olarak uygulanması zorunluluğu ortadan kalkmış, yavaş yüklemeler ve duraksamalarla tekrarlı bir döngü halinde uygulanmıştır, [2].

Yapılan ilk benzeşik dinamik deney uygulamalarında, hareket denklemi lineer ivme yöntemi ile çözülmüştür. Elastik olmayan sistemlerin bu deney yöntemi kullanılarak incelendiği deneylerde, sistemin teğet rijitliği hesap edilmiş ve hareket denklemi adım adım bu teğet rijitliğine göre oluşturulmuştur.

Yay-kütle sistemin hareket denklemi viskoz sönüm değeri için kabul yapılarak direkt integrasyon yöntemiyle çözülmektedir. Bu durumda, klasik sayısal analizden farklı olarak yapı sistemine tekrarlı yüklenen kuvvetler tekrar istenmemekle birlikte, her integrasyon adımında direkt olarak sayısal hesaplamaya paralel deney davranışına

göre hesaplanmaktadır. Bu hesaplamayı ve ölçümleri tekrarlayarak, analiz edilen sistemin deprem yükleri altındaki tepkisi elde edilebilmektedir. Buna göre benzeşik dinamik deneyin kavramsal akış diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir, [2].

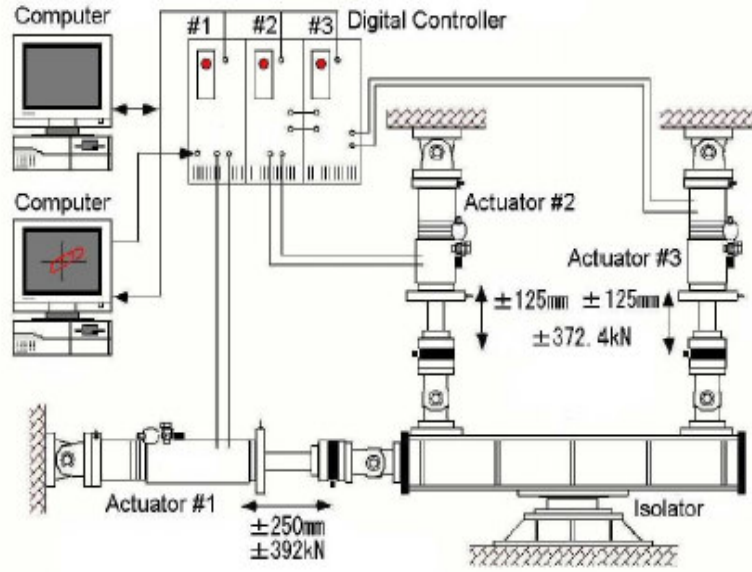


Şekil 2.2: Kavramsal Akış Diyagramı

Kabayama [17], dört adet betonarme kolonu oluşturduğu deney düzeneğinde aynı anda test etmiştir. Sayısal integrasyon yöntemi olarak *Operator Splitting Method* (OS) metodu kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçları sarsma tablası üzerinde yapılanlar ile karşılaştırılarak şu sonuçlara ulaşılmıştır. Numune davranışı, sayısal integrasyon yönteminde kullanılan sönüm oranına önemli ölçüde bağlıdır. Numunenin gerçek davranışını yakalayabilmek için değişken viskoz sönüm matrisi kullanılmalıdır.

Paguette [18], 1/1 ölçekli tek katlı yığma yapıları, düzlemi içinde zayıf döşeme ile kuvvetli duvar etkileşimini irdelemek için, benzeşik dinamik deney tekniğini kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir.

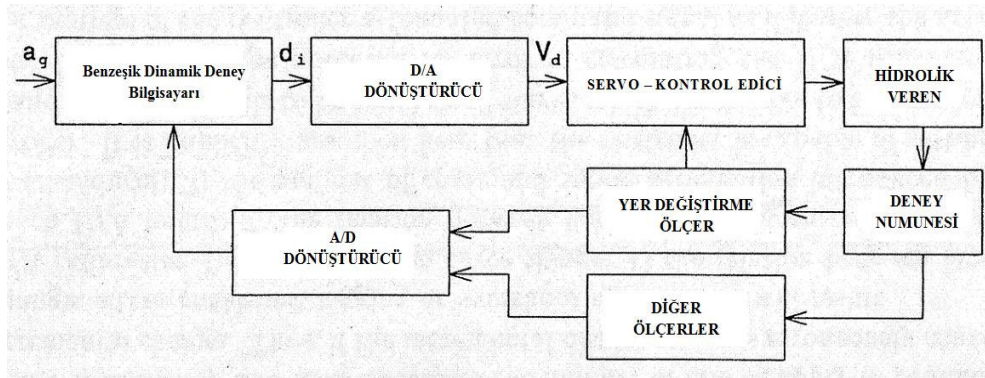
Nakajima [19], düşey deprem yüklerinin, sismik izolatörün yatay deprem davranışına etkilerini, benzeşik dinamik deney tekniğini kullanarak belirlemişlerdir. Kullandıkları deney düzeneğinde üç adet dinamik veren bulunmaktadır, Şekil 2.3, [10].



Şekil 2.3: Nakajima'nın Deney Düzeneği

Pinto ve diğerleri [20], ELSA laboratuvarında mevcut bir köprünün büyük ölçekli modeli üzerinde, alt sistem kullanarak benzeşik deney tekniğini uygulamışlardır. Farklı genlikte üç ivme kaydı kullanılarak yöntem uygulanmıştır. Her deprem durumu için, köprü ayaklarının performansı; rölatif yerdeğiştirme, süneklik, sönmölenen enerji ve hasar mertebesi açısından değerlendirilmiştir.

2.2.2 Benzeşik Dinamik Deney Tekniğine Ait Donanımlar



Şekil 2.4: Benzeşik Dinamik Deney Sisteminin Bileşenleri

Benzeşik dinamik deney yönteminde kullanılan donanımlar Şekil 2.4'de sembolik olarak gösterilmektedir, [2].

Deney tekniğinin önemli donanım bileşenleri;

- Servo – kontrol ünitesi

- Servo – valf
- Hidrolik veren
- Yerdeğiştirme ölçer
- Analog/Dijital (A/D) dönüştürücüler
- Dijital/Analog (D/A) dönüştürücüler

2.2.2.1 Dijitalden Analoga Dönüştürücü (D/A)

D/A dönüştürücü, bilgisayarın vereni kumanda etmek üzere gönderdiği komutun voltaja çevrildiği bileşendir.

Kontrol edici program, doğru olarak yerdeğiştirme değişkenlerinin değerlerini voltaja dönüştürmek durumundadır. Dönüştürülen voltaj, elektro-hidrolik kontrol sistemi tarafından kumanda edici sinyal olarak kullanılmaktadır. D/A dönüştürücü, yerdeğiştirme değerinin doğru yüklenmesinden sorumlu olan üç elektronik aletten birincisidir.

Elektro–hidrolik kontrol ünitesi, yerdeğiştirme ölçerden geri gelen sinyali, D/A dönüştürücünün komutladığı değerle eşitlemek zorundadır.

D/A dönüştürücünün kalibrasyonunu sağlamak üzere, bir bit değişimi için hareket eden fiziksel birimlerin sayısına bağlı bir sabit kullanılmaktadır. Bu sebeple de D/A dönüştürücüler genel olarak kontrol ettiği bit sayısına göre kategorize edilmektedir. Örnek olarak 12 bit veya 14 bit dönüştürücüler mevcuttur.

D/A kalibrasyon faktörü, benzeşik dinamik deneydeki en önemli kalibrasyon sabitidir. Yerdeğiştirme farkı hatalı olarak dönüştürülürse, eksik ya da fazla yerdeğiştirme (undershoot – overshoot) hareketleri sonuçları doğabilmektedir.

D/A kalibrasyon faktörü;

- a) Bitler ve voltajlar arasındaki ilişkiye,
- b) İlgili yerdeğiştirme ölçerin volt ve yerdeğiştirme birimleri arasındaki ilişkisine,
- c) Servo – kontrol tarafından oluşturulan sinyal azaltma miktarına,

Bağlıdır, [2].

2.2.2.2 Analogtan Dijitale Dönüştürücü (A/D)

A/D analogtan dijital dönüşürücü, tüm analog değerleri dijital değerlere dönüştürmekle yükümlüdür.

Uygun bir aralığın seçimi, dönüşürücüden verim almak için önemlidir. Kullanılmakta olan bit'lerin alt-aralık kullanılarak, yüksek teknoloji düzeyine sahip olmayan dönüşürücülerin kullanımı ile gerçekleşen deney uygulamalarında kayda değer hassasiyet kaybı oluşmaktadır. Aralık belirleme probleminin üstesinden, A/D dönüşürücülerden artımın programlanabilir olanlarını kullanarak gelinmektedir. Bu sayede tekrar yerdeğıştirme ölçerin ayarını yapmaya gerek kalmadan, yüksek teknoloji kullanılmayan deneylerde küçük voltaj okumaları için maksimum sayıda bit dönüştürülebilmektedir, [2].

2.2.2.3 Yerdeğıştirme Ölçer

Benzeşik dinamik deney tekniğinin başarısı, doğru yerdeğıştirme kontrolünden ve hesaplamasından geçmektedir. Bu başarıyı elde etmek için deneyin kontrolünde dijital yerdeğıştirme ölçerler kullanılmalıdır, [2].

Yerdeğıştirme ölçümleri adım adım optik şifreleyiciler tarafından gerçekleştirilmektedir. Büyük yerdeğıştirmelere gidilen numunelerde dijital bir ölçüm sistemi, analog sisteme göre çok daha doğru sonuç üretebilmektedir. Bunun en önemli sebebi; analog sistemde maksimum hatanın toplam ölçüm aralığının sabit bir yüzdesi olarak gerçekleşmesidir.

Adım şifreleyici, şifreleyici kafasının her doğrusal yerdeğıştirme birimi için belli bir vuruş sayısını üretmektedir. Basit olarak; doğrusal şifreleyici iki bileşenden oluşmaktadır, [6]. Bunlar;

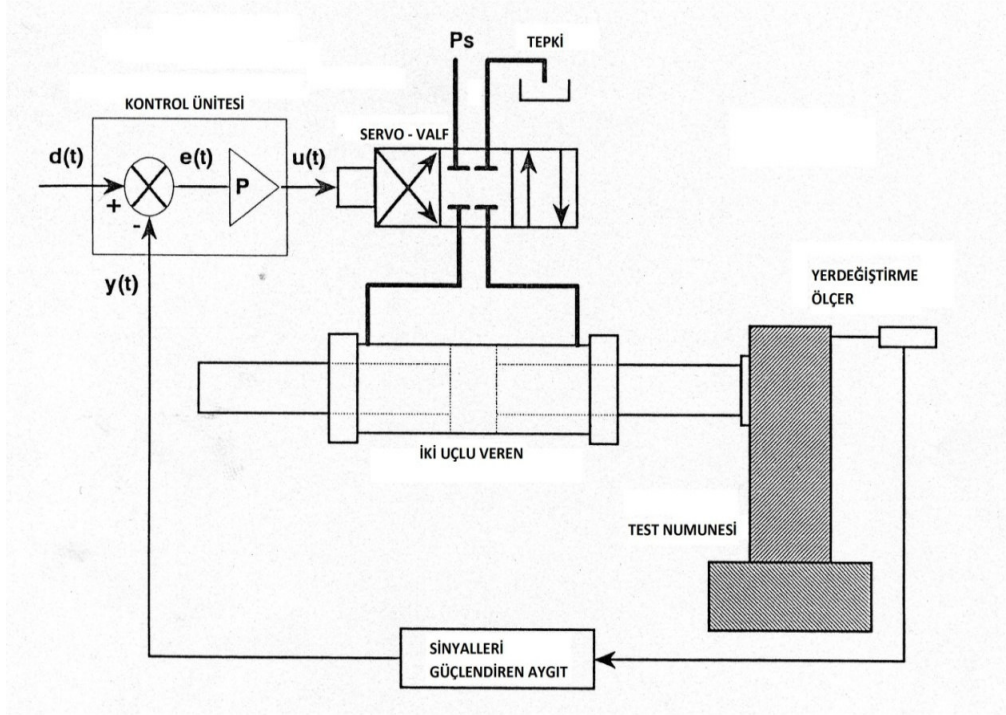
- Birbiri ardına gelen şeffaf ve opak alanlardan oluşan, düzgün biçimde optik olarak dilimlenmiş doğrusal ölçek,
- Optik sistemle ilişkilendirilmiş olan ışık kaynağından oluşan tarama kafası.

Bu dijital yerdeğıştirme ölçerlerin klasik analog yerdeğıştirme ölçerlere kıyasla üstünlüklerini başlıca olarak;

- Çıkış sinyallerinin tamamen gürültüsüz olması,

Dijital diferansiyel analiz devreleri ve elektronik sinyalleri güçlendiren devrelerin performansındaki gelişmeler sonucu düşük gürültü ve yüksek kazanım elde edilmesi sağlanmıştır. Bu sebeple, analog bilgisayarla benzeşik dinamik deney tekrar rağbet kazanmıştır.

Kaneta ve Nishizawa (1983) ve Mizuhata (1982) kendi benzeşik dinamik deney sistemlerini yüksek performanslı bir analog bilgisayarla geliştirmişlerdir.



Şekil 2.6: Analog Servo – Kontrol Döngüsünün Şematik Gösterimi

Analog sistemin kontrol döngüsü Şekil 2.6’da gösterilmektedir. Başlangıçta sistemin dinamik performansı basit analog kontrol elemanı tarafından kontrol edilmektedir. Elektro – hidrolik veren bir negatif karşı etki devresi ile kontrol edilmektedir. Ölçülen yapısal yerdeğiştirme değeri $y(t)$ ve hedeflenen değer $d(t)$ karşılaştırılmaktadır. Aralarındaki fark kontrol hata sinyali $e(t)$, kontrol ünitesi tarafından belirlenmektedir.

Kontrol ünitesi, düzeltme sinyali $u(t)$ ile servo-valfi kontrol etmektedir. Servo-valf hidrolik veren pistonuna yağ bırakıp, hata sinyalini minimize etmek için bu şekilde bir harekete sebep olmaktadır, [16].

b) Elektro – Hidrolik Dijital Kontrol Döngüsü

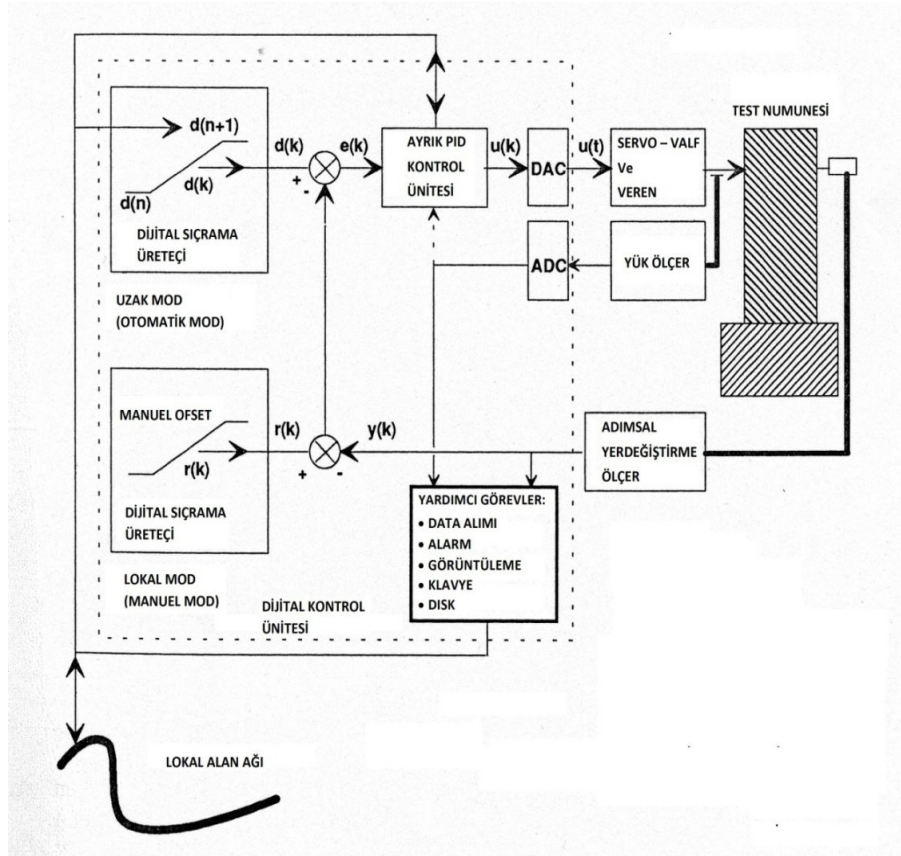
Bu sistemde, çıkış sinyali dijital yerdeğiştirme ölçer tarafından ölçülmektedir. Zaman aralığı (h), birbirini izleyen değerlerin; $y(k)$; 0 ve pozitif rakamlar olması şartıyla gösterilmektedir. Ölçülen değişken $y(k)$, referans değişken $d(k)$ ile karşılaştırılmaktadır.

Hata değişkeni olan $e(k)$, (2.2) ifadesi ile hesaplanmaktadır.

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (2.2)$$

Kontrol ünitesi, (2.2) ifadesinde yer alan hata değişkeninin hesaplanması ve $u(k)$ düzeltme sinyalinin oluşturulmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak dijitalden analoğa dönüştürmede, kontrol edilen hidrolik verenin servo-valfinden zaman sinyali $u(t)$ elde edilir. Bir önceki deformasyon durumu $d(n)$ ve yeni durum $d(n+1)$ 'de, kontrol ünitesi bir sıçrama işlevi gerçekleştirmektedir. Bu işlev, hidrolik verenin takip edeceği ve kolayca hareket edeceği şekilde $d(n)$ 'den $d(n+1)$ 'e gideceği yerdeğiştirme hareketidir. Şekil 2.7 de dijital kontrol sisteminin şeması gösterilmektedir, [16].



Şekil 2.7: Dijital Kontrol Sisteminin Diyagramı

2.2.2.4 Kuvvet Ölçerler

Kuvvet ölçer, benzeşik dinamik deneyde veren ve numune arasına yerleştirilmektedir. Çoğu zaman da, hidrolik verenin bir parçasıdır. Doğrusallığı sağlamak için, deney sonucunun tahmin edilen erişim aralığından daha büyük bir aralığa göre kalibrasyonu yapılmaktadır. Kalibrasyon hataları sistemde eksik kalan ya da fazla olan yerdeğiştirme gibi sonuçlara sebep olmamaktadır, [16].

2.2.3 Benzeşik Dinamik Deney Yönteminin Güvenirliği

Benzeşik dinamik deney çeşitli kabuller ve sadeleştirmeler içermektedir. Prensibi, bir benzeşik dinamik deneyin ne kadar hata içerebildiğinin üzerine kurulmuş olan bir yöntemdir.

Benzeşik dinamik deneyin sonuçlara etki edebilecek pek çok hata kaynağı mevcuttur. Genel olarak hata kaynakları ikiye ayrılmaktadır. Bunlar içsel hata kaynakları ve deneysel hata kaynaklarıdır.

2.2.3.1 İçsel Hata kaynakları

Benzeşik dinamik deney algoritmasının formülasyonunda yapılan hatalardan kaynaklanmaktadır. Bunlar;

- (1) Deneysel olarak incelenecek sistemin, yay – kütle ayrık sistem olarak irdelenmesidir,
- (2) Zaman artımı ve çözülmüş fark denklemi diye ayırarak hareket denkleminin yaklaşımının yapılmasıdır,
- (3) Hız - viskoz sönüm oranı ve sönüm oranı olarak deneyden önce sönümle ilgili yapılan kabullerdir.

