T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAMAN İNTEGRASYON ŞEMALARININ EŞDEĞER DİNAMİK TEST SONUÇLARINA ETKİSİ

SEZER ÖZTÜRK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. BİLGE DORAN

İSTANBUL, 2017

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAMAN İNTEGRASYON ŞEMALARININ EŞDEĞER DİNAMİK TEST SONUÇLARINA ETKİSİ

Sezer Öztürk tarafından hazırlanan tez çalışması 15.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Bilge DORAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Bilge DORAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. İbrahim EKİZ

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Doç. Dr. Zafer KÜTÜĞ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Bu çalışma, TÜBİTAK'ın 212M006 numaralı, "Hibrit Dinamik Benzeri Simülasyon ve Test içi Model Güncellemesi" projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak yürüttüğüm bu çalışmada eşdeğer dinamik analizde kullanılan zaman tanım alanında integrasyon yöntemlerinin ve zaman adım aralığı değerlerinin analitik ve deneysel incelemelere etkisi incelenmiştir.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve yardımlarını benimle paylaşan, tecrübelerini aktaran değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Bilge Doran'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübelerini esirgemedikleri için ve bu yüksek lisans tezi vasıtasıyla akademik olarak çalışabilme konusunda gerekli motivasyonu sağladıkları için, Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi'nde görev yapan değerli öğretim üyeleri hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Cenk Aksoylar, Sayın Yrd. Doç. Dr. Nihan Doğramacı Aksoylar ve üzerimde emeği olan tüm hocalarıma, deneysel çalışmalar süresince yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Emre KARAMAN ve Orhan YAPICI' ya, bugüne kadar maddi ve manevi her konuda yanımda olan sevgili aileme, deneysel çalışmalarım için altyapı ve laboratuvar imkanı sağlayan Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi ailesine teşekkürü borç bilirim.

TÜBİTAK tarafından 212M006 nolu "Hibrit Dinamik Benzeri Simülasyon ve Test içi Model Güncellemesi" projesine verilen destek yazar tarafından teşekkürle karşılanmaktadır.

Haziran, 2017

Sezer ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 6

BÖLÜM 2

DİNAMİK DAVRANIŞ İNCELEME YÖNTEMLERİ 8

2.1 Deprem 8
2.2 Dinamik Hesap Yöntemleri 10
2.2.1 Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleri 11
2.2.2 Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemleri 11
2.3 Deneysel İncelemeler 13
2.3.1 Quasi Statik Testler 13
2.3.2 Eşdeğer Dinamik Testler 14
2.3.3 Sarsma Tablası Testleri 15

BÖLÜM 3

EŞDEĞER DİNAMİK TEST 16

3.1 Zaman Tanım Alanında İntegrasyon Yöntemleri 17
3.1.1 Merkezi Farklar Yöntemi 18

3.1.2 Alpha Operator-Splitting (α-OS) Yöntemi 21

BÖLÜM 4

SAYISAL İNCELEMELER 26

4.1 Örnek Yapı Modeli 26
4.2 Kabuller 27
4.3 Yüklemeler 29
4.4 Sayısal Hesaplar 31
4.4.1 Zaman Tanım Alanında İntegrasyon Şemalarının Etkisi 31
4.4.2 Zaman Adım Aralığının Etkisi 60

BÖLÜM 5

DENEYSEL İNCELEMELER 67

5.1 Deney Düzeneği 67
5.2 Çelik Deney Numuneleri 69
5.3 Çelik Deney Numuneli İncelemeler 72
5.3.1 Zaman Adım Aralığının Etkisi 72

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 80

KAYNAKLAR 83

ÖZGEÇMİŞ 86

SİMGE LİSTESİ

$\mathrm{Ag(t)}$	Zamana bağlı yer ivmesi
a	Dinamik yükleme altında taşıyıcı sistemin ivme vektörü
a_t	Sistemin "t" anındaki ivmesi
$a_{t+\Delta t}$	Sistemin "$t+\Delta t$" anındaki ivmesi
a_0	Başlangıç ivme değeri
C	Taşıyıcı sistem sönümü
E	Malzeme elastisite modülü
$F_D(t)$	Taşıyıcı sistemde oluşan zamana bağlı sönüm kuvveti
$F_E(t)$	Taşıyıcı sistemde oluşan zamana bağlı elastik direnç kuvveti
$F_I(t)$	Taşıyıcı sistemde oluşan zamana bağlı atalet kuvveti
g	Yerçekimi ivmesi
h	Sayısal ve deneysel incelemelerde kullanılan taşıyıcı sistemin yüksekliği
K	Taşıyıcı sistem rijitliği
$\widehat{K}$	Eşdeğer rijitlik değeri
M	Taşıyıcı sistem kütlesi
$\widehat{M}$	Eşdeğer kütle değeri
P	Deprem hareketinin Primer dalgası
R	Dış yük vektörü
$\mathrm{R_0}$	Rijitliğe bağlı kuvvetin başlangıç değeri
$\hat{R}_t$	"t" anındaki eşdeğer kuvvet değeri
$\hat{R}_{t+\Delta t}$	"$t+\Delta t$" anındaki eşdeğer kuvvet değeri
r	Etki/Kapasite oranı
$r_{t+\Delta t}$	Alpha-OS integrasyon yönteminde "$t+\Delta t$" anında dengeleyici kuvvet
$\tilde{r}_{t+\Delta t}$	Alpha-OS integrasyon yönteminde "$t+\Delta t$" anında beklenen dengeleyici kuvvet
S	Deprem hareketinin Sekonder dalgası
$S(T)$	Spektrum katsayısı
T_1	Binanın birinci doğal titreşim periyodu
v	Dinamik yükleme altında taşıyıcı sistemin hız vektörü
v_t	Sistemin "t" anındaki hızı
$v_{t+\Delta t}$	Sistemin "$t+\Delta t$" anındaki hızı
$\mathrm{v_0}$	Başlangıç hız değeri
$\tilde{v}_{t+\Delta t}$	Alpha-OS integrasyon yönteminde "$t+\Delta t$" anında tahmin edilen hız değeri

x	Dinamik yükleme altında taşıyıcı sistemin yer değiştirme vektörü
x_t	Sistemin "t" anındaki yer değiştirmesi
$x_{t+\Delta t}$	Sistemin "$t + \Delta t$" anındaki yer değiştirmesi
x_0	Başlangıç yer değiştirme değeri
$\tilde{x}_{t+\Delta t}$	Alpha-OS integrasyon yönteminde "$t + \Delta t$" anında tahmin edilen yer değiştirme değeri
α	Alpha-OS integrasyon şemasında kullanılan parametre
β	Alpha-OS integrasyon yönteminde yer değiştirme hesabında kullanılan parametre
γ	Alpha-OS integrasyon yönteminde hız hesabında kullanılan parametre
ε	Birim şekil değiştirme
ξ	Modal sönüm oranı
σ	Gerilme
Δt	Zaman tanım alanında integrasyon işleminde zaman adım aralığı
$\Delta \mathrm{x}$	"X" doğrultusunda yer değiştirme değeri

KISALTMA LİSTESİ

DBYBHY Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
DZC270 Kocaeli depremi Düzce istasyonu tarafından kaydedilen deprem kaydı bileşeni
EMY350 Loma Prieta depremi Emeryville kayıt istasyonu tarafından kaydedilen deprem kaydı bileşeni
MFY Merkezi Farklar Yöntemi
NS Imperial Valley depremi ElCentro istasyonu tarafından kaydedilen deprem kaydı bileşeni
PEER Pacific Earthquake Engineering Research Center
PGA Peak Ground Acceleration
SC6000 Servo Controller
α-OS Alpha-Operator Splitting İntegrasyon Yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Farklı türde yer değiştirme profilleri [20] 14
Şekil 3. 1 Sonlu Farklar Yöntemine geometrik bakış [22] 18
Şekil 3. 2 Merkezi Farklar Yöntemi eşdeğer dinamik analiz algoritması 21
Şekil 3. 3 Alpha-OS Yöntemi eşdeğer dinamik analiz algoritması 25
Şekil 4. 1 Sayısal incelemelerde kullanılan yapı modeli 27
Şekil 4. 2 Kinematik pekleşmeli iki doğrulu elasto plastik malzeme modeli [19] 28
Şekil 4. 3 Anlık etkiyen sabit yük grafiği 29
Şekil 4. 4 ElCentro deprem kaydı, NS bileşeni 30
Şekil 4. 5 Düzce deprem kaydı, DZC270 bileşeni 30
Şekil 4. 6 Emeryville deprem kaydı, EMY350 bileşeni 30
Şekil 4. 7 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme) 32
Şekil 4. 8 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme) 33
Şekil 4. 9 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme) 33
Şekil 4. 10 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme) 34
Şekil 4. 11 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme) 34
Şekil 4. 12 Δt=0.04 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme) 35
Şekil 4. 13 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme) 35
Şekil 4. 14 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme) 37
Şekil 4. 15 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme) 38
Şekil 4. 16 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme) 38
Şekil 4. 17 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme) 39
Şekil 4. 18 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme) 39
Şekil 4. 19 Δt=0.04 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme) 40
Şekil 4. 20 Δt=0.1 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme) 40
Şekil 4. 21 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge) 43
Şekil 4. 22 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge) 43
Şekil 4. 23 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge) 44
Şekil 4. 24 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge) 44
Şekil 4. 25 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge) 45
Şekil 4. 26 Δt=0.04 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge) 45
Şekil 4. 27 Δt=0.1 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge) 46
Şekil 4. 28 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge) 48
Şekil 4. 29 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge) 48
Şekil 4. 30 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge) 49
Şekil 4. 31 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge) 49

Şekil 4. 32 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge)..... 50
Şekil 4. 33 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)..... 51
Şekil 4. 34 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)..... 52
Şekil 4. 35 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)..... 52
Şekil 4. 36 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)..... 53
Şekil 4. 37 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge) 54
Şekil 4. 38 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge) 55
Şekil 4. 39 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge) 55
Şekil 4. 40 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge).. 56
Şekil 4. 41 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge) 58
Şekil 4. 42 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge) 58
Şekil 4. 43 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge) 59
Şekil 4. 44 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge) 59
Şekil 4. 45 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, α-OS Yöntemi, birinci grup inceleme) 62
Şekil 4. 46 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, Merkezi Farklar Yöntemi, birinci grup inceleme) 62
Şekil 4. 47 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, α-OS Yöntemi ikinci grup inceleme) 65
Şekil 4. 48 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, Merkezi Farklar Yöntemi ikinci grup inceleme)..... 65
Şekil 5. 1 Altı serbestlik dereceli yük ve yer değiştirme hücresi ile güçlü duvar 68
Şekil 5. 2 Taşıyıcı sistem modeli..... 69
Şekil 5. 3 Deney düzeneği ve numune 69
Şekil 5. 4 Deney numunesi..... 70
Şekil 5. 5 Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkisi 72
Şekil 5. 6 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, deneysel sonuç, birinci grup inceleme) 74
Şekil 5. 7 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, sayısal analiz sonucu, birinci grup inceleme)..... 74
Şekil 5. 8 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, deneysel sonuç, ikinci grup inceleme) 77
Şekil 5. 9 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, sayısal analiz sonucu, ikinci grup inceleme)..... 77

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4. 1 Deprem kayıtlarına ait özellikler [28] 31
Çizelge 4. 2 Sabit Yük altında yapılan İncelemeler (1.grup inceleme) 36
Çizelge 4. 3 Sabit yük altında yapılan sayısal incelemeler (2.grup inceleme)..... 41
Çizelge 4. 4 Sabit Yük Altında Yapılan İncelemeler (elastik ötesi bölge) 46
Çizelge 4. 5 ElCentro Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik bölge)..... 50
Çizelge 4. 6 Kocaeli Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik bölge)..... 53
Çizelge 4. 7 Emeryville Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik bölge)..... 56
Çizelge 4. 8 Emeryville Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik ötesi bölge) 60
Çizelge 4. 9 Zaman adım aralığı etkisi (Birinci grup inceleme, elastik bölge) 63
Çizelge 4. 10 Zaman adım aralığı etkisi (İkinci grup inceleme, elastik bölge)..... 66
Çizelge 5. 1 Teknik kapasite 68
Çizelge 5. 2 Numune kesit tipleri ve geometrik boyutlar 71
Çizelge 5. 3 Malzeme özellikleri..... 71
Çizelge 5. 4 Sayısal analiz ve deney sonuçları (Birinci grup inceleme) 75
Çizelge 5. 5 Sayısal analiz ve deney sonuçları (İkinci grup inceleme) 78

ÖZET

ZAMAN İNTEGRASYON ŞEMALARININ EŞDEĞER DİNAMİK TEST SONUÇLARINA ETKİSİ

Sezer ÖZTÜRK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bilge DORAN

Yapıların ve yapı elemanlarının farklı yüklerin etkisi altındaki davranışının belirlenmesi, uzun yıllardır mühendislerin ve araştırmacıların ilgilendiği konulardır. Özellikle depremlerden sonra yapıların performansını incelemek için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar: *i)* depremlerden sonra yapılan saha incelemeleri, *ii)* matematiksel modellemeler ve *iii)* laboratuvar testleridir. Laboratuvarda yapılan test çalışmaları da kendi içinde üç ayrı başlıkta değerlendirilebilir, bunlar: *i)* sarsma tablası testleri, *ii)* quasi statik deneyler ve *iii)* eşdeğer dinamik testlerdir. Eşdeğer dinamik test yöntemi hem yapı kapasitesini hem de deprem istemini ele alması ve sarsma tablası testlerine göre daha ekonomik ve kolay uygulanabilir olması sebebiyle güvenilir bir alternatif olmuştur ve sıklıkla kullanılmıştır. Temel prensip olarak, yapı adım adım integrasyon yöntemi ile incelenir. Simülasyon gerçek zamanlı olmayan düşük hızlarda gerçekleştirilir ve numune üzerinde hasar oluşumu ve gelişimi izlenebilmektedir. Her zaman adımında yapının fiziksel testinden elde edilen reaksiyon kuvvetleri bir bilgisayar modelinde yapının atalet ve sönüm etkileri ile matematiksel olarak birleştirilir ve depremin bir sonraki zaman adımında yapıdan istediği yer değiştirme değerleri belirlenir. Bu yer değiştirme değerlerinin fiziksel yapıya etki ettirilmesi ile test devam eder. Yüklemenin gelişigüzel değiştiği veya sistemin doğrusal olmayan bir davranış gösterdiği durumlarda yapının dinamik hareket denklemine çözüm üretmek için zaman integrasyon şeması

algoritmaları kullanılır. Bu çalışmada eşdeğer dinamik test yönteminde kullanılan, zamanı adımlama yöntemlerinden olan Merkezi Farklar Yöntemi ve α-OS Yönteminin dinamik davranışa etkisi incelenmiştir. Tek serbestlik dereceli bir sistemin dinamik davranışı hem analitik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Bu incelemelerde dinamik yükleme olarak anlık etkiyen sabit yük ve seçilmiş deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Sayısal incelemelerde her iki integrasyon yöntemi ile sisteme sabit yük ve yer ivme kayıtları uygulanarak elastik ve elastik ötesi bölgede analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde iki integrasyon yönteminin ve farklı zaman adım aralığı değerlerinin eşdeğer dinamik analizlere etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi "Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı" nda anlık etkiyen sabit yük altında, farklı zaman adım aralıklarında, α-OS Yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlarda analitik incelemelerde zaman adım aralığının çok küçük değerleri için gerçekleştirilen analizlerde, her iki integrasyon yöntemi çözümlerinin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak zaman adım aralığı artırıldıkça çözümlerde stabilite bozulmaları meydana gelmiştir. Merkezi Farklar Yöntemi çözümlerinde taşıyıcı sistem periyodunun küçüldüğü, α-OS Yöntemi çözümlerinde taşıyıcı sistem periyodunun büyüdüğü anlaşılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise sayısal analiz sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarla eşdeğer dinamik deney altyapısının gerçekçi biçimde sonuçlar verdiği görülmüştür. Sayısal integrasyon yöntemleri ve zaman adım aralığı değerlerinin analizlere etkisi incelenmiştir. Çalışmanın eşdeğer dinamik deneylerde kullanılacak uygun zaman adım aralığının seçiminde fikir oluşturabileceği düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eşdeğer dinamik analiz, sayısal integrasyon yöntemleri, Alpha-Operator Splitting Yöntemi, Merkezi Farklar Yöntemi, zaman adım aralığı

ABSTRACT

EFFECTS OF THE TIME INTEGRATION SCHEMES ON THE RESULTS OF PSEUDO DYNAMIC TESTS

Sezer ÖZTÜRK

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Bilge DORAN

Determination of the behavior of structures and structural elements under the influence of different loads is a topic that engineers and researchers have been interested in for many years. Different methods are used to examine the performance of structures, especially after earthquakes. These are: i) site surveys after earthquakes, ii) mathematical models, and iii) laboratory tests. Due to the fact that the pseudo dynamic test method is more economical and easier to implement than the shake table tests, it has become a reliable alternative and frequently used because it deals with building capacity and earthquake demand. As a basic principle, the structure is examined step by step with integration method. The simulation is carried out at non-real time so that damage formation and development can be observed on the sample. The reaction forces obtained from the physical test of the structure at each time step are mathematically combined with the inertia and damping effects of the structure in a computer model and the displacement values desired from the structure at the next time step of the earthquake are determined. The test continues with the application of these displacement values to the physical structure. In situations where the loading is randomly changing or the system exhibits nonlinear behavior, time integration scheme algorithms are used to generate a solution to the dynamic equation of the motion. In this study, the effects of the Central Differences Method and the α-OS Method on the dynamic behavior, which are used in the pseudo dynamic test method, are

investigated. The dynamic behavior of a single degree of freedom system has been studied both analytically and experimentally. In these investigations, the dynamic load is used as the instantaneous constant load and the selected earthquake acceleration records. Numerical analyzes have been carried out in both the elastic and inelastic regions by applying constant load and ground acceleration records to the system with both integration methods. In these analyzes, the effect of the two integration methods and different time step interval values to the pseudo dynamic analyzes was investigated. Experimental studies have been carried out at Fatih Sultan Mehmet Vakıf University under "Structural Mechanics and Earthquake Research Laboratory" under constant load, at different time step intervals, using α-OS method and compared with numerical analysis results. In the analytical results obtained for the very small values of the time step interval, it is seen that the solutions of both integration methods give very close results. However, as the time step interval is increased, the stability has deteriorated in the solutions. In the Central Difference Method solutions, the period of the structural system has decreased whereas the period of the structural system has been increased in the solutions of α-OS Method. In experimental studies, results were close to numerical analysis results. It has been seen that the pseudo dynamic experimental infrastructure gave realistic results in the studies carried out. The effects of numerical integration methods and time step interval values on the analysis are examined. It is thought that the study may be able to generate ideas in the selection of the appropriate time step interval to be used in pseudo dynamic experiments.

Keywords: Pseudo dynamic analysis, numerical integration methods, Alpha-Operator Splitting Method, Central Differences Method, time step interval.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yapıların deprem etkisinde sergileyeceği davranış ve performans inşaat mühendisleri tarafından uzun yıllardır araştırılmaktadır. Özellikle son 20 yılda tüm dünyada depreme dayanıklı yapı tasarımı yönetmeliklerinde ciddi değişiklikler olmuştur ve araştırmalara bağlı olarak gelişmeler yoğun olarak devam etmektedir. Yerleşim birimlerinin yoğunluklarının artması mühendislik yapılarının sınırlarını zorlamakta ve yeni yapı malzemeleri ile yapım yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Tüm bu gelişmeler, araştırmacıların mevcut yapıların deprem güvenliklerini araştırması, güçlendirme seçenekleri geliştirmesi, yeni yapı malzemeleri ve sistemleri geliştirmesini zorunlu kılmaktadır. Yapıların deprem davranışının araştırılması ve öğrenilmesinde üç temel yöntemden bahsetmek mümkündür; *i)* depremlerden sonra yapılan saha incelemeleri, *ii)* matematiksel modellemeler, *iii)* laboratuvar deneyleri. Laboratuvar deneyleri (testleri) de, *i)* sarsma tablası testleri, *ii)* quasi statik deneyler, *iii)* eşdeğer dinamik testler gibi sınıflandırılabilir. Eşdeğer dinamik test yöntemleri deprem istemini ve yapı kapasitesini ele aldığından ve sarsma tablası testlerine göre ekonomik ve güvenilir seçenek olmasından dolayı araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiş, kullanılmış ve halen kullanılmaktadır. Eşdeğer dinamik test yönteminde temel hedef yapının dinamik hareketini yöneten denge denkleminin adım adım integrasyon yöntemi ile çözülmesidir. Her zaman adımında deney numunesine yer değiştirme değeri uygulandıktan sonra numunenin rijitliğine bağlı olarak oluşan kuvvet değeri ölçülür, bilgisayar ortamında, öngörülen atalet ve sönüm etkileri ile birleştirilir ve bir sonraki adıma ait yer değiştirme değeri bulunur. İşlem tekrarlanarak devam ettirilir. Deney düşük hızlı olarak gerçekleştirilir ve test numunesi üzerinde hasar oluşumu ve gelişimi gözlemlenir.

Literatürde yapıların dinamik hareket denge denklemini çözümlemede kullanılan birçok yöntem vardır. Eşdeğer dinamik testlerde, yapı deprem kaydı gibi dinamik yükler etkisinde, sözü edilen zaman tanım alanında integrasyon yöntemleri ile adım adım çözülür. Bu analizlerde, kullanılan integrasyon yöntemi, incelenen yükleme çeşidi, yapı modeline ait özellikler, dinamik denge denkleminin çözümünün yapıldığı zaman adım aralığı değeri gibi birçok farklı parametre sayılabilir. Bu tez çalışmasında da hem sayısal hem de deneysel olarak farklı parametrelerin eşdeğer dinamik test sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Deneysel çalışmalar, yapıların kuvvetli yer hareketi gibi dinamik etkiler altındaki performansını belirlemede en güvenilir yöntemlerdir. Bu sebeple yıllardır değişik deneysel yöntemler geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Sarsma tablası deney yöntemi ile gerçekçi sonuçlara ulaşıldığı için, bu yöntem zaman içinde en çok kullanılan yöntemlerden olmuştur. Ancak, deney modelinin boyutu, kütlesi gibi özellikleri, laboratuvar ortamında kullanılması gereken test düzenekleri, hidrolik güç ünitesi gibi deney ekipmanlarının kapasitesinde sınırlamalara sebep olmuştur ve maliyeti artırmaktadır. Bu gelişmeler eşdeğer dinamik test yönteminin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Eşdeğer dinamik test tekniği ilk olarak 1970'li yıllarda Japonya' da geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Daha sonra geçen zamanla farklı parametreleri araştırmak, farklı hedeflere ulaşabilmek üzere çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir.

M. Nakashima (1983)' nın gerçekleştirdiği çalışmada eşdeğer dinamik test tekniğinde, yapının dinamik hareket denge denkleminin zaman tanım alanında çözümünde, çözümün kararlılığını ve doğruluğunu yöneten zaman adım aralığının seçiminin önemi ifade edilmiştir. Yapılan incelemelerde Merkezi Farklar Yönteminin eşdeğer dinamik analizdeki kararlılık ve doğruluk özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca zaman tanım alanında integrasyon işleminde uygun zaman adım aralığı değerini seçmede etkili kurallar belirlemek ve zaman aralığı ile çözüm doğruluğu arasındaki etkileşim açısından daha etkili bir integrasyon yönteminin kullanılma olasılığını incelemek, çalışmadaki diğer hedeflenen veriler olmuştur. Merkezi Farklar Yönteminden daha büyük kararlılığa sahip

bir integrasyon yöntemi, çok serbestlik dereceli bir sistemin eşdeğer dinamik analizi için önem teşkil etmiştir. Yapılan analizlerde yapı periyodunda daralmalar, viskoz sönüm oranında bozulmalar, faz gecikmesi, genlik değişikliği gibi durumlar gözlenmiş ve bu parametrelerle, integrasyon yönteminde zaman adım aralığının seçimi konusunda fikirler edinilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca eşdeğer dinamik analizde Merkezi Farklar Yönteminden daha büyük bir kararlılığa sahip kesin (explicit) bir yöntem bulunmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Doğruluk açısından da merkezi farklar yönteminin, diğer kesin (explicit) yöntemlerden kötü olmadığı saptanmıştır [1].

K. Takanashi ve M. Nakashima (1987)'nın gerçekleştirdiği çalışmada deneysel ve sayısal incelemelerin bir arada yapıldığı test tekniğinin uygulama ve geliştirilmesinde Japon araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar sunulmuştur. Yöntemin gelişimi, yazılımsal ve donanımsal algoritmaları tanıtılmış ve 27 adet çalışma özet halinde sunulmuştur. Yöntemin güvenilirliği tartışılmıştır. Yapısal tepkilerde oluşan hatalar üzerinde etkin olan kaynaklar araştırılmış ve oluşabilecek hataları kontrol altına almak için değerlendirmeler yapılmıştır [2].

Nakashima ve diğerleri (1992) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, viskoz sönüm modeline sahip bir yapının sinüzoidal yük ve deprem ivme kaydı etkisinde gerçek zamanlı eşdeğer dinamik testlerinin gerçekleştirildiği analizde, değiştirilmiş merkezi farklar yöntemi kullanılmıştır. Oluşan tepkilere ait sonuçlar, sayısal çözümlemelerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve çalışmada gerçekleştirilen gerçek zamanlı eşdeğer dinamik test sonuçlarının gerçekçiliği görülmüştür [3].

P. Benson Shing ve diğerlerinin (1996) yürüttüğü çalışmada gerçekleştirilen deney örnekleri ile eşdeğer dinamik test tekniğine genel bir bakış sunulmuştur. Çalışmada yöntemin geleneksel quasi statik test yöntemine göre karmaşık olduğu, ancak deney maliyetinin bir miktar artırılarak yapısal araştırmalarda uygulanabileceği ifade edilmiştir [4].

M. Nakashima ve diğerlerinin (1995) yürüttüğü çalışmada eşdeğer dinamik test tekniğinde yükleme esnasında geleneksel statik kriko kullanılmıştır. Bir çevirici motor kullanılarak yağ akışının hızının ayarlanabildiği bir hidrolik pompa sistemi ve dijital bir yer değiştirme dönüştürücüsünden iletilen geri dönüş yer değiştirme sinyali ile krikonun hareketini kontrol eden bir kontrol cihazı, deney için yeni donanımsal aletler

olarak tanıtılmıştır. Kriko tarafından sağlanan daha büyük güç kapasitesi, birçok yapısal test laboratuvarında mevcut olan aygıtlardan maksimum şekilde yararlanabilme, yapılan işlerin birden çok sayıda bilgisayara ayrılmasıyla gerçekleşen program geliştirme esnekliği, sistemin avantajları arasında gösterilmiştir. Sistemin güvenilirliği önce tek serbestlik dereceli bir sistem için, daha sonra histerik sönüm etkisine sahip olan on katlı bir bina modeli için yapılan eşdeğer dinamik deneyler ile araştırılmıştır. Elde edilen sonuçların doğruluğu, sistemin yer değiştirme kontrolündeki kapasitesi ve yapılan sayısal analizlerin sonucuna dayanarak karşılaştırılmıştır [5].

Nakashima (2001) tarafından yürütülen bir diğer çalışmada gerçek zaman ölçeğinde eşdeğer dinamik analiz için bir test sistemi sunulmuştur. Önerilen sistem, dijital bir sinyal işlemcisinin kullanılması, kolay programlama için C dilinin benimsenmesi, karmaşık yapılarda testi gerçekleştirebilmek için yer değiştirme sinyalinin ve yapısal tepkinin analizinin ayrımı gibi özellikleri içerir. Altı serbestlik dereceli bir yapı olarak görülen, taban izolatörlü bir bina modeli, farklı yer hareketleri için test edilmiştir. Testler, sistemin büyük yer değiştirme ve hız değerleri ile karmaşık sayısal gecikmeleri içeren deprem tepkilerini simüle edebildiğini göstermiştir. Gerçek zamanlı eşdeğer dinamik testin avantaj ve dezavantajları, önceden hazırlanan bir yer değiştirme veya kuvvet profili kullanılarak gerçekleştirilen quasi-statik test yöntemi ve sarsma tablası test tekniği gibi diğer deneysel yöntemlerle karşılaştırılarak tartışılmıştır [6].

Kabayama (1993) oluşturduğu deney düzeneğinde, dört adet betonarme kolonunun aynı anda testini gerçekleştirmiştir. Sayısal integrasyon yöntemi olarak Operator Splitting metodunu kullanmıştır. Elde edilen sonuçları sarsma tablası ile yapılanlarla karşılaştırılarak numune davranışının sayısal integrasyon işleminde kullanılan sönüm oranına bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Numunenin gerçek davranışını yakalayabilmek için değişken viskoz sönüm matrisi kullanılmasını önermiştir [7].

Paguette tam ölçekli tek katlı yığma yapıları, düzlemi içinde zayıf döşeme-kuvvetli duvar etkileşimini araştırmak için, eşdeğer dinamik deney tekniğini kullanarak deneysel olarak incelemiştir [8].

D. Combescure ve P. Pegon (1994), yürüttükleri çalışmada eşdeğer dinamik analiz algoritması için Alpha-Operator Splitting (α-OS) Yöntemini kullanmışlardır ve deneysel incelemede ortaya çıkan hata yayılımını kısıtlama yönünde çalışmışlardır. Çok serbestlik

dereceli sistemlerde yapının en küçük ve en büyük doğal frekans değerleri farklı olup dinamik etki ile yalnızca en büyük doğal titreşim periyoduna sahip olan mod aktifleşebilir. Bu durumda, kararlılık nedenleriyle (en yüksek doğal frekansla yönlendirilen) zaman adımı, doğru bir tepki için gerekenin çok altında olduğundan, kesin (explicit) bir zaman integrasyon şemasının kullanılması etkili değildir. Kapalı (Implicit) bir şemanın kullanımının ise iki şekilde gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Ya her bir zaman adımında alt döngü işlemi içeren iterasyonlu bir implicit yöntemi kullanılır ya da iterasyonsuz, doğrusal olarak implicit ve doğrusal olmayan şekilde explicit olan Operator Splitting Yöntemi kullanılır [9], [10]. Bu çalışmada yapılan incelemelerde iterasyonsuz yöntemle iterasyonlu yöntem arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. OS Yöntemi ile değiştirilmiş α Newmark şeması kullanılmıştır. Ayrıca α-OS Yönteminin hata analizi gerçekleştirilmiş ve sunulmuştur [11].

Ülkemizde ise konuyla ilgili A. Ceyhan (2008), eşdeğer dinamik test yöntemini anlatmış, literatürde yer alan çeşitli çalışmaları, integrasyon tekniklerini sunmuştur. Sinüzoidal yük ve ivme kayıtları ile deney çalışması gerçekleştirip sonuçları SAP2000 programı ile yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırmıştır [12].

E. S. Tako (2009) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise yüksek lisans tezi olarak sunulmuştur, orijinal ve güçlendirilmiş bölme duvarlı betonarme çerçevelerin deprem etkisindeki davranışları statik ve eşdeğer dinamik deney teknikleri kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar birbirileri ile karşılaştırılmıştır [13].

Konu ile ilgili ülkemizdeki bir diğer çalışmada, M. B. Mutlu (2012) yürüttüğü yüksek lisans tezinde ODTÜ Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda imal edilmiş üç farklı betonarme yapının deprem davranışını eşdeğer dinamik test yöntemiyle incelemiştir. Üç farklı deprem kaydı uygulanarak gerçekleştirilen eşdeğer dinamik deney sonuçları, farklı modelleme yaklaşımları kullanılarak oluşturulmuş sayısal modeller üzerinde yapılan doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak sunulmuştur [14].

1.2 Tezin Amacı

Yapı sistemlerinde yüklemenin gelişigüzel değiştiği veya sistemin doğrusal olmayan davranış gösterdiği durumlarda dinamik hareket denklemine analitik çözüm üretmek genelde olanaksızdır. Bu gibi problemler türevsel denklemlere sayısal çözüm üretmekte kullanılan zaman tanım alanında integrasyon yöntemleriyle irdelenebilir.

Bu çalışmada, bina türü yapıların deprem hesabında kullanılan yöntemlerden biri olan zaman tanım alanında hesap yöntemleri kapsamında dinamik hareket denklemine sayısal çözüm üretmek için kullanılan farklı integrasyon yöntemlerinin, yapıların dinamik yükler etkisinde göstereceği davranışa etkisi incelenmiştir. Söz konusu integrasyon yöntemlerinin bilgisayar ortamında kurulmuş algoritmalar yardımı ile tek serbestlik dereceli bir sistemin dinamik davranışına etkisi analitik olarak belirlenmiştir. Buna ek olarak yapı mekaniği ve deprem araştırma laboratuvarında küçük ölçekli deney mekanizmasında, küçük ölçekli çelik numuneler üzerinde, belirlenen yüklemeler etkisinde zaman tanım alanında hesap yapılarak elde edilen dinamik davranış, analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Zaman tanım alanında integrasyon şemalarının eşdeğer dinamik analize etkisine ek olarak, integrasyon işlemi esnasında göz önüne alınan zaman adım aralığı değerlerinin etkisi, bu tez çalışmasında araştırılan bir diğer konudur. Hem sayısal incelemelerde, hem deneysel incelemelerde, yapı modelinin farklı yükleme çeşitleri altında, farklı zaman adım aralığı değerleri için analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar sayesinde eşdeğer dinamik analiz algoritması için en uygun zaman adım aralığı değerinin tespit edilip kullanıcılara önerilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Çok serbestlik dereceli yapı sistemlerinin geçici etkiler altındaki hareket denklemleri, zaman adımlı yöntemler kullanılarak, atalet ve sönümün etkileri de dahil edilerek statik denge denklemleri gibi çözülebilir. Fakat bu yöntem modal ve spektral yöntemlere göre daha fazla çözüm kaynağı gerektirmektedir. Deprem etkisine maruz kalan yapılar genellikle elastik olmayan şekil değiştirmeler ve yer değiştirmeler yapar. Bu yer değiştirmeler göreceli olarak da oldukça büyük olduğu için geometriye bağlı lineer olmayan davranışlar da beklenir. Lineer ve elastik olmayan yapı sistemleri sürekli olarak değişen geçici çözüm karakteri gösterirler. Bunun sebebi sürekli olarak değişen rijitlik ve buna bağlı olarak değişen titreşim periyotlarıdır.

Yapının doğrusal olmayan davranışının zamana göre değişimini hesaplayabilmek için, dinamik denge denkleminin doğrudan integrasyonunun yapılması gerekmektedir. Literatürde birçok sayısal integrasyon yöntemi bulunmaktadır. Bu çalışmada literatürde

bulunan farklı sayısal integrasyon yöntemlerinin, değişik yükleme durumlarında, farklı zaman adım aralığı değerleri kullanılarak analitik ve deneysel çalışmalara etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

DİNAMİK DAVRANIŞ İNCELEME YÖNTEMLERİ

2.1 Deprem

Depreme dayanıklı yapı tasarımı düşüncesinin yapı tarihi kadar eski olduğu, her depremden sonra araştırmacıların çalışmalarını bu konu üzerinde yoğunlaştırdığı ve bu tür yapıların tasarımındaki temel ilkelerin dünyanın her yerinde benzer olduğu görülmektedir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007 **(DBYBHY 2007)**' ye göre yeni yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımının ana ilkesi; hafif şiddetli depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasarın sınırlanmasıdır [15].

Bir yapının deprem etkisindeki davranışı depremin özelliklerine, yapının inşa edildiği alanın tektonik, geoteknik, jeolojik, jeofizik, jeodezik özelliklerine ve yapının özelliklerine bağlıdır. Bu sebeple, oluşacak bir deprem etkisinde yapı davranışının belirlenmesinde bu üç durumun ve karşılıklı etkileşimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bunlardan birinin bilinmemesi durumunda depreme dayanıklı yapı inşa etmenin zor olacağı, bu dayanımın ancak yönetmeliklerde öngörülen şartlar ile sağlanacağı açıktır.

Dünyanın oluşumundan beri sismik açıdan aktif bulunan bölgelerde depremlerin ardışık bir şekilde meydana geldiği ve sonucunda da milyonlarca insanın öldüğü, yerleşim alanlarının ciddi hasar gördüğü hatta yok olduğu bilinmektedir. Ülkemiz dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Deprem bölgeleri haritasına göre ülkemizin %92' sinin deprem riski bünyesinde bulunduğu ve nüfusumuzun %95' inin bu bölgelerde yaşadığı, büyük sanayi merkezlerimizin %98' inin

ve barajlarımızın %93' ünün deprem bölgelerinde olduğu bilinmektedir.

Yer kabuğu içindeki kırılmalar sebebiyle aniden ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsması olayına deprem denir. Deprem hareketi genel olarak yatay ve düşey olmak üzere ikiye ayrılır. Yatay hareket de biri doğu-batı, diğeri kuzey-güney şeklinde iki bileşene ayrılır. Deprem hareketi ilkel hareket ve asıl hareket olmak üzere ikiye ayrılabilir. Deprem hareketinin "P" dalgası (basınç-çekme dalgası) ile "S" dalgasının (kayma dalgası) başlangıcı arasındaki safhasına ilkel hareket denir. "S" dalgası başlangıcından sonraki kısma ise asıl hareket adı verilir. Asıl hareket "S" dalgaları ve yüzey dalgalarından ibarettir ve yapılar bu hareket sırasında hasar görmektedirler.

Son yıllarda inşaat mühendisliğinde olan önemli gelişmelerden biri, yapıların deprem yükleri altındaki davranışlarının tahmin edilmesi konusunda yapılan çalışmalardır. Depremde hasar gören veya yıkılan yapıların ilk olarak ne zaman, ne oranda ve ne zamana kadar hasar gördüğünün araştırılması için mevcut sismik kod ve yönetmeliklerde çeşitli yöntemler önerilmektedir. Artık mevcut bir yapının gözlenmiş davranışından geri gidilerek tasarım depremine karşı ne şekilde cevap vereceği belirlenebilmektedir. Davranışın önceden belirlenmesi, bir anlamda mevcut bir yapının deprem güvenliğinin belirlenebileceği anlamına gelir. Davranışın bir deprem sonrasında belirlenmesi ise hasarın nedeninin proje hatası veya imalat hatasının hangisinden dolayı gerçekleştiğini gösterir. Saha incelemeleri, depremlerin yapılar üstündeki etkilerin değerlendirilmesindeki en gerçekçi yöntemdir. Ancak her deprem kaydının, yapının, zemin koşulları vb. özelliklerin incelenen duruma özel olması nedeniyle elde edilen sonuçlar kısıtlı olmaktadır [16]. Deprem sonrası yapı davranışı hakkında inceleme yapmak için, depremin özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Depremin meydana geliş zamanı, yeri, odak derinliği, büyüklüğü gibi bilgileri, deprem araştırma merkezleri tarafından belirlenir. Saha incelemeleri kapsamında ilgili ekiplerce hazırlanan raporlar, deprem araştırma enstitüleri ve merkezleri tarafından kaydedilen depremin mühendislik özelliklerinin ve sahada edinilen gözlemlerin, yapısal bulguların incelenmesini, değerlendirilmesini kapsar. Araştırılan sahada depremin etkileri incelenmeden önce, bölgenin sismik ve geoteknik özellikleri ile ilgili bilgiler edinilir. Bölgede ve çevresinde bulunan fay hatları, yörede meydana gelmiş, geçmiş

depremlerle ilgili bilgiler toplanır. Sahada araştırma yapılırken arazide yer alan zemin türleri incelenir. Depremin arazide oluşturduğu etkiler, stabilite kayıpları (zeminde çatlama, ayrılma, eğimli arazilerde heyelan vb.) gözlemlenir ve yorumlanır. Daha sonra bölgedeki yapılara ait özellikler incelenir, yapının bulunduğu saha ile olan bağlantısı, uygunluğu, temel sistemleri, malzeme türleri gibi özelliklerinin yanı sıra depremin yapıda oluşturduğu hasarlar tespit edilir. Bu hasarlara, arazinin ve yapının özelliklerine göre göçme, kayma çatlağı, oturma çatlağı, zemin hareketi sonucu oluşan çatlaklar şeklinde örnekler verilebilir.

Depreme ait mühendislik özellikleri deprem kayıt istasyonlarından elde edilen kayıtlar yardımı ile belirlenebilir. Ana hareket ve artçı depremlerle ile ilgili en büyük ivme değerleri bu kayıtlardan öğrenilir. Yine en büyük hız ve yer değiştirme değerleri, kaydın hangi bileşeninde ortaya çıktığı bilgileri de elde edilebilir. Yer hareketine ait ivme spektrumu elde edilir ve tasarım deprem ivme spektrumu ile karşılaştırılır.

Çalışmalar kapsamında depremin etkidiği bölgelerdeki binaların davranışını öğrenebilmek için binalar incelenir. Yapılar türlerine göre farklı şekillerde incelenir. Betonarme binalar için beton, donatı çeliği özellikleri, taşıyıcı sistem tipi gibi özelliklere bağlı olarak gözlemlenen hasarlar hakkında değerlendirmeler yapılır. Yığma binalar varsa, temelleri, malzeme tipi (taş, kerpiç vb.), kat sayısı, malzeme diziliş biçimi, elemanların bağlantı şekilleri, malzeme boyutları, bağlayıcı malzemeler gibi parametreler binanın davranışında etkili olur [17].

Saha incelemeleri, yapıların dinamik yükler etkisindeki davranışını incelemek için kullanılan yöntemlerden biri olarak gösterilebilir. Saha incelemelerine ek olarak matematiksel modellemeler ve laboratuvar testleri, yapıların deprem davranışını öğrenmede kullanılan diğer yöntemlerdir.

2.2 Dinamik Hesap Yöntemleri

Deprem hareketleri yapıyı tabanından etkileyen, yapıda eylemsizlik kuvvetlerinin oluşmasına yol açan ani, ivmeli titreşim hareketleridir. Deprem etkileri, işletme yükleri sonucu doğan zorlanmalara kıyasla daha yüksek mertebelere erişebilen karmaşık etkilerdir. Ülkemizde, yapının belirli bir yer hareketinde sergileyeceği modal mukabelelerin bulunarak bunların belirli bir şekilde süperpoze edilmesi ile yapılan

hesapların tümü “Dinamik Hesap” olarak adlandırılmaktadır. Söz konusu mukabelelerin belirlenmesi için sismik kod ve/veya yönetmeliklerde önerilen hesap yöntemlerinde, malzeme ve yapı modellerine vb. kabullere göre elde edilen sonuçlarda önemli farklılıklar olabilmektedir. DBYBHY 2007’ ye göre dinamik hesap yöntemleri, doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan hesap yöntemleri şeklinde iki kısıma ayrılmıştır.

2.2.1 Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleri

Doğrusal elastik hesap yöntemi ifadesinde taşıyıcı sistemin tam olarak doğrusal bir şekilde davrandığı kabulünü yapmak çok doğru değildir. Mevcut tasarım şartnamelerine göre yeni yapılacak binalarda, doğrusal olmayan davranışla oluşacak yatay yük kapasite artımı, dayanım fazlalığı, süneklik istemi, taşıyıcı sistem davranış katsayısı “*R*” ve deprem yükü azaltma katsayısı “R_a” ile dikkate alınır. Mevcut binalar için doğrusal elastik değerlendirmede ise doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler dikkate alınarak mevcut kesitlerin gerekli yer ve şekil değiştirme istemlerini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilir.

Deprem Yönetmeliğinde tasarım aşamasında deprem etkilerinin doğrusal elastik hesabı için üç yöntem önerilmektedir. Bunlar; Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi, Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemidir. Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi yarı dinamik hesaba dayalı tek modlu çözümü içerir. Modal tepkilerin eş zamanlı olarak toplanması yoluyla yapılan hesap ise Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemidir. Modal tepkilerin en büyük değerlerinin (spektral değerler) belirli bir yöntemle birleştirilmesi ile gerçekleştirilen hesap ise Mod Birleştirme Yöntemidir.

2.2.2 Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemleri

Elastik deprem yükleri, taşıyıcı sistemin doğrusal elastik davranması ve sistemde etkiyen yükler altında hiçbir hasarın oluşmaması durumunda oluşabilecek yüklerdir. Böylelikle şiddetli bir depremde meydana gelecek elastik deprem kuvvetleri, çok büyük değerlere erişecektir ve bu kuvvet değerleriyle hesap yapmak ekonomik bir tasarım açısından sıkıntılı bir durum doğuracaktır. Bu sebeple, yeni yapılacak binaların tasarımında can güvenliği sağlanacak şekilde belirli oranda hasara izin verilir. Yani,

taşıyıcı sistem elemanları doğrusal olmayan biçimde davranış gösterebilecek şekilde tasarlanır [18].

Deprem etkisi altında mevcut binaların yapısal performanslarının belirlenmesi ve güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanmasıdır. Daha sonra bu istem büyüklükleri, deprem yönetmeliğinde tanımlanmış olan şekil değiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesi yapılır.

Bu yöntemde taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışı daha gerçekçi biçimde ele alınır. Buna karşılık yöntemin uygulanmasında taşıyıcı sisteme ait daha çok parametreye ihtiyaç duyulur. Bu durumda özellikle mevcut binalar için bazı durumlarda çözülmesi zor olan belirsizlikler ortaya çıkabilir. Doğrusal yönteme göre çözüm taşıyıcı sistemin düzensizliğinden daha çok etkilenir. Tahmin edilebileceği gibi, elde edilecek sonuç ne kadar çok kabulle ortaya çıkıyorsa, güvenilirliği de o mertebede daha az olacaktır [19].

Bu yöntemde şekil değiştirme ve yer değiştirmeye dayalı değerlendirme gerçekleştirilir ve belirli bir deprem yükü dağılımı için binadaki yer değiştirme talebine ulaşıldığında binanın beklenen performansının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Doğrusal elastik olmayan analizin DBYBHY 2007 kapsamında, Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi, Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi olmak üzere üç farklı uygulaması mevcuttur. Artımsal Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ile Artımsal Mod Birleştirme Yöntemi, doğrusal olmayan deprem performansının değerlendirilmesi ve güçlendirme hesapları için temel alınan Artımsal İtme Analizinde kullanılan yöntemlerdir. Artımsal itme analizinden önce kütlelerle uyumlu düşey yüklerin dikkate alındığı bir doğrusal olmayan statik analiz yapılır. Bu analiz sonuçları artımsal itme analizinin başlangıç koşulları olarak alınır. Artımsal itme analizi, artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi ile yapılırsa, eksenleri “modal yer değiştirme-modal ivme” olarak belirtilen, birinci moda ait modal kapasite diyagramı elde edilir. Bu diyagramla, elastik davranış spektrumu ve farklı aşılma olasılıkları için bu spektrum üzerinde yapılan değişiklikler göz önüne alınarak, birinci moda ait modal yer değiştirme

istemi belirlenir, ardından modal yer değiştirme istemine karşı gelen yer değiştirme, plastik şekil değiştirme ve iç kuvvet istemleri hesaplanır.

Artımsal itme analizi, artımsal mod birleştirme ile yapılırsa, bütün modlara ait modal kapasite diyagramları ile birlikte modal yer değiştirme istemleri de elde edilir, bunlara bağlı olarak taşıyıcı sistemde meydana gelen yer değiştirme, plastik şekil değiştirme ve iç kuvvet istemleri hesaplanır.

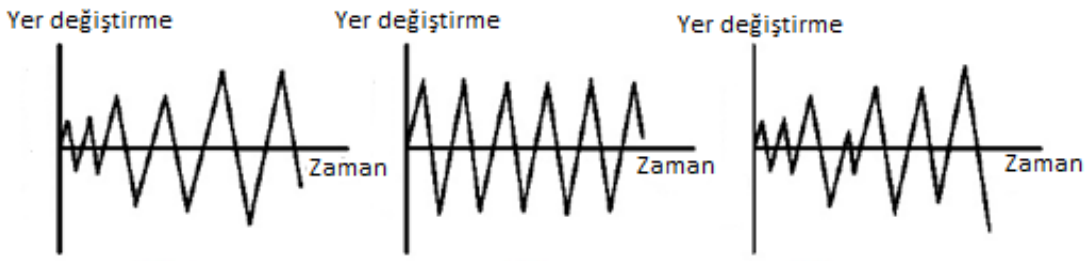
2.3 Deneysel İncelemeler

Laboratuvar testleri yapıların deprem davranışlarının ve kapasitelerinin belirlenmesindeki en etkili yöntemdir. Saha incelemelerinin aksine araştırmacının incelemek istediği yapı tipinde ve deprem senaryosunda tam bir kontrolü vardır. Ayrıca laboratuvar testlerinde malzeme ve geometrik davranışına ait ön kabuller yapılmadığından elde edilen sonuçlar analitik modellemeye göre daha gerçekçi olmaktadır.

Yapıların deprem davranışlarının ve performanslarının belirlenmesinde kullanılan üç ana laboratuvar test yöntemi: quasi statik testler, eşdeğer dinamik testler ve sarsma tablası testleridir.

2.3.1 Quasi Statik Testler

Quasi - statik testler ekonomikliği ve basitliği nedeniyle özellikle gerçek ölçekli yapıların incelenmesinde en çok kullanılan yöntemdir. Ancak bu yöntemde yapının dinamik davranışı göz ardı edilir ve yapının daha önceden belirlenmiş bir yük veya yer değiştirme profilini gerçekleştirilmesi sağlanır. Uygulanan yük veya yer değiştirme, düşük hızlarda etkitilir. Yöntemde ivmeye bağlı atalet kuvvetleri ile hıza bağlı sönüm etkileri ihmal edilir. Bu şekilde yapının kapasitesine ait bazı bilgiler elde edilebilse de, deprem istemi ile ilişkilendirilmesi deneyden sonra analitik olarak yapılır. Şekil 2. 1’ de quasi statik testte kullanılabilen değişken, sabit ve karma yer değiştirme büyüklüğüne sahip farklı tipteki yer değiştirme profilleri verilmiştir [20].



Şekil 2. 1 Farklı türde yer değiştirme profilleri [20]

2.3.2 Eşdeğer Dinamik Testler

Eşdeğer dinamik test tekniği, numunelerin deprem etkisindeki davranışını belirlemek için, bağlantılı olarak gerçekleştirilen deneysel ve sayısal analizi kapsamaktadır. Eşdeğer dinamik testlerde hem yapının kapasitesine hem de deprem istemine ait bilgiler test sırasında elde edilir. Ana prensip olarak, denklem adım adım integrasyon yöntemi ile çözülür. Simülasyon gerçek zamanlı olmayan düşük hızlarda gerçekleştirilir ve numune üzerinde hasar oluşumu ve gelişimi izlenebilmektedir. Her zaman adımında yapının fiziksel testinden elde edilen reaksiyon kuvvetleri bir bilgisayar modelinde yapının atalet ve sönüm etkileri ile matematiksel olarak birleştirilir ve depremin bir sonraki zaman adımında yapıdan istediği yer değiştirme değerleri belirlenir. Bu yer değiştirme değerlerinin fiziksel yapıya etki ettirilmesi ile test devam eder.

Analiz sırasında hareket denkleminin çözümü için gereken atalet ve sönüm kuvvetleri analitik olarak modellenir. Herhangi bir zaman adımında yapısal tepkiyi hesapladıktan sonra, bilgisayar ortamından elektronik olarak aktüatör sistemine bu sonuç iletilir. Deneysel işlemde, aktüatör kontrol sistemi, hesaplanan yer değiştirmeyi uygular ve daha sonra geri çağırım kuvvetini (dengeleyici kuvvet) ölçer ve bilgisayar ortamındaki modele geri gönderir. Ölçülen veri ile bilgisayar modeli bir sonraki adımdaki tepkiyi hesaplayabilir. Bu geri dönüş işlemi ile doğrusal olmayan elastik ötesi dinamik tepki, sarsma tablası deney düzeneği olmadan hesaplanabilir.

Eşdeğer dinamik test yöntemleri 1970'li yıllardan itibaren araştırılmaya ve yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde kullanılmaya başlamıştır. Hem yapı kapasitesini, hem de deprem istemini ele almasından ve sarsma tablası deneylerine göre ekonomik ve güvenilir alternatif olmasından dolayı uzun yıllardır araştırmacıların

yoğun ilgisini çekmiş ve sıklıkla kullanılmıştır. Eşdeğer dinamik test yöntemlerine ait araştırmalar; hibrit, coğrafik olarak hibrit, sürekli ve gerçek zamanlı simülasyon gibi dallarda yoğun olarak sürmektedir [21].

2.3.3 Sarsma Tablası Testleri

Sarsma tablası en basit tanımıyla, bir, iki ya da üç boyutlu titreşim hareketlerini yapay olarak üreterek deprem hareketlerini taklit eden platformdur. Test edilecek bina modeli sarsma tablası üzerine yerleştirilir ve depreme maruz bırakılarak dinamik davranışı gözlemlenir. Sarsma tablası testleri hem yapıların kapasiteleri açısından hem de depremlerin istemleri açısından en güvenli sonuçları veren yöntemdir. Sarsma tablası testlerinde atalet etkileri iyi bir biçimde temsil edilir. Ancak özellikle çok serbestlik dereceli sarsma tablaları çok yüksek maliyetli yatırımlardır ve üzerlerindeki yapı ağırlığına ait kısıtlamalar sebebiyle genellikle ölçeklendirilmiş yapılara ait testler gerçekleştirilebilmektedir.

BÖLÜM 3

EŞDEĞER DİNAMİK TEST

Eşdeğer dinamik test tekniği Bölüm 2.3.2' de anlatıldığı gibi bir yapı modeline düşük hızlarda değişim gösteren kuvvetlerin uygulandığı bir tekniktir. Eşdeğer dinamik test kavramı Japonya' da, Takanashi tarafından ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra birçok araştırmacı yöntemi geliştirmiş ve uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Yöntemin temeli, her zaman adımında dinamik tepkinin deneysel altyapıdan elde edilen sonuçların kullanılması ile hesaplanmasıdır. Analiz esnasında, herhangi bir zaman adımında yapısal tepki bilgisayar ortamında hesaplanır. Dinamik hareket denge denkleminin çözümü için gerekli olan atalet ve sönüm kuvveti etkileri analitik olarak modellenir. Daha sonra bilgisayar ortamında hesaplanan yer değiştirme değeri, elektronik olarak aktüatör sistemine iletilir. Bu sistem de, hesaplanan yer değiştirme değerinin deney numunesine uygulanmasını sağlar, geri yükleme kuvveti ölçülür ve tekrar bilgisayar modeline gönderilir. Bu aşamadan sonra bilgisayar ortamında yeni yer değiştirme değeri hesaplanır ve işlemler tekrarlanır.

Dinamik dış kuvvet etkisinde doğrusal elastik davrandığı varsayılan bir sistemin yer değiştirmesini yöneten hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$Ma + Cv + Kx = R \tag{3.1}$$

Burada M kütle, C sönüm ve K rijitlik matrislerini temsil etmektedir. R ise uygulanan dış yük vektörünü ifade etmektedir. x, v ve a terimleri sırasıyla sistemin yer değiştirme, hız ve ivme vektörlerini belirtmektedir. Denklem herhangi bir "t" anı için şu şekilde de oluşturulabilir:

$$F_I(t) + F_D(t) + F_E(t) = R(t) \quad (3.2)$$

Burada $F_I(t) = Ma$; atalet kuvveti, $F_D(t) = Cv$; sönüm kuvveti ve $F_E(t) = Kx$ elastik direnç kuvvetleridir. Sözü edilen kuvvetler zamana bağlı olarak değişir. Uygulanan kuvvet veya yer ivmesinin rastgele değiştiği veya sistemin doğrusal davranmadığı durumlarda hareket denklemine analitik çözüm üretmek çok zordur. Bu tür problemler, diferansiyel denklemlere sayısal çözüm üretmek, zaman tanım alanında integrasyon şemalarının kullanılmasıyla araştırılabilir.

3.1 Zaman Tanım Alanında İntegrasyon Yöntemleri

Yapısal sistemlerin dinamik tepkisinin çözümüne en genel yaklaşım, dinamik hareket denge denkleminin sayısal integrasyonu şeklindedir. Çözümde başlangıç anından herhangi bir "t" anına kadar eşit küçük zaman adımları ile işlem yapılır. Δt, 2Δt, 3Δt,…..,t anlarında yaklaşık çözümler elde etmek için integrasyon şeması kullanılır. Literatürde bu konuyla ilgili sunulmuş birçok yöntem mevcuttur. Bu yaklaşımlar genelde kesin (explicit) veya kapalı (implicit) integrasyon yöntemleri şeklinde iki sınıfa ayrılabilir.

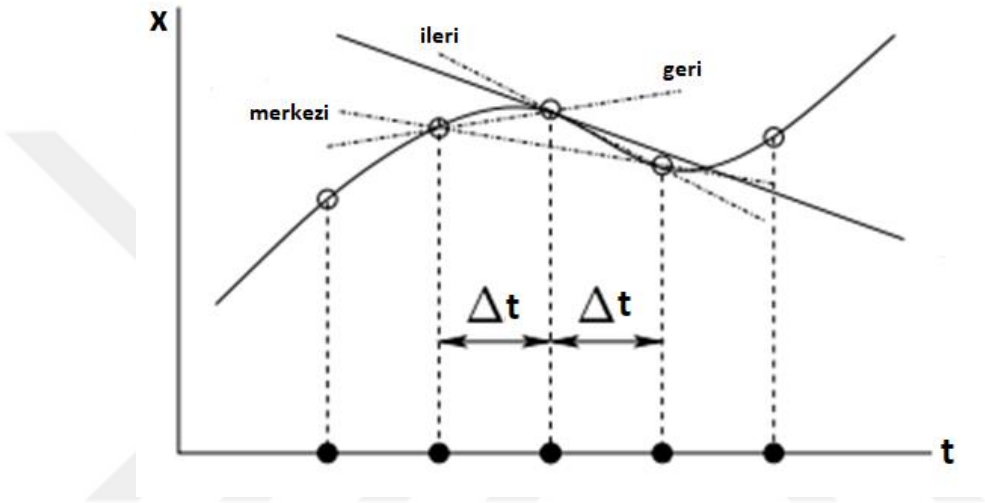
Kesin yöntemlerde herhangi bir "t+Δt" anındaki çözümü tahmin edebilmek için, "t" anındaki diferansiyel denklem kullanılır. Yani "t+Δt" anındaki çözüm için yalnız önceki adımlarda bulunmuş değerler kullanılır, daha sonraki adımlardaki değerlere ihtiyaç duyulmaz. Yapısında rijit elemanlar olan gerçek yapılarda kararlı bir çözüm elde edebilmek için çok küçük zaman adımlarına ihtiyaç vardır. Tüm kesin (explicit) yöntemler zaman adımının boyutuna göre koşullu kararlıdır.

Kapalı yöntemlerde herhangi bir t+Δt anındaki çözüm için yine t+Δt anındaki hareket koşulu kullanılır. Yani bir andaki tepkinin bulunması için o ana ait değişkenlerin bilinmesi gereklidir. Bu yöntemler Δt zaman aralığına göre koşullu veya koşulsuz kararlı olabilir. Bu tez çalışması kapsamında eşdeğer dinamik analizde kullanılabilen iki farklı zaman integrasyon şeması algoritması anlatılmıştır. Bunlar; Merkezi Farklar Yöntemi ve α-Operator Splitting (α-OS) Yöntemidir.

3.1.1 Merkezi Farklar Yöntemi

Kısmi diferansiyel denklemlerde yer alan türevlerin sayısal hesabı için yaklaşık formda yazılması gerekir. Bu tip ayrıklaştırma işlemlerine genel olarak sonlu fark formülasyonu adı verilir. Sonlu fark formülasyonları çoğu zaman Taylor seri açılımına dayanılarak yapılır. Bunun yanında polinomlar yardımıyla da ayrıklaştırma yapılabilir.

Sonlu fark formülasyonları, ileri fark, geri fark ve merkezi farklar yöntemi olmak üzere farklı biçimlerde oluşturulabilir (Şekil 3. 1).



Şekil 3. 1 Sonlu Farklar Yöntemine geometrik bakış [22]

Merkezi Farklar Yöntemi ile integrasyon işlemi, yapı hareket denklemi hız ve ivme terimlerinin sonlu farklar kullanılarak yaklaşık olarak hesap edilmesi işlemine dayanır. Sabit zaman aralıkları kullanılarak "t" anındaki hız merkezi fark ifadesi "t+Δt" ve "t-Δt" zamanlarındaki yer değiştirme değerlerine bağlı olarak hesaplanır:

$$v_t = \frac{(-x_{t-\Delta t} + x_{t+\Delta t})}{2\Delta t} \tag{3.3}$$

Bir "t" anındaki ivme değeri ise:

$$a_t = \frac{(x_{t-\Delta t} - 2x_t + x_{t+\Delta t})}{(\Delta t)^2} \tag{3.4}$$

şeklinde hesaplanır. "t+Δt" zamanındaki yer değiştirmeyi hesaplamak için "t" anındaki hareket denklemi,

$$Ma_t + Cv_t + Kx_t = R_t \tag{3.5}$$

şeklinde düzenlenebilir. Yukarıda, (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile tanımlanan, herhangi bir andaki hız ve ivme terimleri, o ana ait hareket denklemi (3.5)' te yerlerine yerleştirilirse;

$$\left(\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t}\right) x_{t+\Delta t} = R_t - \left(K - \frac{2M}{\Delta t^2}\right) x_t - \left(\frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t}\right) x_{t-\Delta t} \tag{3.6}$$

elde edilir ve (3.6) eşitliği ile $x_{\mathrm{t+\Delta t}}$ terimi hesaplanabilir. Bu şekilde "t" anındaki hareket denklemi kullanılarak $x_{t+\Delta t}$ terimi hesaplanabildiği için yöntem dışa dönük bir yöntemdir. Diğer yandan $x_{\mathrm{t+\Delta t}}$ hesabı için x_{t} ve $x_{\mathrm{t-\Delta t}}$ terimlerinin bilinmelerinin gerekli olduğu denklemden anlaşılmaktadır. Bu yüzden, örneğin Δt anındaki yer değiştirme teriminin hesaplanabilmesi için x_0, v_0 başlangıç terimlerinin bilindiği varsayılmakta, a_0 teriminin ise t=0 anındaki bilinen hız ve yer değiştirme terimlerine bağlı olarak dinamik denge denkleminden hesaplanabildiği bilinmektedir. Başlangıç anından (t=0), Δt kadar sonraki andaki yer değiştirmeyi hesaplamak için (3.6) eşitliğinden görüleceği gibi $x_{\mathrm{-\Delta t}}$ terimine ihtiyaç vardır. Denklem (3.3) ile (3.4)' te, t yerine sıfır yazıldığı zaman:

$$a_0 = \frac{(x_{-\Delta t} - 2x_0 + x_{\Delta t})}{(\Delta t)^2} \tag{3.7}$$

ve

$$v_0 = \frac{(-x_{-\Delta t} + x_{\Delta t})}{2\Delta t} \tag{3.8}$$

terimleri elde edilir. Buradan her iki denklem düzenlenip Δt anındaki yer değiştirmeler yazılırsa:

$$x_{\Delta t} = a_0(\Delta t)^2 - x_{-\Delta t} + 2x_0 \tag{3.9}$$

ile

$$x_{\Delta t} = 2v_0\Delta t + x_{-\Delta t} \tag{3.10}$$

eşitlikleri elde edilir. Bu iki denklemden de $x_{\mathrm{-\Delta t}}$ terimi çekilirse:

$$x_{-\Delta t} = a_0 \frac{\Delta t^2}{2} - v_0 \Delta t + x_0 \tag{3.11}$$

şeklinde elde edilir. (3.6) eşitliği aşağıdaki forma dönüştürülebilir:

$$\widehat{K} x_{t+\Delta t} = \hat{R}_t \tag{3.12}$$

Burada,

$$\widehat{K} = \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t} \tag{3.13}$$

$$\hat{R}_t = R_t - \left(\frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t}\right) x_{t-\Delta t} - \left(K - \frac{2M}{\Delta t^2}\right) x_t \tag{3.14}$$

şeklindedir. Daha sonra aranan $x_{t+\Delta t}$ değeri,

$$x_{t+\Delta t} = \frac{\hat{R}_t}{\widehat{K}} \tag{3.15}$$

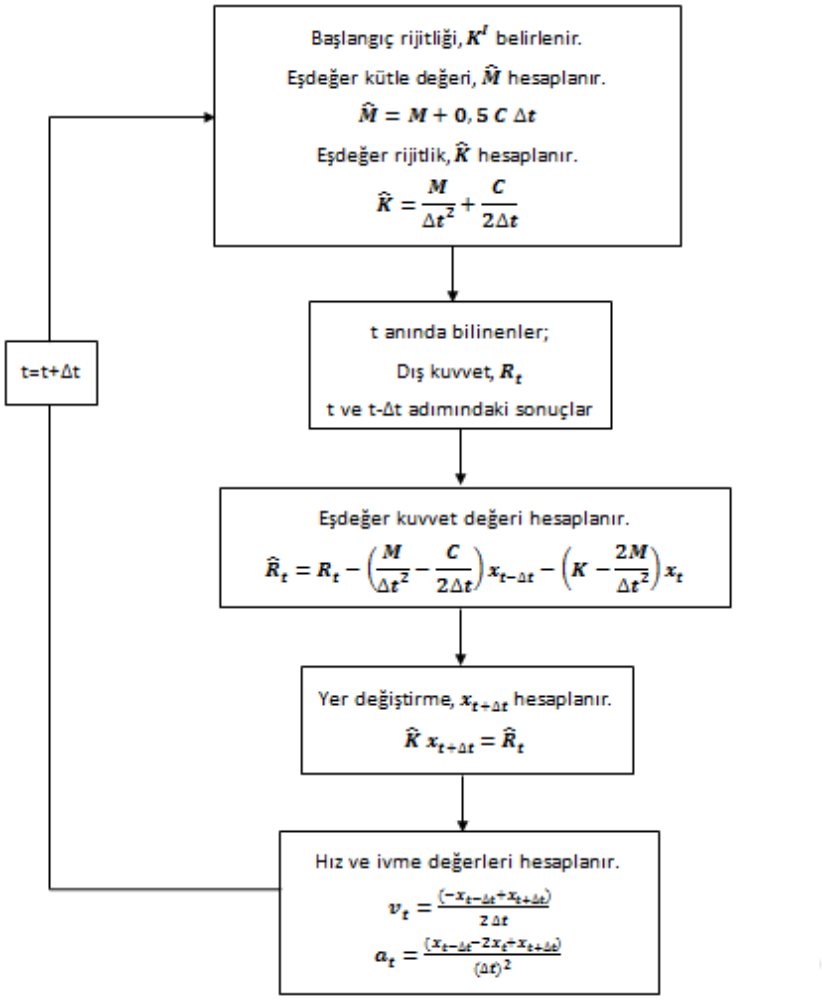
şeklinde hesaplanır. Burada $\widehat{K}$ eşdeğer rijitlik katsayısı, $\hat{R}_t$ ise eşdeğer kuvvet olarak isimlendirilebilir.