Hata kaynaklarının sadece sayısal analiz sırasında da ortaya çıkabileceği unutulmamalıdır.

Nakashima (1985) zaman artım aralığı ile tepki davranışının güvenirliliği arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Onun sonuçlarına dayanarak, zaman artım aralığı büyüdükçe, analiz edilen sistemin doğal periyodu küçülmüş, yerdeğiştirme hız ve ivme davranış genliği büyümüştür, [2].

2.2.3.2 Deneysel Hata Kaynakları

Şekil 2.4’de benzeşik dinamik deney yönteminde kullanılan donanımlar akış şeması içerisinde gösterilmektedir. Gerekli bir yerdeğiştirme girişinde veya yeniden yüklenecek yükün hesabında herhangi bir adımda hata olup da, hatanın tüm deneye yayılması göz ardı edilerek; benzeşik dinamik deneyi uygulamak kesinlikle çok anlamsız sonuçlar doğuracaktır. Fakat şu da açıktır ki; bu hataların minimize edilmesi ile çok ciddi sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca küçük hataların yapısal tepki sonuçlarını etkilemediği görülmüştür, [22].

Hatalar, benzeşik dinamik deneyin akış diyagramında gösterilen herhangi bir bileşeninden kaynaklanabilmektedir. Bu hatalara, Şekil 2.4’de gösterilen bileşenlerden çoğu, fiziksel deneyin gerçekleştirilmesi sırasında sebep olmaktadır. Bu bileşenlerin hatalar üzerindeki etkilerinin hepsinin anlaşılması için akış diyagramında gösterilen tüm bileşenler, bölüm 2.2.2’de açıklanmıştır, [21]. Hatalar en çok yerdeğiştirme kontrol döngüsünde ortaya çıkmaktadır.

- Yerdeğiştirme Ölçer Kaynaklı Hatalar:

Benzeşik dinamik deneyde, bir tepki kuvveti kanalında kötü okumalar oluşabilmektedir. Bu durum da, hareket denkleminin yanlış çözümüne sebep olmaktadır. Daha da kötü olan, hareket denkleminin çözümünde ölçülen yerdeğiştirmelerin kullanılmaması gerekirken, her adım için istenilen yerdeğiştirme artışının hesabında bu değerler kullanılmış olmaktadır.

Bu yerdeğiştirme artışı, her veren için yeni hesaplanan yerdeğiştirme ile önceki ölçülen yerdeğiştirme arasındaki fark kadar oluşmaktadır. Açıkça söylemek gerekirse; ölçülen bir yerdeğiştirme değeri hatalı ölçülmüş ise, hatalı bir yerdeğiştirme artışı komutu hidrolik verenlere gönderilmiş olmaktadır.

Bilgisayar, yerdeğiştirmeleri servo-kontrole voltaj emri göndererek kontrol etmektedir. Servo-kontrol de numuneye gönderilen emir ile geri alınan sinyaller aynı olana kadar numuneyi hareket ettirmektedir. Bu yüzden yerdeğiştirme geri bildirim voltajının doğru olması çok önemlidir. Aksi takdirde numune, bilgisayarın olması gerektiği diye kabul ettiği yerdeğiştirme konfigürasyonundan farklı yerdeğiştirme yapmış olmaktadır. Bu tarz hatalar kontrol yazılımı tarafından fark edilebilir hatalar değildir.

Yerdeğiştirme ölçerin kalibrasyon eksikliği veya lineer olmaması durumunda ise, örnek vermemiz gerekirse; 2 volt sinyal 1 inche (25.4 mm) yerdeğiştirmeye karşılık geliyor olsa da, numune gerçekte 1.1 inch (27.9 mm) yerdeğiştirme yapmış olabilmektedir.

İdeal olan ise, yerdeğiştirme ölçerin davranışının doğrusal ve tekrarlı olmasıdır, [5].

Bilgisayarda bu tür hatalar algılanamamaktadır. Bilgisayarın doğru voltajın uygulandığı dışında fiziksel bir büyüklüğü algılaması imkansızdır. Tepki kuvvetinin de anlık uygulanan yerdeğiştirme değerine bağlı olmasından dolayı, bu pozisyon hataları kuvvet vektörünü etkilemektedir

- A/D ve D/A Dönüştürücü Kaynaklı Hatalar

A/D çeviricinin dönüştirme doğrusallığı kaynaklı hatalar da deney sonuçlarını etkiler. Bu sistematik ve tüm data kanallarında oluştuğundan beri, sistem yazılımı bu etkiyi hesaba katacak şekilde geliştirilmiştir.

- Kuvvet Ölçer Kaynaklı Hatalar

Kuvvet ölçerler, yük ölçere bağlı olarak kalibrasyonu yapılan bir şekil değiştirme ölçerdir. Oluşan hatalar da, sistemin doğal frekansında hataya sebep olduğu gibi, yapısal rijitliğin görünüşte gerçeğinden farklı olarak elde edilmesine de sebep olmaktadır. Buna rağmen, kalibrasyon hataları sistemde eksik kalan ya da fazla olan yerdeğiştirme gibi sayısal enerji değişimlerine sebep olmamaktadır, [16].

Deneysel hata kaynakları, deneysel donanımın yetersizliğinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Başlıcaları aşağıda sıralanmıştır.

- (1) D/A dönüştürücünün, sınırlı çözümünden dolayı servo – kontrolörü kumanda etmek için kullandığı yerdeğiştirme değeri hesaplanan yerdeğiştirmeden farklıdır, [2].
- (2) Hidrolik verenin hareketinden sonra yerdeğiştirmenin ulaştığı değeri, hedeflenen değeri farklı olabilmektedir. Bu durumun başlıca iki sebebi servo kontrol ünitesindeki sınırlamalar ve uygulanan yerdeğiştirmenin sınırlı doğruluğundan kaynaklanmaktadır, [2].
- (3) Yerdeğiştirmiş durumda ölçülen kuvvet büyüklüğü de, o yerdeğiştirmedeki doğru kuvvet değeriyle aynı olmayabilir. Bu durumun da sebebi yük – ölçer hücresinin hassasiyetinin sınırlı olmasıdır, [2].

- (4) A/D dönüşümünden sonra, hesaplanan yük dijital bir değere dönüşmektedir. Bu dönüşüm sırasında da sınırlı bir çözümleme kullanılmaktadır. Deneyin bir kapalı döngüsünün içerdiği en büyük hata kaynağını bunlar oluşturmaktadır. Bir döngüde biriken hatalar, takip eden adımların yanlış uygulanmasına sebep olabilmektedir, [2].

Tek serbestlik dereceli bir sistemde, hesaplanan kuvvet değerine karşı gelen doğru kuvvet (bilinmeyen değer), i olarak alınırsa ve hesaplarda kullanılan kuvvet de_{im} olarak alınırsa, hareket denklemi (2.3) ile ifade edilir, [16].

$$\ddot{x}_i + \dot{x}_i + x_i = -\ddot{x}_{gi} + \Delta_m \quad (2.3)$$

Bu denklemde yer alan Δ_m (2.4)'de verilmiştir.

$$\Delta_m = x_i - x_{im} \quad (2.4)$$

(2.4) ifadesinde, hatalı kuvvet altındaki sistemin davranışı olarak hesap edilen hata kuvveti (Δ_m), sistemin tepki davranış hatasını meydana getirmektedir.

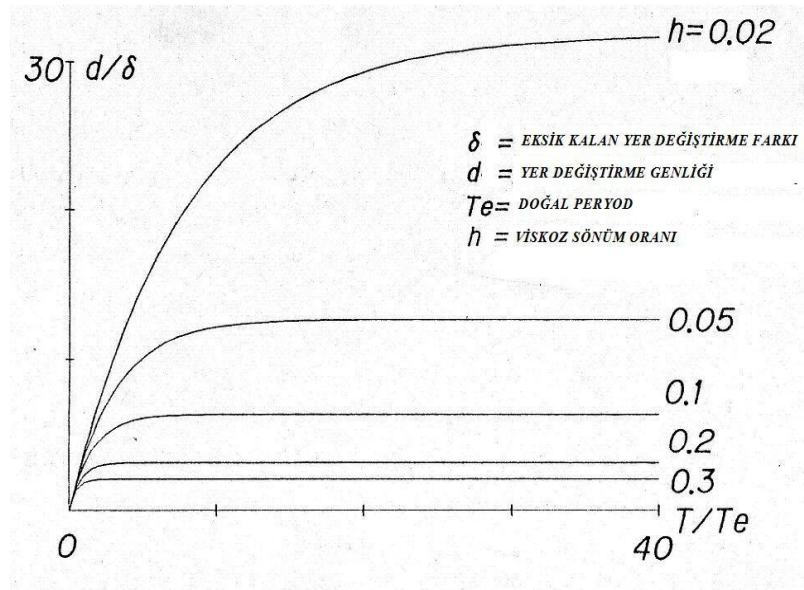
- (5) Sürtünme hataları da deneysel hatalar arasındadır. Numune ile hidrolik verenin bağlantısı fiziksel bir sınırlamadır; bundan başka ek sınırlamalar da mevcut olabilmektedir. Bağlantılar ve hidrolik veren, numune hareket ettikçe sürtünmeye sebep olacak şekilde birbirlerine bağlı durumdadırlar. Bu sürtünme de enerji kaybına sebep olmaktadır. İyi bir deney düzeneği sürtünme etkisini azaltacak şekilde çalışmalıdır; tabii ki bazı sürtünmeler kaçınılmaz olmaktadır. Visköz sönüm matrisi kullanarak ilave sönüm eklemekten önce, serbest titreşim deneyi ile sistemin içsel sönümü elde edilmelidir, [16].

- (6) Kuvvet Yumuşamasını da hata kaynağı olarak açıklamak gerekmektedir. Elastik olmayan deneyler sırasında, yük ölçer tarafından ölçülen kuvvetin, hareketsiz durumda adımlar arasındaki bekleme periyodunda azaldığı gözlemlenmiştir, [16].

Kato (1985) [2], kendisinin kullandığı benzeşik dinamik deney sistemiyle, deneysel hataların karakteristiklerini incelemek üzere bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar şöyledir;

- (1) Yerdeğiştirme hatası, hesaplanan yerdeğiştirme ile hidrolik verenin hareketinden sonra gerçekleşen yerdeğiştirme değerleri arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.
- (2) Yerdeğiştirme hatası, servo-kontrolörün sınırlamasından dolayı hidrolik verenin hedef yerdeğiştirme değerine ulaşamamasından da oluşmaktadır.
- (3) Yerdeğiştirme hatalarının sistematik bir durumu vardır. Bir adımın hesaplanan yerdeğiştirme artışının kesin değeri, o adımda numunenin yerdeğiştirme artışından her zaman için daha büyük olmaktadır.
- (4) Bu oluşan yerdeğiştirme hatası (undershoot) analiz edilen sistemin doğal periyoduna karşılık gelen tepki davranışını arttırmaktadır.
- (5) Deney numunesi elastik olmayan bölgeye girdikten sonra, tepki davranışı azalmaktadır. Bu aralıkta rijitlik kaybıyla birlikte hata kuvveti de azalmaktadır.

Nakashima (1985) eksik kalan yerdeğiştirme değeri ile elastik davranış hatasının oluşumu arasındaki ilişkiyi Şekil 2.8’de göstererek; analitik olarak formülize etmiştir, [2].



Şekil 2.8: Eksik Kalan Yerdeğiştirme Artımının Sebep Olduğu Yerdeğiştirme Genliği Oluşumu

Şekil 2.8’de kullanılan semboller,

δ = Eksik kalan yerdeğiştirme değerlerinin toplamı

d = Yerdeğiştirme davranışından dolayı oluşan hata genliği

τ_e = Analiz edilen sistemin doğal periyodu

η = viskoz sönüm oranı

Δt = zaman aralığı

Yerdeğiştirme hatasının esas olarak hidrolik verenin deney numunesini yönlendirememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Nakashima, (1985) bu hata miktarını minimize etmek üzere bir algoritma geliştirmiştir. Bunun için her yükleme adımında ölçülen verilerden elde edilen ani rijitlikler kullanılmıştır, [2]. Davranıştan kaynaklanan hataların oluşumunu önlemek için bazı teknikler geliştirilmiştir.

Uygulamayı zorlaştıran bir kritik nokta da yerdeğiştirme ölçerlerin hassasiyetidir. İyi yerdeğiştirme kontrolü, yerdeğiştirme sensörü doğru yerdeğiştirmeyi ölçmeyi başaramadığında sağlanamamaktadır.

Deney sonuçlarının kalitesini düşüren, güvenilirliğini azaltan bu hatalar, benzeşik dinamik deneydeki en önemli problemlerdir ve geniş kapsamlı olarak üzerinde çalışılan bir konudur.

Bu hataları görmezden gelmek benzeşik dinamik deneyde çok yetersiz sonuçlar alınmasına sebep olurken; bilinen odur ki hataların minimize edilmesi durumunda da çok iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Shing ve Mahin (1983), hataları sistematik veya rastlantısal olarak kategorize etmiştir.

Sistematik hatalar; doğrudan yapısal tepki davranışına bağlı olarak oluşurken; rastlantısal hatalar yapısal tepki davranışı üzerinde çok önemli bir etkiye sahip değildir. Rastlantısal hatalar yapısal davranıştan bağımsızdır. Adım adım bakıldığında oldukça küçük olan sistematik hatalar bile yapının tepki davranışı üzerinde dramatik sonuçlar yaratabilmektedir.

Yapıya hatalı yerdeğiştirme yüklemesinden dolayı yapıdan hatalı tepki kuvveti alınmaktadır. Her adımdaki yerdeğiştirme değerinin sistematik olarak yanlış olması sebebiyle; çok büyük veya çok küçük olsa da; hatalar enerji kaybına yol açmaktadır.

Sistematik hatalarla aynı oranda olmasa da, yükleme hızının etkisi gibi etkiler de yapının tepki davranışı üzerinde önemli bir role sahip olabilmektedir.

Shing ve Mahin (1984), bir sonraki adımın hesabında kullanılan büyüklüğün, ölçülen değerden büyük olması durumunda; hata dağılım davranışının her zaman daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir, [21].

Hataların sonuçlarını azaltmak üzere çeşitli telafi edici teknikler önerilse de; en iyi teknik deney sonuçlarını etkileyen bu hatalardan uzak durulabilmesidir.

Benzeşik dinamik deney düzeneğinin performansını ölçmek için, her hidrolik verenin hata zaman tanımıyla ilgili bilgileri toplanmaktadır. Her adımda hesaplanan ve gerçekten yüklenen yerdeğiştirmeler arasındaki farkı, her veren için tanımlamaktadır. Bu kayıtların Fast Fourier Transformu (FFT) yapıldığında, hata bir veya birden fazla yapı doğal frekanslarında pik yapıyor ise, o zaman deney düzeneğinde problem olduğu anlaşılmalıdır. Bu hatalar deney numunesine zarar vermeden, düşük seviye elastik deneylerde fark edilebilmektedir, [21].

Benzeşik dinamik deney yönteminde kaçınılmaz olan deneysel hataların çözümü, kontrol sistemindeki sınırlamalarla mümkün olmaktadır. Deney elemanlarının dinamik tepkilerinin, kümülatif kontrol hatalarından çokça etkilendiği görülmüştür. Bu sebeple kontrol hatalarını azaltmak için, iki tane sayısal integrasyon tekniği kullanılmaktadır, [22]. Bu integrasyon teknikleri;

1) PTA (Sonraki Zaman Aralığı Düzenlemeli Teknik)

2) MPTA (Geliştirilmiş Sonraki Zaman Aralığı Düzenlemeli Teknik)

Her zaman adımında, Δt gibi belirli bir sabit zaman artımının eklenerek kullanılması olan bu teknikler hataların azalmasını sağlamaktadır.

Yükleme yük vektörü, sayısal tersinir tekrarlı model ve yükleme testinden ölçülen değerler bir araya getirilip; her adımda tüm yapı için kullanılacak yükleme vektörü bilgisayar yardımıyla hesaplanmaktadır.

Genellikle bilgisayar kontrollü hidrolik veren kullanıldığından, ölçüm ve kontrol elemanlarında hatalar oluşabilmektedir.

Hidrolik veren büyük çoğunlukla analog voltaj ile kontrol edilmektedir. Buna karşın, bilgisayarlar dijital olarak kontrol edilmektedirler. Bu sebeple yükleme sisteminin sinyalleri analogtan dijitala, dijitalden analoğa dönüştürülürken kontrol edilmek durumundadır.

Kontrol edilebilen minimum yerdeğiştirme δ_{min} , A/D ve D/A çevriminin hassaslığında (2.5) ifadesi ile hesaplanmaktadır. Bu ifade;

$$\delta_{min} = \frac{2\ell}{\eta} \quad (2.5)$$

Bu formülde yer alan;

ℓ = Hidrolik veren yerdeğiştirme kapasitesi

η =A/D ve D/A dönüşümünün duyarlılığı

tanımlamaktadır.

Minimum yerdeğiştirmenin okunduğu ℓ_{min} değerinden daha küçük yerdeğiştirmeleri hidrolik veren ile kontrol etmek imkansız olmaktadır. Bu sebeple de, genellikle hedeflenen yerdeğiştirmeye numuneye hasar vermeden ulaşabilmek için, δ_{min} değerine ulaşmayan daha küçük δ yerdeğiştirmelerinden kaynaklanan hatalar uygulanmış olmaktadır. Hatalı olarak yapılan numunenin tersinir tekrarlı karakterinin kullanıldığı sayısal integrasyonu, gerçekten farklı olmaktadır.

Kontrol hatasından oluşan değer, ilk verilen yerdeğiştirme değerinin (2.6)'daki değer $\{y_{n+1}^{\cdot}\}$ ile SPT deneyinden ölçülerek elde edilen yerdeğiştirme değeri $y_{n+1}^{\cdot}$ arasındaki farktan elde edilmektedir. Bir sonraki adımda, (2.7)'de gösterildiği üzere; değişken zaman adımı Δ_n ile yeni uygulanacak olan $y_{n+1}^{\cdot}$ yerdeğiştirme bulunmaktadır.

$$y_{n+1}^{\cdot} - y_n^{\cdot} = y_n^{\cdot} \Delta_n + \frac{1}{2} \ddot{y}_n^{\cdot} \Delta_n^2 \quad (2.6)$$

$$\tilde{y}_{n+1}^{\cdot} - y_n^{\cdot} = y_n^{\cdot} \Delta_n + \frac{1}{2} \ddot{y}_n^{\cdot} \Delta_n^2 \quad (2.7)$$

Kontrol hatasından oluşan $y_{n+1}^{\cdot} - y_n^{\cdot}$ değeri, başka bir deyişle hatayı minimum yapan değer olan Δ_n , değişken zaman adımı değeri hesaplanmaktadır.

Tepki yerdeğiştirmesinin n. adımdaki kontrol hatasının etkisi, formül (2.8)'de Δt yerine Δ_n ve $\{y_{n+1}^{\cdot}\}$ yerine $y_{n+1}^{\cdot}$ değeri kullanılarak azaltılmış olduğu

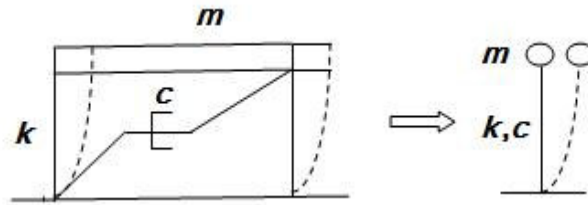
görülmektedir. Başka bir deyişle Δ_n değeri, kontrol hatasını minimize eden en uygun zaman aralığı durumundadır, [22].

$$M[y]_{n+1}^{\dots} \in [y]_{n+1}^{\dots} \otimes \{ \cdot \}_{n+1} \otimes \{ \cdot \}_{n+1} \otimes \{ \cdot \}_{n+1} = M[y]_{n+1}^{\dots 0} \quad (2.8)$$

2.2.4 Hareket Denklemi ve Sayısal Teknik

Kullanılacak olan dinamik model tek serbestlik dereceli bir sistem (SDOF) olarak kabul edilmiştir.

Tek serbestlik dereceli sistemin serbest titreşim hareketi Şekil 2.9'de gösterilen tek katlı bir çerçeve sistem için idealize edilmiştir.



Şekil 2.9: Tek Serbestlik Dereceli Sistem

Serbest titreşim hareket denklemi (2.9) ifadesinde verilmiştir. Bu ifade;

$$\ddot{x} + \dot{x} + x = 0 \quad (2.9)$$

m , kütle değeri ile sadeleştirme yaparsak eğer;

$$x'' + \frac{c}{m} x' + \frac{k}{m} x = 0 \quad (2.10)$$

$$x'' + 2\xi\omega x' + \omega^2 x = 0 \quad (2.11)$$

Burada $\ddot{x}$ sırasıyla; ivme hız ve yerdeğiştirme; m ve k ise sırasıyla kütle ve sistemin yatay rijitliğidir.

Titreşim durumunda hareketin bir tekrarı için geçen zaman *Periyot*; birim zamanda yapılan periyodik hareket sayısı ise *Frekans* olarak tanımlanmaktadır.

Eğer sönüm mevcutsa ve hareket bir titreşim hareketi ise; bu durumda sönümlü serbest titreşim hareketi meydana gelmektedir. Sönüm nedeniyle bu tür hareketin

genliği sürekli azalmaktadır ve sönümlü hareketin dairesel frekansı sönümsüz hareketin açılal frekansından daha küçüktür (2.12).

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.12)$$

Eğer titreşim bir dış etkiyle ortaya çıkıyorsa bu tür titreşime *Zorlanmış Titreşim* adı verilir, [21].

Yapı sisteminin ayrık parametrelı dinamik denge denklemi matris formda verilirse;

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = F(t) \quad (2.13)$$

(2.13) numaralı denklemde verilen değerler sırasıyla;

M: Kütle matrisini

C: Viskoz sönüm matrisini

r: Yapının reaksiyon kuvvetini

$\dot{u}$: Hız vektörünü

$\ddot{u}$: İvme vektörünü

f: Yükleme fonksiyonunu

göstermektedir.

Yapının reaksiyon kuvveti, anlık yerdeğiştirme durumu ve yapı davranış geçmişinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Elastik sistemler için yapısal reaksiyon kuvveti, (2.14)'deki gibi ifade edilebilir.

$$F(t) = -K u(t) \quad (2.14)$$

K: Rijitlik matrisi

u: Yerdeğiştirme vektörü

Elastik olmayan, daha karmaşık sistemlerin denge denkleminin yakınsaması ise adım adım doğrudan integrasyon teknikleri kullanılarak $[0, \tau]$ aralığında, $\Delta t = \tau / N$ olmak üzere N eşit aralığa bölünmüş olarak yapılırsa;

$$M \frac{du_i}{dt} + C u_i + K u_i = F_i(t) \quad (2.15)$$

$\ddot{u}_i$ ve $\dot{u}_i$; sırasıyla $\ddot{u}(\Delta)$ ve $\dot{u}(\Delta)$ ve $u_i = u(\Delta)$ olmak üzere hareket denklemi (2.15) kullanılmaktadır.

Benzeşik dinamik deney yönteminde her deney adımında numunenin davranışına bağlı olarak yapının reaksiyon kuvveti ölçülmektedir.

Benzeşik dinamik deney algoritmasını i no'lu adımında;

1. Bir integrasyon tekniği kullanılarak bir sonraki adımın yerdeğiştirme değeri u_{i+1} hesaplanmaktadır.
2. Bilgisayar kontrollü hidrolik veren kullanılarak bulunan yerdeğiştirme numuneye yüklenmektedir.
3. Hidrolik verenin durması beklenmeli ve yeni tepki kuvveti F_{i+1} okunmalıdır.
4. $\ddot{u}_{i+1}$ ve $\dot{u}_{i+1}$ değerleri ve diğer büyüklükler hesaplanmaktadır.
5. Döngü tekrarlanmaktadır, [21].

2.2.4.1 Hareket Denkleminin Genelleştirilmesi

Yük fonksiyonu:

Benzeşik Dinamik Deney yöntemi çoğunlukla sismik yükler cinsinden ifade edilmektedir. Bu sebeple yük fonksiyonu gerçekte keyfi olarak seçilmiş olmaktadır. En basit şekilde sismik yükleme (2.16)'da ifade edilecek olunursa:

$$F_i = \{1\} \ddot{u}_i \quad (2.16)$$

F_i = herhangi i Δt bir zamandaki yük vektörü

$\{1\}$ = birim vektörü

$\ddot{u}_i$ = herhangi bir zamandaki zemin ivmesi

Yukarıdaki formülasyon (2.16), sarsma tablasında uygulanacak olan basit yatay hareketin yapılmasına izin vermektedir. Benzeşik dinamik yöntem, düzlemsel olmayan yapılara uygulandığında (2.17) denklemi;

$$F_i = -M \ddot{u}_i \quad (2.17)$$

M = Yer ivmesi dönüştürme matrisi

$\ddot{u}_i$ = herhangi bir zamandaki zemin ivmesi

Numune konfigürasyonu ve zemin hareketi girdileri verilen bir deney için, B matrisi sabit durumdadır. Bu şekildeki yükleme denklemi, sarsma tablası ile yapılamayan deneyleri benzeşik dinamik deneylerle yapmayı olanaklı kılmaktadır, [21].

2.2.4.2 Benzeşik Dinamik Deney Algoritması

Atalet ve viskoz sönüm özellikleri analitik olarak tanımlanmaktadır ve yükleme durumu kullanıcı tarafından kontrol edilmektedir. Deney uygulanırken, hareket denklemi adım adım sayısal integrasyon ile çözümlenmektedir.

Hidrolik veren, hesaplanmış yapısal yerdeğiştirmeyi uygulamak için kullanılır ve sonuç olarak bir sonraki adımda kullanılacak yük hesaplanmaktadır, [21].

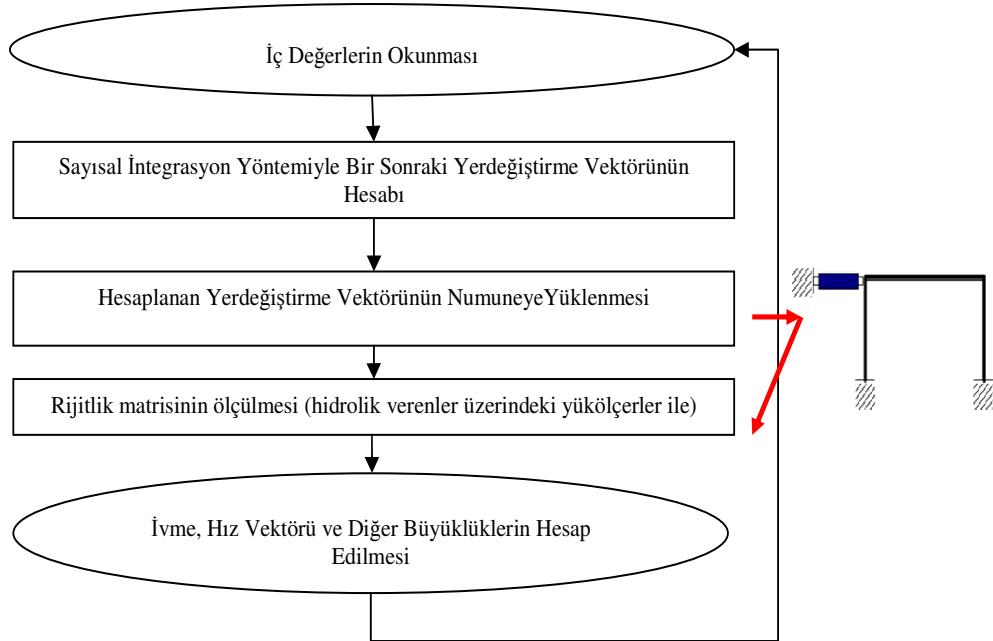
2.2.5 Benzeşik Dinamik Deney Yönteminin İntegrasyon Teknikleri

Sistemin hareket denklemi;

$$M \{ \ddot{x}_n \} + C \{ \dot{x}_n \} + F \{ x_n \} = M \{ \ddot{x}_{n0} \} \quad (2.18)$$

Bu denklemde (2.18),

$[M]$, $[C]$, $[F]$ sırasıyla kütle, viskoz sönüm oranını, yük matrisini göstermektedir.



Şekil 2.10: Benzeşik Dinamik Deney Genel Akış Şeması

$\{ \}$ 'nin tanımlanmasından sonra; ivme hız ve bir sonraki adımın deplasmanı olan $\{ \}_{n+1}$ yerdeğiştirme vektörü sayısal integrasyon metoduyla hesap edilmektedir. Bu düzen Şekil 2.10'daki akış şemasıyla gösterilmiştir.

Benzeşik dinamik deney tekniğinde üç farklı integrasyon tekniği kullanılabilir, [23], [24]. Bunlar; açık (explicit), kapalı (implicit) ve karma yöntemlerdir.

Kullanılacak integrasyon yöntemi teğet rijitlik matrisini kullanmamalıdır. Çünkü deney esnasında bu matrisin doğru olarak tayin edilmesi mümkün değildir. Lineer olmayan yapı davranışının incelenmesi durumunda, kullanılacak ardışık yaklaşım yöntemi numuneye yükleme ve boşaltma yapmayı gerektirmemelidir.

Bilgisayar bağlantılı deney yönteminde, integrasyon tekniğinin uygulanmasının iki ana koşulu;

a) Teğet rijitlik matrisi test sırasında hesaplanmadığından, integrasyon tekniğinde kullanılmamalıdır.

b) Elastik olmayan bir sistemin tepkisini çalışmak için iteratif çözüm mekanizması istenmeyen yükleme durumlarını ve yüksüz döngüyü numunede oluşturulmamalıdır.

Açık (explicit) integrasyon yöntemleri kolay programlanabilir, az bellek kapasitesi gerektirir; ancak çözüm stabiliteleri tam değildir. Küçük adım aralığı kullanımını gerektirmektedir. Sonlu farklar metodu, Newmark metodu, değiştirilmiş Newmark metodu, Runge-Kutta metodu bu gruba giren yöntemlerdir.

Kapalı (implicit) integrasyon yöntemlerinin çözüm stabiliteleri tamdır. Programlanmaları güç ve bellek gereksinimi yüksektir. Hilber α metodu, Houbolt metodu, Newmark metodu, Wilson Metodu bu gruba giren yöntemlerdir.

Karma yöntemlerde ise problem iki parçaya ayrılır ve parçalar için farklı integrasyon yöntemleri kullanılır. Örneğin açık integrasyon yöntemleri test edilen bölüm için, kapalı integrasyon yöntemleri de hesaplanan bölüm için kullanılabilir. Operator-Splitting methodu buna bir örnektir. Karma durum her iki yöntemin avantajını taşımaktadır.

2.2.6 İntegrasyon Tekniklerinin Anlatılması

Deneyler, basit ve sünek yapı sistemleri için mantıklı sonuçlar göstermiş olsa da; rijit sistemlerde, rijitliklerinde ani değişmelerin olduğu sistemlerde, yerdeğiştirme

ölçüm sensörlerinin güvenilirliğinden dolayı sistemlerin rijitlik değerlerini belirlemek oldukça güç olmaktadır. Bu güçlüklerin üstesinden gelmek için, Tanaka ve ekibi yeni bir integrasyon şekli olan sonlu farklar yöntemi Tokyo Üniversitesinde Endüstriyel Bilim Enstitüsünde uygulamışlardır. Bu yöntem ile, tanjant rijitliği hesaplamaya da adım adım hareket denklemi hesaplamaya da gerek olmamaktadır. Sistemin reaksiyon kuvveti (yük ölçer tarafından ölçülen) hareket denkleminin çözümünde direkt olarak kullanılmaktadır.

2.2.6.1 Sonlu Farklar İntegrasyon Yöntemi

Benzeşik Dinamik Deney yönteminde en temel prensip olan sonlu farklar integrasyon yöntemi (CDM) ile açıklanmıştır. Diğer integrasyon teknikleri daha karmaşık yöntemlerdir.

Benzeşik dinamik deney Şekil 2.10'da gösterilen akış diyagramındaki haliyle gerçekleşmektedir. Yük vektörü deneysel olarak ölçülmektedir. Yapıların doğrusal olmayan karakteristiklerinde bu yöntemle çözümünden hiçbir şüphe duyulmamaktadır. Aynı zamanda, doğrusal olmayan davranışa göre tersinir tekrarlı sönüm deneysel olarak modellenmekte, bu sayede sönüm matrisi C sadece viskoz sönüm kuvvetleri için değere ihtiyaç duymaktadır, [15].

Sonlu farklar integrasyon yönteminde, iteratif uygulamaya gerek yoktur. Bu da özellikle elastik olmayan bölge olmak üzere, oldukça avantaj sağlamaktadır.

Kütle ve sönüm matrisleri diyagonal ise, hesaplama matris hesaplaması içermez. Bu da hesaplama zamanının ve bellek kapasitesi ihtiyacının azalması demektir.

2.2.6.2 Newmark İntegrasyon Yöntemi (Açık)

Newmark yöntemi, hareket denklemi olan (2.18) denklemi; yerdeğiştirme, hız ve ivme değerleri için ara denklemlerle kullanılmaktadır.

$$x\{\dot{x}_{n+1}\} = x\{\dot{x}_n\} + \Delta t \{ \ddot{x}_n \} + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta^2 \{ \ddot{x}_{n+1} \} + \beta \Delta^2 \{ \ddot{x}_{n+1} \} \quad (2.19)$$

$$\{\dot{x}_{n+1}\} = \{\dot{x}_n\} + (1 - \nu) \Delta t \{\ddot{x}_n\} + \nu \Delta t \{\ddot{x}_{n+1}\} \quad (2.20)$$

Denklemdaki β ve ν değerlerinin seçimine göre algoritma açık ya da kapalı olabilmektedir. Bu durumda (2.19) ve (2.20) no'lu denklemler, (2.21), (2.22) ve (2.23) hallerini alır.

$$\{x_{n+1}\} = \{x_n\} + \Delta t \{\dot{x}_n\} + \frac{\Delta t^2}{2} \{\ddot{x}_n\} \quad (2.21)$$

$$\{\dot{x}_{n+1}\} = \{\dot{x}_n\} + \frac{\Delta t}{2} (\{\ddot{x}_n\} + \{\ddot{x}_{n+1}\}) \quad (2.22)$$

$$\{\ddot{x}_{n+1}\} = \left\{ [M] + \frac{\Delta t}{2} [C] \right\}^{-1} \left\{ [M] \ddot{x}_{0n+1} - \{F_{n+1}\} - [C] \{\dot{x}_n\} - \frac{\Delta t}{2} [C] \{\ddot{x}_n\} \right\} \quad (2.23)$$

Çok serbestlik dereceli sistemlerde sayısal stabiliteyi sağlamak üzere çok küçük zaman artımları gereklidir.

lineer olmayan bölge için stabilite sınırlaması henüz geliştirilmemiştir. Fakat önceki çalışmalar, çok küçük zaman artımları için doğru sonuçların elde edilebildiğini bize göstermektedir.

2.2.6.3 Düzeltilmiş Newmark İntegrasyon Açık Yöntemi

Yapıların dinamik analizlerinde, sönüm parametresini seçmek oldukça güçtür. İç elastik yapısal değerlere bağlı olarak sabit bir sönüm matrisi seçmek Shing ve Mahin'in (1985) göstermiş olduğu üzere kararsız sonuçlar vermektedir. Modal sönüm oranları ise değişebilmektedir.

Viskoz sönüm sadece yapının anlık hareketini modellemek için kullanılmaktadır.

Viskoz sönüm matrisinin kullanılmasındansa, sayısal integrasyon döngüsü enerji dağılımı üzerine kuruludur.

2.2.6.4 Operator Splitting Yöntemi

Nakashima tarafından benzeşik dinamik deney tekniği için 1990 yılında önerilen nümerik integrasyon yöntemi *Operator Splitting Method* (OS) tekniğinin kullanılması halinde, (2.24) ve (2.25) formüle edilebilir.

$$m\ddot{x}_{i+1} + c\dot{x}_{i+1} + k'x_{i+1} + k_{n+1}^E x_{i+1}^* = -mx_{i+1}^g \quad (2.24)$$

$$c = 2\omega_0 h \quad (2.25)$$

m = kütle matrisi

c = viskoz sönüm matrisi

k' = linear rijitlik matrisi

k_{n+1}^E = nonlineer rijitlik matrisi

x_{i+1}^g = zemin ivme matrisi

$\ddot{x}_{i+1}$ = ivme

$\dot{x}_{i+1}$ = hız

x_{i+1}^* = ön yerdeğiştirme

x_{i+1} = hedef yerdeğiştirme

f_{i+1}^* = ön yerdeğiştirmeye karşılık yükölçer ile belirlenen numune yatay rijitliği

ω_0 = doğal titreşim frekansı (açısal)

h = sönüm oranı

Ön yerdeğiştirme artımı, hedef yerdeğiştirme ve hız arasındaki ilişki (2.26), (2.27) ve (2.28)'de verilmiştir.

$$x_{i+1}^* = x_i + \Delta t \dot{x}_i + \frac{1}{4} \Delta t^2 \ddot{x}_i \quad (2.26)$$

$$x_{i+1} = x_{i+1}^* + \frac{1}{4} \Delta t^2 \ddot{x}_{i+1} \quad (2.27)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \frac{1}{2} \Delta t (\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1}) \quad (2.28)$$

Δt = zaman aralığı

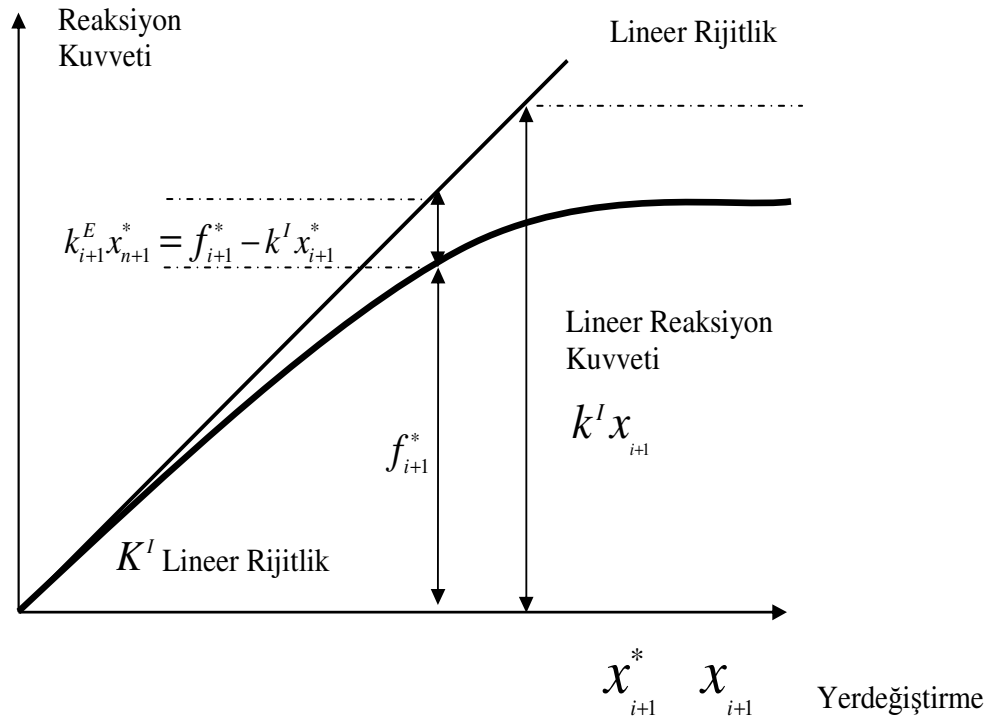
Yöntemin ayrıntılı akış diyagramı Şekil 2.11'de verilmektedir.