Merkezi farklar yönteminde kararlılık için Δt zaman aralığının yeterince küçük seçilmesi gerekmektedir. Yöntem koşullu olarak kararlıdır, gerekli şart aşağıdaki gibidir [23], [24].

$$\frac{\Delta t}{T_n} < \frac{1}{\pi} \tag{3.16}$$

Konu ile ilgili gerçekleştirilen analizlerde doğru bir çözüm için, genel olarak $\boldsymbol{\Delta t / T_n \leq 0.1}$ şeklinde alınır. Hatta deprem ivme kayıtları ile yapılan çalışmalarda, yer ivme kayıtlarının doğru tanımlanabilmesi için zaman adım aralığı değeri $\boldsymbol{\Delta t}$, 0.01~0.02 saniye dolaylarında alınır.

Merkezi Farklar Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde izlenecek olan hesap algoritmasının akış şeması, Şekil 3. 2' de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Merkezi Farklar Yöntemi eşdeğer dinamik analiz algoritması

3.1.2 Alpha Operator-Splitting (α-OS) Yöntemi

Merkezi Farklar Yöntemi, eşdeğer dinamik analizde yaygın olarak kullanılan, kesin bir yöntemdir. Ancak yöntemin koşullu kararlı olduğu ve koşulunun (3.16) ile verildiği açıklanmıştı. Birden fazla serbestlik derecesi içeren yapı modellerinin deneysel çalışması sırasında, dinamik etki ile yapı modelinin yalnızca en büyük titreşim periyodu ile ilişkili olan modları aktifleşebilir. Bu durumda, kesin bir yöntem ile gerçekleştirilen analizlerde, küçük periyotlu titreşim modlarının dinamik harekete katkısı konusunda stabilite sorunları ortaya çıkar ve kapalı bir yöntemin kullanılması uygun olur. Bunun için eşdeğer dinamik analizde, her zaman adımında döngüsel bir işlem gerçekleştirilen, iterasyonlu, örtük bir integrasyon şeması kullanılabilir. Bunun yanında iterasyon işlemi gerektirmeyen, doğrusal olarak örtük, doğrusal olmayan biçimde belirtik bir yöntem

olan Alpha Operator-Splitting Yönteminin kullanılması, ikinci bir seçenek olarak verilebilir.

Alpha OS Yöntemi, uygulamanın basitliğinin korunduğu, zaman adım aralığı değeri arttırıldıkça kararlılığını koruyan bir integrasyon yöntemidir.

Yöntemin algoritması incelendiğinde, (3.5) eşitliği ile verilen dinamik hareket denge denkleminin her bir adımdaki çözümünde yer değiştirme istemini bulabilmek için bir önceki adımdaki değerler kullanılır. Yapısal tepkinin hesaplanacağı süre, eşit Δt zaman adımı aralıklarına bölünür. Herhangi bir zaman seviyesinden bir sonraki zaman adımında oluşacak yer değiştirme ve hız değerleri için tahmini bir değer hesaplanır. Bu beklenen değerler:

$$\tilde{x}_{t+\Delta t} = x_t + \Delta t\, v_t + \frac{\Delta t^2}{2}(1-2\beta)a_t \tag{3.17}$$

ve

$$\tilde{v}_{t+\Delta t} = v_t + \Delta t(1-\gamma)a_t \tag{3.18}$$

şeklinde hesaplanır. Bu öngörme işleminden sonra bir düzeltme işlemi yapılır ve sistemde oluşacak yer değiştirme ve hız değerleri sırasıyla (3.19) ve (3.20) eşitlikleri ile hesaplanır.

$$x_{t+\Delta t} = \tilde{x}_{t+\Delta t} + \Delta t^2 \beta\, a_{t+\Delta t} \tag{3.19}$$

$$v_{t+\Delta t} = \tilde{v}_{t+\Delta t} + \Delta t\, \gamma\, a_{t+\Delta t} \tag{3.20}$$

Yöntemde hareket denklemi,

$$M\, a_{t+\Delta t} + (1+\alpha)\, C v_{t+\Delta t} - \alpha\, C\, v_t + (1+\alpha)\, r_{t+\Delta t} - \alpha\, r_t = (1+\alpha) R_{t+\Delta t} - \alpha\, R_t \tag{3.21}$$

şeklinde α parametresine bağlı olarak verilmektedir. Burada yönteme ait iki adet parametre bulunmaktadır. β ve γ parametreleri sırasıyla (3.22) ve (3.23) eşitlikleri ile hesaplanır.

$$\beta = (1+\alpha)^2/4 \tag{3.22}$$

$$\gamma = (1 + 2\alpha)/2 \tag{3.23}$$

α katsayısı yöntemde sayısal sönümün ayarlanmasında kullanılan bir parametredir. Eğer $\alpha = 0$ değerini alırsa, integrasyon şeması, prensipte iterasyonlu bir işlem süreci gerektiren, bilinen kapalı β-Newmark zaman integrasyon şemasına dönüşür. Bununla birlikte, bu yöntemi iterasyon işlemine ihtiyaç duyulmadan uygulamak mümkündür. Bu yöntem, dinamik tepkinin elastik kısmı için kapalı kalan şemanın kararlılığını korur ancak, tepkinin doğrusal olmayan kısmı için kesin iterasyon gerektirmez. Yöntemde dengeleyici kuvvet, $r_{t+\Delta t}$'in (3.24)' te verilen yaklaşıklıkla hesaplanacağı belirtilir.

$$r_{t+\Delta t}(x_{t+\Delta t}) \approx K^I(x_{t+\Delta t} - \tilde{x}_{t+\Delta t}) + \tilde{r}_{t+\Delta t}(\tilde{x}_{t+\Delta t}) \tag{3.24}$$

Bu integrasyon şeması koşulsuz kararlı bir yöntemdir. Bu yüzden Δt zaman adım aralığı, bir kararlılık koşuluna ihtiyaç duyulmadan keyfi bir biçimde seçilebilir. (3.24) eşitliğinde $K^I(x_{t+\Delta t} - \tilde{x}_{t+\Delta t})$ ifadesi iki terimin çarpımını, $\tilde{r}_{t+\Delta t}(\tilde{x}_{t+\Delta t})$ terimi ise bir fonksiyonu ifade etmektedir.

(3.24) ile verilen yaklaşım ve (3.17), (3.18), (3.19) ve (3.20) eşitlikleri, (3.21) eşitliğinde yerine yerleştirilerek, (3.25) eşitliği ile $a_{t+\Delta t}$ ivme değeri elde edilir.

$$\widehat{M}\, a_{t+\Delta t} = \hat{R}_{t+\Delta t} \tag{3.25}$$

Burada;

$$\widehat{M} = M + \gamma\, \Delta t\, (1 - \alpha)\, C + \beta\, \Delta t^2 (1 - \alpha) K^I \tag{3.26}$$

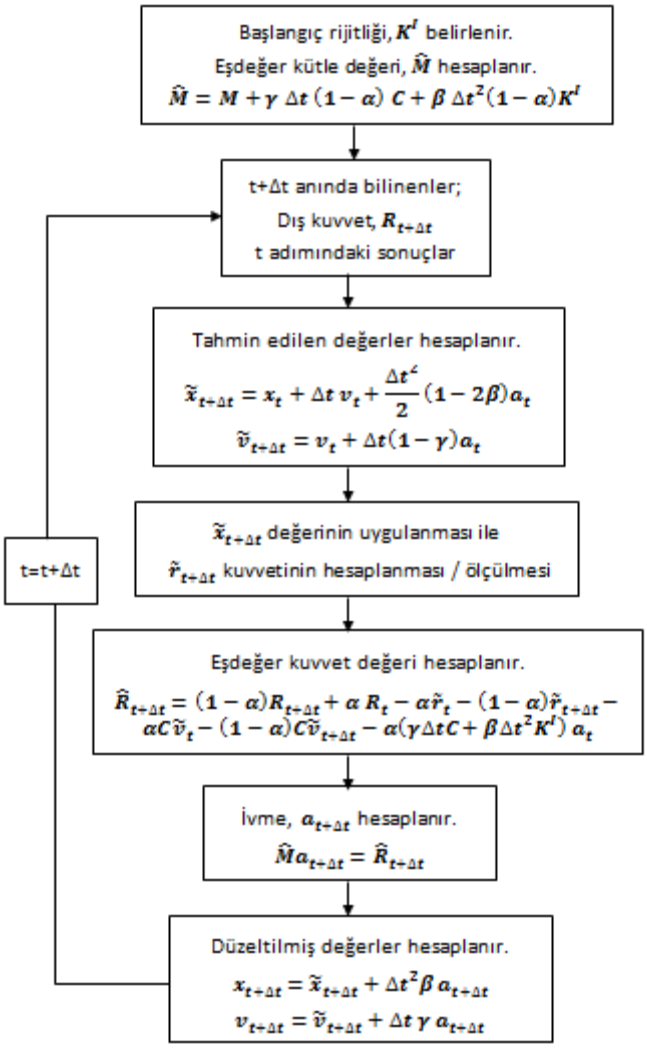
ve

$$\begin{aligned}\hat{R}_{t+\Delta t} = {} & (1 - \alpha) R_{t+\Delta t} + \alpha\, R_t - \alpha \tilde{r}_t - (1 - \alpha)\tilde{r}_{t+\Delta t} - \alpha C \tilde{v}_t - \\ & (1 - \alpha) C \tilde{v}_{t+\Delta t} - \alpha(\gamma \Delta t C + \beta \Delta t^2 K^I)\, a_t\end{aligned} \tag{3.27}$$

şeklinde hesaplanır. Eşdeğer dinamik test için yöntemin işlem adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Δt seçilir, (3.26) eşitliği ile $\widehat{M}$ eşdeğer kütlesi hesaplanır.
- t=0 anı için $\tilde{x}_0$, $x_0 = \tilde{x}_0$, v_0, a_0, $\tilde{r}_0$, R_0 başlangıç değerler belirlenir.
- $R_{t+\Delta t}$ dış kuvvet değeri girilir.
- Beklenen yer değiştirme $\tilde{x}_{t+\Delta t}$ ve hız $\tilde{v}_{t+\Delta t}$ değerleri, (3.17) ve (3.18) eşitlikleri yardımı ile hesaplanır.
- Hesaplanan $\tilde{x}_{t+\Delta t}$ değeri yapıya uygulanır.
- $\tilde{r}^m_{t+\Delta t}$ ve $\tilde{x}^m_{t+\Delta t}$ terimleri ölçülür.
- $\tilde{r}_{t+\Delta t} = \tilde{r}^m_{t+\Delta t} - K^I(\tilde{x}^m_{t+\Delta t} - \tilde{x}_{t+\Delta t})$ eşitliği ile beklenen dengeleyici kuvvet hesaplanır.
- Eşdeğer kuvvet, $\hat{R}_{t+\Delta t}$ terimi (3.27) eşitliği ile hesaplanır.
- (3.25) eşitliği çözülerek $a_{t+\Delta t}$ ivme değeri hesaplanır.
- (3.19) ve (3.20) eşitlikleri ile $x_{t+\Delta t}$ ve $v_{t+\Delta t}$ yer değiştirme ve hız değerleri hesaplanır.
- t=Δt yazılarak bir sonraki adıma geçilir ve işlemler tekrarlanır [25].

Yöntem, $x_{t+\Delta t}$ teriminin, $a_{t+\Delta t}$ ivmesine bağlı olarak hesaplandığı için kapalı bir yöntemdir. Alpha OS Yönteminin eşdeğer dinamik analizde takip edilen hesap algoritması, Şekil 3. 3' te verilmiştir.



Şekil 3. 3 Alpha-OS Yöntemi eşdeğer dinamik analiz algoritması

Çalışmalar kapsamında hem Merkezi Farklar Yöntemi hem de α-OS Yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde sönümsüz sistem göz önüne alınmıştır ($C = 0$).

BÖLÜM 4

SAYISAL İNCELEMELER

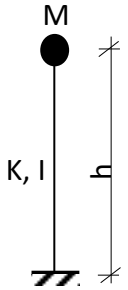
Bu bölümde tek serbestlik dereceli sistemlerin deprem davranışı, eşdeğer dinamik test yönteminde kullanılabilen ve Bölüm 3'te açıklanan Merkezi Farklar Yöntemi ile Alpha Operator-Splitting (α-OS) Yöntemi zaman integrasyon şemaları ile araştırılmıştır. İki farklı zaman integrasyon yönteminin, iki farklı yükleme çeşidinin ve farklı zaman adım aralığı değerlerinin sayısal çözümlere etkisi incelenip sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan sayısal incelemelerde araştırılan konulardan biri zaman adım aralığı değerlerinin eşdeğer dinamik analize olan etkisini inceleyip en uygun zaman adım aralığı değerini tespit edebilmektir. Bu sonucun deneysel inceleme için de, araştırmacılara en uygun değeri kullanmak adına fikir vereceği düşünülmüştür. Ayrıca aynı taşıyıcı sistemin, aynı yük etkisinde, aynı zaman adım aralığı değerleri için iki farklı integrasyon şeması ile dinamik analizleri yapılmış ve integrasyon şemalarının çözüme olan etkileri incelenmiştir.

4.1 Örnek Yapı Modeli

Yapılan sayısal incelemelerde, Bölüm 5' te anlatılan deneysel incelemelerde kullanılan çelik numunelerin geometrik boyutları ve malzeme özellikleri dikkate alınarak taşıyıcı sistem modeli oluşturulmuştur. Farklı incelemeler amacıyla, Şekil 4. 1' de verilen tek serbestlik dereceli, konsol kolon sistemini temsilen deneylerde farklı yüksekliklere sahip numuneler kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çelik numunelerin kesit boyutları 12 mm ^{x} 12 mm, 16 mm ^{x} 16 mm ve 20 mm ^{x} 20 mm dir. Bölüm 5' te anlatılan deney sonuçları ile karşılaştırabilmek için yapılan sayısal incelemelerde de deneylerde

kullanılan numunelerin geometrik özelliklerine uyum sağlanmıştır. Malzeme özelliği olarak, elastik bölgede yapılan analizler için çelik elastisite modülü, $E = 200000\ MPa$ alınmıştır.

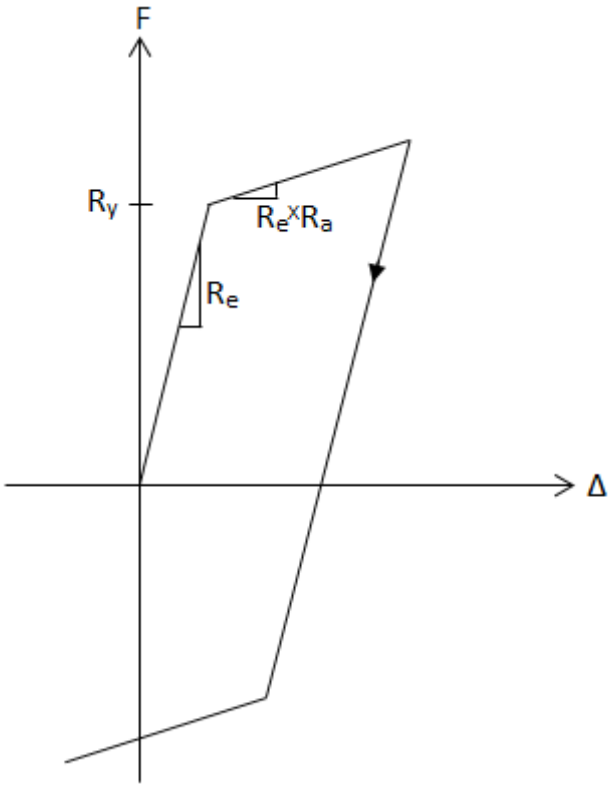


Şekil 4. 1 Sayısal incelemelerde kullanılan yapı modeli

4.2 Kabuller

Sayısal incelemeler tek serbestlik dereceli bir sistem üzerinde yapılmıştır. Taşıyıcı sistemin bir ucunda toplanmış kütle bulunduğu ve sönüm olmadığı kabul edilmiştir. Yapılan nümerik incelemelerde α-OS zaman integrasyon şemasında sönümü ayarlamakta kullanılan α parametresi α=0.05 olarak işleme alınmıştır. Bu kısımda iki farklı zaman integrasyon şeması, Merkezi Farklar Yöntemi ile α-OS Yöntemi, sabit yük için yedi farklı zaman adım aralığı ve deprem ivme kaydı etkisinde dört farklı zaman adım aralığı değeri ile MS Excel'de kurulmuş eşdeğer dinamik analiz algoritması kullanılarak elastik ve elastik ötesi bölgede sayısal incelemeler yapılmıştır. Zaman adım aralığı değerleri ise sabit yük ile gerçekleştirilen analizlerde Δt=0.001 s (T/200), Δt=0.002 s (T/100), Δt=0.004 s (T/50), Δt=0.01 s (T/20), Δt=0.02 s (T/10), Δt=0.04 s (T/5), Δt=0.1 s (T/2), deprem ivme kaydı ile yapılan analizlerde Δt=0.001 s (T/200), Δt=0.002 s (T/100), Δt=0.004 s (T/50), Δt=0.01 s (T/20) alınarak işlemler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan sayısal analizlerde sistemin elastik bölgedeki rijitliği, her yapı modeli için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Elastik ötesi bölgede yapılan analizler için ise iki doğrulu elasto plastik kinematik pekleşme özelliği gösteren malzeme modeli kullanılarak elastik ötesi rijitlik değerleri belirlenmiştir (Şekil 4. 2).



Şekil 4. 2 Kinematik pekleşmeli iki doğrulu elasto plastik malzeme modeli [19]

Modelde, malzeme elastik davranış sınırına ulaştığında akmaya başlar ve bu andan sonra, daha düşük bir rijitlikle pekleşmeye başlamakta ve plastik şekil değiştirmeler artmaktadır. Yükleme boşalması, elastik bölgedeki gerilme-birim şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi veren doğruya paralel biçimde gerçekleşir ve plastik deformasyonlar geri dönmez [19].

Sayısal incelemelerde tek serbestlik dereceli sistemler için MS Excel [26] programında geliştirilen eşdeğer dinamik analiz hesapları kullanılmıştır. Geliştirilen hesaplarla Denklem 4.1' deki dinamik hareket denklemi, α-OS ve Merkezi Farklar zaman integrasyon şemaları ile çözülmüştür.

$$\mathrm{Sys.M}\; a + \mathrm{Sys.C}\; v + \mathrm{Sys.K}\; x = F(t) \qquad (4.1)$$

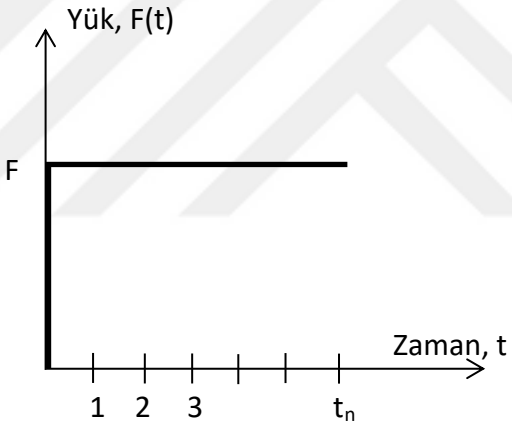
Burada $\mathrm{Sys.M}$, sistemin kütlesini, $\mathrm{Sys.C}$, sistemin sönümünü, $\mathrm{Sys.K}$, sistemin başlangıç rijitliğini temsil etmektedir.

Programdaki hesaplar tek serbestlik dereceli, doğrusal elastik ya da kinematik pekleşmeli bilineer elasto plastik sistemler için kullanılabilmektedir.

4.3 Yüklemeler

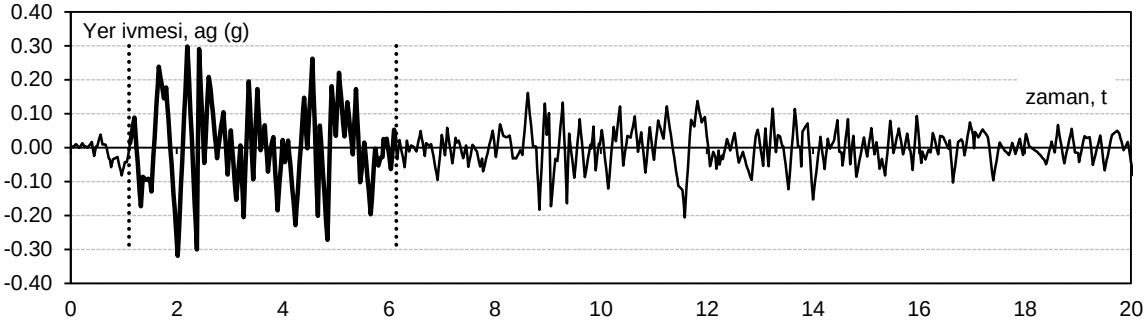
Yapılan incelemelerde, MS Excel [26]' de hazırlanan eşdeğer dinamik analiz algoritmalarında iki farklı yük etkisi göz önüne alınmıştır. Bunlar: anlık etkiyen sabit yük ve keyfi seçilmiş olan yer ivme kayıtlarıdır.

Elastik bölgede sabit yük etkisinde yapılan incelemeler, deneysel incelemelerde iki farklı grup altında çalışıldığı için sayısal analizlerde de iki grupta gerçekleştirilmiştir. İlk gruptaki inceleme, deneylerde yük hücrelerinin sağlıklı olarak çalışabileceği en alt sınır seviyelerine tekabül eden değerlerde (kapasitenin %1'i) gerçekleştirilmiştir. İkinci grup incelemelerde ise yük seviyeleri, deneysel incelemelerde olduğu gibi bir önceki grupta çalışılan yük seviyelerinin iki katına çıkarılmıştır. Birinci grup analizlerde anlık sabit yük F=180 N olarak alınmıştır. İkinci grup incelemelerde ise F=300 N olarak alınmıştır. Söz konusu anlık etkiyen sabit yük grafiği Şekil 4. 3' te gösterilmiştir.

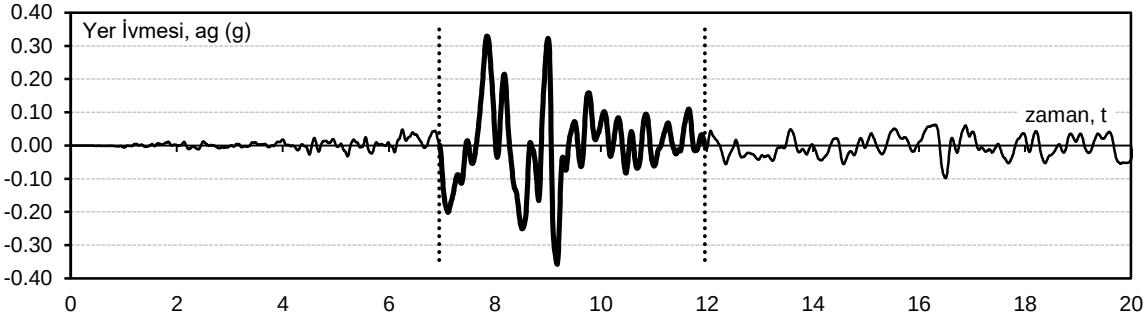


Şekil 4. 3 Anlık etkiyen sabit yük grafiği

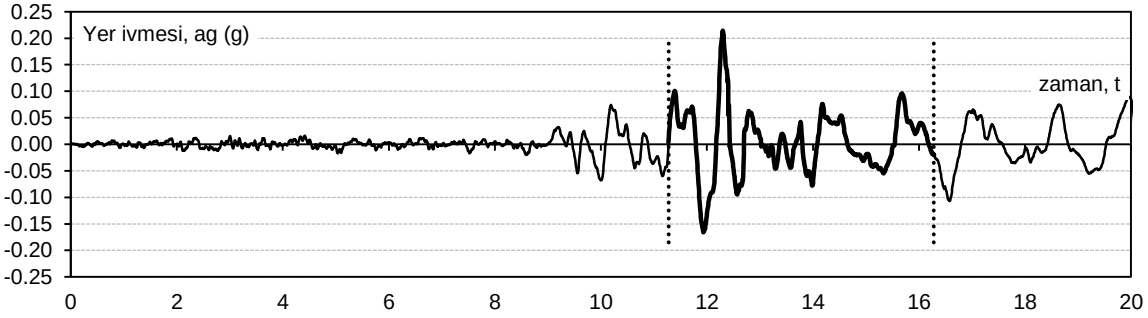
Deprem kaydı olarak ise üç farklı kayıt kullanılmıştır. Bu kayıtlar; 1940' ta gerçekleşen Imperial Valley depremi ElCentro istasyonu NS bileşeni, 1999' da gerçekleşen Kocaeli depremi Düzce istasyonu DZC270 bileşeni (KDZC270), 1989' da Loma Prieta'da gerçekleşen, Emeryville kayıt istasyonu tarafından kaydedilen deprem kaydının EMY350 bileşenleridir. Yer hareketi kayıtları "PEER NGA Strong Motion" veri bankasından indirilmiştir [27]. Deprem kayıtları Şekil 4. 4, 4. 5 ve 4. 6' da, deprem kayıtlarına ait bilgiler Çizelge 4. 1' de verilmiştir [26].



Şekil 4. 4 ElCentro deprem kaydı, NS bileşeni



Şekil 4. 5 Düzce deprem kaydı, DZC270 bileşeni



Şekil 4. 6 Emeryville deprem kaydı, EMY350 bileşeni

Çizelge 4. 1 Deprem kayıtlarına ait özellikler [28]

Yıl	Deprem	M	Kayıt İstasyonu	Mesafe (km)	Zemin Sınıfı	Bileşeni	PGA (g)
1940	Imperial Valley	6.9	El Centro	40	D	NS	0.313
1999	Kocaeli	7.5	Düzce	15.4	D	DZC270	0.358
1989	Loma Prieta	6.9	Emeryville	77	D	EMY350	0.215

4.4 Sayısal Hesaplar

Bu bölümde gerçekleştirilen sayısal incelemeler, eşdeğer dinamik analize etkisi araştırılmak istenen parametreler ve kullanılan yöntemler ayrıntılı biçimde anlatılmış, sonuçlar yorumlanmıştır.

İlk olarak, Merkezi Farklar Yöntemi ile α-OS Yönteminin sözü edilen yapı modelinin dinamik davranışına etkileri, uygulanan iki farklı yük etkisinde, elastik ve elastik ötesi bölgede incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu inceleme, sabit yük ile yapılan incelemelerde yedi farklı zaman adım aralığı için, yer ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde dört farklı zaman adımı değeri için yapılmıştır.

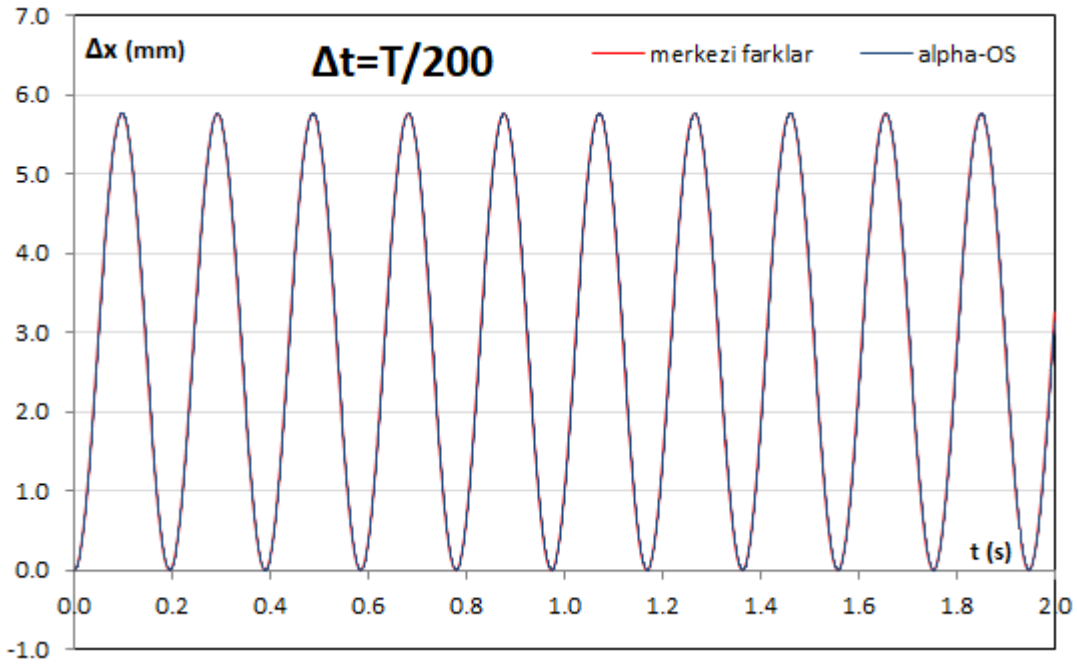
Daha sonra yine Bölüm 4.3' te tanımlanan iki farklı yük türü ile elastik ve elastik ötesi bölgede yapılan analizlerde, zaman adım aralığı değerlerinin analizlere olan etkisini incelemek üzere kıyaslamaların verildiği grafikler elde edilmiştir.

4.4.1 Zaman Tanım Alanında İntegrasyon Şemalarının Etkisi

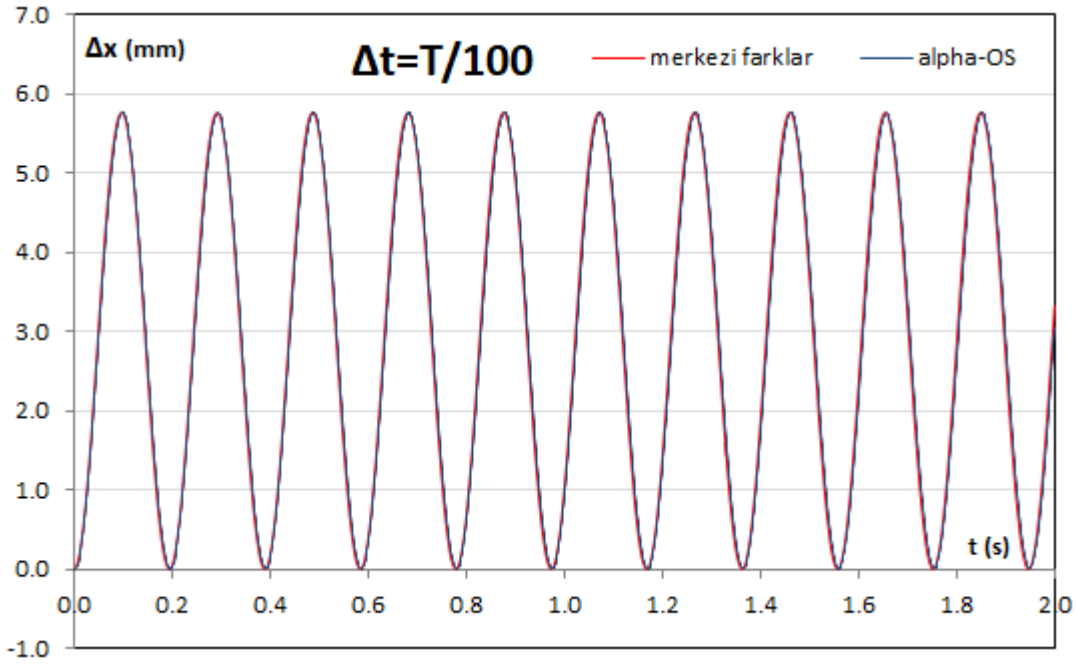
Elastik Bölgede Sabit Yük Altındaki İncelemeler (Birinci Grup İncelemeler)

Parametrik incelemelerin ilk adımında integrasyon şemalarının dinamik analiz davranışına etkisi incelenmiştir. Öncelikle anlık etkiyen sabit yük etkisinde, yapı modelinin elastik bölgedeki davranışı, yedi farklı zaman adımı için incelenmiştir ve çalışma iki farklı grupta yapılmıştır. İlk gruptaki incelemelerde 12 mm x 12 mm kesit

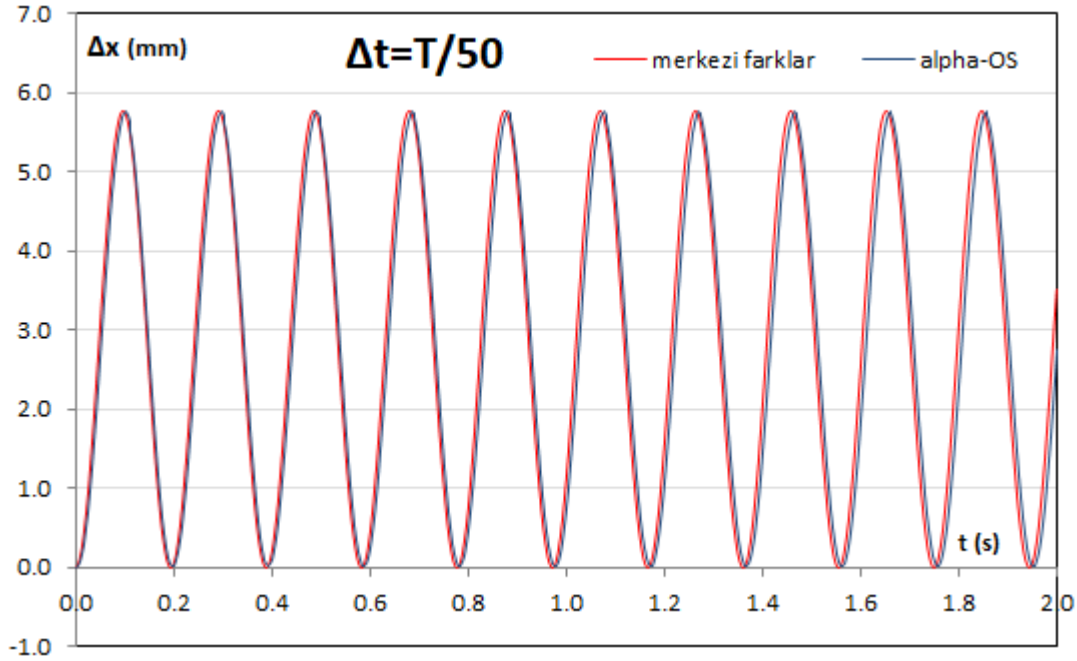
boyutlarına ve 405 mm yüksekliğine sahip çelik numuneler üzerinde çalışılmıştır. İncelenen tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi $M = 0.06\ Ns^2/mm$ olarak alınmış, anlık sabit yükün değeri, deneylerde yük hücresi kapasitesinin %1'ine karşı gelen yük seviyesi olarak uygulanan $F = 180\ N$ değerindedir. Bu analizde elastik bölgede çalışıldığı için malzeme özelliği olarak çeliğin elastisite modülü $E = 200000\ MPa$ alınmıştır, sistemin yatay öteleme rijitliği ise $K = \frac{12EI}{L^3} = 62{,}43\ N/mm$ olarak hesaplanmıştır. İncelenen tek serbestlik dereceli sistemin serbest titreşim periyodu $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 0.195\ s$ şeklinde hesaplanmıştır. Bu araştırmaya ilişkin grafikler Şekil 4. 7 ila Şekil 4. 13' te verilmiştir. İnceleme sonunda hesaplanan yer değiştirme değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile Δt=0.001 s zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelere, diğer zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelerin oransal farkı Çizelge 4. 2' deki gibidir.