1. *i. adım* için x_i yerdeğiştirme, $\dot{x}_i$ hız ve $\ddot{x}_i$ ivme değerleri bilinmektedir.
2. *i+1 adımı* için (3) denklemi ile x_{i+1}^* adım ara-yerdeğiştirme miktarının hesabı
3. Numuneye x_{i+1}^* adım ara-yerdeğiştirmesinin tatbik edilmesi

4. x_{i+1}^* adım ara-yerdeğiştirmesine karşılık gelen f_{i+1}^* reaksiyon vektörünün yük ölçerler ile ölçülmesi
5. $(f_{i+1}^* - k^I x_{i+1}^*)$ matrisinin hesabı ve (1) denkleminde $k_{n+1}^E x_{i+1}^*$ terimini yerine koyarak x_{i+1} adım yerdeğiştirmesinin hesabı
6. Denklem (4) ve (5) ile $\ddot{x}_{i+1}$ ivme ve $\dot{x}_{i+1}$ hız değerlerinin hesabı
7. $i=i+1$
8. Adım 2 ye dönülmesi

Bu algorithmada adım ara yerdeğiştirmesine karşılık gelen f_{i+1}^* vektörü deneyden alınan tek büyüklüktür. Söz konusu büyüklük herhangi bir yük çevrimine gerek kalmaksızın deneyde doğrudan ölçülebilmektedir. $(f_{i+1}^* - k^I x_{i+1}^*)$ terimi sıfır olduğunda, bu method Newmark metoduna dönüşmektedir.

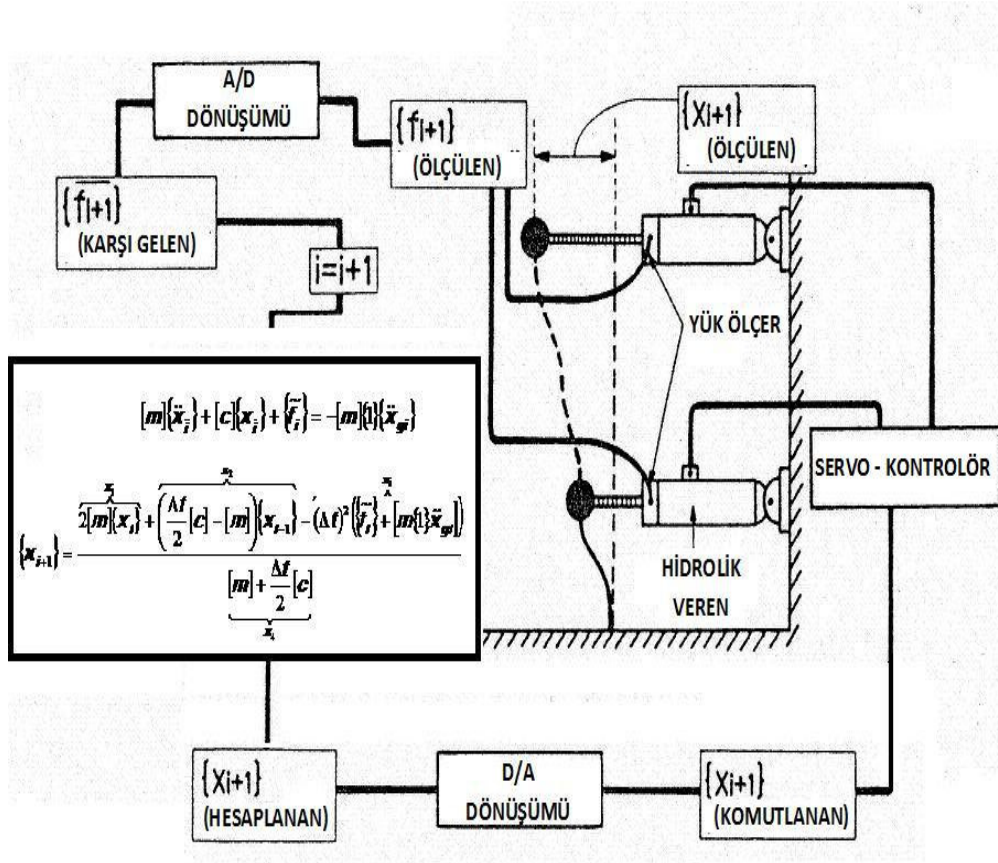
Numuneler üzerinde oluşacak hasar dağılımı, deney sırasında istenilen adımlarda durularak izlenecek ve kaydedilecektir.



Şekil 2.11: OS Algoritmasının Detayı

3. GELİŞTİRİLEN BENZEŞİK DİNAMİK DENEY ALGORİTMASI

3.1 Sonlu Farklar İntegrasyon Tekniği



Şekil 3.1: Benzeşik Dinamik Deneyin kullanılan Temel Algoritması ve Akış Diyagramı

Sonlu farklar yönteminin temel algoritması yukarıdaki Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere ayrık hareket denklemleri matris formda yazılırsa;

$$m \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \dot{x}_i \\ x_i \end{bmatrix} + c \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ x_i \end{bmatrix} + f_i = -m \ddot{x}_g \quad (3.1)$$

Burada; x , m , c , ve $\ddot{x}_g$ sırasıyla yerdeğiştirme, kütle, viskoz sönüm, reaksiyon kuvveti ve zemin ivmesi büyüklükleridir. Nokta $(\cdot)$ $[]$ $\{ \}$ ise sırasıyla diferansiyel, matris ve vektörü ifade ederler; i ise denklemin i . adım olduğunu göstermek için kullanılır.

Hız ve ivme, sonlu farklar yöntemi kullanılarak Δt integrasyon zaman artımı alınarak gösterilecek olursa ve i. adımın hız ve ivme vektörleri; (i-1), (i) ve (i+1). adımların yerdeğiştirmeleri cinsinden yazılırsa sırasıyla (3.2) ve (3.3) ifadeleri;

$$\{\dot{x}_i\} = \frac{\{x_{i+1}\} - \{x_{i-1}\}}{2\Delta t} \quad (3.2)$$

$$\{\ddot{x}_i\} = \frac{\{x_{i+1}\} - 2\{x_i\} + \{x_{i-1}\}}{(\Delta t)^2} \quad (3.3)$$

Bu ifadeleri, yukarıdaki hareket denklemine yerleştirdiğimiz zaman elde ettiğimiz denklem (3.4) ifadesi ile aşağıda verilmiştir.

$$x_{\{n+1\}} = \left[\left[\frac{\Delta t}{2} \right] \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \right]^{-1} \left\{ \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \right\} \left\{ \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \right\} \left\{ \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \right\} \left\{ \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \left[\frac{\Delta t}{2} \right] \right\} \quad (3.4)$$

Bu ifadeden, bir sonraki ykleme adımı olan (i +1). adımda elde edilecek olan yerdeğiştirmenin sadece bilinen değerlerle elde edilebildiği sonucu ıkalabilir. Hareket denklemi adım adım formda oluşturulmasına gerek olmadan, iterasyon uygulamasından uzak duralabilir.

Sonlu farklar yönteminin uygulanabilirliği açısından üstünlüğünden dolayı neredeyse tüm başarılı benzeşik dinamik deneylerin sonlu farklar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir, [2].

Bir sonraki adımın yerdeğiştirmesini ifade eden yukarıdaki bu denklem, bizim deneyimizde kullandığımız benzeşik dinamik deney yazılımında aynen yukarıda ifade edilen şekilde yer almıştır. Deneyin MATLAB yazılımında x_1, x_2, x_3, x_4 cinsinden ifade edilen değişkenlerin formülleri aşağıda görüldüğü gibidir.

$$\{x_{i+1}\} = \frac{\overbrace{2[m]\{x_i\}}^{x_1} + \overbrace{\left(\frac{\Delta t}{2}[c] - [m]\right)\{x_{i-1}\}}^{x_2} - \overbrace{(\Delta t)^2\left(\{f_i\} + [m]\{\ddot{x}_{gi}\}\right)}^{x_3}}{\underbrace{[m] + \frac{\Delta t}{2}[c]}_{x_4}} \quad (3.5)$$

Sonlu farklar yönteminde iteratif yöntem gerekliliği duyulmaz. Elastik olmayan aralıktaki hesaplarda bu büyük avantaj sağlamaktadır. Eğer kütle ve sönüm matrisleri diyagonal ise; hesaplamalarda matris hesabına gerek duyulmaz. Sonuç olarak da hesap süresi ve depo kapasitesi azalmış olacaktır.

Sonlu Farklar yönteminde stabilite durumu:

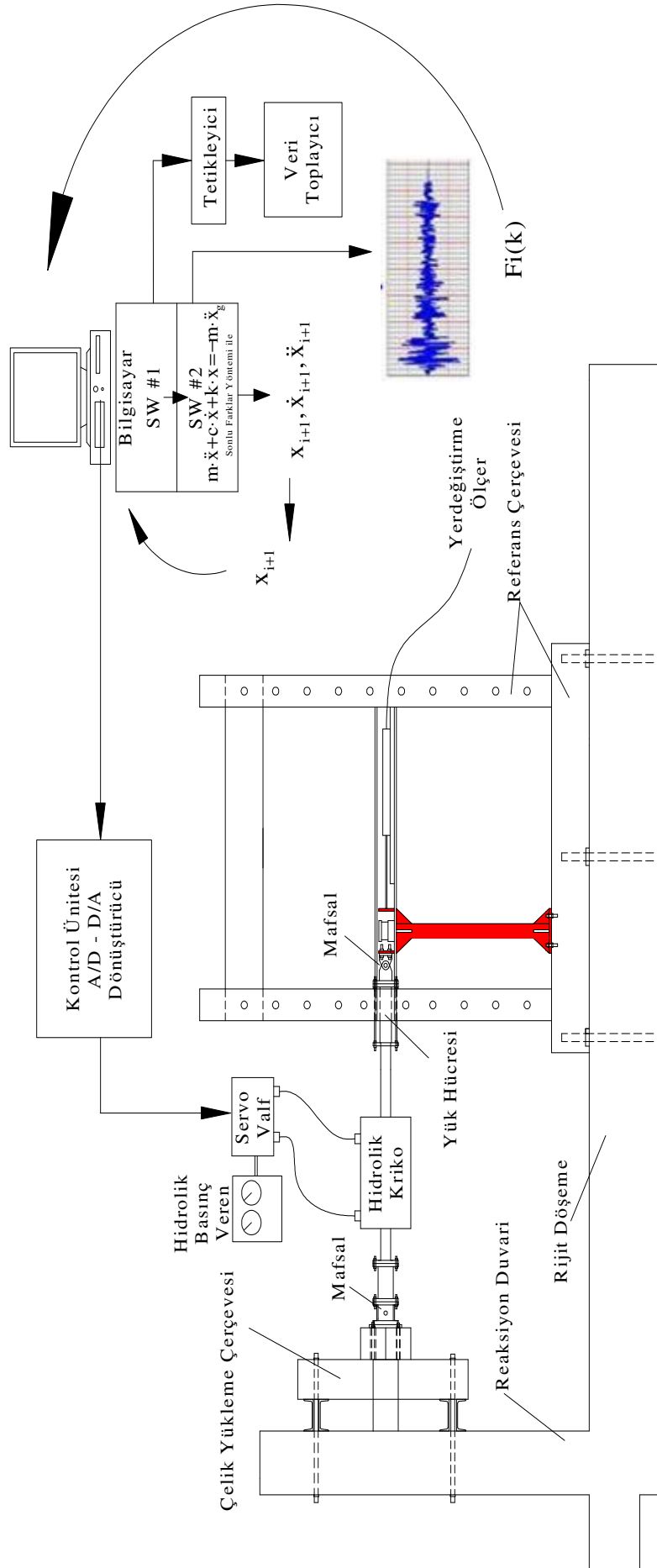
$$\Delta t < \frac{T_{\min}}{\pi} \quad (3.6)$$

Bu denklemde stabilitenin sadece yapının periyodunun en küçük olduğu zaman aralığı olan Δt , (3.6) ifadesinde sağlanır.

3.2 Benzeşik Dinamik Deney (PSD) Programının Yapısı

Benzeşik dinamik deney tekniğinin yapının hareket denkleminin sayısal integrasyonu, deneysel ölçümleri kombine eden bir karma yöntem olduğunu önceki bölümlerde açıklamıştık. Uygulanan ve iç kuvvetlerin simülasyonunun sayısal olarak yapılmasından sonra, azaltılmış hidrolik bir güce ihtiyaç duyulmaktadır ve deney devam eden gerçek zamanlı olarak ayarlanmış bir zaman dilimi içinde oluşturulmaktadır. Bu da geleneksel yarı-statik test ile aynı ekipmanlara sahip anlamına gelmektedir. Uygulanan yerdeğiştirmeye karşı gelen gerekli yükü ölçen yükölçer, hidrolik verene bağlanmışken, hidrolik veren öngörülen yerdeğiştirme geçmişini servo-valf aracılığıyla numuneye yüklemektedir, [2].

Benzeşik dinamik deney yöntemi, iki döngü sistemi olarak düşünülmelidir. Aktif döngü sistemi bilgisayar ve hareket denklemini çözen yazılımlardan oluşmaktadır. Pasif döngü sistemi ise elektro-hidrolik yerdeğiştirme kontrol sisteminden sorumlu bulunmaktadır. Bu iki döngünün de gösterimini içeren benzeşik dinamik deney uygulamasında kullanılan akış diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Deney Düzenneği ve Deneyin Akış Diyagramı

Benzeşik dinamik deney programı olarak geliştirilen programda iki adet yazılım kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi (software #1) ile bilgisayar kontrol ünitesine yerdeğiştirme datası gönderilmektedir. Gönderilen dijital data kontrol ünitesinin içindeki A/D - D/A dönüştürücü sayesinde analog dataya çevirilmekte ve hidrolik verenin üzerinde bulunan servo-valf aracılığı ile hidrolik veren, numuneye istenilen yerdeğiştirmeyi uygulamaktadır. Numuneden gelen tepki kuvveti ise tekrar bilgisayara aktarılır. Bilgisayar içerisindeki ikinci yazılım (software #2), numunenin davranışına göre elde edilen rijitlik değerini hareket denklemi olan; (2.17) denkleminde kullanarak; sonlu farklar integrasyon yöntemiyle ivme, hız büyüklükleri ile birlikte bir sonraki adımın yerdeğiştirme değerini de elde etmemizi sağlamaktadır.

Bu elde edilen yeni yerdeğiştirme değeri, birinci yazılım aracılığıyla tekrar önce kontrol ünitesine; oradan da analog akıma çevrilerek numuneye uygulanmak üzere hidrolik verene gönderilmektedir. Bu sistem benzeşik dinamik deney yönteminin aktif olan döngüsüdür.

Aynı zamanda numune üzerinde takılı olan şekildeğiştirme ölçerden, yerdeğiştirme ölçerden vs. alınan veriler de bilgisayara aktarıldığı gibi aynı zamanda data toplayıcı içerisinde de toplanmaktadır. Data toplayıcı içerisinde dataların toplanmasını sağlayan döngü ise benzeşik dinamik deney sisteminin gerçekleştirilmesi ile ilgili olmadığından pasif döngü olarak adlandırılmaktadır. Aktif ve pasif deney döngüleri akış diyagramında gösterilmiştir.

3.3 Benzeşik Dinamik Deney (PSD) Programının Anlatılması

MATLAB programında geliştirilen benzeşik dinamik deney programı; deney simülasyonunu yapmamızı sağlayan PSD_see.m, deneyin gerçekleştirilmesini sağlayan kontrol ünitesi komutlarını içeren PSD_run.m ve deneyde kullanılacak olan deprem ivme kayıtlarının girildiği ortam olan PSD_quake.m yazılımı olmak üzere üç adet yazılımdan oluşmaktadır.

Bunlardan simülasyonu yapan PSD_see.m ve deneyi gerçekleştiren yazılım olan PSD_run.m yazılımlarında kullanılan algoritmalar tamamen aynı olmakla birlikte; simülasyon yapma olanağı sağlayan PSD_see.m yazılımı sayesinde gerçekleştirilecek olan deneyin, deney süresince elastik kalacağı bilinen çelik kolon

numunesinin boyutlandırmasını yapmak ve laboratuvar koşullarında uygulanabilirliğini görmek açısından oldukça yararlı bir yazılımdır.

Bu iki yazılımda da sırasıyla; deney sisteminin kütlesi, kritik sönüm oranı, yerçekim ivmesi, ilk yatay rijitlik, deprem ölçeklendirme faktörü, deprem kaydı zaman artım aralığı, hesap zaman aralığı, deprem sonundaki çalışma süresi değerleri birimlerine dikkat edilmek şartıyla programa girilmektedir.

Yazılım, bu değerler girildikten sonra PSD_quake.m dosyasından PSD_quake olarak adlandırılmış olan deprem zemin ivme kaydını çağırarak, gerekli şekilde birim çevirmesini yaptıktan sonra daha önceden girdiğimiz deprem ölçeklendirme oranıyla çarpılmaktadır. Numuneye yüklenecek olan yükleme akselogramı elde edilmektedir. Bundan sonra program tarafından önemli olan bazı parametreler hesaplanmaktadır. Bunlar;

ω = Yapının doğal frekansı

C = Girilen sönüm oranına, kütleye ve frekansa bağlı olarak hesaplanan sönüm katsayısı

T = Yapının doğal periyodu

Bu değerler ekranda görüldükten sonra program bizden değerleri onaylamamızı istemektedir. Onay verildikten sonra, sisteme basınç verilince programın algoritması aktif hale gelmektedir.

Benzeşik dinamik deney yöntemi için geliştirilen programın algoritması, sonlu farklar integrasyon yöntemi algoritmasıdır. Bir sonraki yerdeğiştirme hesabının yapıldığı bu algoritma (3.5) ifadesinde verildiği üzere; $1 \quad 2 \quad 3 \quad 4$ cinsinden ifade edilen değişkenler program içerisinde tek tek hesaplanmakta ve sonuç olarak (3.5) ifadesinde yerlerine konmak şartıyla bir sonraki adımın yerdeğiştirme değeri elde edilmektedir.

Bir sonraki adımın yerdeğiştirme değerini veren yazılım, o değere gidilip gidilmeyeceğini operatöre sormaktadır. Deneyi istediğimiz bir anında sonlandırmamız mümkün olduğu gibi; o zamana kadar deneyden elde edilen veriler de EXCELL dosyasının içerisinde saklanmaktadır.

Döngü tekrar başlatıldığında ise aynı adımlar tekrarlanarak deney devam etmektedir. Deney sona erdiğinde, hidrolik basıncın kesilmesi gerekmektedir. Deney sonuç

verileri PSD_data_xsl olarak adlandırılmış olan EXCELL dosyasında otomatik olarak saklanmaktadır.

PSD_quake.m yazılımına, çalışmak istediğimiz deprem ivme kayıtları uygun boyuttaki matris forma çevrilerek aktarıldığında; program, yapı sistemimizin istediğimiz deprem ivmesi altındaki davranışını görmemiz mümkün kılmaktadır.

Numune değişkenlerinin program ortamına girilmesi dışında, deney yazılımında da istediğimiz değişiklikleri yapmamız mümkün olmaktadır. Örnek olarak; V-act olarak adlandırılan hidrolik veren hızını programdan ayarlamız mümkün olmaktadır.