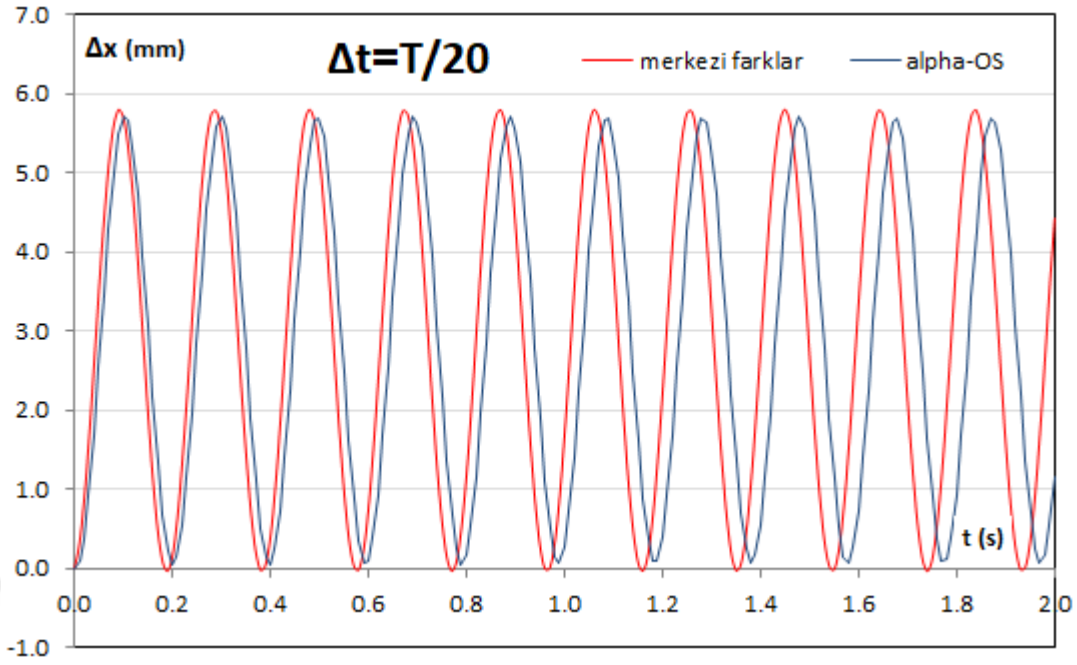
Şekil 4. 7 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme)



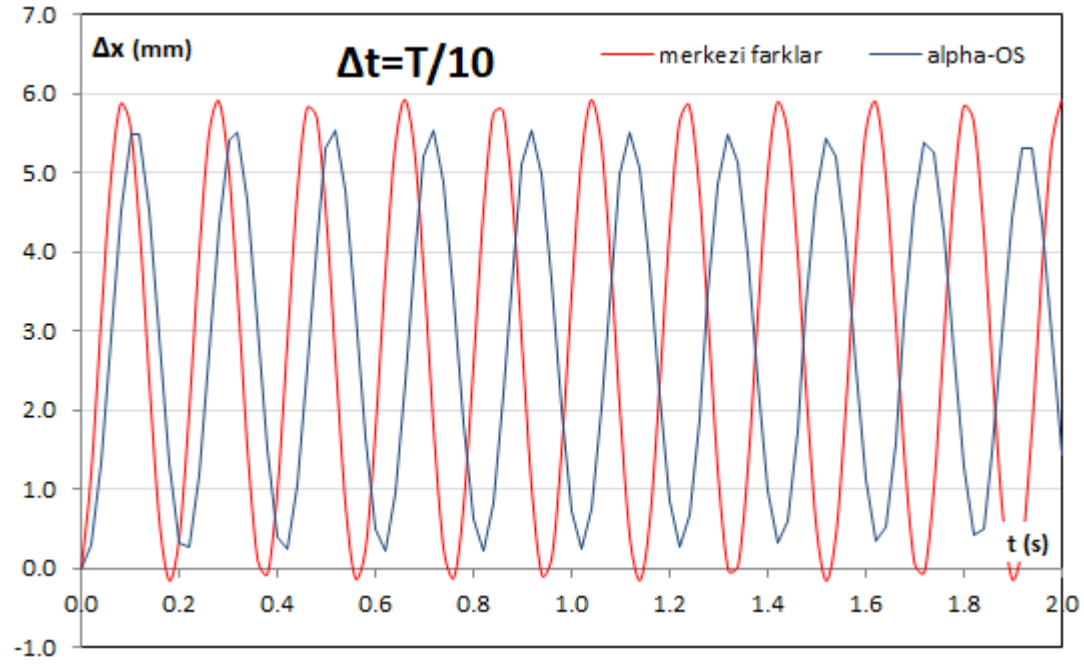
Şekil 4. 8 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme)



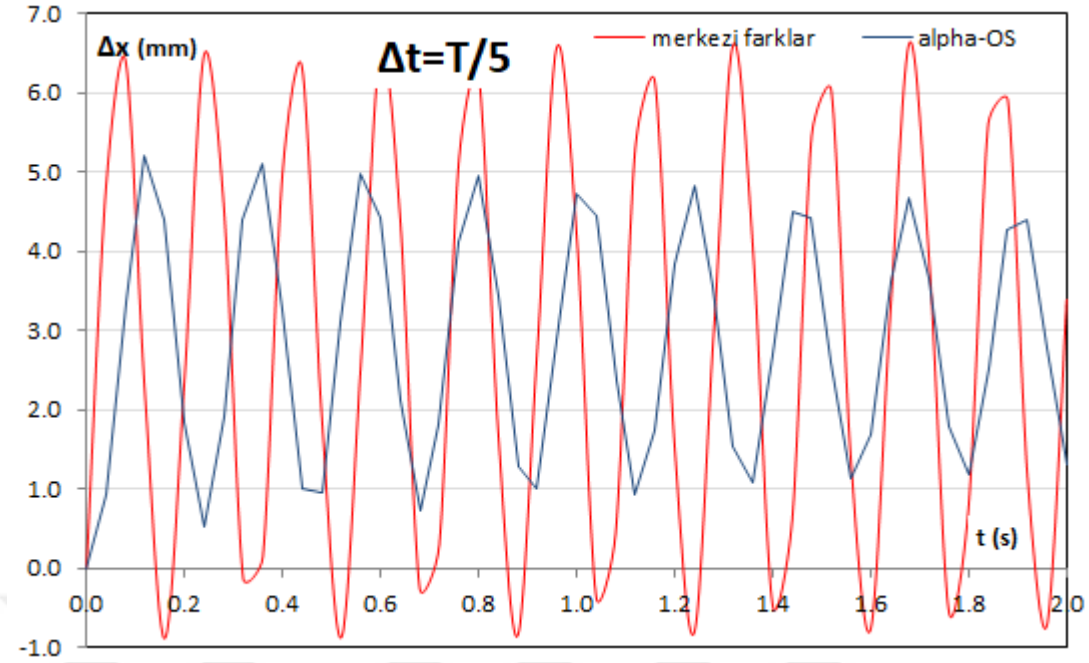
Şekil 4. 9 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme)



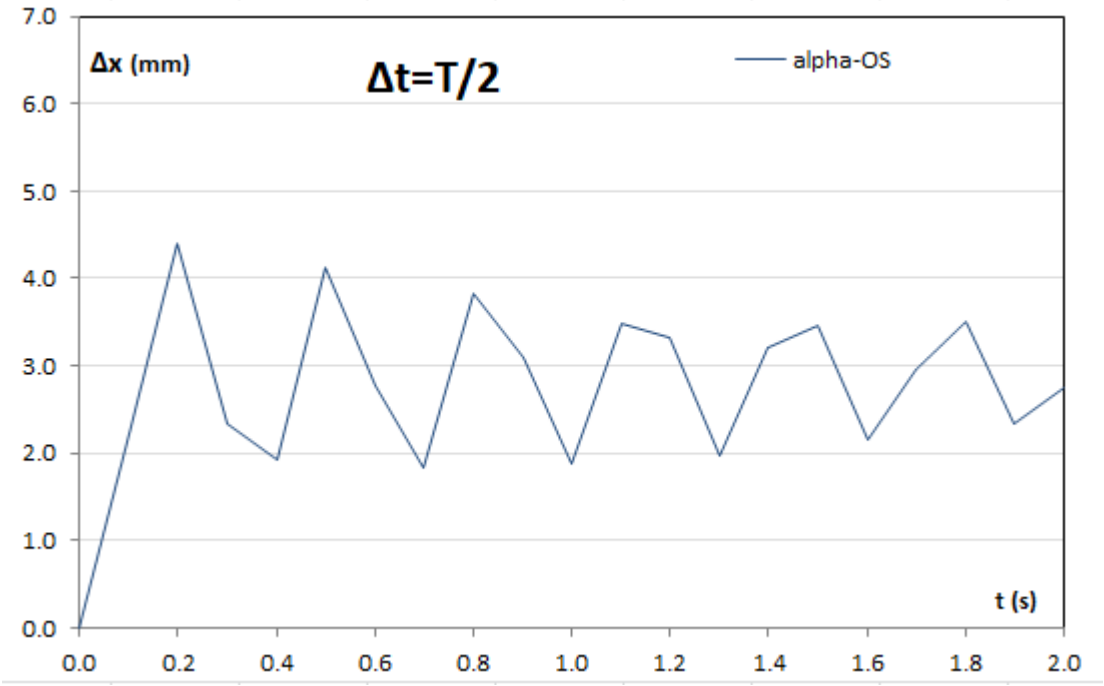
Şekil 4. 10 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme)



Şekil 4. 11 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme)



Şekil 4. 12 Δt=0.04 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme)



Şekil 4. 13 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (1.grup inceleme)

Çizelge 4. 2 Sabit Yük altında yapılan İncelemeler (1.grup inceleme)

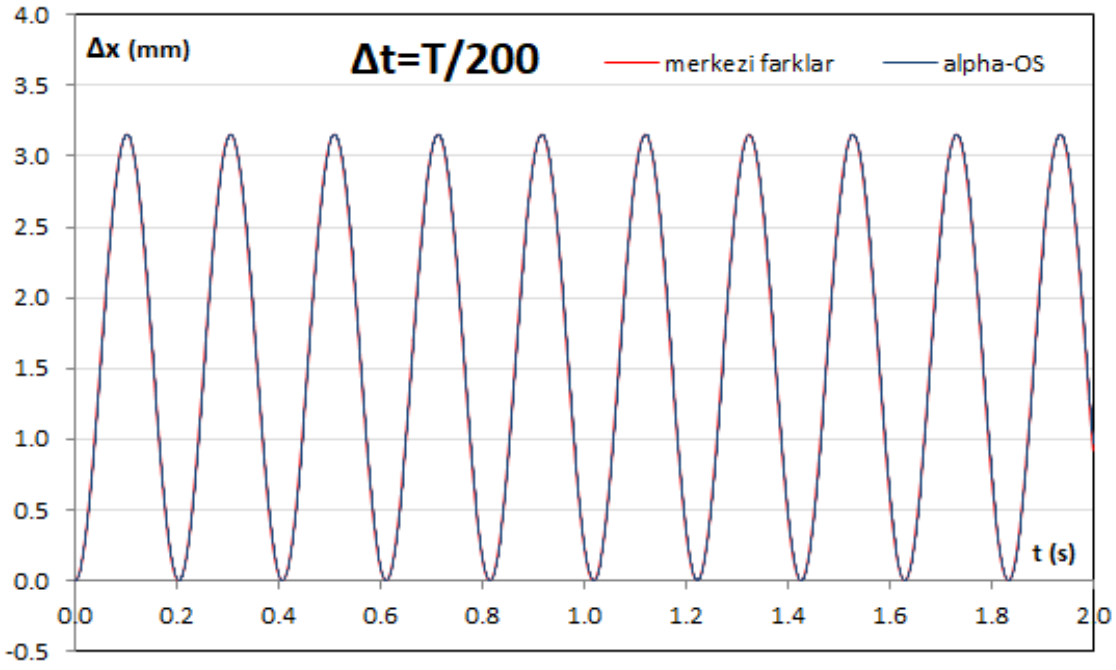
		α-OS			MFY		
	Δt (sn)	**Min**	**Max**	**Fark (%)**	**Min**	**Max**	**Fark (%)**
T/200	0.001	0.00	5.77		0.00	5.77	
T/100	0.002	0.00	5.76	-0.02	0.00	5.77	0
T/50	0.004	0.01	5.76	-0.11	-0.01	5.77	0.07
T/20	0.01	0.04	5.72	-0.71	-0.04	5.80	0.64
T/10	0.02	0.23	5.54	-3.92	-0.16	5.93	2.79
T/5	0.04	0.53	5.22	-9.49	-0.89	6.64	15.16
T/2	0.1	1.84	4.41	-23.60	Stabil olmayan çözüm		

Sabit yük etkisinde yapılan birinci grup sayısal incelemeler zaman adım aralığının çok küçük değerleri için (Δt=0.001 s, Δt=0.002 s) hem α-OS Yöntemi hem de Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizlerde her iki grup incelemede de yer değiştirme sonuçlarının birbirine çok yakın değerlerde olduğunu göstermiştir. Ancak zaman adım aralığı değeri artırıldığında α-OS Yöntemi ile yapılan incelemede taşıyıcı sistem periyodunun büyüdüğü, Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan incelemede taşıyıcı sistem periyodunun küçüldüğü görülmüştür. Bununla birlikte iki ayrı yöntemin verdiği yer değiştirme sonuçlarında farklılıklar görülmüştür. Elde edilen en büyük yer değiştirme sonuçlarının hassasiyetinin azaldığı görülmektedir. α-OS Yöntemi ile yapılan analizlerde zaman adım aralığı arttıkça sayısal parametreler sebebiyle sönüm etkisinin arttığı anlaşılmaktadır. Ayrıca zaman adım aralığı büyüdükçe Merkezi Farklar Yöntemi'nin stabilitesinin azaldığı, hatta Δt=0.1 s'lik adım aralığında yöntemin stabilitesinin kaybolduğu görülmektedir.

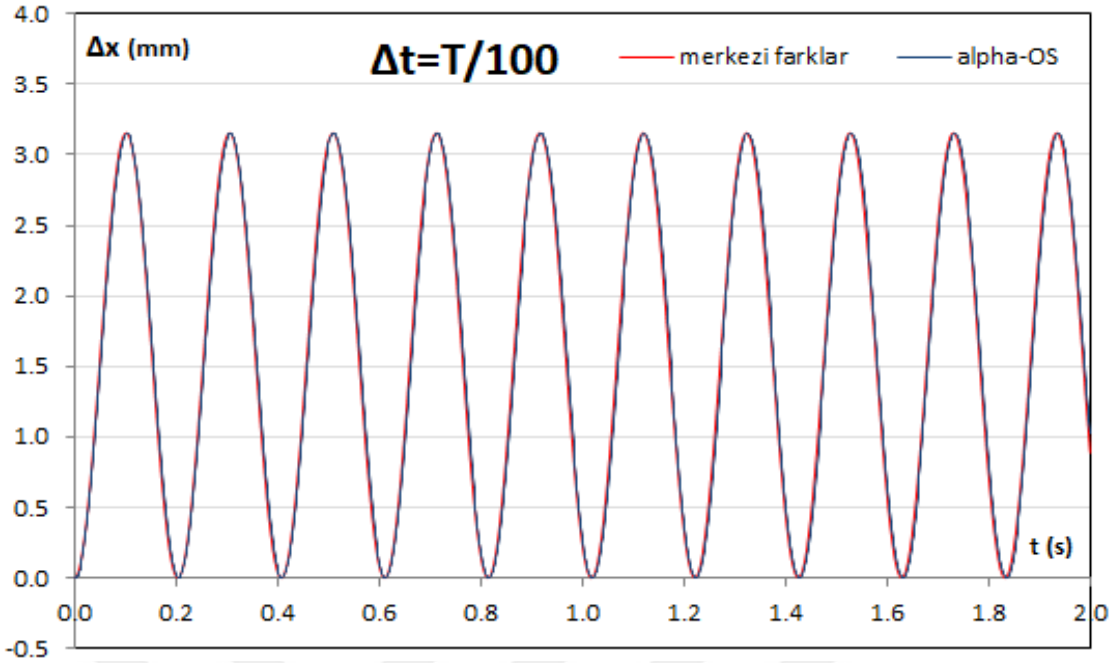
Çizelge 4. 2' deki sonuçlar değerlendirildiğinde, α-OS Yöntemi ile yapılan analizde, zaman adım aralığı arttıkça sönüm etkileri sebebiyle maksimum yer değiştirme değerleri küçüldüğünden, yer değiştirme sonuçlarının Δt=0.001 s için yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirmeyle arasındaki fark da negatif yönde artmaktadır. Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizlerde ise grafiklerden de görüldüğü gibi periyot değerlerinde düşüşler ve oluşan maksimum yerdeğiştirme değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Merkezi Farklar Yöntemi ile Δt=0.1 s zaman adımı alınarak gerçekleştirilen analizlerde yöntem stabilitesini yitirdiğinden sonuç alınamamıştır.

Elastik Bölgede Sabit Yük Altındaki İncelemeler (İkinci Grup İncelemeler)

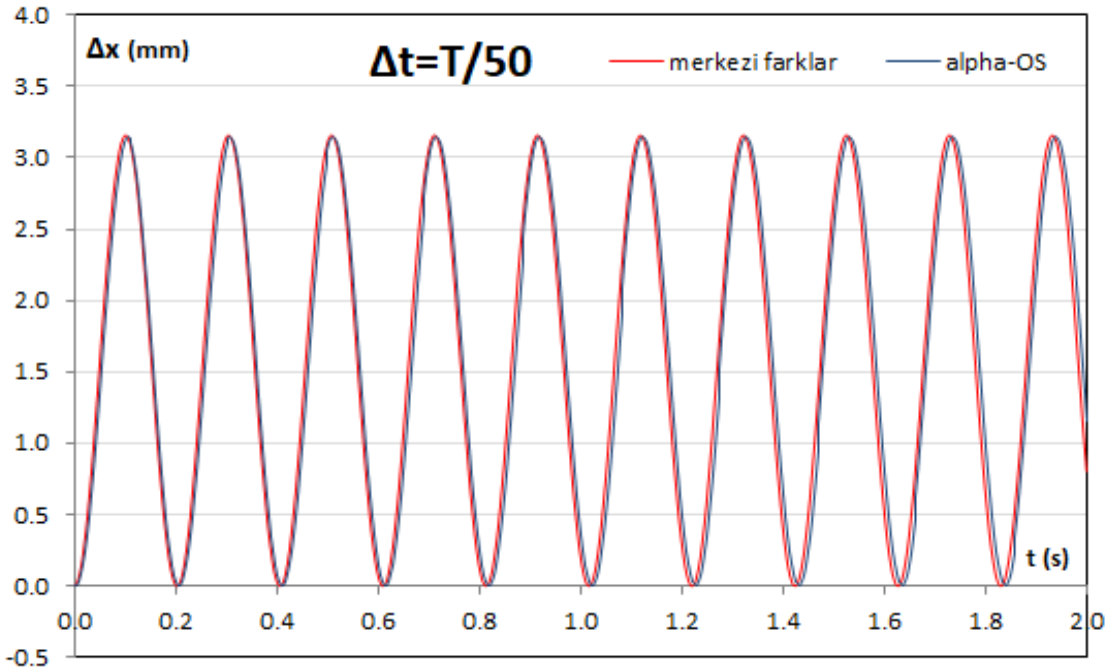
İkinci gruptaki çalışmada ise 16 mm x 16 mm kesit boyutlarına ve 410 mm yüksekliğine sahip çelik numuneler üzerinde çalışılmıştır. İncelenen tek serbestlik dereceli sistemin kütlesi $M = 0.2\ Ns^2/mm$ olarak alınmış, sistemin sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. Anlık sabit yükün değeri, deneylerde uygulandığı gibi yük hücresi kapasitesinin %2' sine denk gelen $F = 300\ N$ değerindedir. Bu analizde elastik bölgede çalışıldığı için malzeme özelliği olarak çeliğin elastisite modülü $E = 200000\ MPa$ alınmıştır, sistemin yatay öteleme rijitliği ise $K = \frac{12EI}{L^3} = 190{,}18\ N/mm$ olarak hesaplanmıştır. Yapı modelinin doğal titreşim periyodu $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 0.204\ s$ olarak hesaplanmıştır. α-OS Yönteminde kullanılan α parametresinin değeri, $\alpha = 0.05$ olarak alınmıştır. Bu araştırmaya ilişkin grafikler Şekil 4. 14 ila Şekil 4. 20' de verilmiştir. İnceleme sonunda hesaplanan yer değiştirme değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile Δt=0.001 s zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelere, diğer zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelerin oransal farkı Çizelge 4. 3' te verilmiştir.



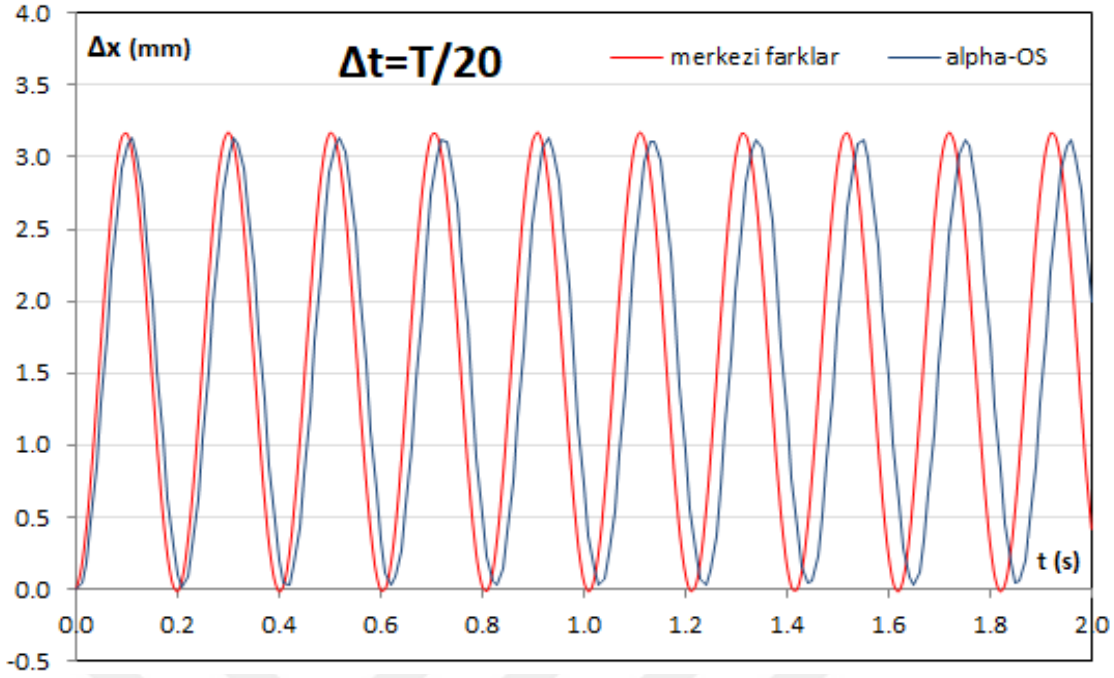
Şekil 4. 14 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme)



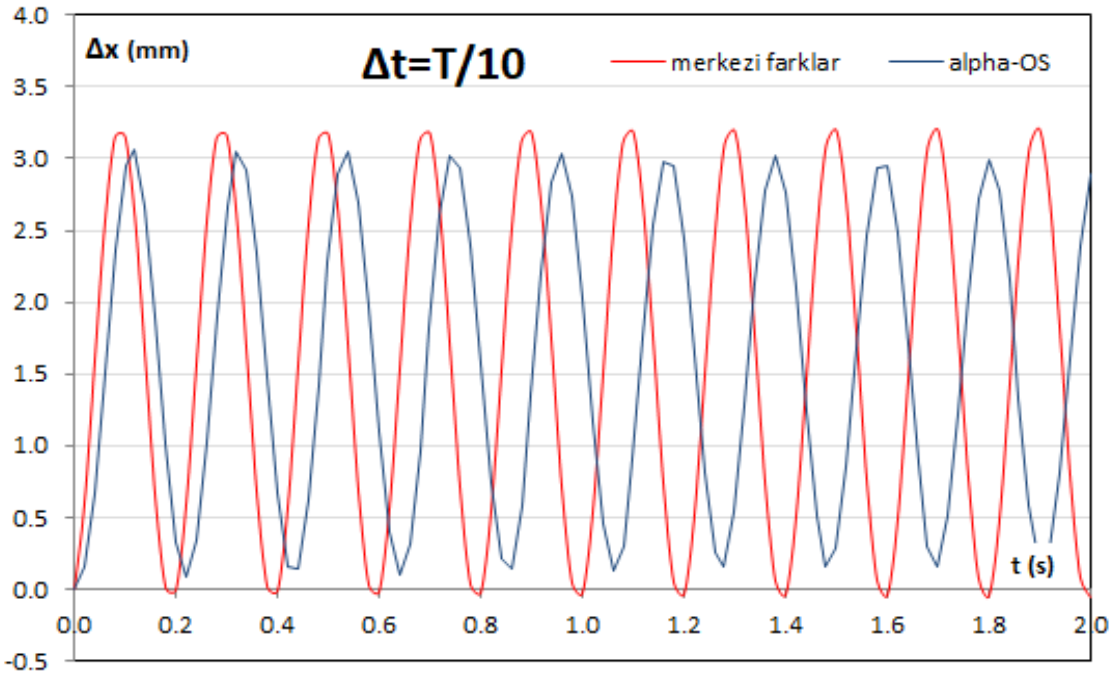
Şekil 4. 15 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme)



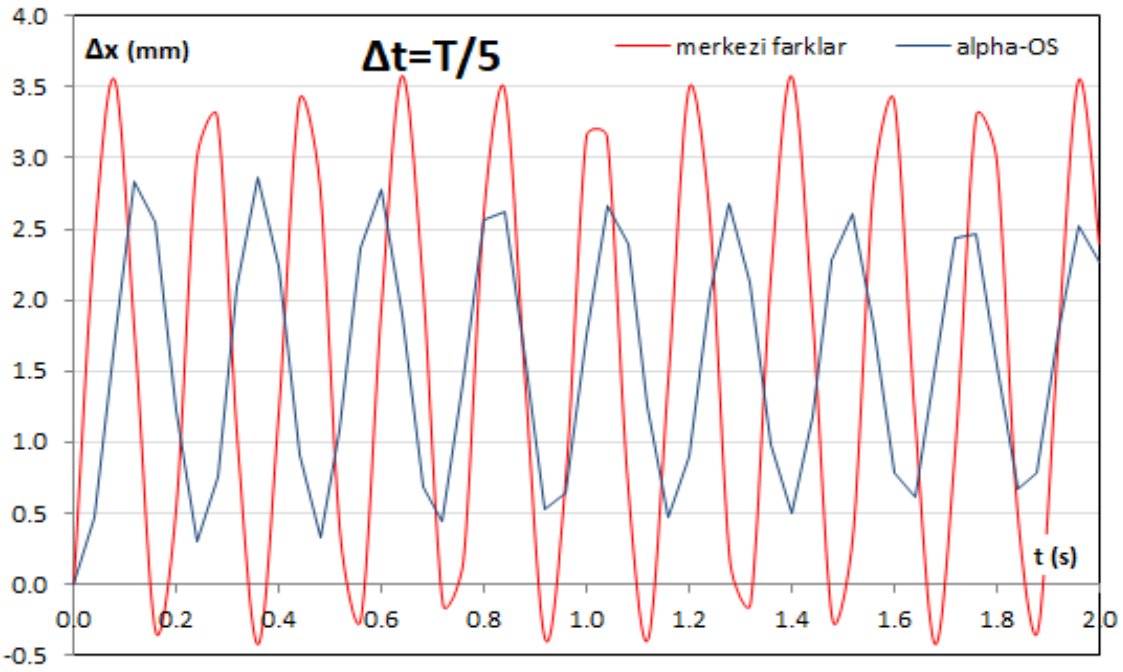
Şekil 4. 16 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme)



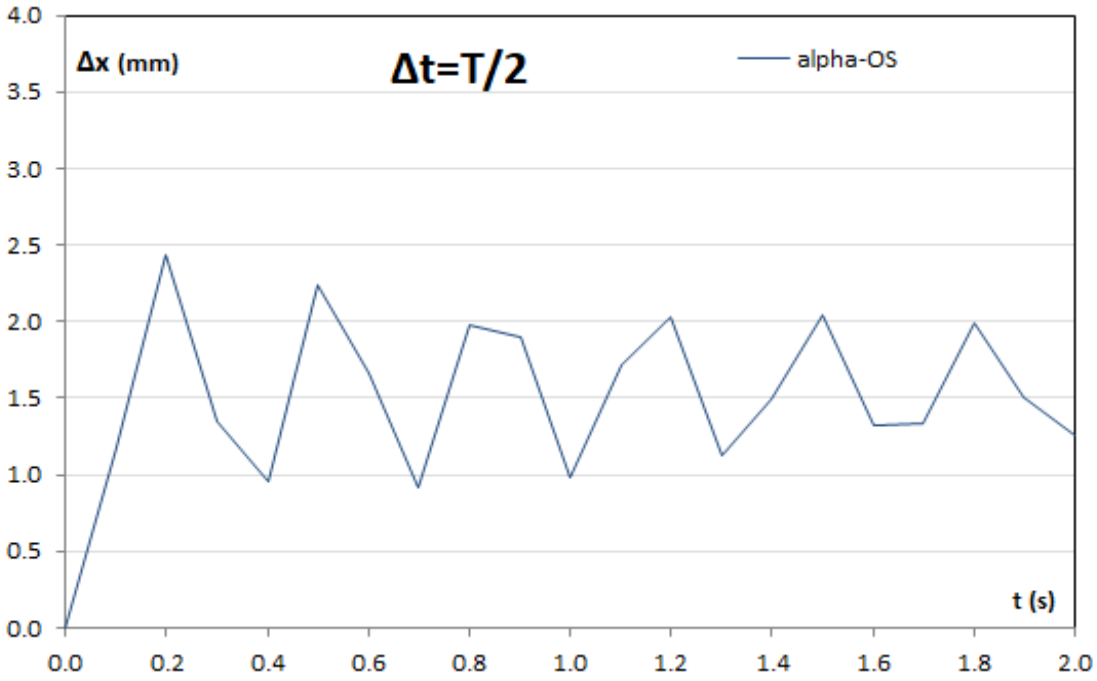
Şekil 4. 17 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme)



Şekil 4. 18 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme)



Şekil 4. 19 Δt=0.04 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme)



Şekil 4. 20 Δt=0.1 s adım aralığında inceleme (2.grup inceleme)

Sabit yük etkisinde yapılan ikinci grup sayısal incelemelerden zaman adım aralığının çok küçük değerleri için (Δt=0.001 s, Δt=0.002 s) hem α-OS Yöntemi hem de Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizlerde her iki grup incelemede de yer değiştirme sonuçlarının birbirine çok yakın değerlerde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, birinci

grup incelemelere göre maksimum yer değiştirme değerlerinde farklılıklar oluşmuştur. Ancak zaman adım aralığı artırıldığında α-OS Yöntemi ile yapılan incelemede taşıyıcı sistem periyodunun büyüdüğü, Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan incelemede taşıyıcı sistem periyodunun küçüldüğü görülmüştür. Bununla birlikte iki ayrı yöntemin verdiği yer değiştirme sonuçlarında farklılıklar görülmüştür. Elde edilen en büyük yer değiştirme sonuçlarının hassasiyetinin azaldığı görülmektedir. α-OS Yöntemi ile yapılan analizlerde zaman adım aralığı arttıkça sayısal parametreler sebebiyle sönüm etkisinin arttığı anlaşılmaktadır. Ayrıca zaman adım aralığı büyüdükçe Merkezi Farklar Yöntemi'nin stabilitesinin azaldığı, hatta Δt=0.1 s'lik adım aralığında yöntemin stabilitesinin kaybolduğu görülmektedir. Sabit yük altında, her iki integrasyon yöntemi ile sayısal incelemesi yapılan yapı modelinde oluşan en küçük ve en büyük yer değiştirme değerleri, her zaman adımı değeri ile Çizelge 4. 3' te verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Sabit yük altında yapılan sayısal incelemeler (2.grup inceleme)

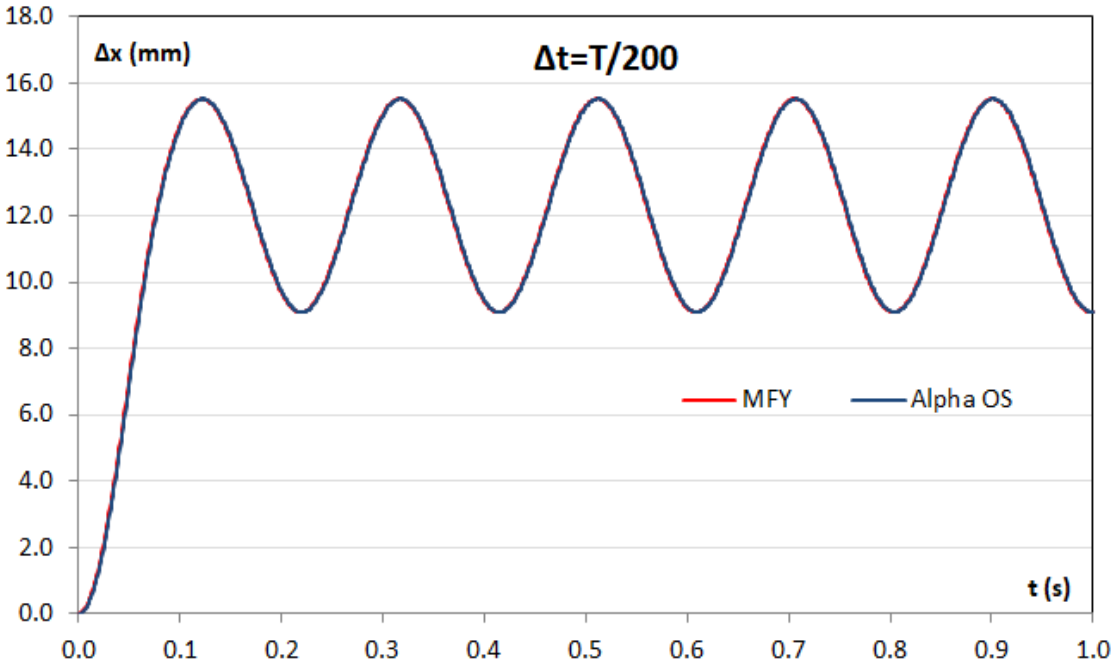
		α-OS			**Merk. Farklar**		
	Δt (s)	**Min (mm)**	**Max (mm)**	**Fark (%)**	**Min (mm)**	**Max (mm)**	**Fark (%)**
T/200	0.001	0.00	3.15		0.00	3.16	
T/100	0.002	0.00	3.15	-0.02	0.00	3.16	0
T/50	0.004	0.01	3.15	-0.09	0.00	3.16	0.07
T/20	0.01	0.02	3.13	-0.75	-0.02	3.17	0.58
T/10	0.02	0.08	3.06	-3.00	-0.05	3.21	1.65
T/5	0.04	0.30	2.86	-9.43	-0.42	3.58	13.38
T/2	0.1	0.91	2.43	-22.87	Stabil olmayan çözüm		

Çizelge 4. 3' teki sonuçlar değerlendirildiğinde, α-OS Yöntemi ile yapılan analizde, zaman adım aralığı arttıkça sönüm etkileri sebebiyle maksimum yer değiştirme değerleri küçüldüğünden, yer değiştirme sonuçlarının Δt=0.001 s için yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirmeyle arasındaki fark da negatif yönde artmaktadır. Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizlerde ise grafiklerden de görüldüğü gibi periyot değerleri azalmakta ve oluşan maksimum yer değiştirme değerlerinde artışlar gözlenmiştir.

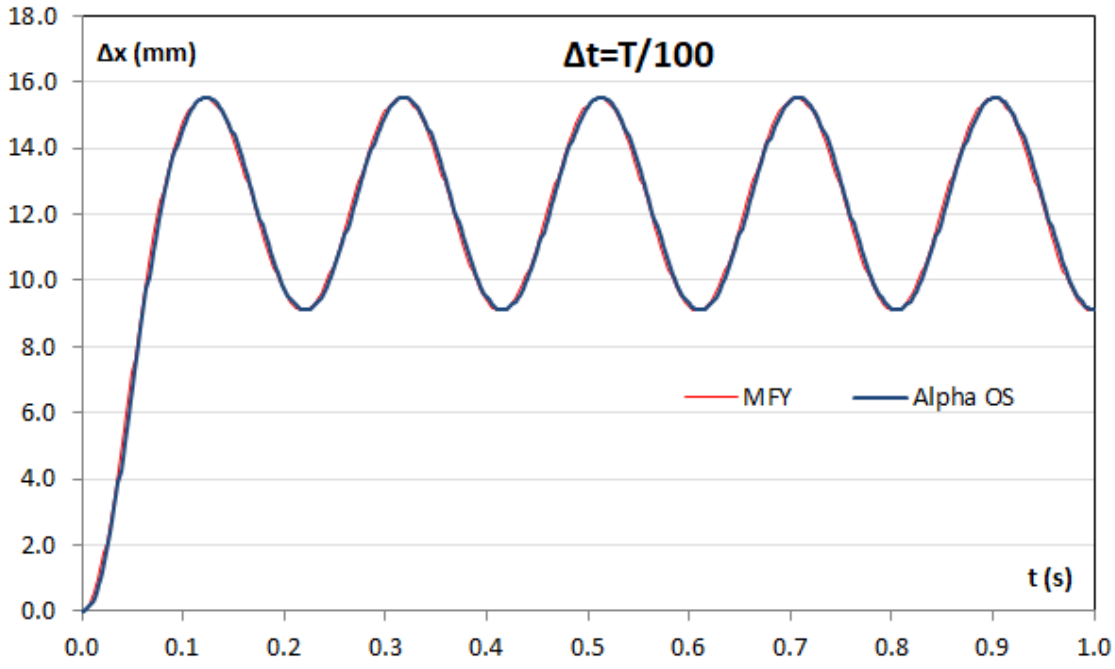
Sayısal incelemelerin ilk adımına aynı yapı modelinin elastik ötesi bölgede iki integrasyon şeması ile anlık sabit yük etkisinde yapılan analizi ile devam edilmiştir.

Elastik Ötesi Bölgede Sabit Yük Altındaki İncelemeler

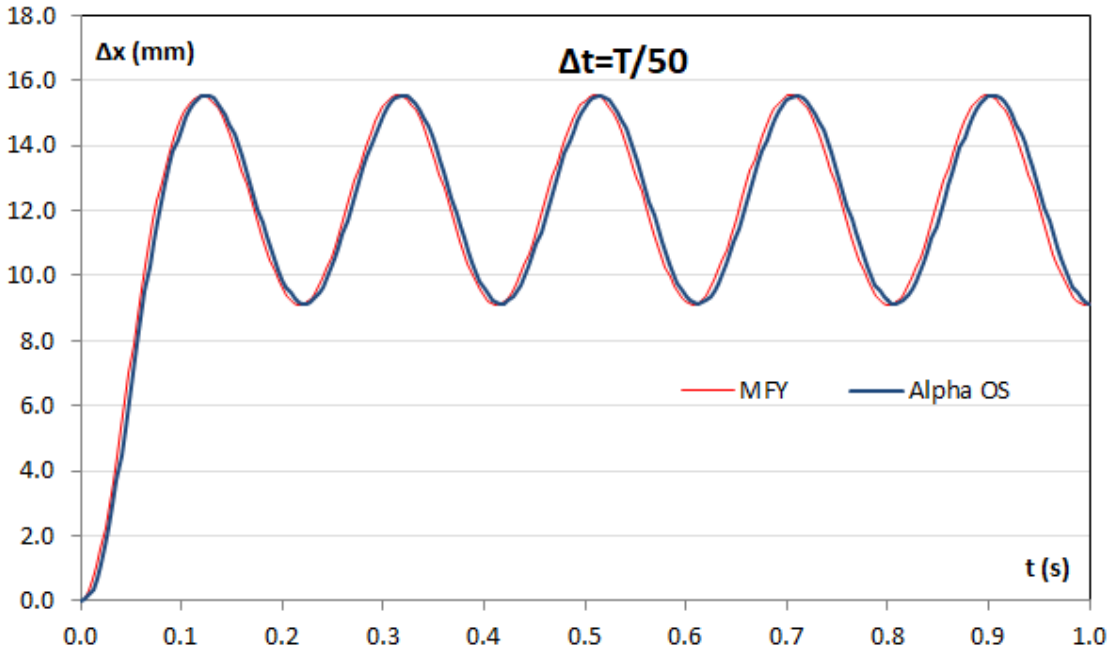
Bu bölümde eşdeğer dinamik analizde dinamik hareket denge denkleminin çözümünde kullanılan zaman integrasyon şemalarının, yapı modelinin sabit yük etkisinde, elastik ötesi bölgedeki davranışı için gerçekleştirilen çözümlere etkisi incelenmiştir. İncelemelerde Şekil 4. 1' de gösterilen yapı modeli, 12 mm x 12 mm kesit boyutlarına sahip ve 405 mm yüksekliğindedir. Taşıyıcı sistemin ucundaki toplanmış kütle değeri $M = 0.06\ Ns^2/mm$ ' dir. Sistemde sönümün sıfır olduğu kabul edilmiş ve α-OS Yönteminde kullanılan α parametresi $\alpha = 0.05$ değerinde alınmıştır. Dinamik yükleme olarak $F = 420\ N$ değerindeki anlık etkiyen sabit yük kullanılmıştır. Sayısal analizlerde, Bölüm 5' te anlatıldığı gibi deneyi yapılan numunelerin elastik ötesi bölgedeki davranışı üzerinde çalışıldığı için çeliğin elastisite modülü, $E = 200000\ MPa$, akma gerilmesi, $f_y = 290MPa$ ve pekleşme oranı, $\mu = 0.03$ olarak alınmıştır. Yapısal sistemin yatay öteleme rijitliği $K = \frac{12EI}{L^3} = 62.43\ N/mm$ şeklinde hesaplanmıştır. Sistemin titreşim periyodu ise $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 0.195\ s$ olarak hesaplanmıştır. Sabit yük etkisinde, iki farklı integrasyon şeması ve yedi farklı zaman adım aralığı değeri kullanılarak gerçekleştirilen analize ilişkin yer değiştirme (Δx) – zaman (t) grafikleri Şekil 4. 21 ila Şekil 4. 27' de verilmiştir. Çalışmada elde edilen yer değiştirme değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile Δt=0.001 s zaman adımı ile yapılan analiz sonuçları baz alınarak diğer zaman adımı değerleri ile yapılan analiz sonuçlarının kıyaslanması ile oluşan fark değerleri Çizelge 4. 4' te verilmiştir.



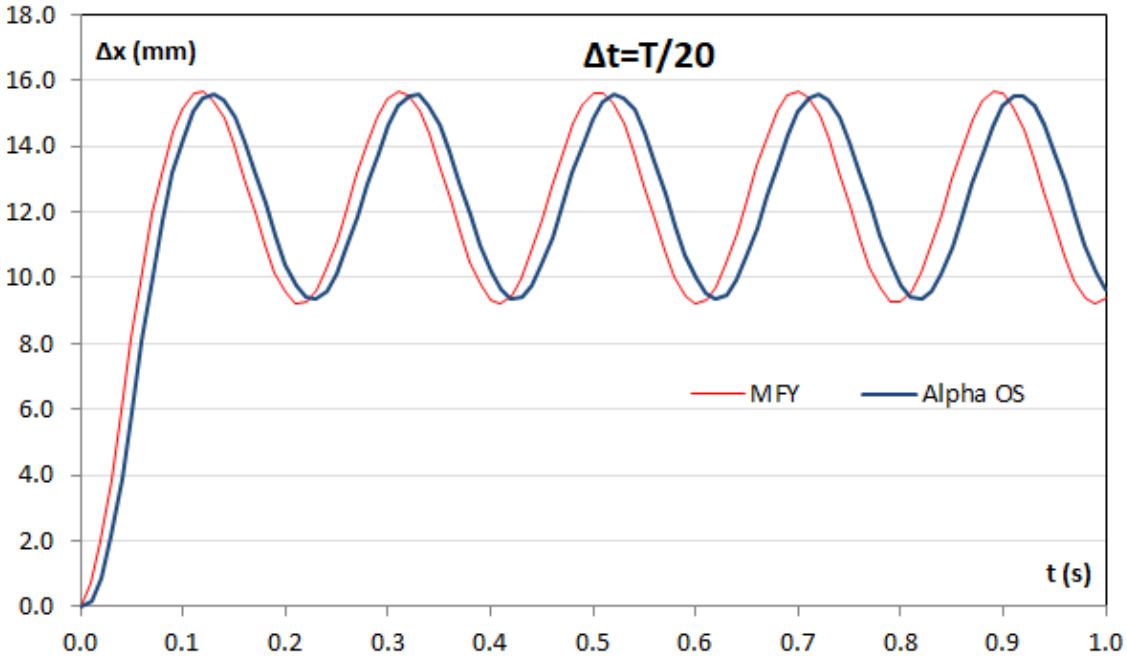
Şekil 4. 21 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge)



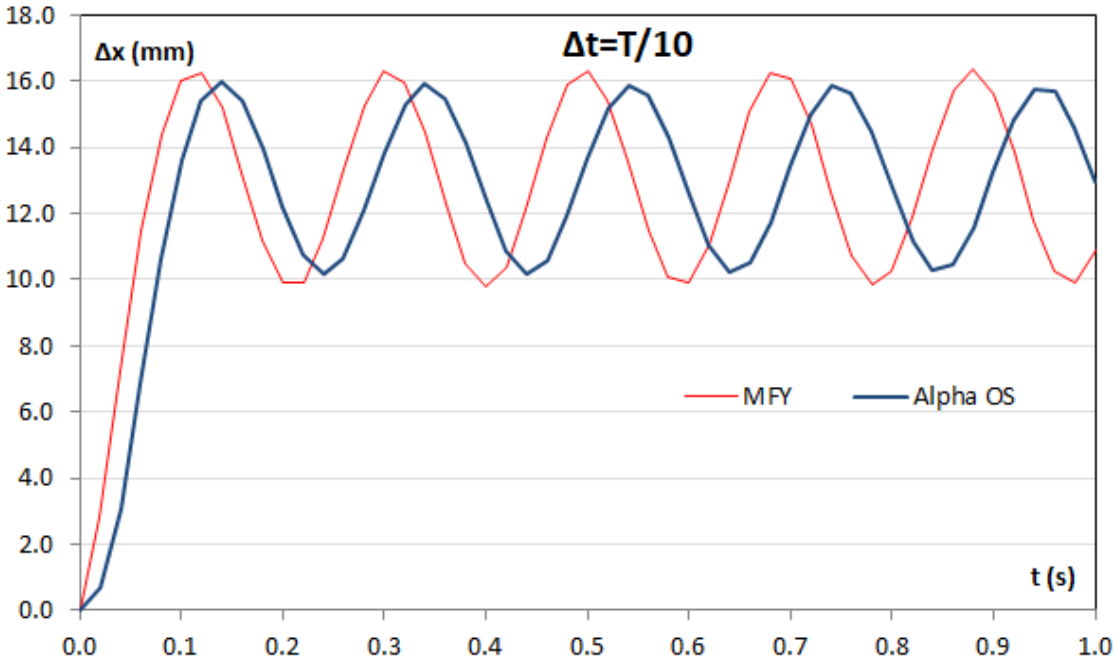
Şekil 4. 22 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge)



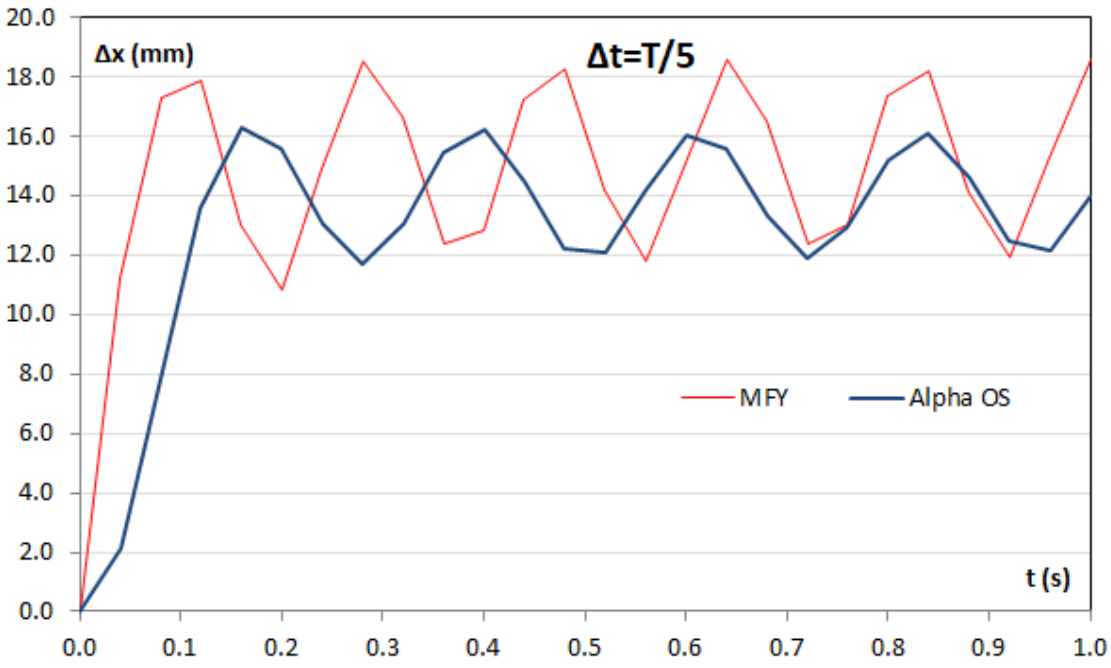
Şekil 4. 23 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge)



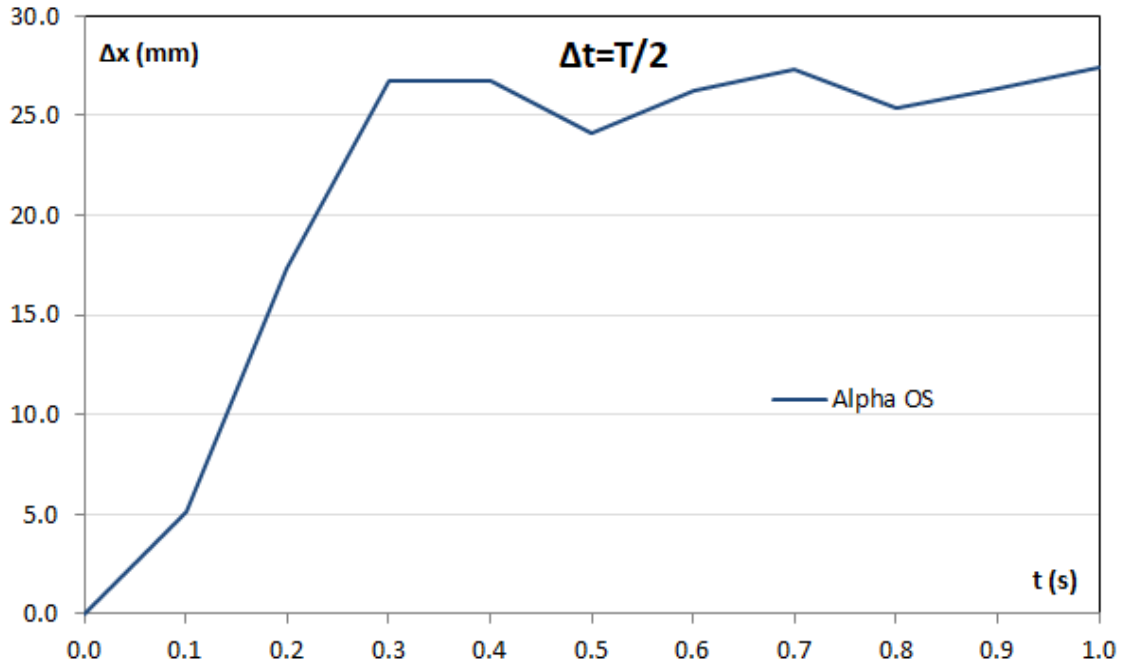
Şekil 4. 24 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge)



Şekil 4. 25 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge)



Şekil 4. 26 Δt=0.04 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge)



Şekil 4. 27 Δt=0.1 s adım aralığında inceleme (sabit yük, elastik ötesi bölge)

Çizelge 4. 4 Sabit Yük Altında Yapılan İncelemeler (elastik ötesi bölge)

		α-OS			MFY		
	Δt (s)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)
T/200	0.001	0.00	15.52		0.01	15.52	
T/100	0.002	0.01	15.52	0.00	0.03	15.53	0.02
T/50	0.004	0.03	15.54	0.09	0.11	15.55	0.16
T/20	0.01	0.19	15.59	0.44	0.70	15.67	0.94
T/10	0.02	0.70	15.96	2.80	2.80	16.34	5.26
T/5	0.04	2.15	16.25	4.69	10.79	18.63	20.00
T/2	0.1	5.18	27.42	76.63	Stabil olmayan çözüm		

Sabit yük etkisinde, elastik ötesi bölgede gerçekleştirilen analizler sonucu oluşan grafikler ve Çizelge 4. 4 incelenirse, zaman adım aralığının, yapı sistemi titreşim periyodunun 1/200, 1/100 ve 1/50'sine tekabül ettiği çözümlerde hem α-OS Yöntemi hem de Merkezi Farklar Yöntemi çözümlerinde birbirine çok yakın sonuçların elde edilmiş olduğu görülebilir. Zaman adım aralığı artırıldıkça, iki integrasyon şeması ile elde edilen yer değiştirme sonuçlarının Δt=0.001 s zaman adım aralığında elde edilen yer değiştirme sonuçlarına farkı da artmaktadır. Ayrıca α-OS Yöntemi çözümlerine

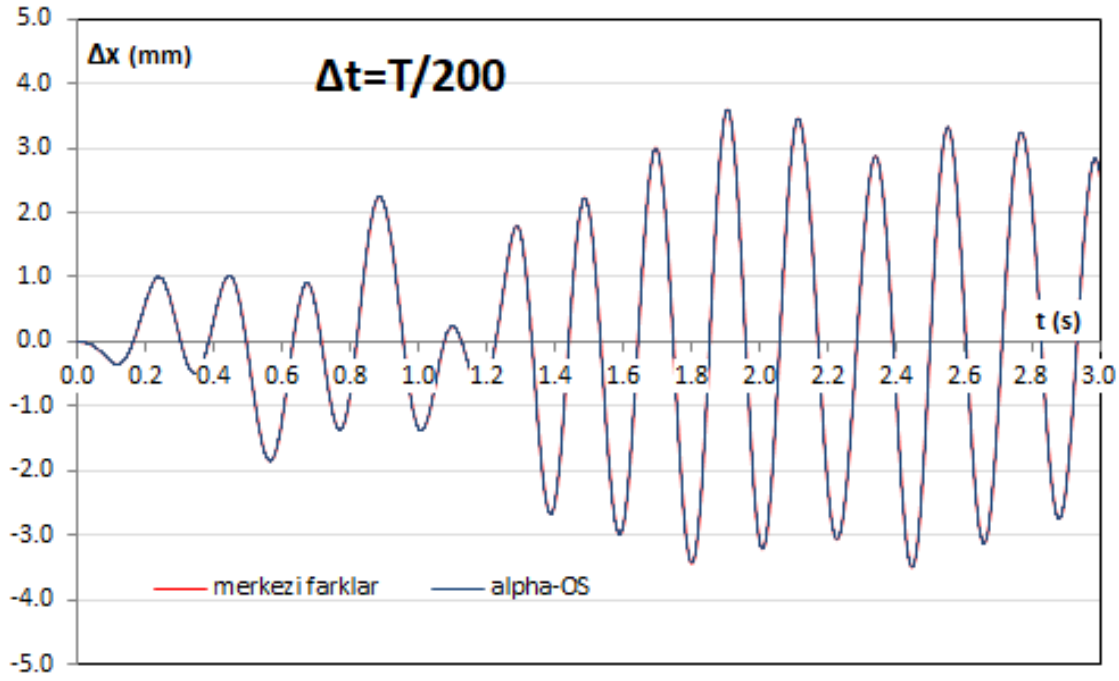
kıyasla Merkezi Farklar Yöntemi çözümlerindeki fark değerlerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Yapı modelinin elastik bölgedeki davranışı için gerçekleştirilen analizlerde olduğu gibi Δt=0.1 s için yapılan analizlerde Merkezi Farklar Yönteminin kararlılığını yitirdiği görülmüştür.

Elastik Bölgede Deprem Kaydı Altındaki İncelemeler

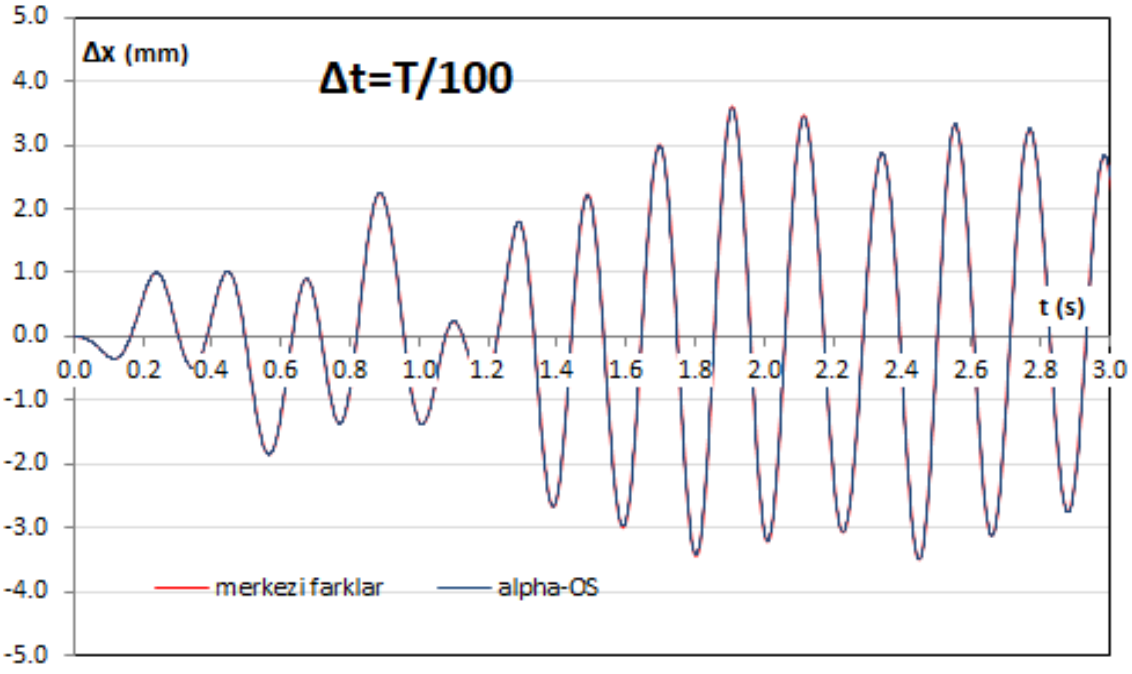
Zaman tanım alanında integrasyon şemalarının incelendiği, elastik bölgedeki deprem kaydı etkisindeki analizler üç farklı deprem kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk gruptaki incelemelerde El Centro deprem ivme kaydı, ikinci gruptaki çalışmada Kocaeli-Düzce yer ivme kaydı ve üçüncü grup analizlerde Emeryville yer ivme kaydı kullanılmıştır. Analizlerde malzeme özelliği olarak çeliğin elastisite modülü, $E = 200000\ MPa$ kullanılmıştır. Yapısal sistemin yatay öteleme rijitliği $K = \frac{12EI}{h^3} = 280.5\ N/mm$ şeklinde hesaplanmıştır. Sistemin serbest titreşim periyodu ise $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 0.212\ s$ olarak hesaplanmıştır.

1.Grup İncelemeler (El Centro Deprem Kaydı)

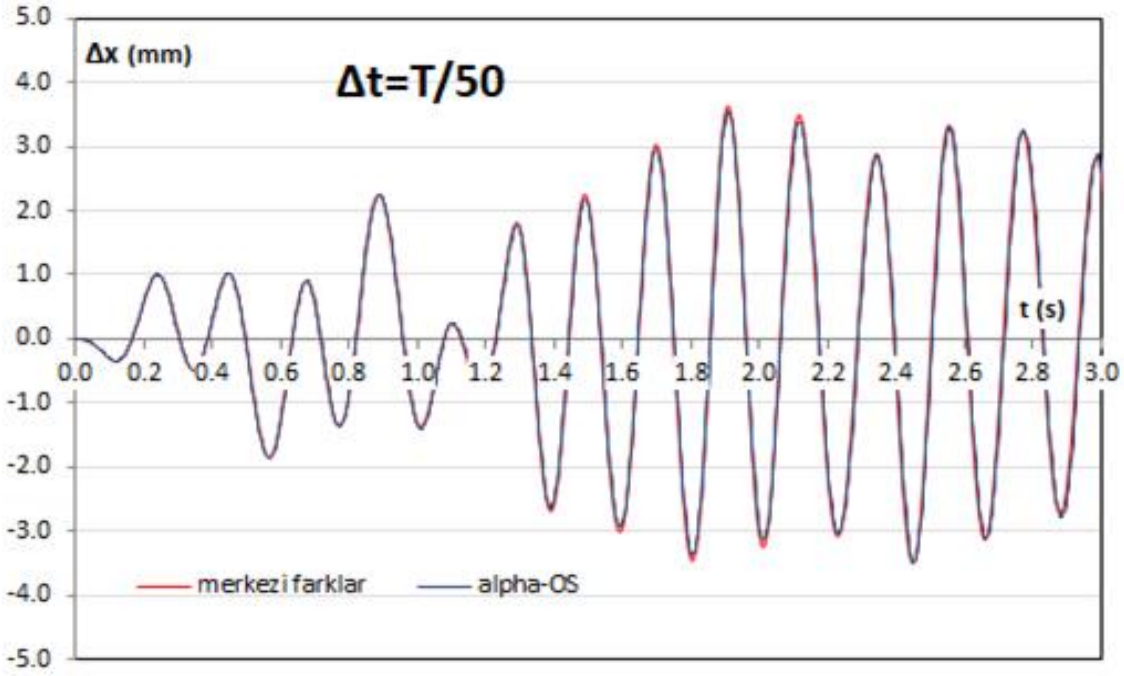
Bu bölümde gerçekleştirilen incelemelerde Şekil 4. 1' de verilen yapı modelinin kesit boyutları deneysel incelemelerde kullanılan numunelerle uyumlu olması bakımından 20 mm x 20 mm, yüksekliği ise 485 mm olarak alınmıştır. Taşıyıcı sistemin bir ucunda $M = 0.32\ Ns^2/mm$' lik kütle bulunduğu ve sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. α-OS integrasyon şemasında kullanılan α parametresi $\alpha = 0.05$ olarak alınmıştır. İncelemelerde Δt=0.001 s, Δt=0.002 s, Δt=0.004 s, Δt=0.01 s ve Δt=0.02 s zaman adımı aralıklarında çalışılmıştır. Dinamik yükleme olarak 18 Mayıs 1940' ta meydana gelen Imperial Valley depremi, ElCentro istasyonu NS bileşeni, 0.25 katsayısı ile ölçeklendirilerek kullanılmıştır. Bu araştırmaya ilişkin grafikler Şekil 4. 28 ila Şekil 4. 32' de verilmiştir. İnceleme sonunda hesaplanan yer değiştirme değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile Δt=0.001 s zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelere, diğer zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelerin oransal farkı Çizelge 4. 5' te verilmiştir.