4. DENEYSEL VE ANALİTİK ÇALIŞMALAR

4.1 Genel

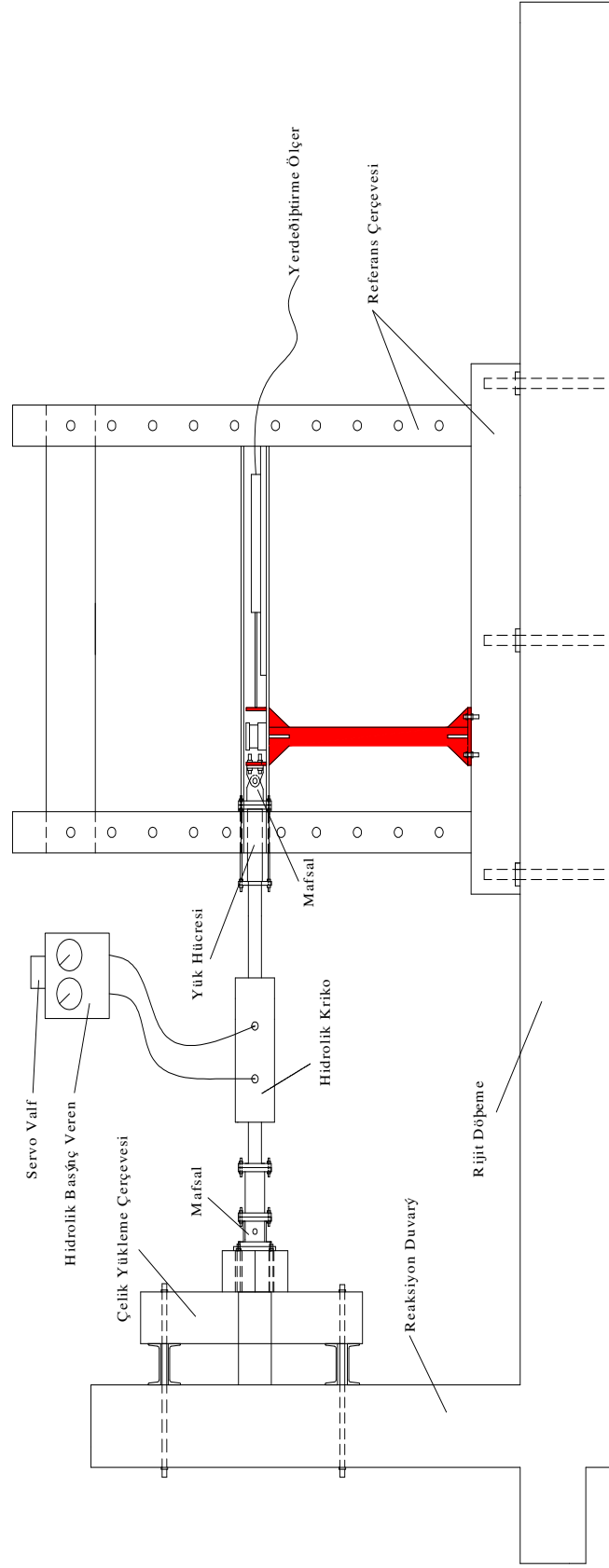
Bu tez çalışmasının ana amacı; benzeşik dinamik deney tekniği uygulayacak bir algoritmanın geliştirilmesi ve doğruluğunun deneysel ve analitik yöntemler ile incelenmesidir. Bu amaçla tek serbestlik dereceli elastik bir çelik konsol kolon deney numunesi olarak kullanılmıştır.

Numunenin kesit ve malzeme detayları Bölüm 4.2’de verilmiştir. Deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında yer alan rijit deney döşemesi üzerine monte edilmiş olan özel bir çelik çerçeve içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Deney numunesi sinüzoidal formdaki ivme kaydı ile gerçek deprem kaydı etkisinde incelenmiştir. Deney numunesi özel yükleme çerçevesine ankastre olarak bağlanmıştır. Kendi öz ağırlığına ilave olarak numune üzerinde 70 kg’lık yük bulunmaktadır.

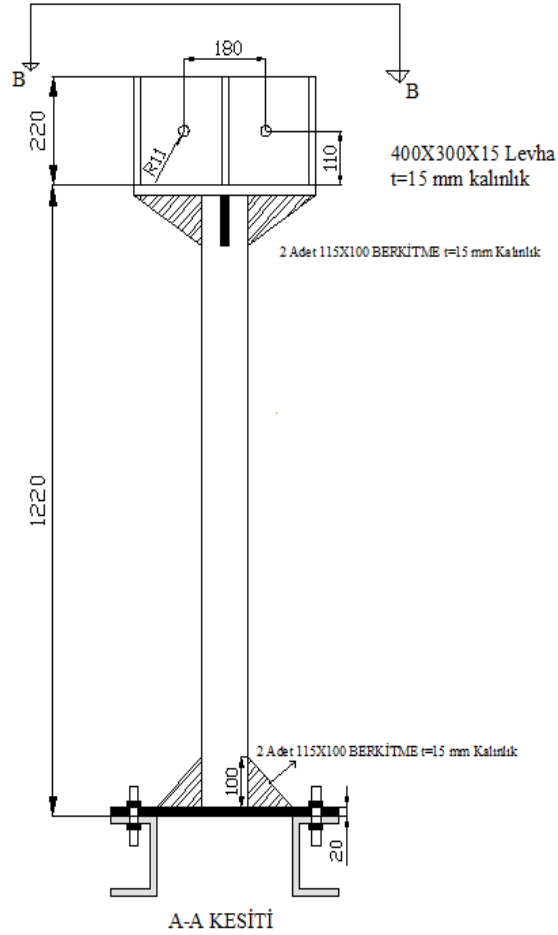
4.2 Deney Düzeneği ve Deney Numunesi

Deneysel çalışma, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında yer alan rijit deney döşemesi üzerine bağlı yükleme çerçevesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme çerçevesi çelik profillerden oluşturulmuş olup, yatay ve düşey yüklerden oluşan reaksiyon kuvvetlerinin rijit laboratuvar döşemesine güvenli olarak aktarımını sağlamaktadır. Deney ve yükleme düzeneği Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmiştir.

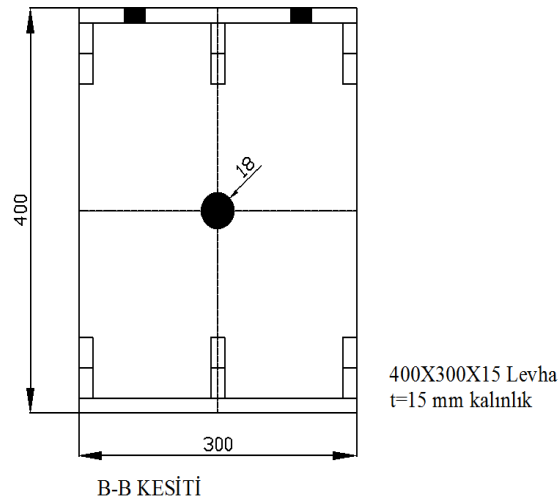


Şekil 4.1: Deney ve Yükleme Düzenegi

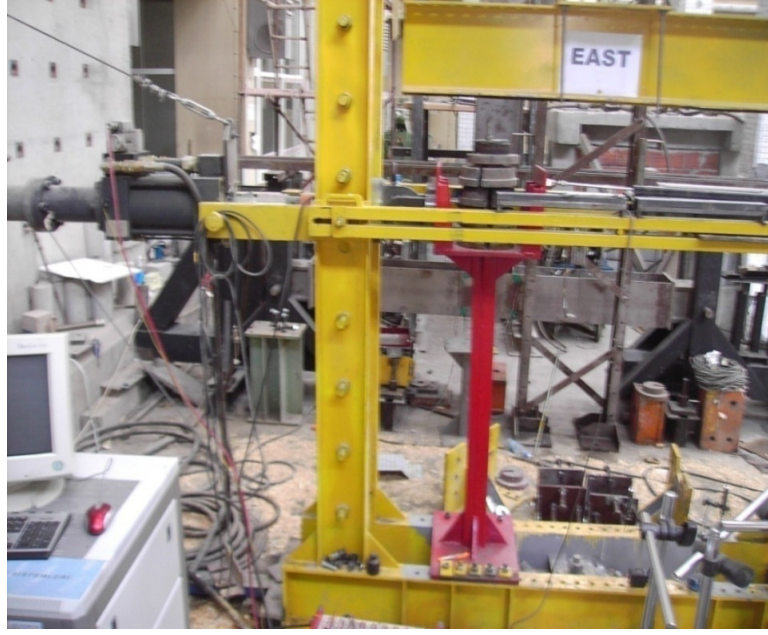
Deney numunesi olarak bir adet elik kolon üretilmiştir. Numunenin yüksekliği 1200 mm olup, 2 adet NPU80 elik profilden oluşturulmuştur. Deney numunesine ait detaylar şekil 4.2 ve şekil 4.3’de yer almaktadır. Numunenin deney düzeneği içindeki görünümü ise şekil 4.4 ve şekil 4.5’te verilmiştir.



şekil 4.2: Numunenin A-A Kesit Detayı



şekil 4.3: Numunenin B-B Kesit Detayı



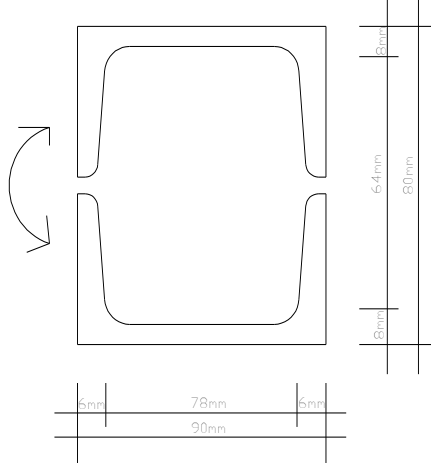
Şekil 4.4: Çelik Konsol Kolon Numunesi ve Deney Düzeneği



Şekil 4.5: Deney Düzeneğine Yerleştirilmiş Tek Serbestlik Dereceli Çelik Konsol Kolon Sistemi

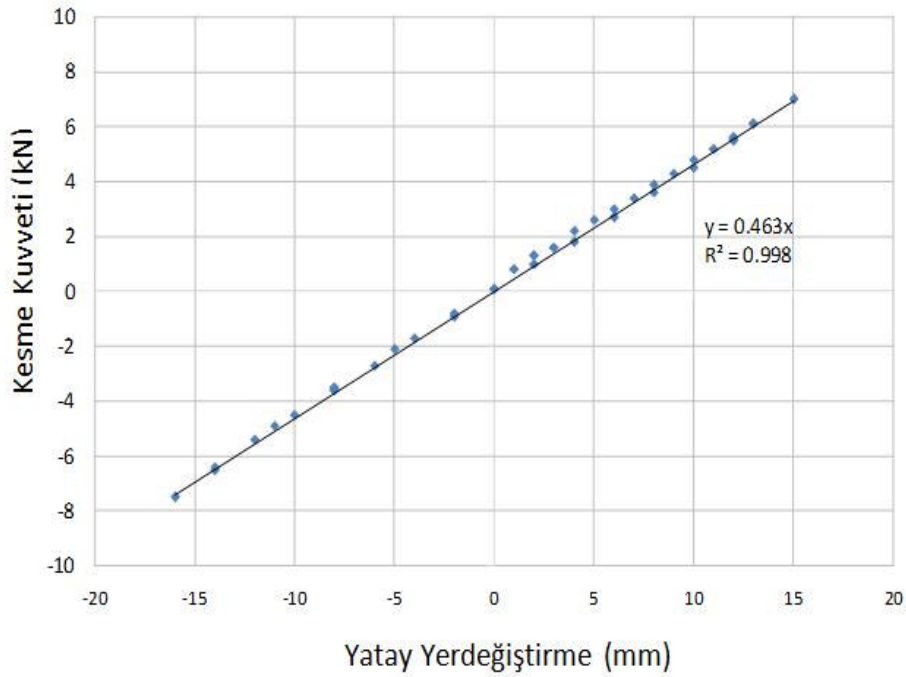
4.3 Deney Numunesinin Genel Özellikleri

Deney numunesi tek serbestlik dereceli sistem olarak idealleştirilmiştir. Kolon tipik kesiti Şekil 4.6’da verilmiştir. Kolon tepesinde toplanmış ağırlık 70 kg’dır ve rijitliği k olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.6: Numune Kesiti

Numunenin gerçekleşen rijitliğinin belirlenmesi için deney numunesi değişik genliklerde itilmiş ve sistemin cevabı (kuvvet) okunarak Şekil 4.7 oluşturulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, deney numunesi elastik olarak davranmakta ve yatay rijitliği 0.4638 kN/mm olmaktadır.



Şekil 4.7: Yatay Yerdeğiştirme-Kesme Kuvveti Arasındaki İlişki

4.4 Analitik Çalışmalar

4.4.1 SAP2000 Programı ile Çözümler

Deneysel olarak elde edilmiş olan $k = 0.4638$ kN/mm yatay rijitlik değeri kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal elastik dinamik hesap yapılmıştır. Bu hesapta SAP2000 [25] bilgisayar programı kullanılmıştır.

Dinamik hesap, El Centro deprem kaydı ile sinüzoidal formdaki bir ivme kaydı için ayrı ayrı yapılmıştır. Gerçek deprem kaydı ile yapılan analizlerde seçilen integrasyon adım aralığının etkisi üzerinde duyarlılık analizi yapılmıştır. Buradaki amaç; PSD_see.m programı sonuçlarının SAP2000 programı sonuçlarıyla karşılaştırılarak optimum integrasyon adım aralığının belirlenmesidir. Farklı hesap adım aralığı değerleri için bulunan sonuçlar analitik çözüm yönteminde çok farklılık göstermezken; PSD_see.m programı ile yapılan hesaplarda, hesap adım aralığı küçüldükçe sonuçların kararlı hale geldiği ve analitik çözüm sonuçlarına yaklaştığı tespit edilmiştir.

El Centro ivme kaydı ve harmonik formdaki ivme kaydı kullanılarak aşağıda verilen beş durum için analiz yapılmış ve Δt ivme kayıt aralığını, Δt_{HESAP} da integrasyon aralığını göstermek üzere elde edilen sonuçlar PSD_see.m programı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İlk dört durum El Centro ivme kaydı kullanılarak, beşinci ve son durum ise sinüzoidal formdaki ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1. Durum

$\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.02$ için;

2. Durum

$\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.01$ için;

3. Durum

$\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ için;

4. Durum

El Centro ivme kaydı için gerçekleştirilen analizde SAP2000 programında $\Delta t = 0.02$ $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ iken; PSD_see.m programında $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ olarak seçilmiştir.

5. Durum

Sinüzoidal formdaki bir fonksiyon olarak tanımlanan ivme kaydı için gerçekleştirilen analizde SAP2000 programında $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ iken; PSD_see.m programında $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ olarak seçilmiştir. Sistemin *Taban Kesme Kuvveti – Zaman* ve *Yerdeğiştirme – Zaman* grafikleri oluşturulmuştur.

4.4.2 Benzeşik Dinamik Deney Simülasyon Programı ile Çözümler

MATLAB ortamında oluşturulan PSD_see.m; programına kütle, kritik sönüm oranı, yerçekim ivmesi, yatay rijitlik, deprem büyütme katsayısı, deprem kaydı zaman artım aralığı (Δt), hesap adım aralığı (Δt_{HESAP}), deprem ivme kaydı bitiminden sonraki çalışma süresi gibi veriler girilmektedir. El Centro ivme kaydı ve harmonik formdaki ivme kaydı kullanılarak PSD_see.m programında da SAP2000 programında incelenen beş durumun sonuçları elde edilmiştir. Programın vermiş olduğu sonuç dosyasından *Taban Kesme Kuvveti – Zaman* ve *Yerdeğiştirme – Zaman* grafikleri oluşturulmuştur.

4.4.3 Benzeşik Dinamik Deney Simülasyon Sonuçları ve SAP2000 Sonuçlarının Karşılaştırılması

EL Centro ivme kaydı etkisinde hesap adım aralığı değiştirilerek; $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.02$, 0.01, 0.005 değerleri için, elde edilen PSD_see.m ve SAP2000 programlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Hesap adım aralığının küçültülmesi ile iki programın sonuçlarının birbirine çok yaklaştığı görülmüştür. Yine El Centro deprem kaydı etkisinde PSD_see.m yazılımında hesap adım aralığı $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ alınarak bulunan sonuçlar; SAP2000 programında $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ alınarak bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirlerine çok yakın çıkması sonucu, sinüzoidal formdaki ivme kaydı için de aynı inceleme tekrarlanmıştır.

1. Durum

El Centro ivme kaydı için gerçekleştirilen hesapta, $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.02$ değerleri kullanıldığında; PSD_see.m ve SAP2000 programlarından elde edilen sonuçlar Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilen grafiklerde karşılaştırılmıştır.

2. Durum

El Centro ivme kaydı altında gerçekleştirilen, $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.01$ için; PSD_see.m ve SAP2000® programlarından elde edilen sonuçlarının karşılaştırma grafikleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.

3. Durum

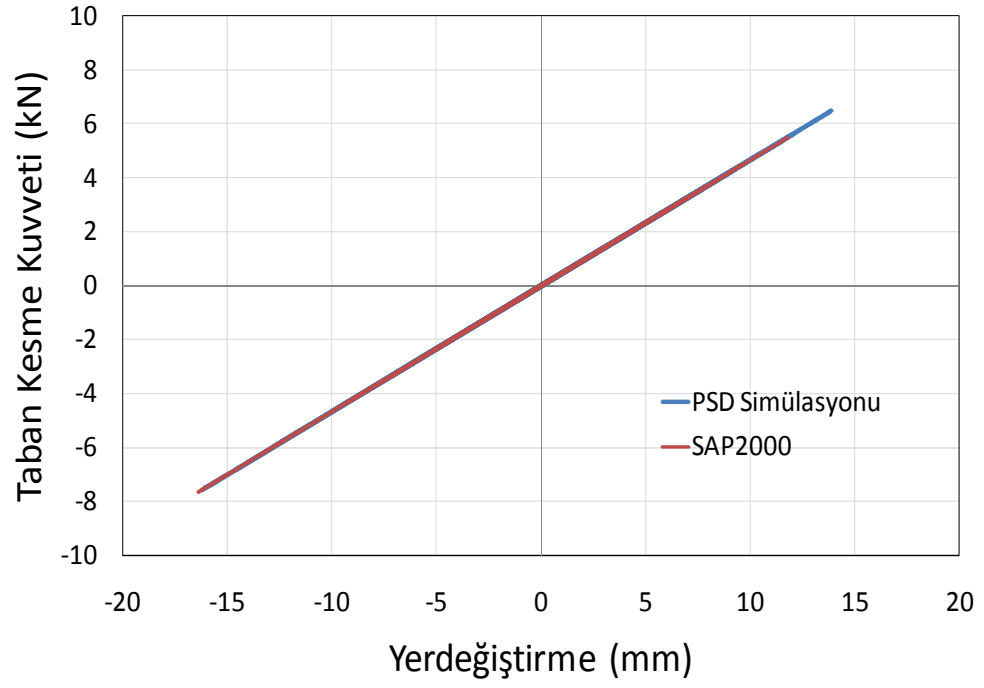
El Centro ivme kaydı altında gerçekleştirilen, $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ için PSD_see.m ve SAP2000® programlarından elde edilen sonuçlarının karşılaştırma grafikleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’da verilmiştir.

4. Durum

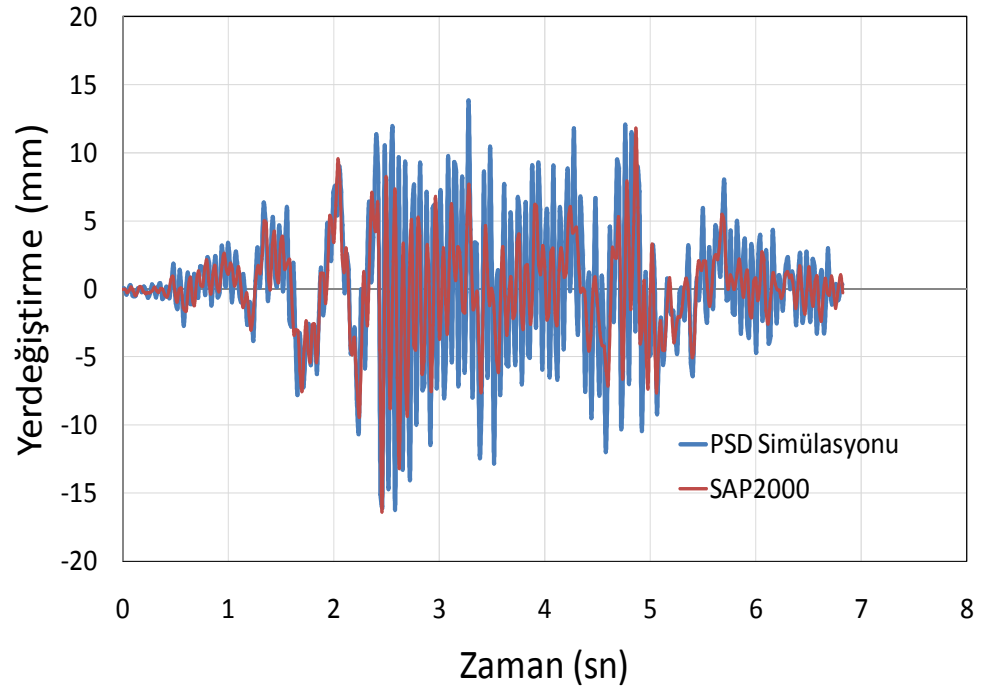
El Centro ivme kaydı altında gerçekleştirilen SAP2000 veri girişinde $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ iken; PSD_see.m simülasyonunda $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ alınmıştır. PSD_see.m ve SAP2000® programlarından elde edilen sonuçlarının karşılaştırma grafikleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.

5. Durum

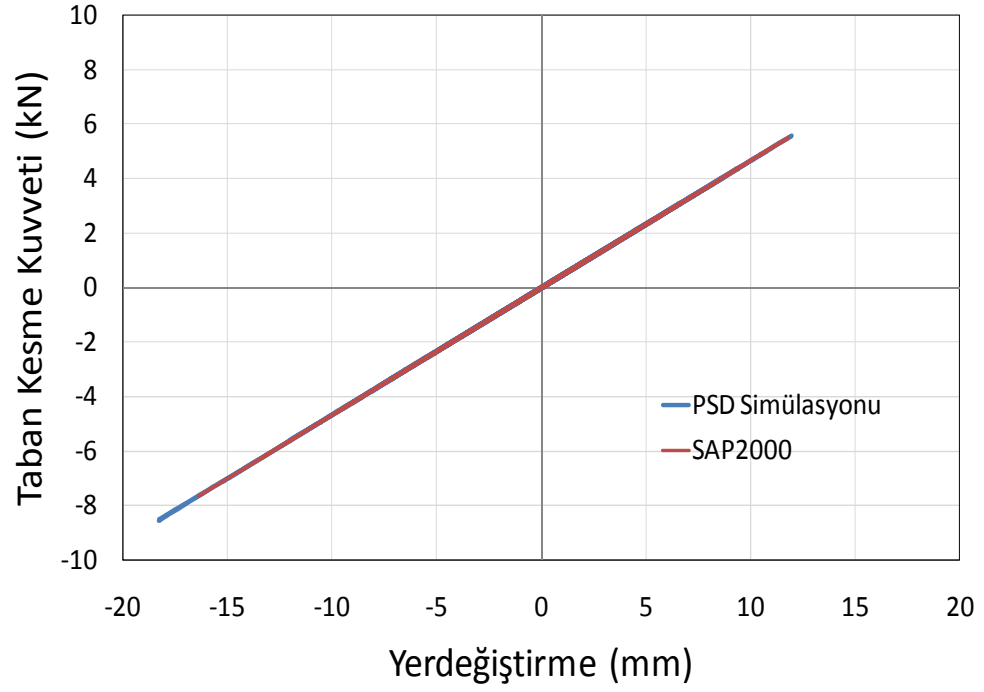
$\Delta t = 0.02$ aralıklı sinüzoidal formdaki ivme kaydının SAP2000 programı ile çözümü aşamasında kullanılan integrasyon adım aralığı $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ ‘dir. Aynı data için PSD_see.m programında benzer sonuçları alabilmek amacıyla $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de karşılaştırılmıştır.



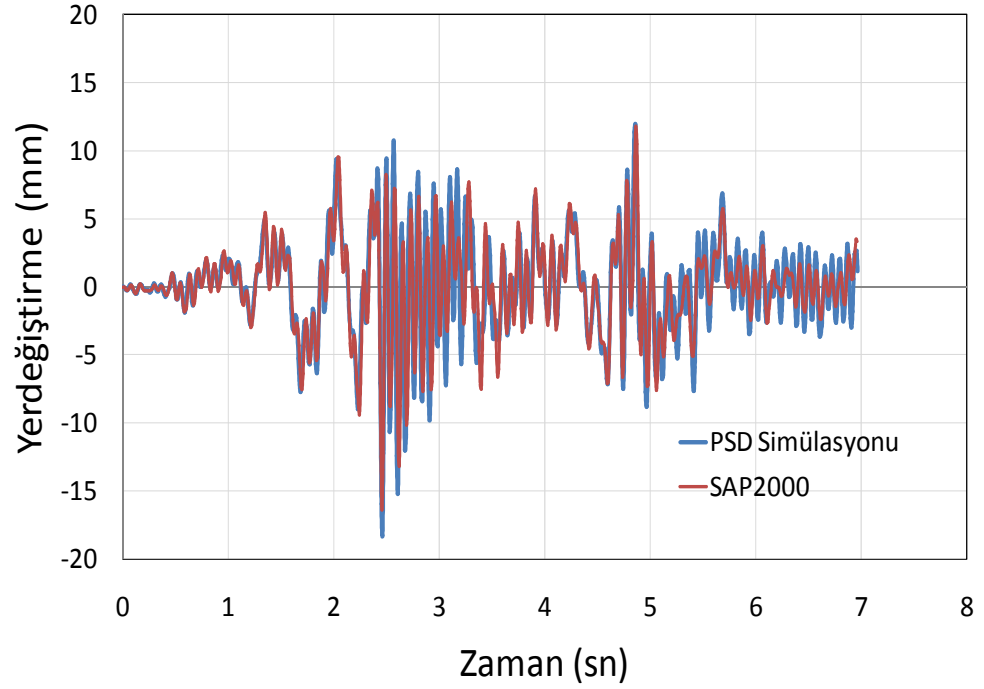
Şekil 4.8: $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.02$ için Taban Kesme Kuvveti – Zaman Grafiği



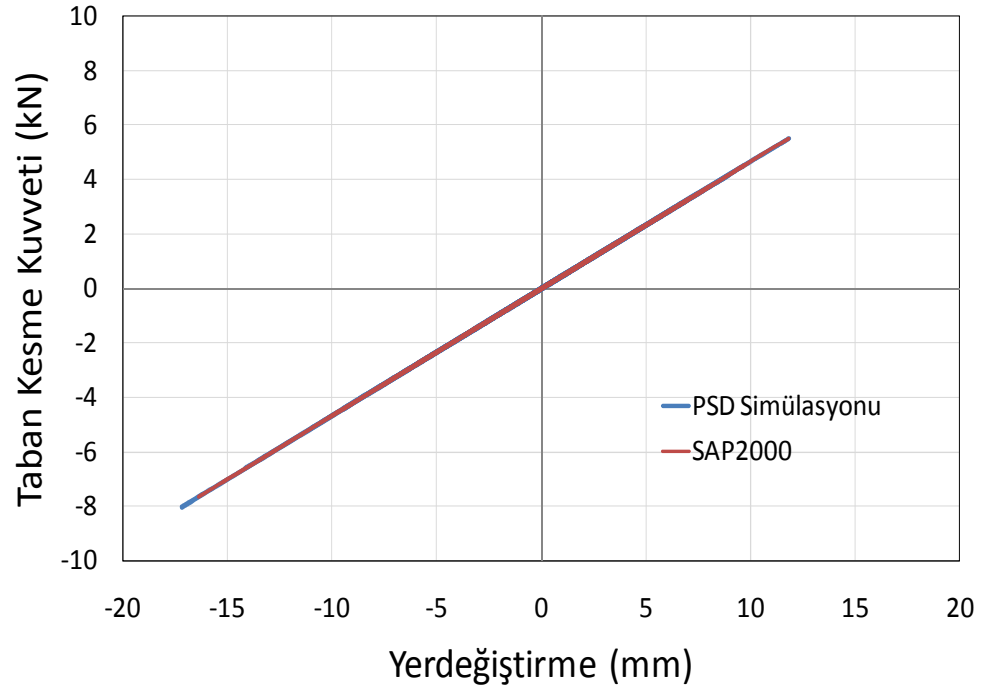
Şekil 4.9: $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.02$ için Yerdeğiştirme – Zaman Grafiği



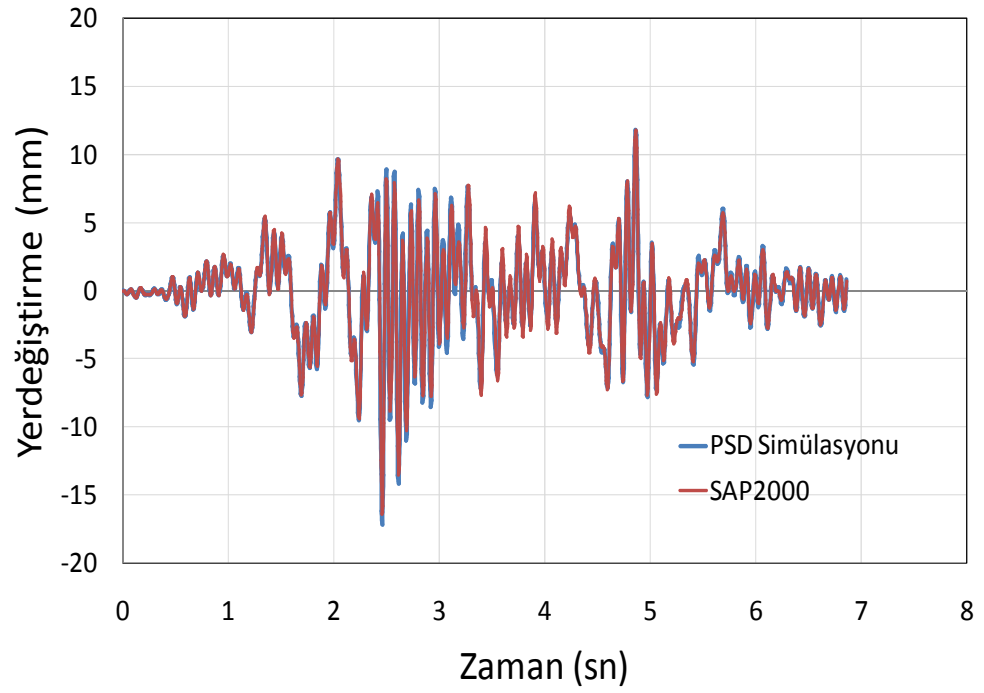
Şekil 4.10: $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.01$ için Taban Kesme Kuvveti – Zaman Grafiği



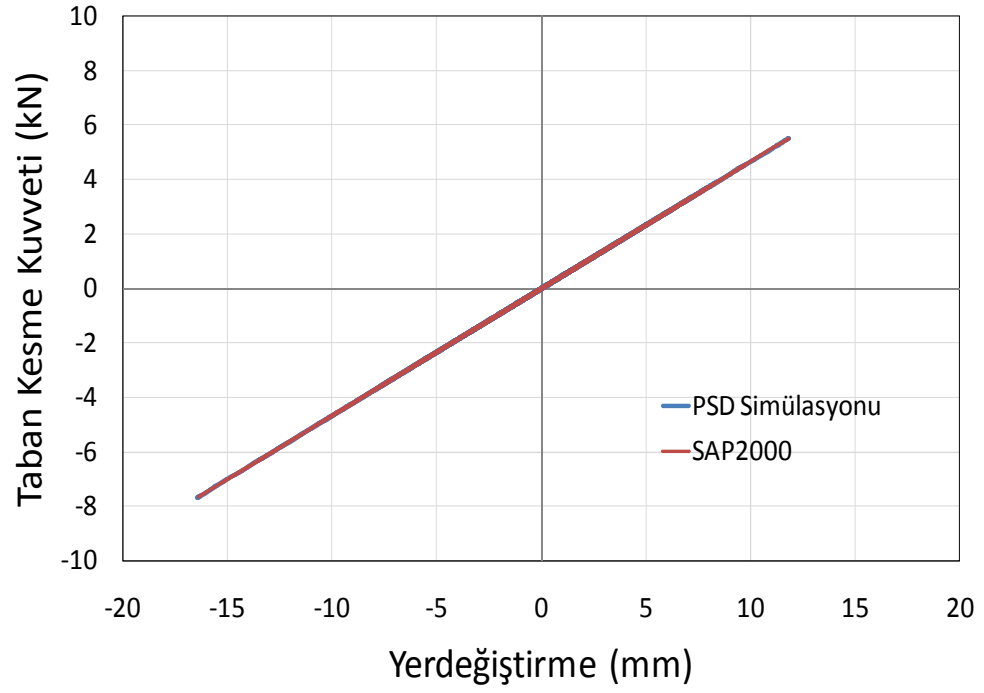
Şekil 4.11: $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.01$ için Yerdeğiştirme – Zaman Grafiği



Şekil 4.12: $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ için Taban Kesme Kuvveti – Zaman Grafiği

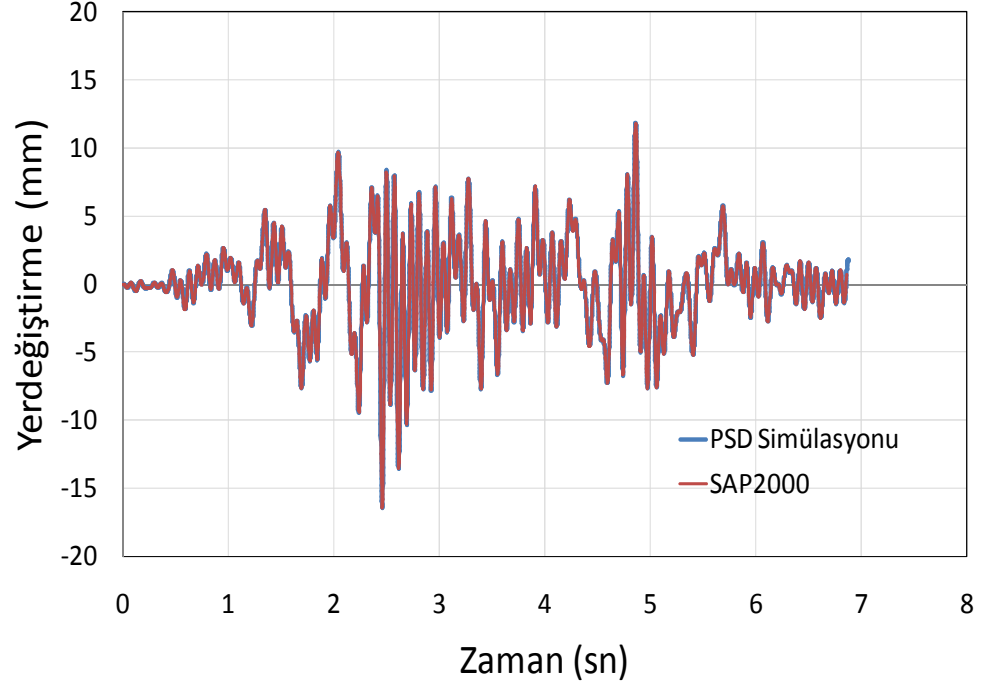


Şekil 4.13: $\Delta t = 0.02$, $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ için Yerdeğiştirme – Zaman Grafiği



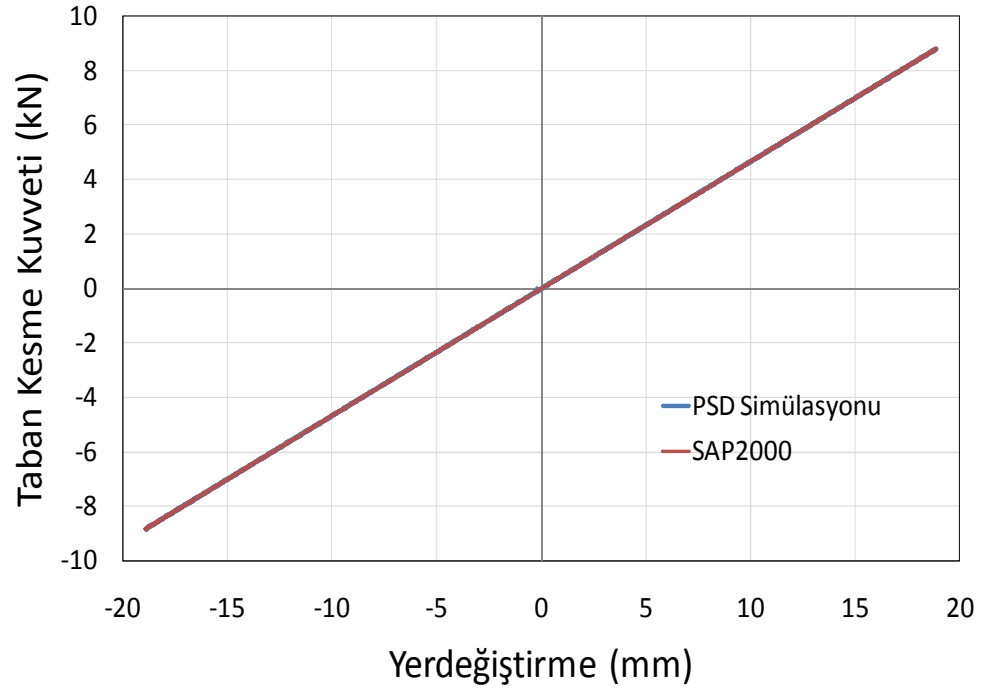
Şekil 4.14: $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ iken; PSD_see.m

$\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ için Taban Kesme Kuvveti – Zaman Grafiği



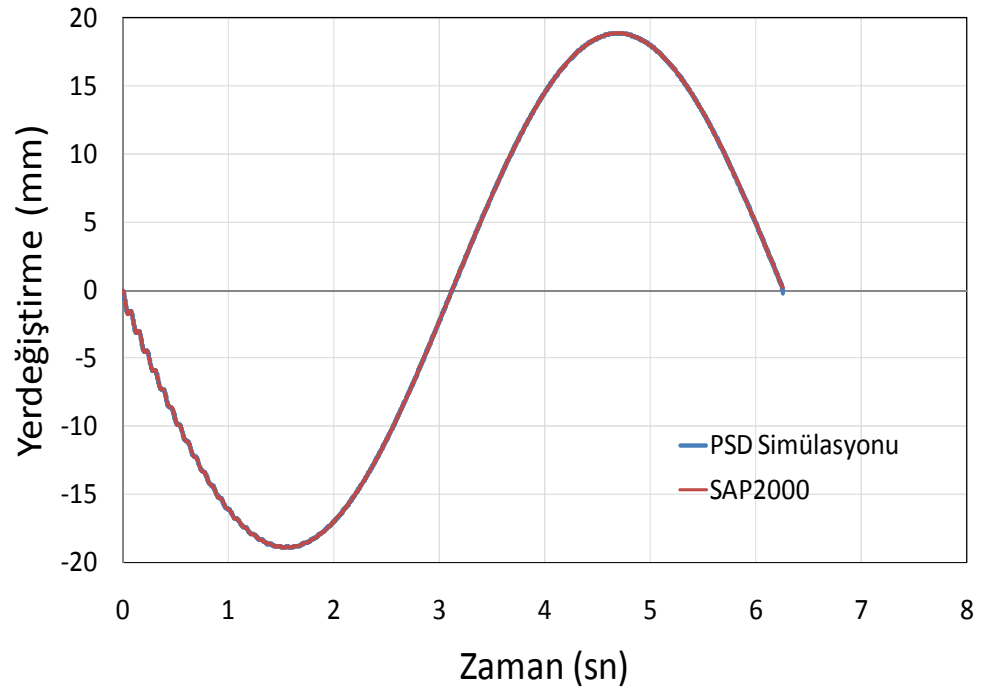
Şekil 4.15: $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ iken; PSD_see.m

$\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ için Yerdeğiştirme – Zaman Grafiği



Şekil 4.16: $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ iken; PSD_see.m

$\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ için Taban Kesme Kuvveti – Zaman Grafiği



Şekil 4.17: $\Delta t = 0.02$ ve SAP2000 $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ iken; PSD_see.m

$\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ için Yerdeğiştirme – Zaman Grafiği

4.4.3.1 Sonuçların Değerlendirilmesi

1. Durum

Bu durum için; PSD_see.m programı ile SAP2000 programının üretmiş olduğu büyüklükler arasında özellikle genlikler açısından farklılıklar oluşmuştur. PSD_see.m programı içerisinde kullanılan integrasyon tekniğinin yetersiz düşünülerek, integrasyon adım aralığının deprem ivme kaydı aralığına göre daha küçük seçilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

2. Durum

Kullanılan integrasyon adım aralığının deprem kaydı ivme aralığının yarısı olduğu bu durumda, davranış grafikleri birbirine yaklaşmakla birlikte tam olarak rtşmemiştir.