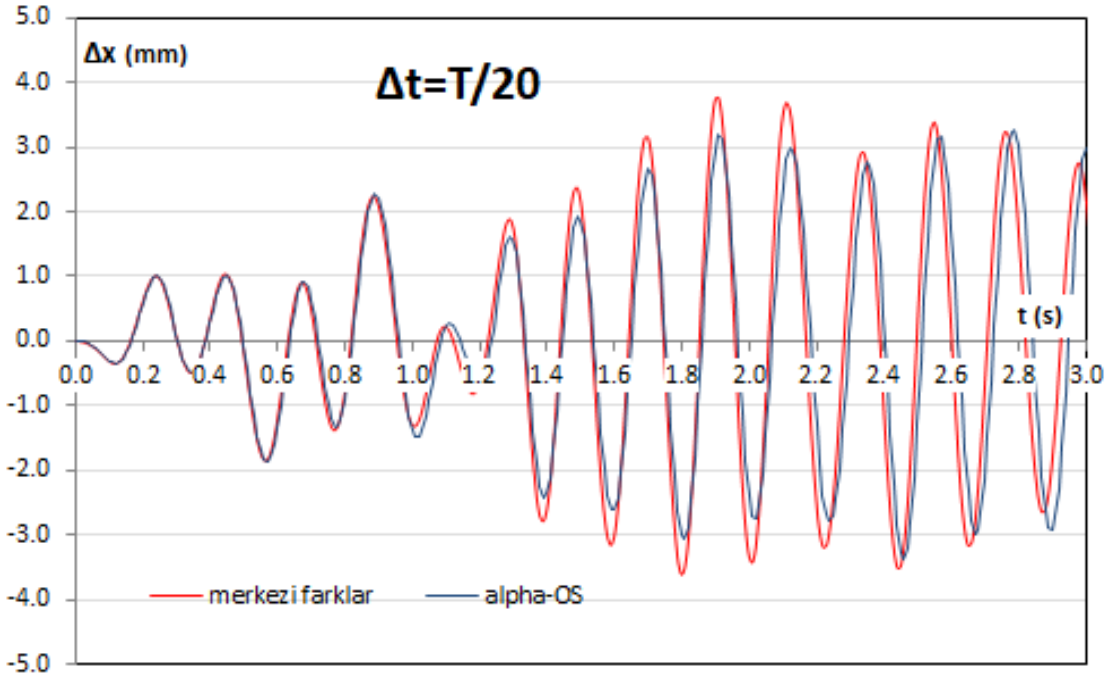
Şekil 4. 28 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge)



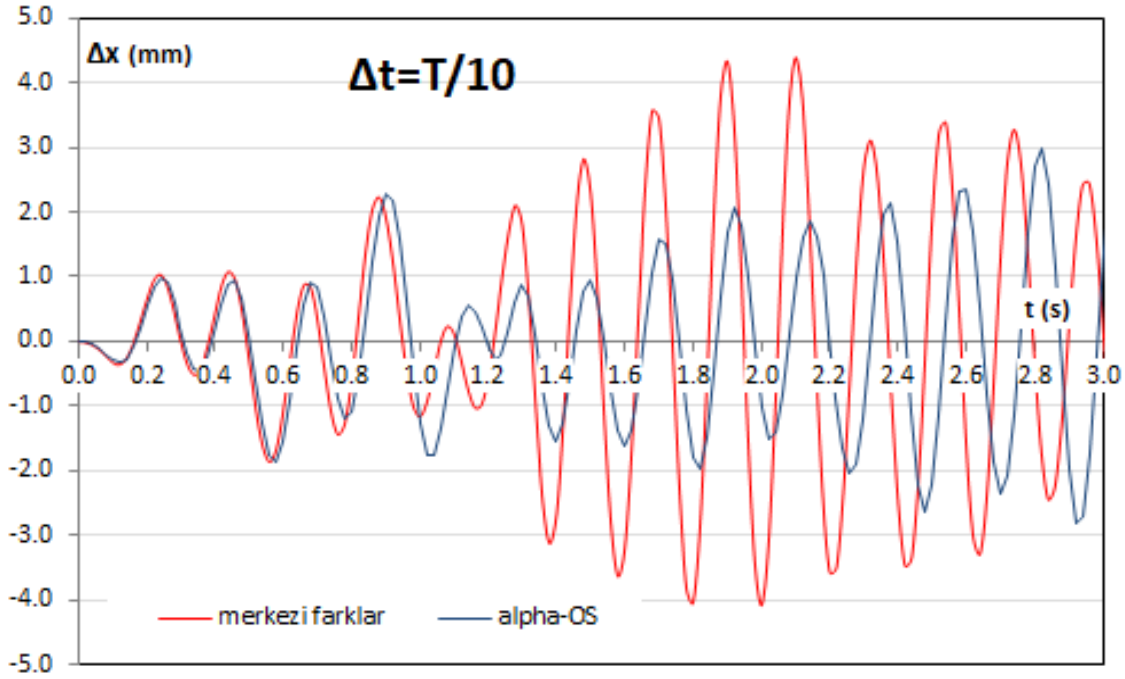
Şekil 4. 29 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 30 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 31 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 32 Δt=0.02 s adım aralığında inceleme (ElCentro ivme kaydı, elastik bölge)

Çizelge 4. 5 ElCentro Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik bölge)

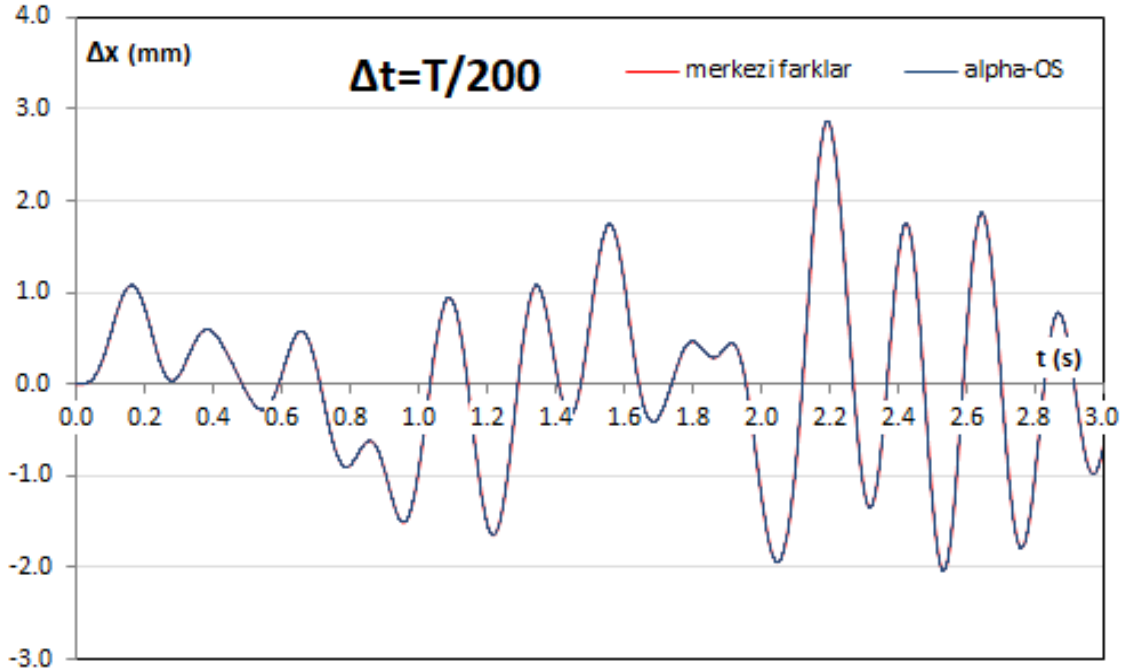
		α-OS			MFY		
	Δt (s)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)
T/200	0.001	-4.51	4.65		-4.52	4.66	
T/100	0.002	-4.47	4.63	-0.30	-4.54	4.66	0.00
T/50	0.004	-4.34	4.57	-1.61	-4.60	4.68	0.45
T/20	0.01	-3.84	3.99	-14.08	-5.02	5.08	9.06
T/10	0.02	-2.81	3.00	-35.54	-6.20	6.43	37.92

ElCentro deprem kaydı etkisinde, elastik bölgede gerçekleştirilen analizler sonucu oluşan grafikler ve Çizelge 4. 5 incelendiğinde, zaman adım aralığının, yapı sistemi titreşim periyodunun 1/200, 1/100 ve 1/50'sine tekabül ettiği çözümlerde hem α-OS Yöntemi hem de Merkezi Farklar Yöntemi çözümleri birbirine çok yakın sonuçlar vermiş olduğu görülmüştür. Zaman adım aralığı artırıldıkça, iki integrasyon şeması ile elde edilen yer değiştirme sonuçlarının Δt=0.001 s zaman adım aralığında elde edilen yer değiştirme sonuçlarına farkı da artmaktadır. α-OS Yöntemi ile yapılan analizlerde zaman adımı artırıldıkça, algoritmada bulunan sayısal sönüm etkisi ile yer değiştirme değerleri azalmıştır. Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizlerde ise zaman adım aralığı değeri artırıldıkça, yapı modelinin periyodu giderek azalmış ve yer değiştirme değerleri artmıştır. Çizelge 4. 5' ten görüldüğü gibi Δt=0.01 s alınarak gerçekleştirilen analiz sonucunda oluşan maksimum yer değiştirme değeri ile Δt=0.001 s alınarak

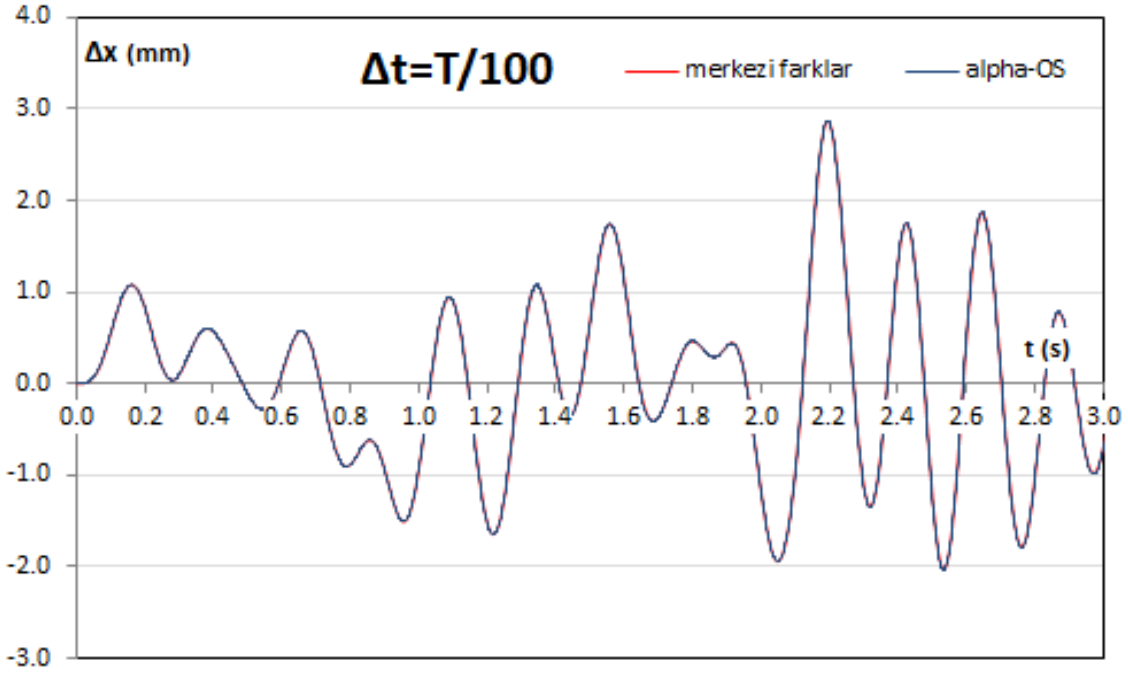
gerçekleştirilen analiz sonucu oluşan maksimum yer değiştirme arasında, α-OS Yönteminde %14.08, Merkezi Farklar Yönteminde %9.06' lık fark oluşmuştur. Zaman adım aralığı Δt=0.02 s alınarak yapılan analizlerde bu fark daha da artmıştır.

2.Grup İncelemeler (Kocaeli-Düzce Deprem Kaydı)

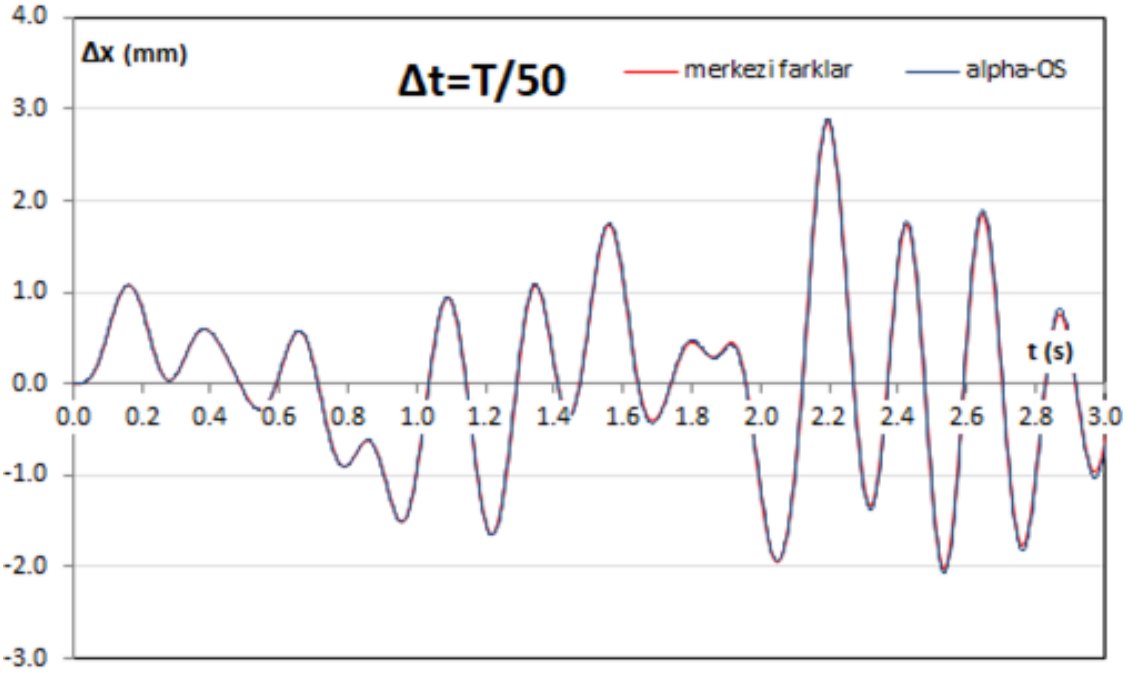
Bu bölümde gerçekleştirilen incelemelerin birinci grup incelemelerden farkı, dinamik yükleme olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Düzce istasyonu DZC270 bileşeninin kullanılmasıdır. Bölüm 5' te anlatılan deneysel incelemelerle uyumlu olarak Şekil 4. 1' de verilen yapı modelinin kesit boyutları 20 mm x 20 mm olarak alınmıştır, yüksekliği ise 485 mm olarak alınmıştır. Taşıyıcı sistemin bir ucunda $M = 0.32\ Ns^2/mm$' lik kütle bulunduğu ve sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. α-OS integrasyon şemasında kullanılan α parametresi $\alpha = 0.05$ olarak alınmıştır. İncelemelerde Δt=0.001 s, Δt=0.002 s, Δt=0.004 s ve Δt=0.01 s zaman adımı aralıklarında çalışılmıştır. Yer ivme kaydı 0.30 katsayısı ile ölçeklendirilerek uygulanmıştır. Bu araştırmaya ilişkin grafikler Şekil 4. 33 ila Şekil 4. 36' da verilmiştir. İnceleme sonunda hesaplanan yer değiştirme değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile Δt=0.001 s zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelere, diğer zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelerin oransal farkı Çizelge 4. 6' da verilmiştir.



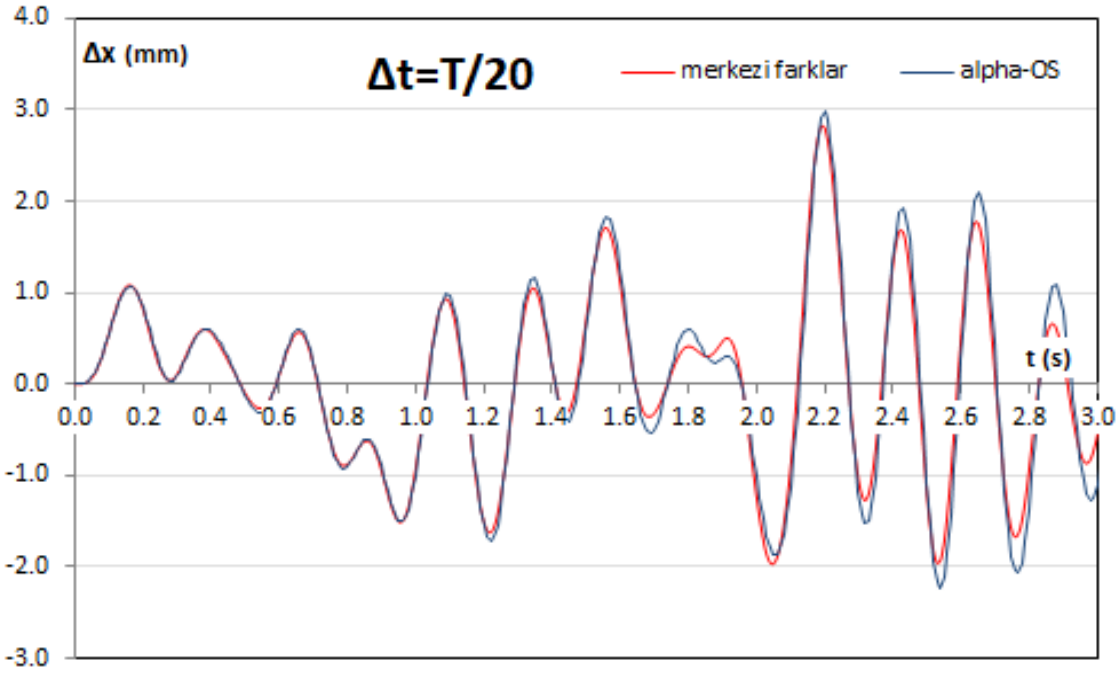
Şekil 4. 33 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 34 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 35 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 36 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (Kocaeli ivme kaydı, elastik bölge)

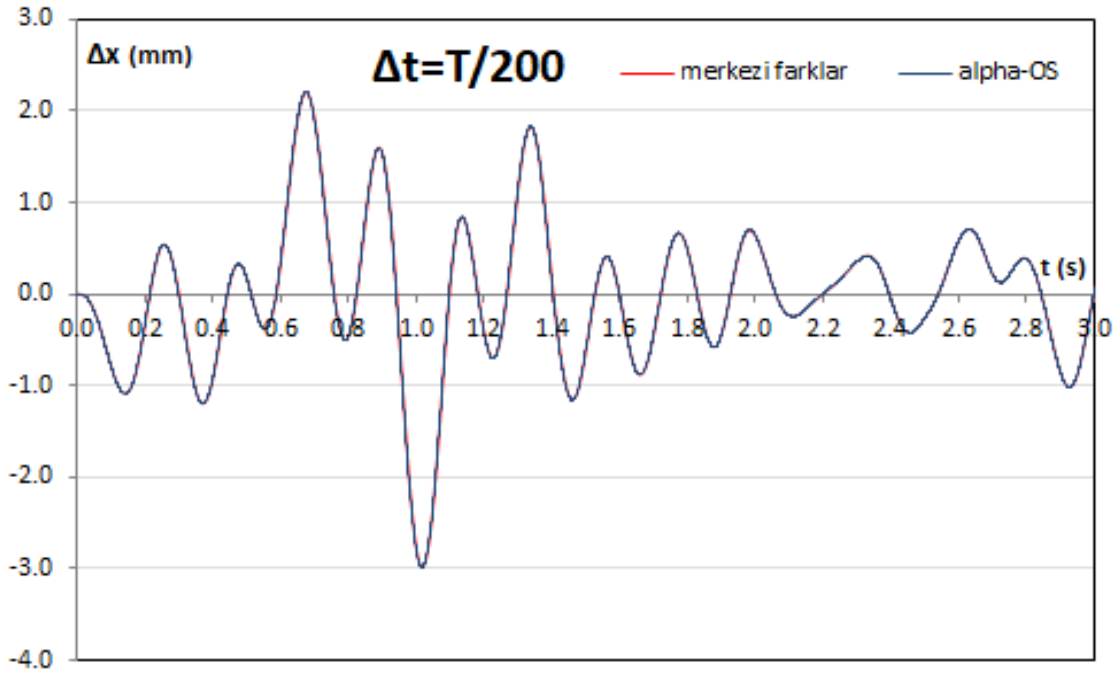
Çizelge 4. 6 Kocaeli Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik bölge)

		α-OS			MFY		
	Δt (sn)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)
T/200	0.001	-2.04	2.87		-2.03	2.87	
T/100	0.002	-2.04	2.87	0.13	-2.03	2.87	0.00
T/50	0.004	-2.06	2.89	0.57	-2.02	2.86	-0.21
T/20	0.01	-2.23	2.98	3.72	-1.97	2.82	-1.66

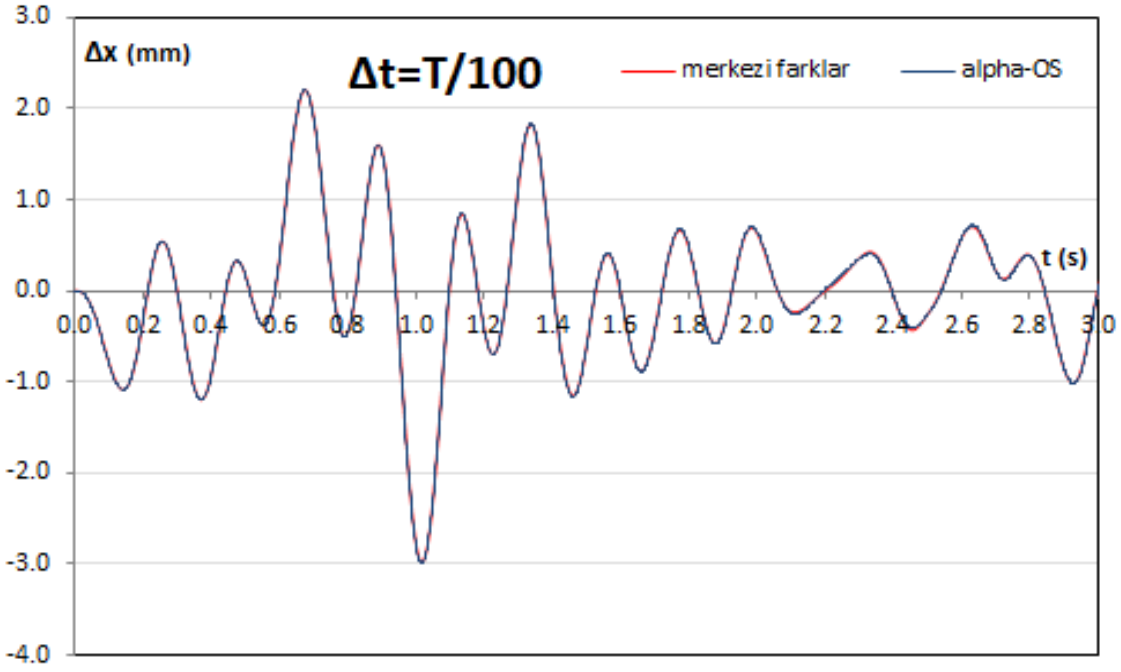
Kocaeli depremi, Düzce istasyonu DZC270 bileşeni kullanılarak elastik bölgede gerçekleştirilen sayısal analizler incelendiğinde her iki integrasyon şeması analizleri sonucu oluşan yer değiştirme değerleri birbirlerine yeterince yakındır. Zaman adım aralığı değeri artırıldıkça, analizlerde Δt=0.001 s ile yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirme sonuçlarına olan fark artmaktadır. Ancak α-OS Yöntemi ile yapılan incelemelerde oluşan en büyük yer değiştirmenin Δt=0.001 s ile yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirme değerine olan en büyük fark %3.72' dir. Merkezi Farklar Yönteminde ise bu fark %-1.66 olarak gözlenmiştir. Zaman adım aralığı değerinin yapı modelinin titreşim periyodunun 1/20' sine tekabül ettiği analizlerde bile oluşan fark değerlerinin göz ardı edilebilir seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır.

3.Grup İncelemeler (Emeryville Deprem Kaydı)

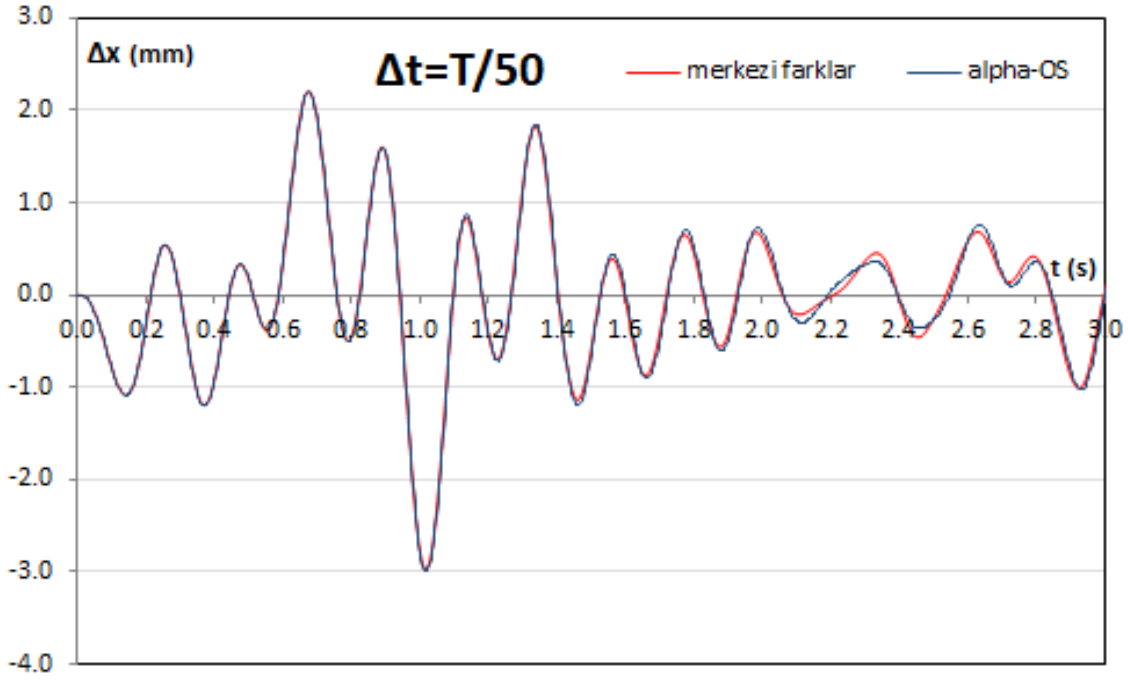
Bu bölümde gerçekleştirilen incelemelerin birinci ve ikinci grup incelemelerden farkı, dinamik yükleme olarak 17 Ekim 1989 Loma Prieta depremi Emeryville istasyonu EMY350 bileşeninin kullanılmasıdır. Bölüm 5' te anlatılan deneysel incelemelerle uyumlu olarak Şekil 4. 1' de verilen yapı modelinin kesit boyutları 20 mm x 20 mm olarak alınmıştır, yüksekliği ise 485 mm olarak alınmıştır. Taşıyıcı sistemin bir ucunda $M = 0.32\ Ns^2/mm$' lik kütle bulunduğu ve sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. α-OS integrasyon şemasında kullanılan α parametresi $\alpha = 0.05$ olarak alınmıştır. İncelemelerde Δt=0.001 s, Δt=0.002 s, Δt=0.004 s ve Δt=0.01 s zaman adımı aralıklarında çalışılmıştır. Yer ivme kaydı 0.60 katsayısı ile ölçeklendirilerek uygulanmıştır. Bu araştırmaya ilişkin grafikler Şekil 4. 37 ila Şekil 4. 40' ta verilmiştir. İnceleme sonunda hesaplanan yer değiştirme değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile Δt=0.001 s zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelere, diğer zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelerin oransal farkı Çizelge 4. 7' de verilmiştir.



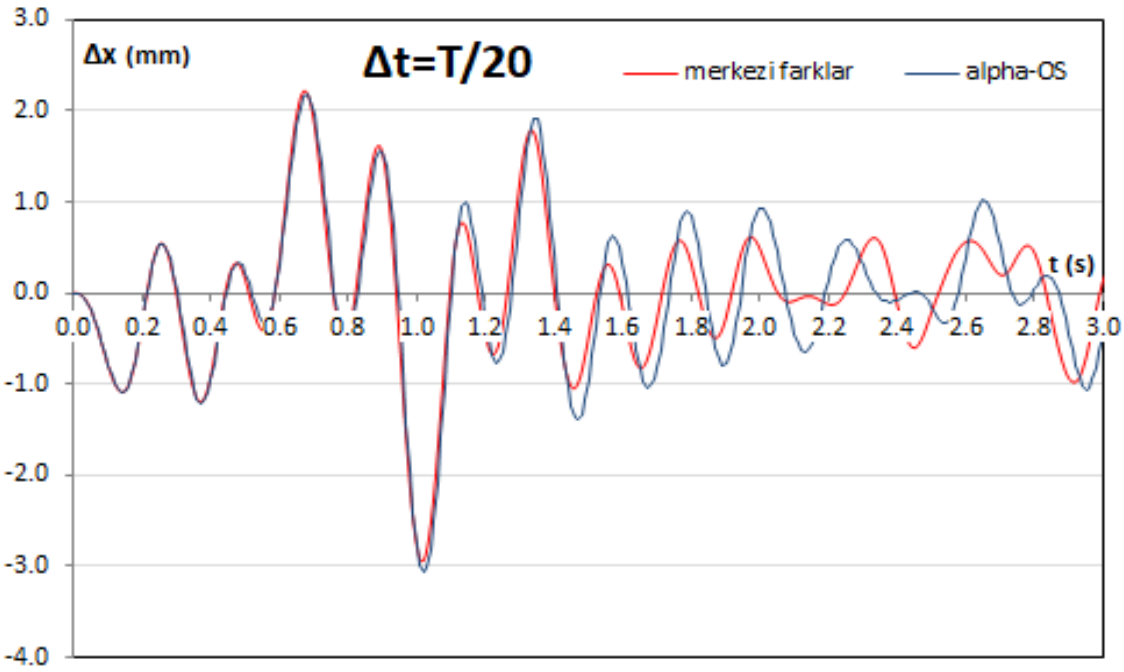
Şekil 4. 37 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 38 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 39 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge)



Şekil 4. 40 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik bölge)

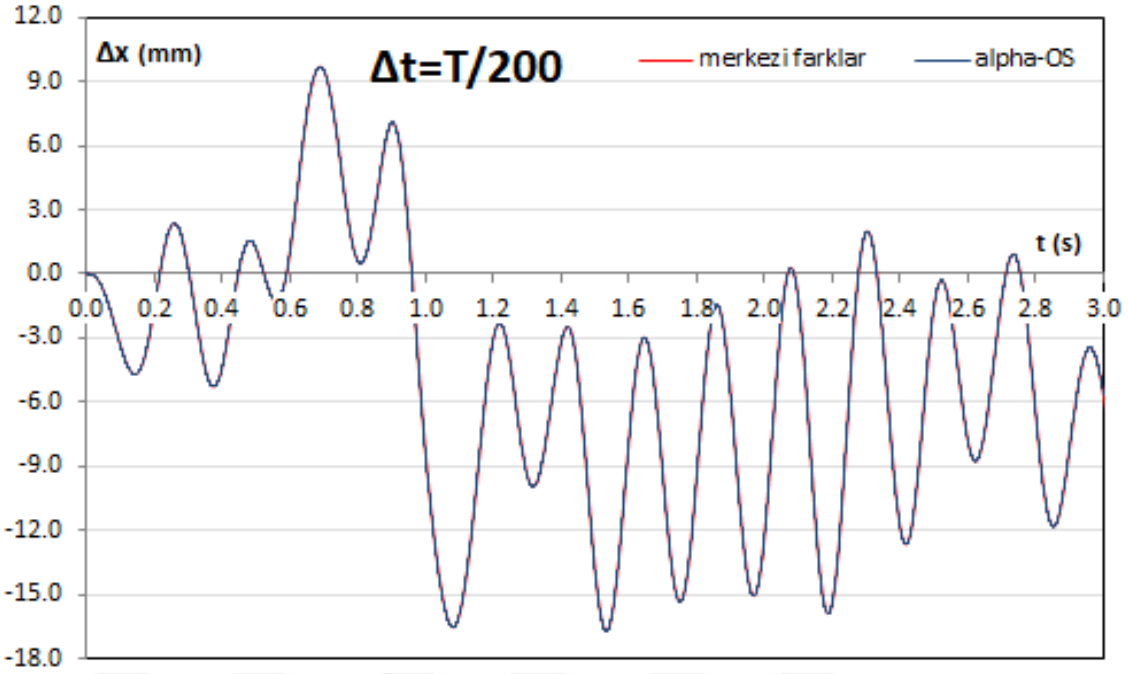
Çizelge 4. 7 Emeryville Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik bölge)

		α-OS			MFY		
	Δt (s)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)	Min (mm)	Max (mm)	Fark (%)
T/200	0.001	-2.99	2.21		-2.98	2.21	
T/100	0.002	-2.99	2.21	-0.01	-2.98	2.21	0.00
T/50	0.004	-3.00	2.20	-0.10	-2.98	2.21	0.01
T/20	0.01	-3.08	2.18	-0.97	-2.94	2.22	0.56

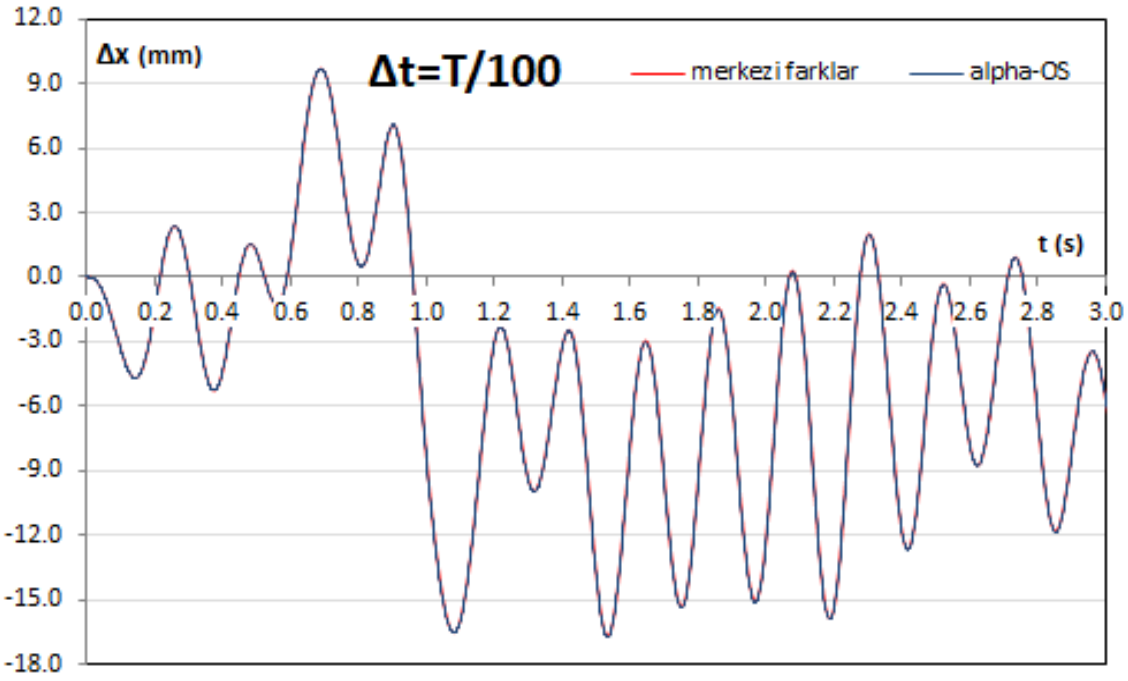
Loma Prieta depremi, Emeryville istasyonu EMY350 bileşeni kullanılarak elastik bölgede gerçekleştirilen sayısal analizler sonucu ortaya çıkan grafikler ve Çizelge 4. 7 incelendiğinde her iki integrasyon şeması analizleri sonucu oluşan yer değiştirme değerleri birbirlerine yeterince yakındır. Zaman adım aralığı değeri artırıldıkça, analizlerde Δt=0.001 s ile yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirme sonuçlarına olan fark artmaktadır. Ancak α-OS Yöntemi ile yapılan incelemelerde oluşan en büyük yer değiştirmenin Δt=0.001 s ile yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirme değerine olan en büyük fark %-0.97' dir. Merkezi Farklar Yönteminde ise bu fark %0.56 olarak gözlenmiştir. Zaman adım aralığı değerinin yapı modelinin titreşim periyodunun 1/20' sine tekabül ettiği analizlerde bile oluşan fark değerlerinin göz ardı edilebilir seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır.