3. Durum

Kullanılan integrasyon adım aralığının deprem kaydı ivme aralığının dörtte biri olduğu bu durumda, davranış grafikleri büyük ölçüde rtşmştir. Tersinir yükleminin bazı evirimlerinde PSD_see.m programının ürettiği yerdeğiştirme değerleri bir miktar büyük olabilmektedir.

4. Durum

SAP2000 programı ile yapılan analizde kullanılan $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ integrasyon adım aralığı iken, PSD_see.m programında $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ kullanılarak tamamen örtüşen sonuçlar elde edilmiştir.

5. Durum

SAP2000 programı ile yapılan analizde kullanılan $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.005$ integrasyon adım aralığı iken, PSD_see.m programında $\Delta t_{\text{HESAP}} = 0.001$ kullanılarak tamamen örtüşen sonuçlar elde edilmiştir.

4.5 Sönüm, Kütle ve Yatay Rijitlik Büyüklükleri Üzerinde Gerçekleştirilen Duyarlık Analizi

Farklı integrasyon adım aralıkları için PSD_see.m programı sonuçları ile SAP2000 sonuçlarının karşılaştırılmasının ardından, üç farklı parametre için duyarlık analizi yapılmıştır. Bunlar sönüm, kütle ve yatay rijitlik büyüklükleridir.

Farklı sönüm, kütle ve yatay rijitlik büyüklükleri için yapılan çözümlerde elde edilen ve tipik davranışı gösteren *Zaman – Tepe Yerdeğiştirmesi* grafikleri oluşturulmuştur.

4.5.1 Farklı Sönüm Oranları

El Centro ivme kaydı için %2, %5 ve %10 sönüm oranları seçilerek PSD_see.m programı ile analizler yapılmıştır. İntegrasyon adım aralığı olarak $\Delta t_{HESAP} = 0.005$ değeri kullanılmıştır. Deneysel çalışmada da kullanılan %2 kritik sönüm oranı referans alınarak, %5 ve %10 kritik sönüm oranları için elde edilen sonuçlar sırası ile Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da karşılaştırılmıştır.

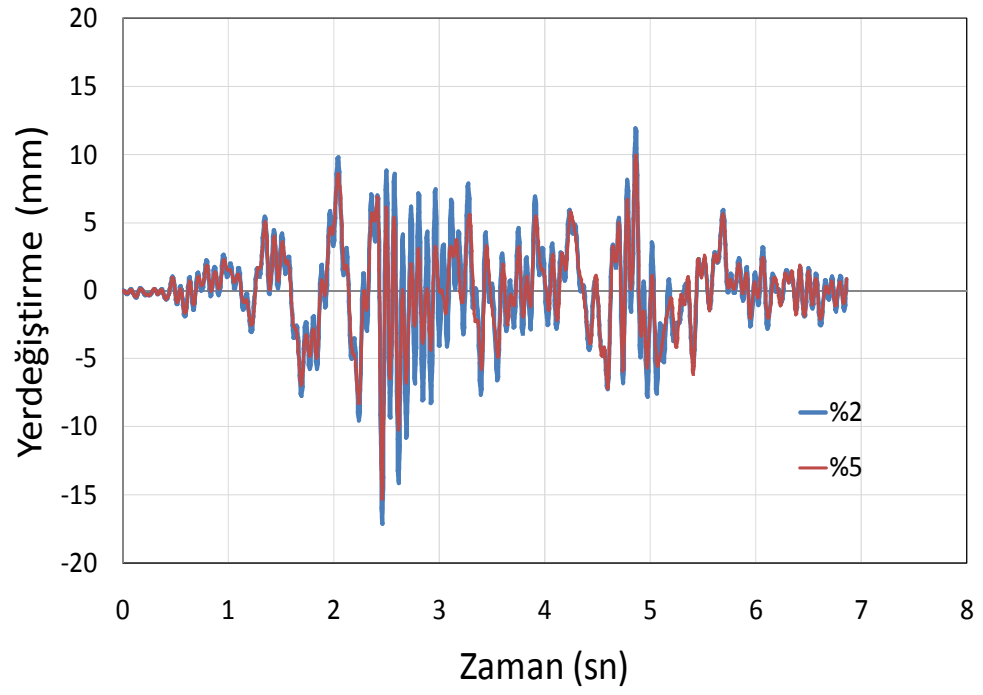
4.5.2 Farklı Kütle Oranları

Kolon üstüne bağlanmış olan ilave kütle miktarı %50 ve %100 oranlarında artırılarak PSD_see.m simülasyon programı ile analizler yapılmıştır. Bu analizlerde de deprem ivme kaydı olarak El Centro ve integrasyon adım aralığı olarak da $\Delta t_{HESAP} = 0.005$ kullanılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilmiştir.

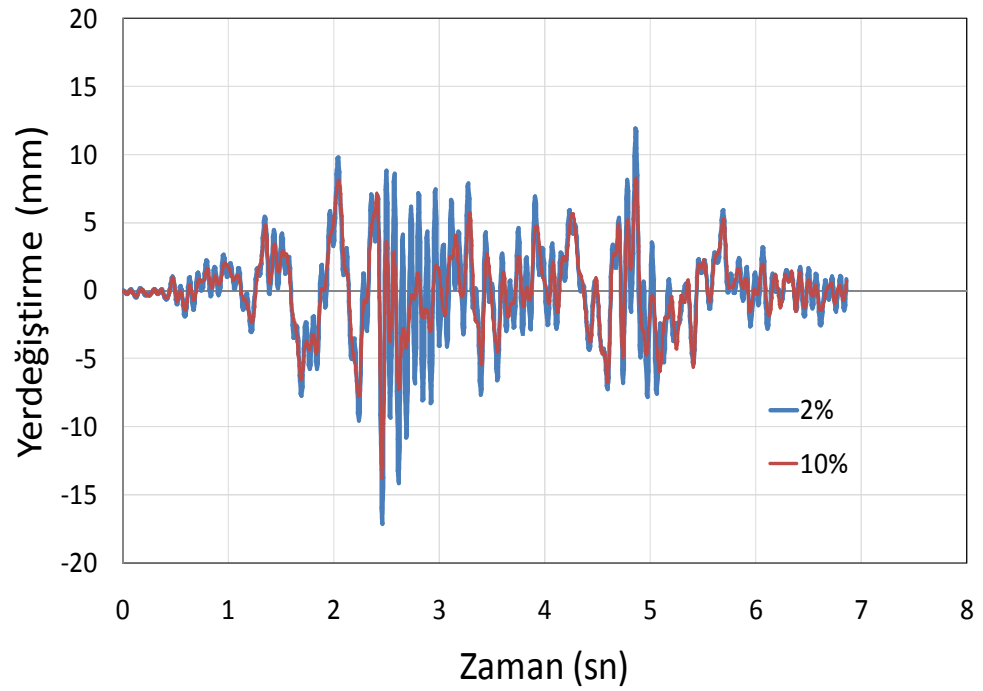
4.5.3 Farklı Rijitlik Oranları

El Centro ivme kaydı için sistem yatay rijitliği %20 artırılıp, %20 azaltılarak analizler yapılmıştır. Bu analizlerde kütle değeri $m=7.13e-5$ kNs²/mm, integrasyon adım aralığı $\Delta t_{HESAP} = 0.005$ olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de verilmiştir.

1. Farklı Sönüm Oranları



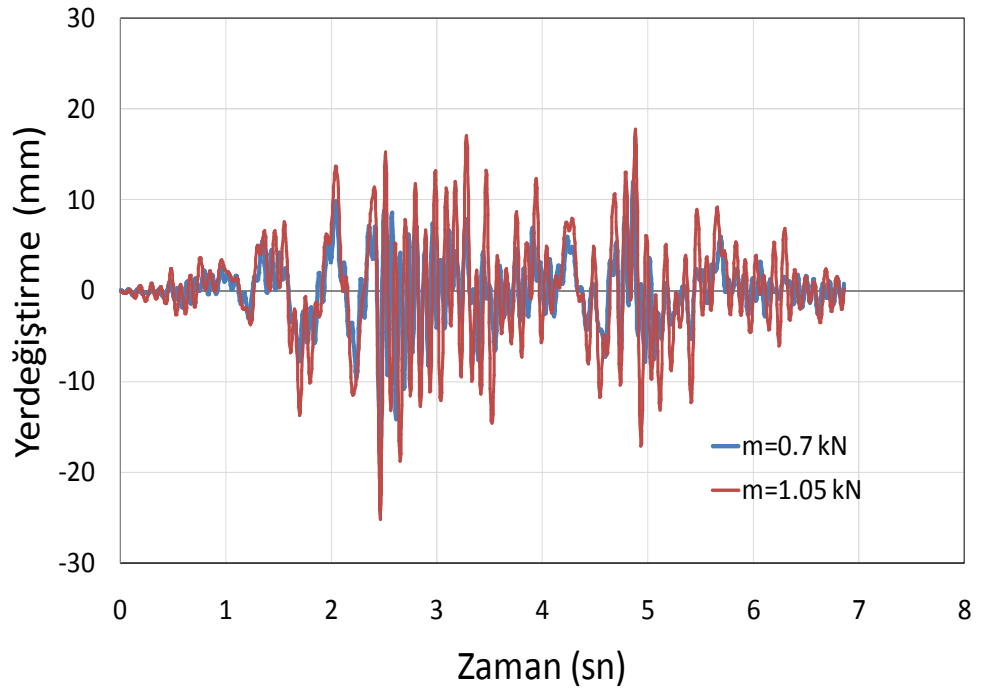
Şekil 4.18: %2 ve %5 Sönüm Oranları için Yerdeğiştirme - Zaman Karşılaştırması



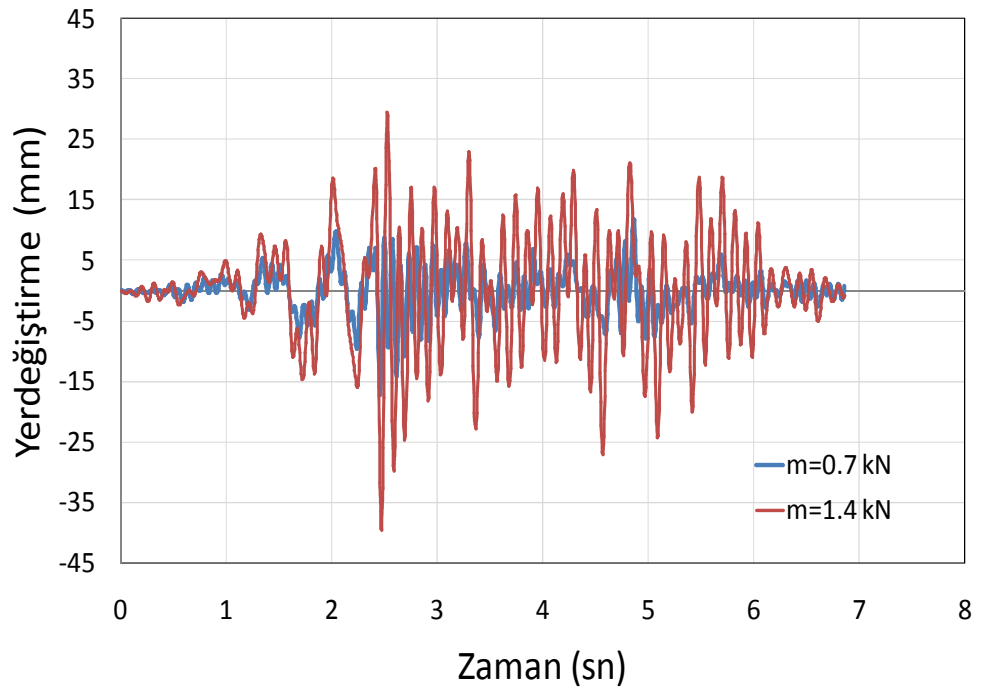
Şekil 4.19: %2 ve %10 Sönüm Oranları için Yerdeğiştirme - Zaman Karşılaştırması

Beklendiği gibi, kritik sönüm oranının artmasıyla titreşim genliklerinde küçülmeler gözlenmiştir.

2. Farklı Kütle Oranları



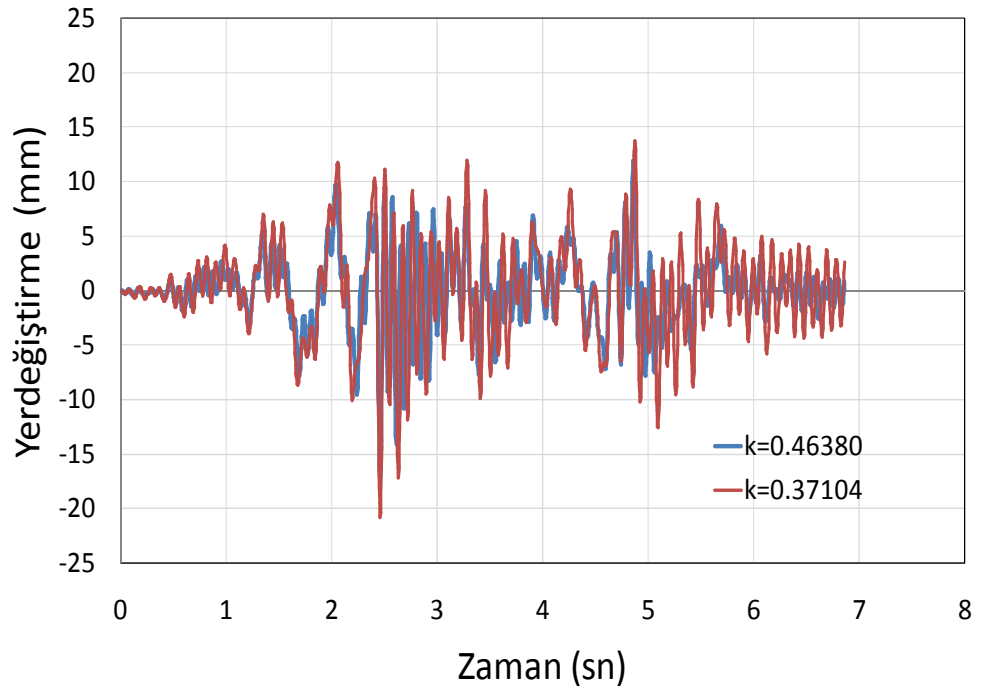
Şekil 4.20: $m=0.7$ kN ve $m=1.05$ kN için Yerdeğiştirme - Zaman Karşılaştırması



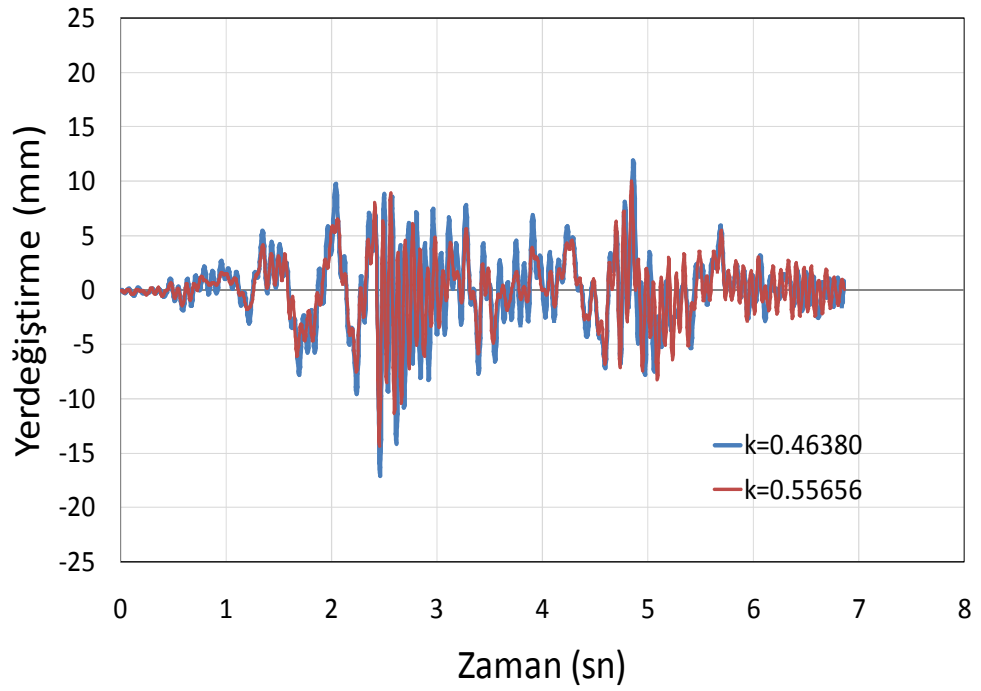
Şekil 4.21: $m=0.7$ kN ve $m=1.4$ kN için Yerdeğiştirme - Zaman Karşılaştırması

Kütle değerlerindeki artışla birlikte numune doğal titreşim periyodu ve titreşim genliklerinde büyümeler gözlenmiştir.

3. Farklı Rijitlik Oranları



Şekil 4.22: $k=0.46380$ ve $k=0.37104$ için Yerdeğiştirme - Zaman Karşılaştırması



Şekil 4.23: $k=0.4638$ ve $k=0.55656$ için Yerdeğiştirme - Zaman Karşılaştırması

Yatay rijitlik değerindeki $\pm \%20$ 'lık değişim doğal titreşim periyodu ve titreşim genliklerinde değişmelere sebep olmaktadır.