Elastik Ötesi Bölgede Deprem Kaydı Altındaki İncelemeler

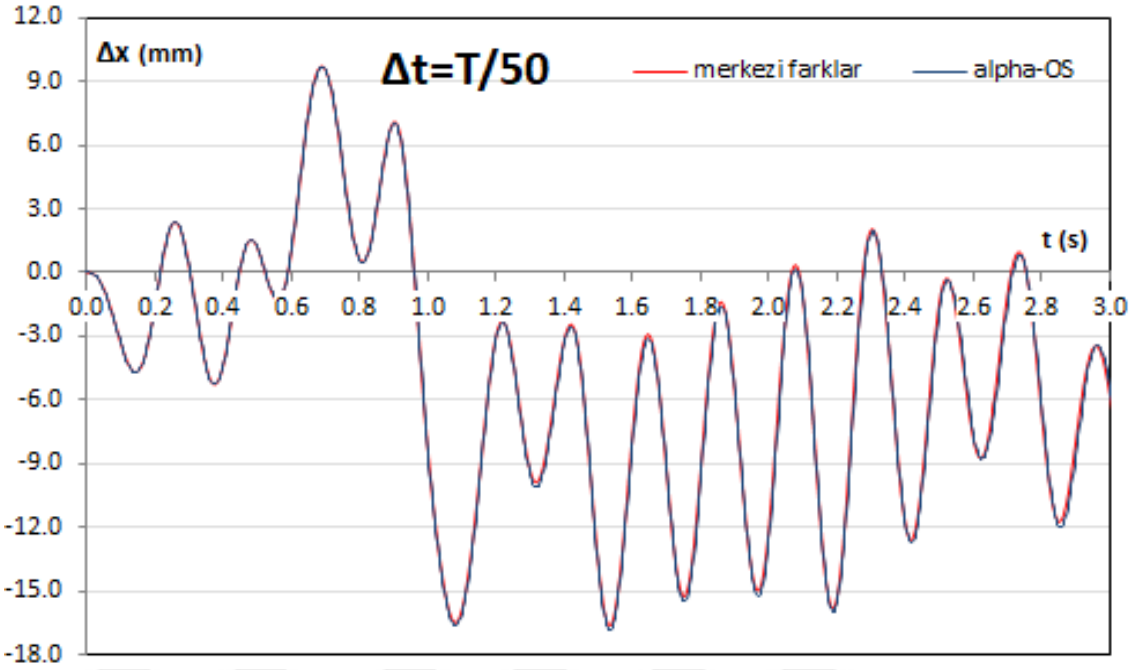
Elastik ötesi bölgede gerçekleştirilen sayısal analizlerde 17 Ekim 1989 Loma Prieta depremi Emeryville istasyonu EMY350 bileşeni, 2.50 katsayısı ile ölçeklendirilerek kullanılmıştır. Analizde incelenen yapı modelinin kesit boyutları, Bölüm 5'te anlatılan deneysel incelemelerle uyumlu olması açısından 20 mm x 20 mm olarak alınmıştır. Eleman yüksekliği 490 mm alınmıştır. Taşıyıcı sistemin bir ucunda $M = 0.32\ Ns^2/mm$' lik kütle bulunduğu ve sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. Eşdeğer dinamik analizde α-OS Yönteminde kullanılan α parametresi $\alpha = 0.05$ alınmıştır. Zaman adımı olarak $\Delta t = 0.001\ s$, $\Delta t = 0.002\ s$, $\Delta t = 0.004\ s$ ve $\Delta t = 0.01\ s$ kullanılmıştır. Malzeme özelliği olarak çeliğin elastisite modülü $E = 200000\ MPa$, akma gerilmesi $f_y = 290\ MPa$ ve elastik ötesi pekleşme oranı $\mu = 0.03$ olarak işleme alınmıştır. Sistemin yatay öteleme rijitliği $K = 12\frac{EI}{L^3} = 272\ N/mm$, serbest titreşim periyodu $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K}} = 0.216\ s$ olarak hesaplanmıştır. Elastik ötesi bölgede deprem kaydı ile yapılan analizlere ait grafikler Şekil 4. 41 ila Şekil 4. 44' te verilmiştir. İnceleme sonunda hesaplanan yer değiştirme değerlerinin minimum ve maksimum değerleri ile Δt=0.001 s zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelere, diğer zaman adımında yapılan analizler sonucu oluşan yer değiştirmelerin oransal farkı Çizelge 4. 8' de verilmiştir.



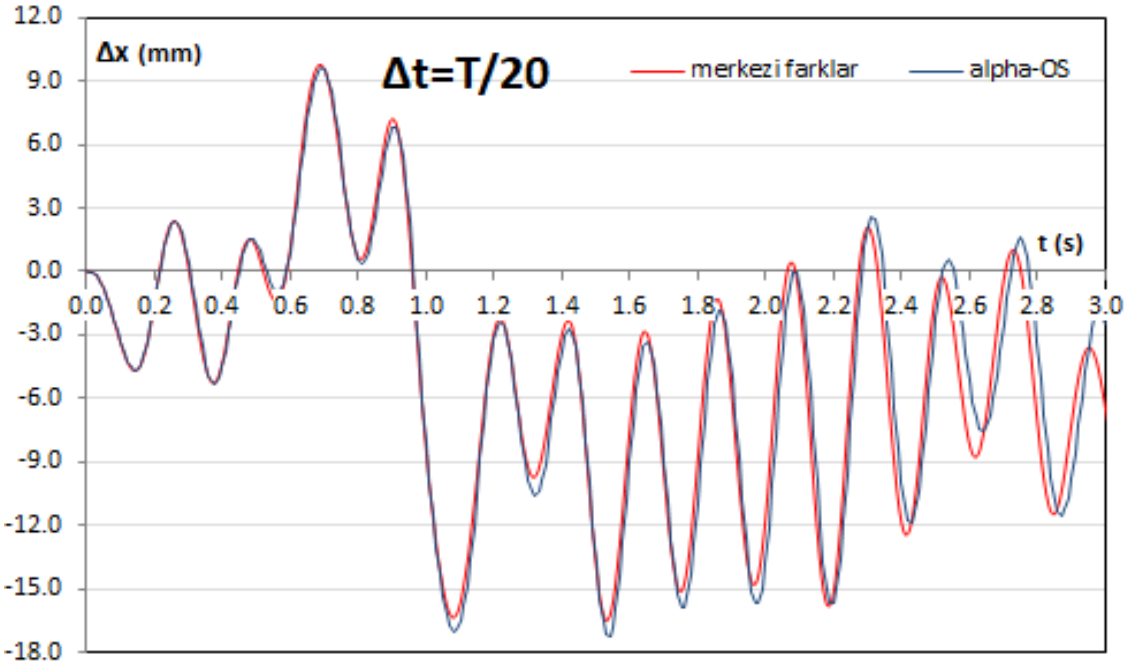
Şekil 4. 41 Δt=0.001 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge)



Şekil 4. 42 Δt=0.002 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge)



Şekil 4. 43 Δt=0.004 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge)



Şekil 4. 44 Δt=0.01 s adım aralığında inceleme (Emeryville ivme kaydı, elastik ötesi bölge)

Çizelge 4. 8 Emeryville Deprem Kaydı Altında Yapılan İncelemeler (elastik ötesi bölge)

		α-OS			MFY		
	∆t (s)	Min	Max	Fark (%)	Min	Max	Fark (%)
T/200	0.001	-16.71	9.71		-16.70	9.71	
T/100	0.002	-16.75	9.71	-0.01	-16.69	9.71	0.00
T/50	0.004	-16.85	9.70	-0.08	-16.63	9.72	0.12
T/20	0.01	-17.29	9.61	-1.02	-16.51	9.79	0.81

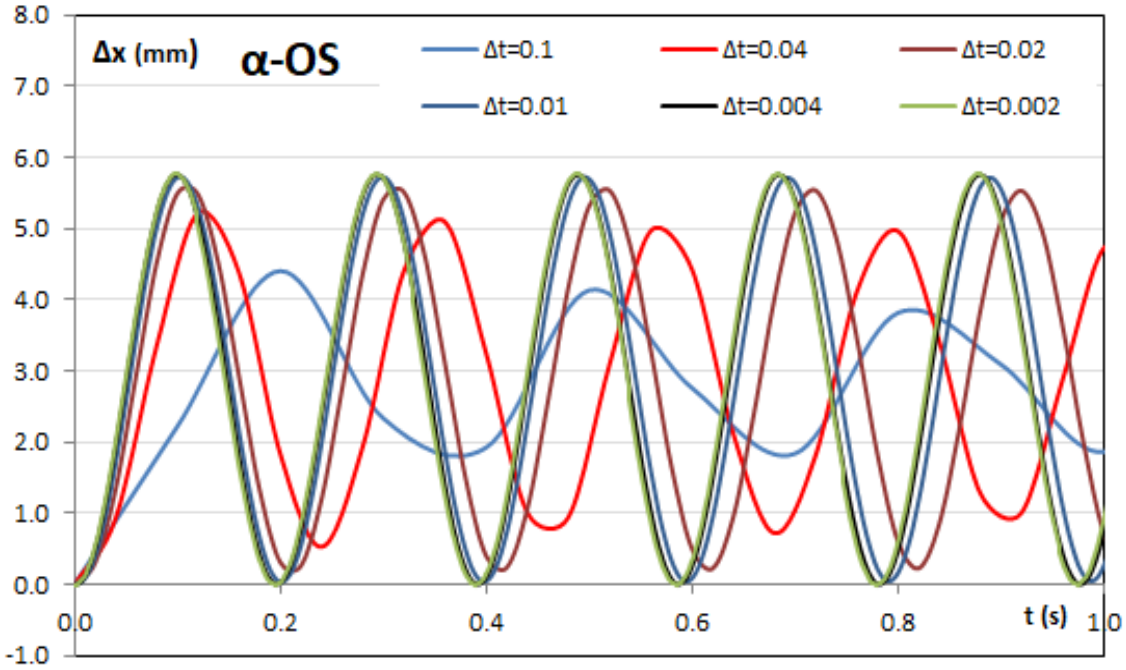
Loma Prieta depremi, Emeryville istasyonu EMY350 bileşeni kullanılarak elastik ötesi bölgede gerçekleştirilen sayısal analizler sonucu ortaya çıkan grafikler ve Çizelge 4. 8 incelendiğinde her iki integrasyon şeması analizleri sonucu oluşan yer değiştirme değerleri birbirlerine yeterince yakındır. Zaman adım aralığı değeri artırıldıkça, analizlerde Δt=0.001 s ile yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirme sonuçlarına olan fark artmaktadır. Ancak α-OS Yöntemi ile yapılan incelemelerde oluşan en büyük yer değiştirmenin Δt=0.001 s ile yapılan analiz sonucu oluşan yer değiştirme değerine olan en büyük farkı %-1.02' dir. Merkezi Farklar Yönteminde ise bu fark %0.81 olarak ortaya çıkmıştır. Zaman adım aralığı değerinin yapı modelinin titreşim periyodunun 1/20' sine tekabül ettiği analizlerde bile oluşan fark değerlerinin göz ardı edilebilir seviyelerde olduğu anlaşılmaktadır.

4.4.2 Zaman Adım Aralığının Etkisi

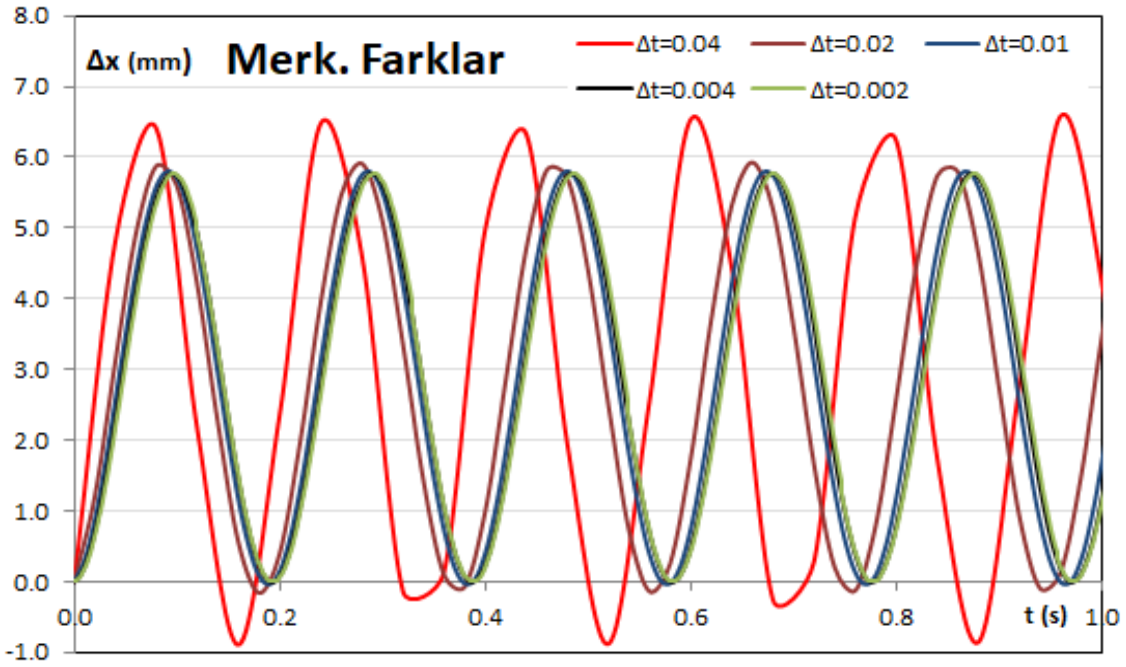
Sayısal incelemelerin ikinci adımında eşdeğer dinamik analizde kullanılan zaman adım aralığı değerlerinin sonuçlara etkisi irdelenmiştir. Bu şekilde, eşdeğer dinamik analizlerde kullanılacak en uygun zaman adım aralığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen sayısal incelemelerde zaman adım aralığı olarak $T/200$, $T/100$, $T/50$, $T/20$, $T/10$, $T/5$ ve $T/2$ seçilmiştir. Bu incelemeye yönelik gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ise Bölüm 5' te anlatılmıştır. Literatürde zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde, zaman adım aralığı olarak sıklıkla $T/10$ seçilmektedir. Zaman adım aralığının etkisi deneysel çalışmalarla uyumlu olarak iki ayrı grup altında incelenmiştir. İlk grup incelemeler elastik bölgede, deneysel çalışmalarda yük hücresi kapasitesinin %1'ine tekabül eden yükler etkisinde gerçekleştirilmiştir. İkinci grup incelemeler yine elastik bölgede, ancak yük hücresi kapasitesinin %2'sine denk gelen yük seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Her iki grup incelemede de iki farklı zaman integrasyon şeması ile analiz yapılmıştır.

Elastik Bölgede Sabit Yük Altındaki İncelemeler (Birinci Grup İncelemeler)

Birinci grup incelemelerde Şekil 4. 1' de verilen yapı modelinin kesit boyutları 12 mm x 12 mm, yüksekliği 405 mm'dir. Taşıyıcı sistemin bir ucunda $M = 0.06\ Ns^2/mm$' lik kütle bulunduğu ve sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. Eşdeğer dinamik analizde kullanılan α-OS zaman integrasyon şeması algoritmasında kullanılan α parametresi, $\alpha = 0.05$ alınmıştır. Kullanılan zaman adımı değerleri, $T/200 = 0.001\ s$, $T/100 = 0.002\ s$, $T/50 = 0.004\ s$, $T/20 = 0.01\ s$, $T/10 = 0.02\ s$, $T/5 = 0.04\ s$ ve $T/2 = 0.1\ s$ şeklindedir. Dinamik yükleme olarak Şekil 4. 3' te gösterilen anlık sabit yük, $F = 180\ N$ olarak alınmıştır. Malzeme özelliği olarak çeliğin elastisite modülü $E = 200000\ MPa$ kullanılmıştır. Taşıyıcı sistemin yatay öteleme rijitliği, $K = 12EI/L^3 = 62.43\ N/mm$ şeklinde hesaplanmıştır. Yapı serbest tireşim periyodu, $T = 2\pi\sqrt{M/K} = 0.195\ s$ olarak hesaplanmıştır. Her bir zaman adım aralığı değeri ile yapılan analiz sonucu oluşan Δx-t (yer değiştirme-zaman) grafikleri, α-OS integrasyon şeması ile yapılan analizler için Şekil 4. 45' te, Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizler için Şekil 4. 46' da verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4. 9' da kıyaslanmıştır.



Şekil 4. 45 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, α-OS Yöntemi, birinci grup inceleme)



Şekil 4. 46 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, Merkezi Farklar Yöntemi, birinci grup inceleme)

Çizelge 4. 9 Zaman adım aralığı etkisi (Birinci grup inceleme, elastik bölge)

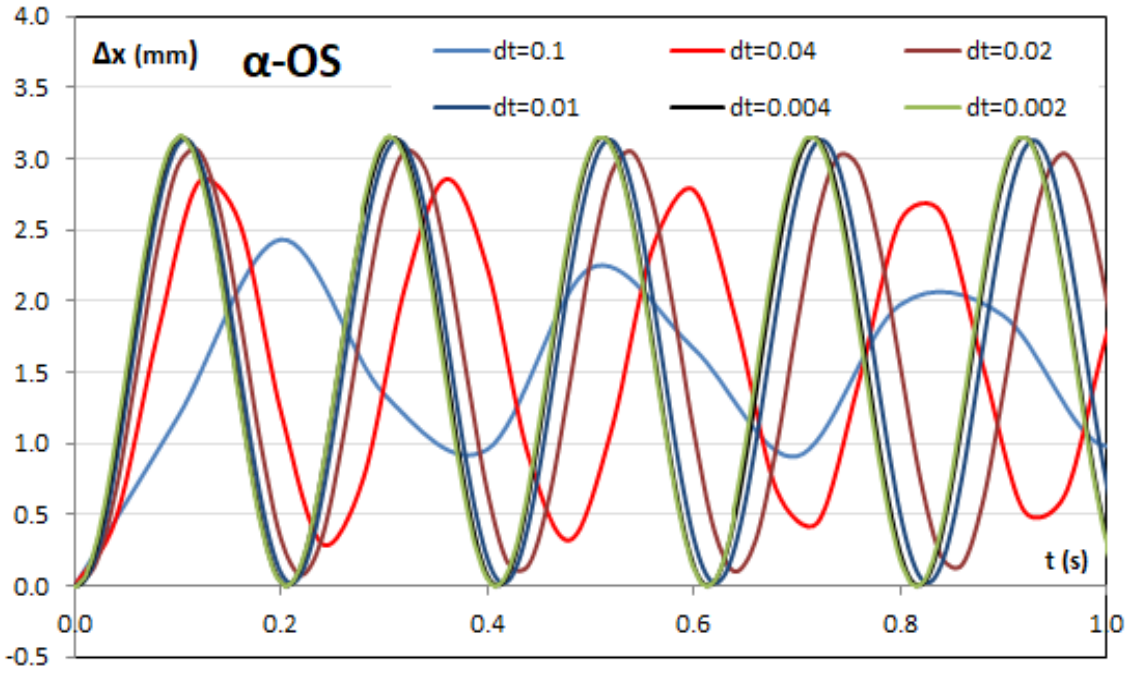
		α-OS			MFY		
	∆t (s)	Min	Max	Fark (%)	Min	Max	Fark (%)
T/200	0.001	0.00	5.77		0.00	5.77	
T/100	0.002	0.00	5.76	-0.02	0.00	5.77	0
T/50	0.004	0.01	5.76	-0.11	-0.01	5.77	0.07
T/20	0.01	0.04	5.72	-0.71	-0.04	5.80	0.64
T/10	0.02	0.23	5.54	-3.92	-0.16	5.93	2.79
T/5	0.04	0.53	5.22	-9.49	-0.89	6.64	15.16
T/2	0.1	1.84	4.41	-23.60	Stabil olmayan çözüm		

Zaman adım aralığının eşdeğer dinamik analize etkisinin incelendiği analizlerde α-OS Yönteminin kullanıldığı incelemelerde Şekil 4. 45 ve Çizelge 4. 9' dan görüldüğü gibi, zaman adım aralığının artması ile taşıyıcı sistemin periyodunun büyüdüğü, sistemde sayısal etkiler sebebiyle oluşan sönümün arttığı ve oluşan en büyük yer değiştirme değeri hassasiyetinin azaldığı görülmektedir. Eşdeğer dinamik deney çalışmaları için zaman adım aralığının, taşıyıcı sistemin titreşim periyodunun 1/20' si veya 1/10' u olarak seçilmesinin uygun olduğu sonucu çıkarılabilir. Zaman adımının $\Delta t = T/200$ olarak alındığı analizlerde en büyük yer değiştirme değeri 5.77 mm olarak elde edilmiştir. Zaman adım aralığı artırıldıkça bu değer sönüm etkileriyle azalmış ve $\Delta t = T/5$ için 5.22 mm, $\Delta t = T/2$ için 4.41 mm olarak elde edilmiş ve yöntemin stabilitesinin ciddi oranda bozulduğu görülmüştür.

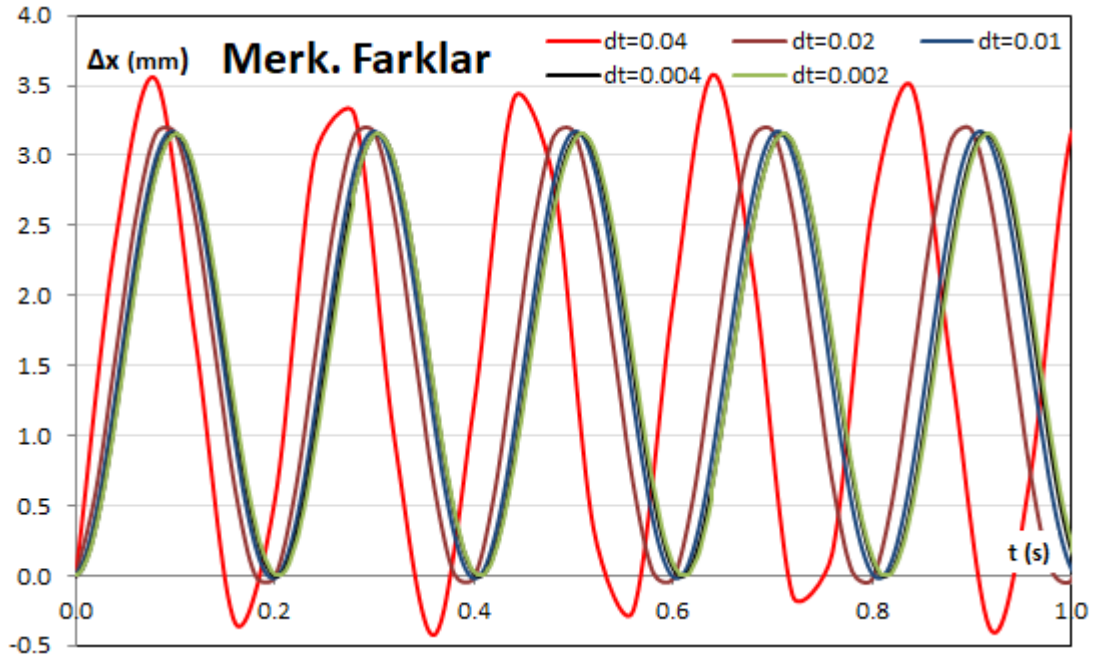
Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizler incelendiğinde, Şekil 4. 46 ve Çizelge 4. 9' dan zaman adım aralığı değeri artırıldıkça α-OS Yöntemi ile yapılan analiz sonuçlarının aksine taşıyıcı sistem periyodunun küçüldüğü, elde edilen en büyük yer değiştirme değerinin arttığı görülmektedir. Zaman adımının $\Delta t = T/200$ olarak alındığı analizlerde en büyük yer değiştirme değeri 5.77 mm olarak elde edilmiştir. Zaman adım aralığı artırıldıkça bu değer artmış ve $\Delta t = T/5$ için 6.64 mm olarak elde edilmiştir. Zaman adım aralığının taşıyıcı sistem periyodunun 1/2' sine karşı geldiği incelemelerde ise yöntemin stabilitesinin kaybolduğu ve sonuç vermediği görülmektedir.

Elastik Bölgede Sabit Yük Altındaki İncelemeler (İkinci Grup İncelemeler)

İkinci grup incelemelerde Şekil 4. 1' de verilen yapı modelinin kesit boyutları 16 mm x 16 mm, yüksekliği 410 mm'dir. Taşıyıcı sistemin bir ucunda $M = 0.20\ Ns^2/mm$' lik kütle bulunduğu ve sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. Eşdeğer dinamik analizde kullanılan α-OS zaman integrasyon şeması algoritmasında kullanılan α parametresi, $\alpha = 0.05$ alınmıştır. Kullanılan zaman adımı değerleri, $T/200 = 0.001\ s$, $T/100 = 0.002\ s$, $T/50 = 0.004\ s$, $T/20 = 0.01\ s$, $T/10 = 0.02\ s$, $T/5 = 0.04\ s$ ve $T/2 = 0.1\ s$ şeklindedir. Dinamik yükleme olarak Şekil 4. 3' te gösterilen anlık sabit yük, $F = 300\ N$ olarak alınmıştır. Malzeme özelliği olarak çeliğin elastisite modülü $E = 200000\ MPa$ kullanılmıştır. Taşıyıcı sistemin yatay öteleme rijitliği, $K = 12EI/L^3 = 190.18\ N/mm$ şeklinde hesaplanmıştır. Yapı serbest tireşim periyodu, $T = 2\pi\sqrt{M/K} = 0.204\ s$ olarak hesaplanmıştır. Her bir zaman adım aralığı değeri ile yapılan analiz sonucu oluşan Δx-t (yer değiştirme-zaman) grafikleri, α-OS integrasyon şeması ile yapılan analizler için Şekil 4. 47' de, Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizler için Şekil 4. 48' de verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4. 10' da kıyaslanmıştır.



Şekil 4. 47 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, α-OS Yöntemi ikinci grup inceleme)



Şekil 4. 48 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, Merkezi Farklar Yöntemi ikinci grup inceleme)

Çizelge 4. 10 Zaman adım aralığı etkisi (İkinci grup inceleme, elastik bölge)

		α-OS			MFY		
	∆t (s)	Min	Max	Fark (%)	Min	Max	Fark (%)
T/200	0.001	0.00	3.15		0.00	3.16	
T/100	0.002	0.00	3.15	0.00	0.00	3.16	0
T/50	0.004	0.01	3.15	0.00	0.00	3.16	0.07
T/20	0.01	0.02	3.13	-0.63	-0.02	3.17	0.58
T/10	0.02	0.08	3.06	-2.86	-0.05	3.21	1.65
T/5	0.04	0.30	2.86	-9.21	-0.42	3.58	13.38
T/2	0.1	0.91	2.43	-22.87	Stabil olmayan çözüm		

Zaman adım aralığının eşdeğer dinamik analize etkisinin incelendiği analizlerde α-OS Yönteminin kullanıldığı incelemelerde Şekil 4. 47 ve Çizelge 4. 10' dan görüldüğü gibi, zaman adım aralığının artması ile taşıyıcı sistemin periyodunun büyüdüğü, sistemde sayısal etkiler sebebiyle oluşan sönümün arttığı ve oluşan en büyük yer değiştirme değeri hassasiyetinin azaldığı görülmektedir. Eşdeğer dinamik deney çalışmaları için zaman adım aralığının, taşıyıcı sistemin titreşim periyodunun 1/20' si veya 1/10' u olarak seçilmesinin uygun olduğu sonucu çıkarılabilir. Zaman adımının $\Delta t = T/200$ olarak alındığı analizlerde en büyük yer değiştirme değeri 3.15 mm olarak elde edilmiştir. Zaman adım aralığı artırıldıkça bu değer sönüm etkileriyle azalmış ve $\Delta t = T/5$ için 2.86 mm, $\Delta t = T/2$ için 2.43 mm olarak elde edilmiş ve yöntemin stabilitesinin ciddi oranda bozulduğu görülmüştür.

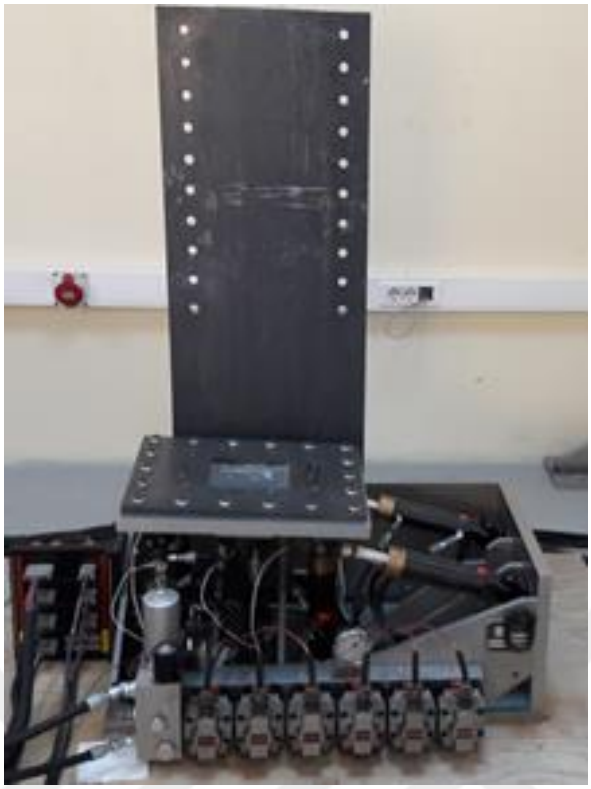
Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan analizler incelendiğinde, Şekil 4. 48 ve Çizelge 4. 10' dan zaman adım aralığı değeri artırıldıkça α-OS Yöntemi ile yapılan analiz sonuçlarının aksine taşıyıcı sistem periyodunun küçüldüğü, elde edilen en büyük yer değiştirme değerinin arttığı görülmektedir. Zaman adımının $\Delta t = T/200$ olarak alındığı analizlerde en büyük yer değiştirme değeri 3.16 mm olarak elde edilmiştir. Zaman adım aralığı artırıldıkça bu değer artmış ve $\Delta t = T/5$ için 3.58 mm olarak elde edilmiştir. Zaman adım aralığının taşıyıcı sistem periyodunun 1/2' sine karşı geldiği incelemelerde ise yöntemin stabilitesinin kaybolduğu ve sonuç vermediği görülmektedir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL İNCELEMELER

5.1 Deney Düzeneği

Deneysel çalışmalar Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi "Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı"nda gerçekleştirilmiştir. Burada bulunan 1/5 ölçekli, altı serbestlik dereceli yük ve yer değiştirme hücresi, her üç eksen doğrultusunda öteleme veya kuvvet ve her üç eksen etrafında açısal yer değiştirme veya moment olarak aldığı komutları deney numunesine yansıtabilmektedir. Laboratuvarda kullanılan hücrenin fotoğrafı Şekil 5. 1' de, teknik kapasitesi ise Çizelge 5. 1' de verilmiştir. Altı eksenli yük ve yer değiştirme hücresi temel olarak altı bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; 1) hücrenin sabit kasası, 2) hücrenin hareketli yüzeyi, altışar adet 3) hidrolik kriko, 4) yük ölçer, 5) yer değiştirme ölçer ve 6) servo vanadır. Bu şekilde, hücrenin hareketli yüzeyinin her bir serbestlik derecesi hem doğrusal yer değiştirme/açısal yer değiştirme hem de kuvvet/moment olarak kontrol edilebilmektedir. Yük ve yer değiştirme hücresi SC6000 (Servo controller) ile kontrol edilmektedir [29], [30].



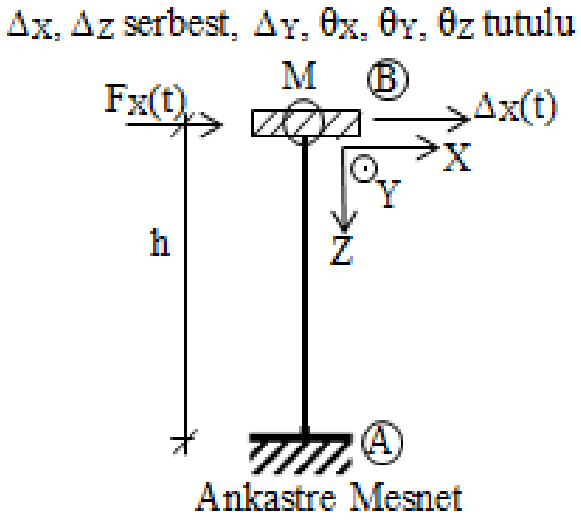
Şekil 5. 1 Altı serbestlik dereceli yük ve yer değiştirme hücresi ile güçlü duvar

Çizelge 5. 1 Teknik kapasite

	X	**Y**	**Z**
Yer değiştirme	± 50 mm	± 25 mm	± 25 mm
Açısal yer değiştirme	± 11.6°	± 9.4°	± 20.4°
Kuvvet	18.6/31 kN (B/Ç)	9.3/15.6 kN (B/Ç)	27.9/46.8 kN (B/Ç)
Moment	2.2 kNm	2.6 kNm	2.2 kNm

5.2 Çelik Deney Numuneleri

Eşdeğer dinamik deneylerde, bir ucu ankastre mesnetli olan, diğer ucu “X” ve “Z” yönlerinde hareket edebilen, “Y” doğrultusundaki doğrusal/açısal yer değiştirmeleri tutulu şekilde mesnetli kolon elemanı kullanılmıştır. İncelenen taşıyıcı sistemin modeli Şekil 5. 2’ de gösterilmiştir. Deney düzeneğine bağlı numune ise Şekil 5. 3’te verilmiştir.