4.6 Benzeşik Dinamik Deney Uygulaması

Özellikleri yukarıda anlatılan çelik kolon gerçek deprem ve sinüzoidal formdaki ivme kayıtları etkisinde deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar, analitik çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

4.6.1 Benzeşik Dinamik Deney Programının Veri Girişi

PSD_run.m deney kontrol programına girilen veriler Şekil 4.24’de sisteme girilme sırasıyla verilmiştir. Harmonik form ve El Centro ivme kayıtları için iki ayrı deney gerçekleştirilmiştir.

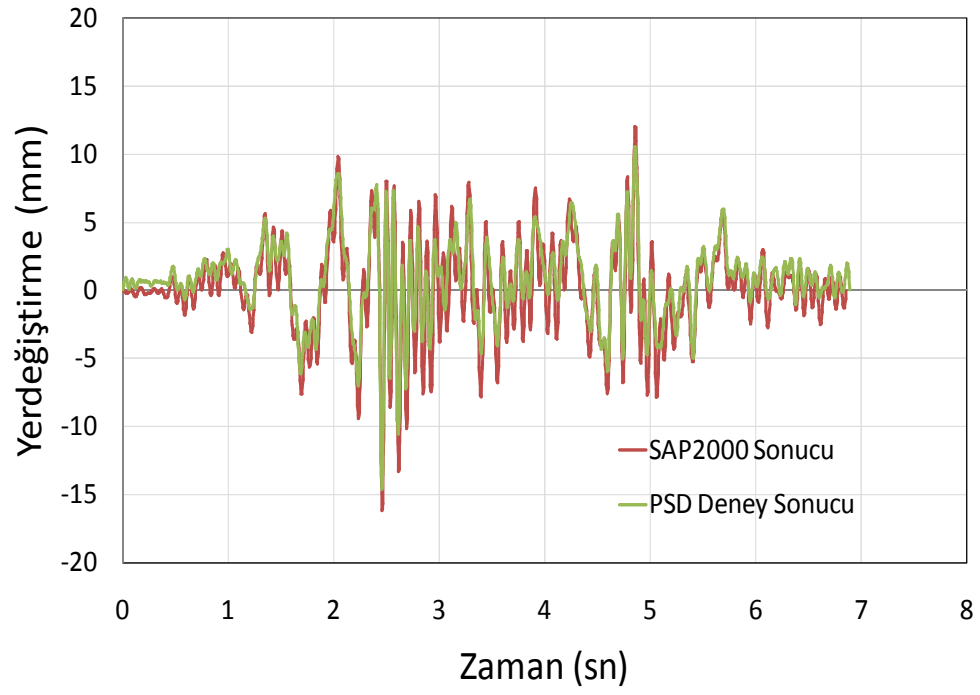
- Kütle ($\text{kN.Sn}^2/\text{mm}$) : 7.13E-5
- Kritik sönüm oranı (%) : 2
- Yer çekim ivmesi (mm/s^2) : 9810
- Yatay rijitlik (kN/mm) : 0.4638
- Deprem ölçek faktörü (x) : 16
- Deprem kaydı zaman artım aralığı (sn) : 0.02
- Hesap adım aralığı (sn) : 0.005
- Deprem kaydı bitiminden sonra çalışma süresi (sn) : 0.01

Şekil 4.24 PSD_run.m Programının Veri Girişi

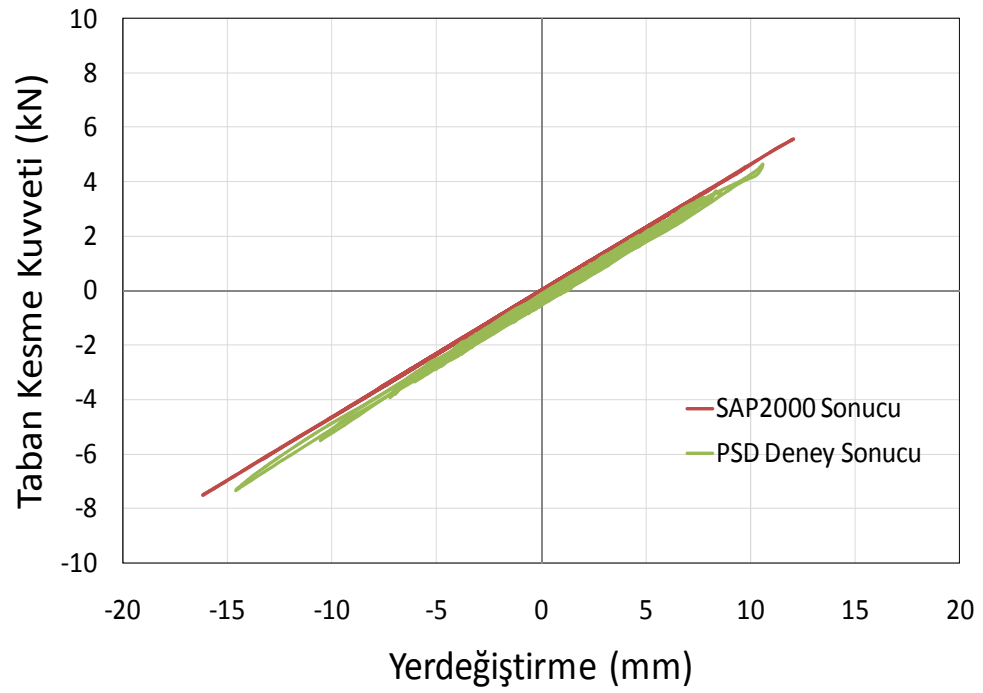
Veri giriş formunun doldurulmasının ardından program incelenen sisteme ait doğal titreşim frekansı, periyodu ve sönüm matrisini hesaplayarak dış ortama basmaktadır. Bu büyüklükler sırasıyla $\omega_n = 80.6530 \text{ 1/sn}$, $T_n = 0.0779 \text{ sn}$, $c = 2.3002\text{E-}4$ olarak hesaplanmıştır.

4.7 Deneysel ve Analitik Sonuçlarının Karşılaştırılması

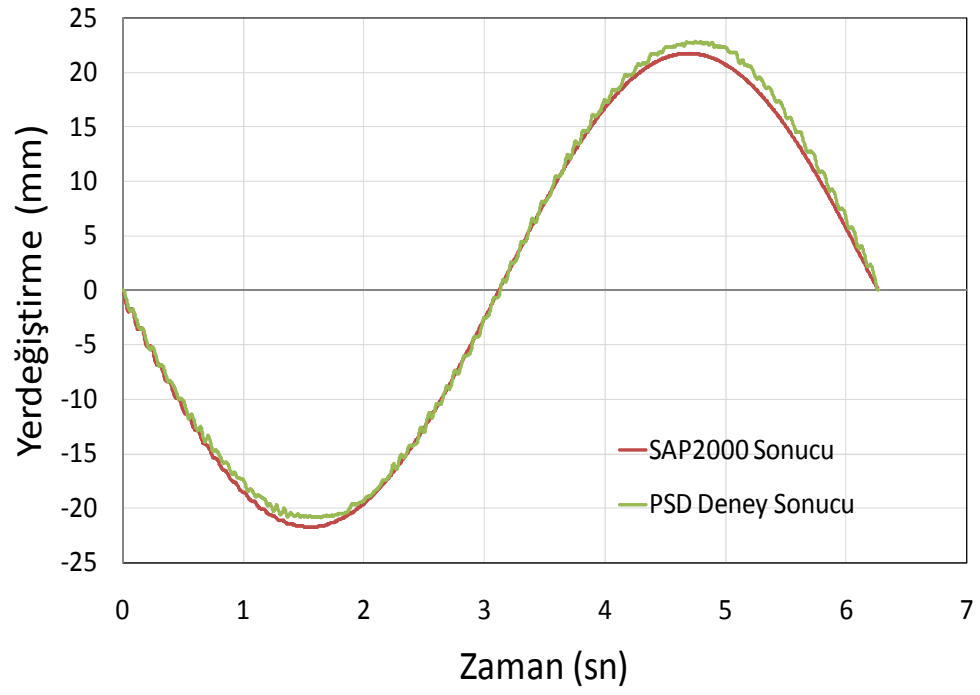
El Centro deprem kaydının %20’lik bölümü kullanılarak deneysel olarak elde edilen Yatay Yük – Tepe Yerdeğiştirmesi ve Zaman – Tepe Yerdeğiştirmesi ilişkileri Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir. Verilen diyagramlarda SAP2000 programı ile elde edilen analitik çözümlerde yer almaktadır.



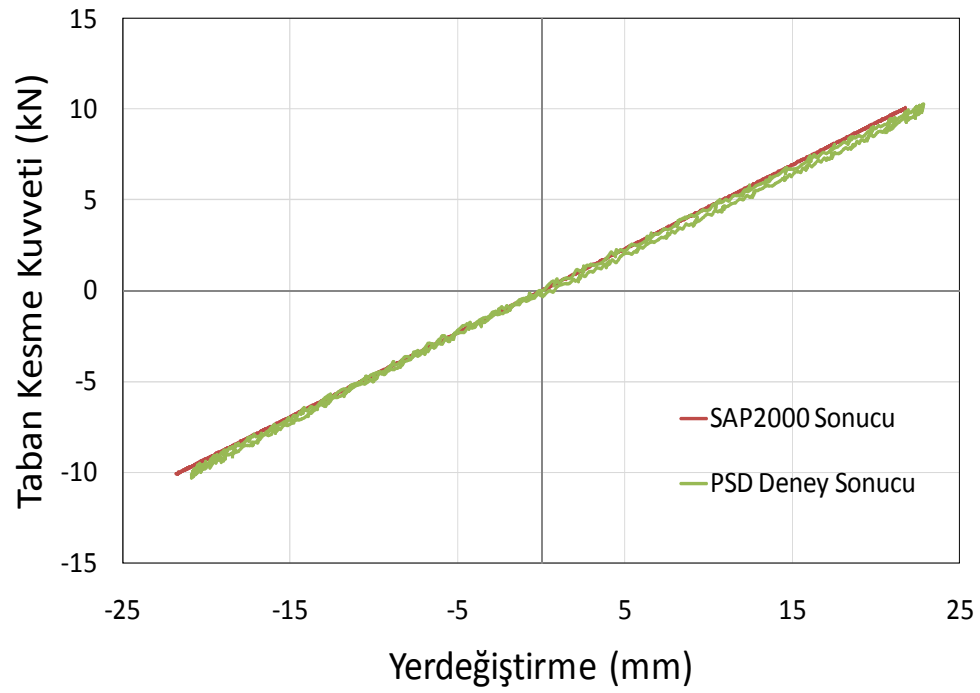
Şekil 4.25: El Centro İvme Kaydı için Deneysel ve Analitik Yerdeğiştirme – Zaman Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 4.26: ElCentro Deprem Kaydı için Deneysel ve Analitik Taban Kesme Kuvveti-Zaman Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 4.27: Harmonik Formdaki İvme Kaydı için Deneysel ve Analitik
Yerdeğiştirme – Zaman Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 4.28: Harmonik Formdaki İvme Kaydı için Deneysel ve Analitik Taban Kesme
Kuvveti – Zaman Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sinüzoidal formdaki bir ivme kaydı kullanılarak deneysel olarak elde edilen Yatay Yük – Yerdeğiştirmesi ve Zaman – Tepe Yerdeğiştirmesi ilişkileri şekil 4.27 ve şekil 4.28’de verilmiştir. Verilen diyagramlarda SAP2000 programı ile elde edilen analitik sonuçlara da yer verilmiştir.

Deneysel alışma ile elde edilen genel davranış grafikleri, analitik sonuçlar ile uyumludur. Ancak; genlikler bir miktar farklı olabilmektedir. Bu farklılığın yk ölçer ve kontrol yerdeğiştirme ölçer duyarlığı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

5. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yapı sistemlerinin veya onlar içerisinde çıkarılmış olan yapısal elemanların deprem etkisindeki davranışlarının belirlenmesi için, mevcut deneysel yöntemler ayrıntılı bir kaynak çalışması ile belirlenmiştir. Bunlar statik yükleme deneyleri, sarsma tablası deneyleri, benzeşik dinamik deneyler ve gerçek zamanlı yükleme deneyleri biçiminde sıralanabilir.

Çalışmanın ikinci bölümünde benzeşik dinamik deney tekniğinin tanımı yapıldıktan sonra, ayrıntıları gözden geçirilmiş ve yöntemin başarı ile uygulanması üzerinde etkili olabilen aletsel ve programsal faktörlerin etkileri ayrı ayrı irdelenmiştir. Benzeşik dinamik deney tekniğinin uygulanmasında önemli yeri olan farklı integrasyon teknikleri ve geliştirilen deney algoritması bu bölümde anlatılmıştır.

İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında mevcut olan bir hidrolik veren kullanılarak, tek dinamik serbestlik dereceli yapı sistemlere uygulanabilen benzeşik dinamik deney algoritması geliştirilmiştir. Başlangıç düzeyindeki bu algoritmada hesap kolaylığı açısından sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

Programın simülasyon sürümü kullanılarak deney öncesinde numune davranışı irdelenebilmektedir. Sönüm, kütle, yatay rijitlik gibi büyüklüklerdeki değişimlerin algoritma üzerindeki etkilerini irdelemek amacıyla seçilmiş bazı kritik değerler için duyarlık analizi yapılmıştır. Elastik bölgede incelenen bir kolon için, simülasyon programı ile üretilen büyüklükler yaygın kullanılan bir paket programın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon programında kullanılan integrasyon adım aralığı, ivme kaydı adım aralığının %25'i mertebesinde seçilmesi durumunda her iki programın ürettiği sonuçların aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum; simülasyon ve deneysel analiz programında kullanılan sonlu farklar integrasyon tekniğinin yeterliliği ile ilişkilendirilmiştir. Algoritma içerisinde daha üst düzey integrasyon teknikleri kullanılması durumunda, daha büyük hesap adım aralıkları kullanmak mümkün

olabilecektir. Bu durum, gerçek deneyde harcanan işlem suresinin kısılması anlamına gelmektedir.

Gerçek deprem kaydı ve sinüzoidal formdaki ivme kayıtları etkisinde deneysel olarak elde edilen sonuçlar analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen davranış eğrilerinin genel olarak aynı formda olduğu ve genliklerde gözlenen farklılıklar dışında büyük ölçüde st üste oturdukları gözlenmektedir. Aradaki farkın en önemli sebebi olarak görülen yk ölçerin duyarlığında değişiklik yapıldıktan sonra, sonuçlarda göreli bir iyileşme gözlenmiştir.

Elastik davranan bir kolon üzerinde analitik ve deneysel olarak doğruluğu kanıtlanan benzeşik dinamik deney algoritmasının geliştirilmesi için, öncelikle yk ölçer ve kontrol yerdeğiştirme ölçer duyarlılıklarının daha da artırılması yerinde olacaktır. Harcanan deney zamanının azaltılması için, algoritmada daha st düzey bir integrasyon tekniğini kullanılması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Barani, T., Tanrikulu K., Dündar C., Tanrikulu H.,** Deney ve Eğitim Amaçlı Mekanik, Tek Eksenli Bir Sarsma Tablasının İmalatı ve Performansının Araştırılması, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul
- [2] **Takanashi, K., Nakashima M.,** Japanese Activities on On-line Testing, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 113, No. 7, July 1987
- [3] **Sullivan T. J., Pinho R., Pavese A.,** An Introduction to Structural Testing Techniques in Earthquake Engineering
- [4] **Hakuno, M., Shidawara, M., Hara, T.,** “Dynamic Destructive Tests of a Cantilever Beam Controlled by an Analog-Computer”, *Trans. Japan Society of Civil Engineers*, 171, 1-9 (1969).
- [5] **Okada, T. et al.,** “Nonlinear Earthquake Response of System Anchored on RC Building Floor”, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, No.13, IIS, University of Tokyo, Japan, 1980.
- [6] **Okada, T. et al.,** “A simulation of Earthquake Response of Reinforced Concrete Building Frames to bi-directional Ground Motion by IIS Computer Actuator On-line System, In *Proceedings, Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey, 1980.
- [7] **Yamanouchi, H. et al.,** “Test Results of Full Scale Six Story Building”, *Fourth Joint Technical Coordinating Committee Meeting, U.S.-Japan Cooperative Research Program*, Tsukuba, Japan, 1983.
- [8] **Balendra, T., Lam, K., Liaw, C., Lee, S.,** “Behaviour of Eccentrically Braced Frame by Pseudo-Dynamic Tests”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 113(4), 1987.
- [9] **Peek, R. And Yi,W.(1990),**”Error Analysis for Pseudodynamic Test Method: 1.Analysis”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*,116(7):1618-1637
- [10] **Peek, R. And Yi,W., (1990),**”Error Analysis for Pseudodynamic Test Method: 2.Application”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*,116(7):1638-1658.
- [11] **Shing, P.B., Mahin, S.A., (1987),** “Cumulative Experimental Errors in Pseudodynamic Tests”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15(4).
- [12] **Nakashima, M., (1983),** “Stability and Accuracy of Integration Techniques in Pseudodynamic Testing”, *Technical Report No.105, Building Research Institute*, Japan.

- [13] **Shing, P.B., Mahin, S.A.**, (1985), “Computational Aspect of a Seismic Performance Test Method Using On-Line Computer Control”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13: 507-526.
- [14] **Shing, P.S.B. and Manivannan, T.**, (1990), “On the Accuracy of an Implicit Algorithm for Pseudodynamic Tests”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(5):631-651.
- [15] **Williams, M. S., Blakeborough A.**, *Laboratory Testing of Structures Under Dynamic Loads: an Introductory Review*
- [16] **Magonette, G.**, *Digital Control of Pseudo-Dynamic Tests*, Ispra (VA), Italy
- [17] **Kabayama, K., Toyoshima, M., Kumazawa, F., Nakano, Y., Okada, T.**, “On-line Tests of Frame Structures”, *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, No:26, March 1993.
- [18] **Paguette, J., Bruneau, M.**, “Pseudo-Dynamic Testing of Unreinforced Masonry Buildings With Flexible Diaphragm”, *12WCEE*, 1367, 2000.
- [19] **Nakajima, K., Iemura, H., Takahashi, Y., Ogawa, K.**, “Pseudo Dynamic Tests and Implementation of Sliding Bridge Isolators with Vertical Motion”, *12WCEE*, 2000.
- [20] **Pinto, A., Pegon, P., Magonette, G., Molina, J., Buchet, P., Tsionis, G.**, “Pseudodynamic Tests on a Large-Scale Model of An Existing RC Bridge Using Non-Linear Substructuring and Asynchronous Motion”, *ELSA*, 2002.
- [21] **Thewalt, C. R., Mahin, S. A.**, *The Pseudo-Dynamic Test Method: Numerical Aspects*, California, U.S.A.
- [22] **Kusunoki, K., Woan, H.**, *Posterior Time-step Adjustment Technique in Substructuring Pseudo-Dynamic Test- Numerical Simulation and Loading Test*
- [23] **Nakashima, M., Kaminosono, T., Ishida, M., Ando, K.**, “Integration Techniques for Substructure Pseudo Dynamic Test”, *Proceedings of 4. US National Conference on Earthquake Engineering*, Vol.2
- [24] **Shing, B., Vannan, T., Cater, E.**, “Implicit Time Integration for Pseudodynamic Tests”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol.20*, pp 551-576.
- [25] **SAP2000, 2005.** *Structural Analysis Program*, Computer and Structures Inc., Berkeley, California

ÖZGEÇMİŞ

Aslı Ceyhan, 1982 yılında İstanbul’da doğmuştur. Ortaokul ve liseyi İstanbul Hüseyin Avni Sözen Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. 2001 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde öğrenim görmeye başlamış ve 2006 yılı bahar dönemi sonunda öğrenimi tamamlamıştır. 2006 yılı güz dönemi başlangıcında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Deprem Mühendisliği Programı’nda öğrenimine başlamıştır.