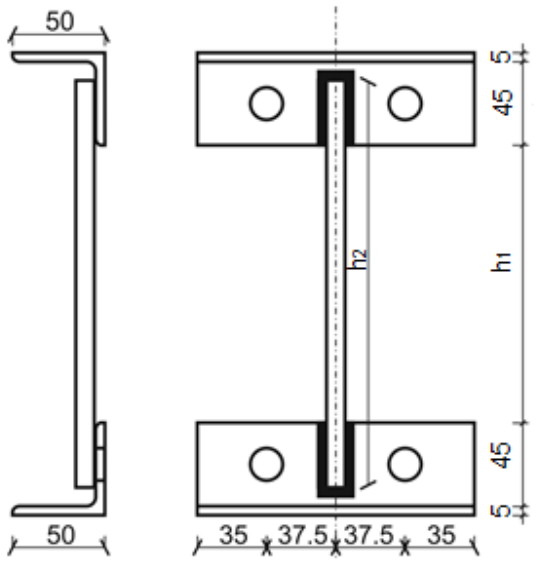
Şekil 5. 2 Taşıyıcı sistem modeli



Şekil 5. 3 Deney düzeneği ve numune

Deney düzeneğinden dolayı Şekil 5. 2’ deki sistemin deneyleri baş aşağı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi “A” ucundan güçlü duvara, “B” ucundan Yük ve Yer Değiştirme Hücresinin hareketli plakasına bağlanmıştır. Taşıyıcı sistemin “B” ucunda toplanmış kütle bulunduğu varsayılmıştır. Deneylerde dinamik yük etkisi taşıyıcı sistemin “B” ucuna uygulanarak gösterilmiştir. İvme kaydı ile yapılan deneylerde, yer ivme kaydının taşıyıcı sistemin ankastre mesnetli “A” ucundan “X” doğrultusunda uygulandığı düşünülmüştür. Deney düzeneğinde “A” ucu ankastre mesnetli olduğu için bu durumu yansıtmak üzere, deprem ivme kaydı “B” ucunda bulunan kütle ile çarpılarak “B” ucundan etkiyen dinamik yük olarak tanımlanmıştır.

Tüm deneylerde çelik malzemeli numuneler kullanılmıştır. Deney numunesinin geometrik özellikleri ve bağlantı detayları Şekil 5. 4’ te gösterildiği gibidir. Deney numuneleri kare geometriye sahip, dolu kesitli çelik çubuklardan üretilmiştir. Çelik çubuklar her iki uçtan 50 x 50 x 5 mm boyutlarındaki korniyerlere, 3 mm’ lik köşe kaynağıyla bağlanmıştır. Korniyerler ise, üzerlerine açılan ikişer delik vasıtasıyla güçlü duvara ve Yük ve Yer Değiştirme Hücresinin hareketli plakasına, M12 bulonlarla bağlanmıştır. Bu birleşimler rijit birleşim olarak çalışmaktadır. Şekil 5. 4’ te verilen tüm ölçüler “mm” cinsindendir.



Şekil 5. 4 Deney numunesi

Eşdeğer dinamik testlerde üç farklı geometrik boyutta numuneler kullanılmıştır. Bu numunelere ait geometrik özellikler Çizelge 5. 2' de verilmiştir.

Çizelge 5. 2 Numune kesit tipleri ve geometrik boyutlar

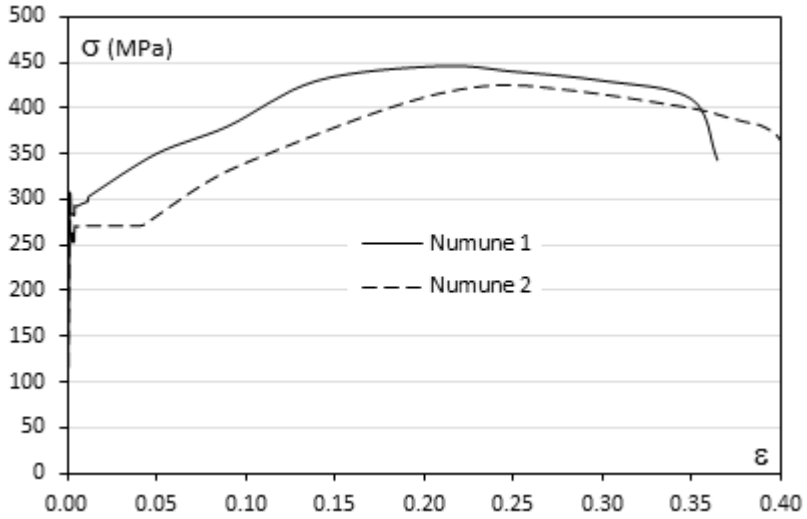
Numune Tipi	Kesit (mm x mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h (mm)
Tip 1	12 x 12	390	470	405
Tip 2	16 x 16	390	470	410

Çizelge 5. 2' de yer alan "h_1" ve "h_2" yükseklikleri, Şekil 5. 3' te gösterilen yüksekliklerdir. Çizelge 5. 2' deki "h" yüksekliği ise sayısal ve deneysel analizlerde göz önüne alınan, Şekil 4. 1 ve Şekil 5. 2' de gösterilen yüksekliktir.

Test numuneleri oluşturulurken kullanılan çelik çubukların mekanik özellikleri ve gerilme – şekil değiştirme ilişkileri TS EN ISO 6892-1, 2011 yönetmeliğine göre ortam sıcaklığında yapılan çekme deneyleri ile belirlenmiştir [31]. Bu amaçla, Tip 1 numunelerde kullanılan, 12 x 12 mm dolu kesit boyutlarına sahip çelik çubuklardan iki adet 300 mm uzunluğunda parçanın çekme testi gerçekleştirilmiştir. İki deneyden elde edilen malzeme özellikleri Çizelge 5. 3' te gösterilmiştir. Elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 5. 5' te verilmiştir [32].

Çizelge 5. 3 Malzeme özellikleri

Özellik	Numune 1	Numune 2
Kalınlık (mm)	11.88	11.98
Genişlik (mm)	12.06	11.88
Alan (mm^2)	143.3	142.3
Elastisite Modülü (MPa)	212140	208250
Üst Akma (MPa)	301	281
Alt Akma (MPa)	277	260
Çekme Dayanımı (MPa)	449	424
Kopma Gerilmesi (MPa)	343	321
Kopma Uzama Oranı (%)	36.3	40.9



Şekil 5. 5 Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkisi

5.3 Çelik Deney Numuneli İncelemeler

Eşdeğer dinamik deneylerde anlık etkiyen sabit yük etkisinde iki grupta gerçekleştirilmiştir. İlk grupta yük hücresi kapasitesinin %1'ine, ikinci grup deneylerde yük hücresi kapasitesinin %2'sine karşı gelen yük seviyeleriyle çalışılmıştır. Deneysel incelemeler kısmında eşdeğer dinamik testte kullanılan zaman adım aralığı değerinin sonuçlara etkisi irdelenmiştir.

5.3.1 Zaman Adım Aralığının Etkisi

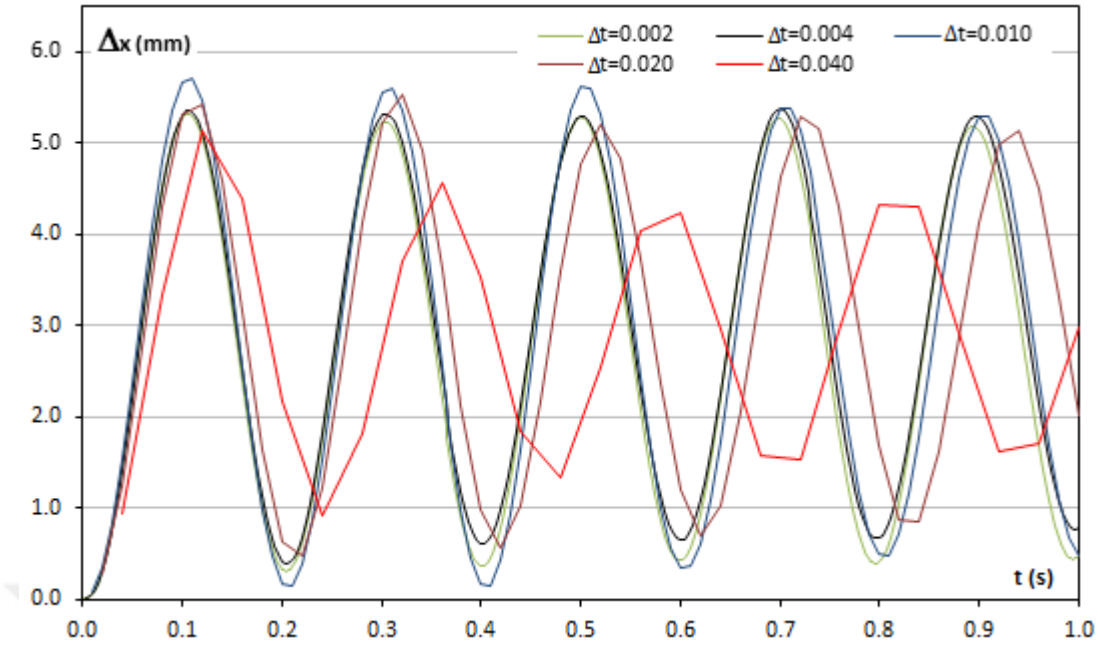
Deneysel çalışmalarda farklı zaman adım aralıkları ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde eşdeğer dinamik deneylerde kullanılacak en uygun zaman adım aralığı değerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan araştırmalarda zaman adım aralığı olarak $T/100$, $T/50$, $T/20$, $T/10$ ve $T/5$ değerleri seçilmiştir.

Zaman adım aralığı etkisi iki ayrı inceleme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Birinci grup deneylerde, elastik bölgede çalışılmıştır ve yük hücrelerinin sağlıklı olarak çalışabileceği en alt sınır değerlerde (yük hücresi kapasitesinin %1'i) deneyler gerçekleştirilmiştir. İkinci grup deneylerde de elastik bölgede çalışılmıştır, ancak yük seviyeleri bir önceki grubun yük seviyelerinin iki katına çıkarılmıştır.

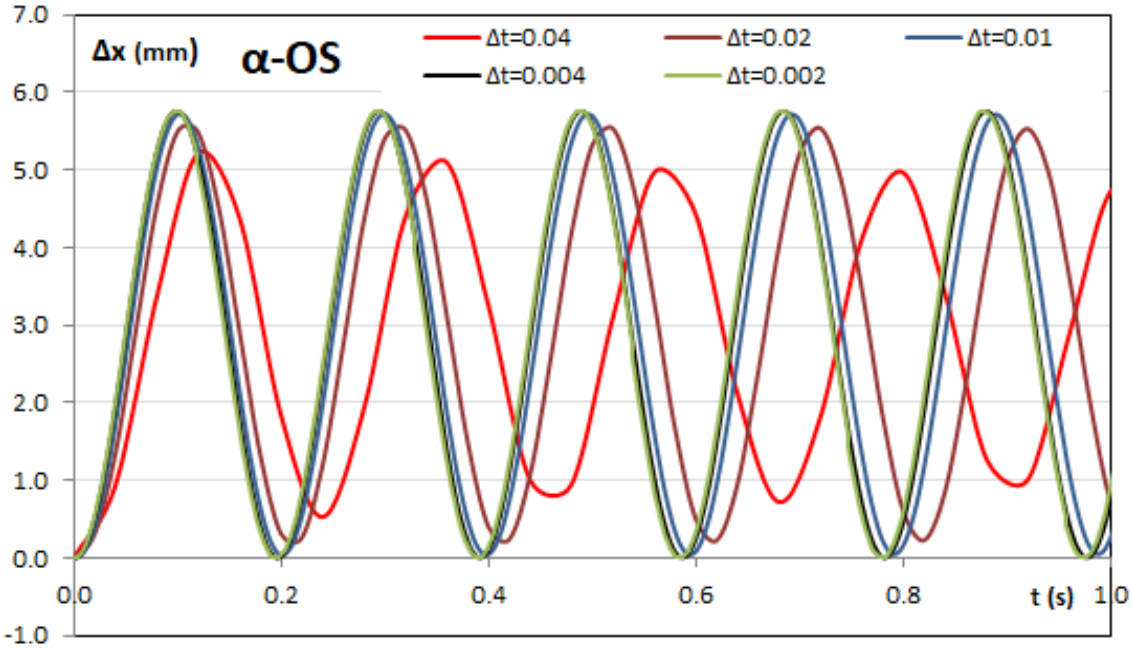
Birinci Grup Deneyler (Elastik Bölge, %1 Yük Hücresi Kapasitesi)

Bu grupta gerçekleştirilen beş adet deney, elastik bölgede ve yük hücrelerinin uygun biçimde çalışabildiği alt sınır değerlerde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Şekil 5. 2' de gösterilen taşıyıcı sistem için Çizelge 5. 2' de gösterilen 405 mm yüksekliğinde, 12 x 12 mm kesit boyutlarına sahip Tip 1 numuneleri kullanılmıştır. Sistemin bir ucunda $M = 0.06\, Ns^2/mm$'lik kütle bulunduğu ve modelin sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. Deneylerde α-OS integrasyon şeması kullanılmış ve yöntemin parametresi α, $\alpha = 0.05$ olarak işleme alınmıştır. Zaman adımı olarak $\Delta t = T/100 = 0.002\, s$, $\Delta t = T/50 = 0.004\, s$, $\Delta t = T/20 = 0.01\, s$, $\Delta t = T/10 = 0.02\, s$ ve $\Delta t = T/5 = 0.04\, s$ değerleri kullanılmış ve deneylere 1 saniyelik süre boyunca devam edilmiştir. Dinamik yükleme olarak $F = 180\, N$ alınmıştır. Deneylerden elde edilen zamana bağlı yer değiştirme grafikleri Şekil 5. 6' da verilmiştir.

α-OS Yöntemi kullanılarak farklı zaman adım aralığı değerleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu oluşan yer değiştirme değerlerini kıyaslamak üzere, Bölüm 4.4.2' de anlatılan, Şekil 4. 45 ile verilen sayısal analiz sonucu oluşan yer değiştirme grafiğinin, deneysel çalışmada kullanılan beş adet zaman adımı için düzenlenmiş hali Şekil 5. 7' de verilmiştir.



Şekil 5. 6 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, deneysel sonuç, birinci grup inceleme)



Şekil 5. 7 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, sayısal analiz sonucu, birinci grup inceleme)

Deney sonuçları değerlendirildiğinde, deneysel eşdeğer dinamik test altyapısının ve yazılımlarının, farklı zaman adım aralığı değerleri için sayısal analiz sonuçları ile uyumlu bir şekilde çalıştığı görülmektedir.

Sayısal incelemeler sonunda zaman adım aralığı değeri artırıldıkça taşıyıcı sistem periyodunun büyüdüğü, sayısal etkenler sebebiyle sönümün arttığı, elde edilen en büyük yer değiştirme değeri hassasiyetinin azaldığı görülmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda oluşan grafikler incelendiğinde, zaman adım aralığı artırıldıkça sayısal analiz sonuçlarına benzer sonuçlar gözlenmektedir. Ancak zaman adımının küçük değerleri için ($T/100$, $T/50$) yer değiştirme değerlerinde, $T/20$ zaman adımı kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucu oluşan yer değiştirme değerlerine göre farklılıklar ortaya çıkmıştır. Sayısal analiz ve deneysel çalışma sonucu oluşan en büyük yer değiştirme değerleri ile bu değerlerin Δt=0.002 s zaman adım aralığı ile gerçekleştirilen sayısal analiz sonucu oluşan yer değiştirme değerine yüzdesel farkı Çizelge 5. 4' te verilmiştir.

Çizelge 5. 4 Sayısal analiz ve deney sonuçları (Birinci grup inceleme)

	Sayısal Analiz		Deneysel Analiz	
Zaman adımı (s)	Δx (mm)	Fark (%)	Δx (mm)	Fark (%)
$T/100$; Δt=0.002	5.76		5.32	-7.64
$T/50$; Δt=0.004	5.76	0.00	5.37	-6.77
$T/20$; Δt=0.01	5.72	-0.69	5.70	-1.04
$T/10$; Δt=0.02	5.54	-3.82	5.53	-3.99
$T/5$; Δt=0.04	5.22	-9.38	5.14	-10.76

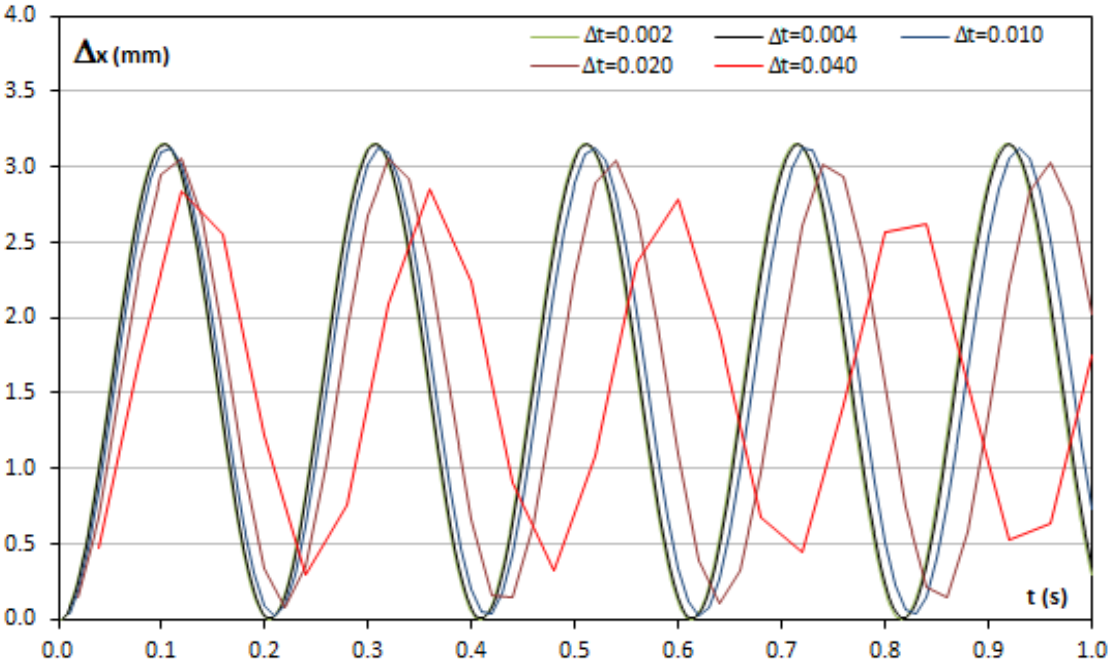
Çizelge 5. 4' ten anlaşılacağı üzere, sayısal analizlerde, zaman adım aralığı artırıldıkça meydana gelen en büyük yer değiştirme değeri azalmaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarında da aynı şekilde, zaman adım aralığı değerinin küçük değerlerinde kesin sonuca yakınsama oluşması beklenmektedir, $T/5$' ten $T/20$' ye kadar bu yakınsama gerçekleşmiş fakat $T/50$ ve $T/100$ zaman aralığı ile yapılan deneylerde yer değiştirme değerleri kesin sonuçtan uzaklaşmıştır. Taşıyıcı sistem titreşim hareketinin tepe ve çukur bölgelerinde hız sıfıra yaklaşmaktadır. Bu bölgeler sabit bir zaman adımında oluşan yer değiştirmenin en az olduğu kısımlardır. Yer değiştirmelerin küçük olmasından dolayı karşı gelen rijitliğe bağlı kuvvet büyüklüklerindeki değişim de küçük olmaktadır. Bazı durumlarda ise kuvvetteki değişim miktarı, yük hücrelerinde bulunan ses seviyesinin de altına inmektedir. Böylece, yük hücresi çok az miktarda da olsa

kuvvette artış yerine düşüş ölçebilmektedir. Bu durum negatif rijitlik oluşturup sonuçların bozulmasına neden olabilmektedir. Özellikle zaman adımının çok küçük değerlerinde ($T/50$ ve $T/100$) gerçekleştirilen analizlerde tepe ve çukur bölgelerinde bu negatif rijitlikler oluşabilmektedir. Bu durum, çok küçük zaman adımlarında yapılan deneylerde oluşan yer değiştirme değerlerindeki bozulmaların sebebi olarak gösterilebilir.

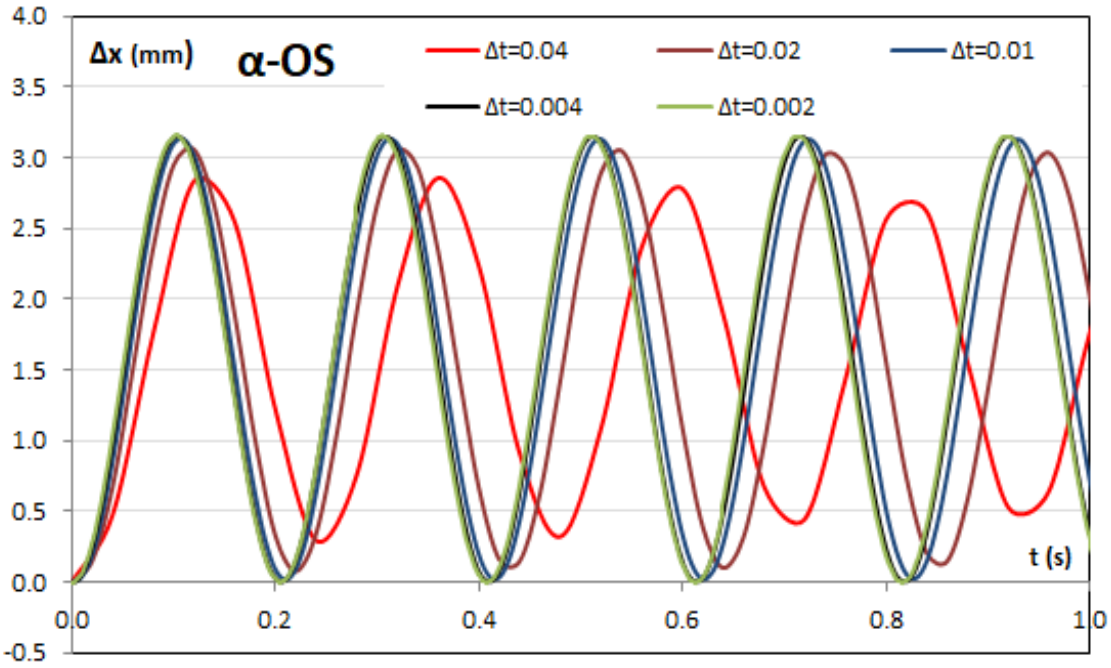
İkinci Grup Deneyler (Elastik Bölge, %2 Yük Hücresi Kapasitesi)

Bu grupta gerçekleştirilen beş adet deney, elastik bölgede ve yük hücrelerinin uygun biçimde çalışabildiği en alt sınır değerin iki katında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Şekil 5. 2' de gösterilen taşıyıcı sistem için Çizelge 5. 2' de gösterilen 410 mm yüksekliğinde, 16 x 16 mm kesit boyutlarına sahip Tip 2 numuneleri kullanılmıştır. Sistemin bir ucunda $M = 0.20\ Ns^2/mm$'lik kütle bulunduğu ve modelin sönümsüz olduğu kabul edilmiştir. Deneylerde α-OS integrasyon şeması kullanılmış ve yöntemin parametresi α, $\alpha = 0.05$ olarak işleme alınmıştır. Zaman adımı olarak $\Delta t = T/100 = 0.002\ s$, $\Delta t = T/50 = 0.004\ s$, $\Delta t = T/20 = 0.01\ s$, $\Delta t = T/10 = 0.02\ s$ ve $\Delta t = T/5 = 0.04\ s$ değerleri kullanılmış ve deneylere 1 saniyelik süre boyunca devam edilmiştir. Dinamik yükleme olarak $F = 300\ N$ alınmıştır. Deneylerden elde edilen zamana bağlı yer değiştirme grafikleri Şekil 5. 8' de verilmiştir.

α-OS Yöntemi kullanılarak farklı zaman adım aralığı değerleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucu oluşan yer değiştirme değerlerini kıyaslamak üzere, Bölüm 4.4.2' de anlatılan, Şekil 4. 47 ile verilen sayısal analiz sonucu oluşan yer değiştirme grafiğinin, deneysel çalışmada kullanılan beş adet zaman adımı için düzenlenmiş hali Şekil 5. 9' da verilmiştir.



Şekil 5. 8 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, deneysel sonuç, ikinci grup inceleme)



Şekil 5. 9 Δx Yer Değiştirmeleri (Zaman adım aralığı etkisi, sayısal analiz sonucu, ikinci grup inceleme)

Deney sonuçları değerlendirildiğinde, deneysel eşdeğer dinamik test altyapısının ve yazılımlarının, farklı zaman adım aralığı değerleri için sayısal analiz sonuçları ile uyumlu bir şekilde çalıştığı görülmektedir.

Sayısal incelemeler sonunda zaman adım aralığı değeri artırıldıkça taşıyıcı sistem periyodunun büyüdüğü, sayısal etkenler sebebiyle sönümün arttığı, elde edilen en büyük yer değiştirme değeri hassasiyetinin azaldığı görülmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda oluşan grafikler incelendiğinde, zaman adım aralığı artırıldıkça sayısal analiz sonuçlarına benzer sonuçlar gözlenmektedir. Ancak zaman adımının küçük değerleri için ($T/100$, $T/50$) yer değiştirme değerlerinde, $T/20$ zaman adımı kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucu oluşan yer değiştirme değerlerine göre farklılıklar ortaya çıkmıştır. Sayısal analiz ve deneysel çalışma sonucu oluşan en büyük yer değiştirme değerleri ile, bu değerlerin Δt=0.002 s zaman adım aralığı ile gerçekleştirilen sayısal analiz sonucu oluşan yer değiştirme değerine farkı yüzde olarak Çizelge 5. 5' te verilmiştir.

Çizelge 5. 5 Sayısal analiz ve deney sonuçları (İkinci grup inceleme)

	Sayısal Analiz		Deneysel Analiz	
Zaman adımı (s)	Δx (mm)	Fark (%)	Δx (mm)	Fark (%)
$T/100$; Δt=0.002	3.15		3.10	-1.59
$T/50$; Δt=0.004	3.15	0.00	3.13	-0.63
$T/20$; Δt=0.01	3.13	-0.63	3.13	-0.63
$T/10$; Δt=0.02	3.06	-2.86	3.13	-0.63
$T/5$; Δt=0.04	2.86	-9.21	2.90	-7.94

Çizelge 5. 5' ten anlaşılacağı üzere, sayısal analizlerde, zaman adım aralığı artırıldıkça meydana gelen en büyük yer değiştirme değeri azalmaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarında da aynı şekilde, zaman adım aralığı değerinin küçük değerlerinde kesin sonuca yakınsama oluşması beklenmektedir, ancak $T/100$ zaman aralığı ile yapılan deneyde yer değiştirme değerleri kesin sonuçtan bir miktar uzaklaşmıştır. İkinci grup deneylerde, birinci grup deneylerdeki yük hücresi kapasitesinin iki katı kullanıldığı için

taşıyıcı sistem yer değiştirme davranışının tepe ve çukur bölgelerinde, kuvvet artışından dolayı, ortaya çıkan negatif rijitlikler azalmıştır.

Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde eşdeğer dinamik deneyler için en uygun zaman adım aralığı değerinin $\Delta t = T/20$ olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu değer göz önüne alındığında, yük hücresinin %1'ine karşı gelen yük seviyeleriyle yapılan deneylerde oluşan yatay yer değiştirme değerleri için elde edilen hassasiyet %1.04' tür. Yük hücrelerinin çalışabileceği alt sınırın iki katı olan seviyelerdeki deneylerde ise bu hassasiyet %0.63 olarak gerçekleştirilmiştir. Her iki grupta gerçekleştirilen deneylerde $\Delta t = T/5$ zaman adım aralığıyla yapılan deneyler dışında, yer değiştirme değerlerinde oluşan fark %10' u geçmemiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yapılarda dinamik yükler etkisindeki davranışı belirlemede kullanılan yöntemlerden biri olan laboratuvar deney yöntemlerinden eşdeğer dinamik deney yöntemi üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Eşdeğer dinamik test tekniğinde yapı modelinin kapasitesi ve deprem istemine ait bilgiler deney sırasında edinilebilir. Yapı adım adım integrasyon yöntemiyle incelendiğinden simülasyon düşük hızlarda gerçekleşir ve bu sayede numune üzerinde hasar oluşumu ve gelişimi görülebilmektedir. Eşdeğer dinamik test yöntemi ile doğrusal olmayan elastik ötesi dinamik tepki, sarsma tablası deney düzeneği olmadan hesaplanabilir.

Çalışmalar kapsamında tek serbestlik dereceli bir yapı modeli için hem sayısal hem de deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler kapsamında eşdeğer dinamik analizlerde kullanılan zaman tanım alanında integrasyon yöntemlerinin ve zaman adım aralığı değerlerinin çözümlere etkisi incelenmiştir. Deneysel analizlerde ise farklı zaman adım aralığı değerleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deneyler için en uygun zaman adım aralığı değerinin bulunması amaçlanmıştır.

Sayısal analizlerde tek serbestlik dereceli sistem için eşdeğer dinamik analizlerde kullanılabilen iki farklı integrasyon şemasının çözümlere etkisi incelenmiştir. Elastik bölgede, anlık etkiyen sabit yük altında gerçekleştirilen analizlerde $T/200$ ve $T/2$ arasında değişen zaman adım aralığı değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Zaman adım aralığı değeri artırıldıkça α-OS Yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde taşıyıcı sistem periyodunun büyüdüğü, sayısal sönüm etkilerinden

dolayı elde edilen en büyük yer değiştirme değerinde azalmalar meydana geldiği, elde edilen en büyük yer değiştirme değeri hassasiyetinin azaldığı görülmüştür.

- Merkezi Farklar Yöntemi ile yapılan çözümlerde ise zaman adım aralığı değeri artırıldıkça taşıyıcı sistemin periyodunun küçüldüğü, en büyük yer değiştirme değerlerinde artışlar olduğu, yöntemin kararlılığının giderek bozulduğu gözlenmiştir.
- Zaman adımının taşıyıcı sistem periyodunun yarısına karşılık geldiği analizlerde ise Merkezi Farklar Yönteminin stabilitesini kaybetmiş olduğu, sonuç alınamadığı görülmüştür. Zaman adım aralığı değerinin çok küçük olduğu ($T/200$, $T/100$, $T/50$) analizlerde iki yöntem ile yapılan çözümler sonucu oluşan yer değiştirme değerleri neredeyse eşit olarak elde edilmiştir.
- Elastik ötesi bölgede anlık etkiyen sabit yük altında gerçekleştirilen analizlerde de elastik bölgede gerçekleştirilen analiz sonuçlarına benzer yorumlar yapılabilir.
- Elastik bölgede deprem kaydı ile gerçekleştirilen analizler için Elcentro, Kocaeli-Düzce ve Emeryville olmak üzere üç farklı ivme kaydı kullanılmıştır. Zaman adımının çok küçük değerleri ile gerçekleştirilen analizlerde, her iki integrasyon yöntemi birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Zaman adım aralığı değeri artırıldıkça, elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerindeki hassasiyet azalmaktadır.
- Elastik ötesi bölgede ise deprem kaydı olarak Emeryville (EMY350) ivme kaydı ile analiz yapılmıştır. Bu incelemede de iki integrasyon yöntemi sonuçlarının, dört farklı zaman adım aralığı değeri için birbirine yeterince yakın sonuç verdiği görülmüştür. α-OS Yöntemi analizlerinde sayısal sönüm etkisiyle, en büyük yer değiştirme değerlerinde azalma görülürken, Merkezi Farklar Yöntemi analizlerinde periyot küçülmesi ve en büyük yer değiştirme değerlerinde artış görülmektedir.

Sayısal analizlerde incelenen parametrelerden bir diğeri zaman adım aralığının analizlere etkisidir. Elastik bölgede, iki farklı integrasyon şeması ve yedi farklı zaman adım aralığı ile gerçekleştirilen analizlerde sabit yük altında çalışılmıştır.

- Zaman adım aralığı artırıldıkça her iki yöntemde de elde edilen en büyük yer değiştirme değeri hassasiyetinin azaldığı, yöntemin kararlılığının bozulmaya başladığı görülmektedir.
- Merkezi Farklar Yönteminin zaman adımının yapı titreşim periyodunun yarısına tekabül ettiği çözümlerde sonuç vermediği görülmüştür.

Deneysel çalışmalarda ise $T/100$, $T/50$, $T/20$, $T/10$ ve $T/5$ zaman adım aralıklarında eşdeğer dinamik testler gerçekleştirilmiştir. Elastik bölgede, anlık etkiyen sabit yük altında gerçekleştirilen deneylerde α-OS integrasyon şeması kullanılmış ve sonuçlar, yapılan sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak;

- Deneysel eşdeğer dinamik test altyapısının sayısal analiz sonuçları ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlenmiştir.
- Sayısal analizlerde zaman adımının $T/100$ olduğu çalışmalarda elde edilen yer değiştirme sonuçları kesin sonuç olarak değerlendirilirse, α-OS Yöntemi çözümlerinde zaman adımı artırıldıkça en büyük yer değiştirme sonuçları kesin sonuçtan uzaklaşmaktadır.
- Deneysel analizlerde zaman adımının büyük değerlerinde ($T/20$, $T/10$ ve $T/5$) sayısal analiz sonuçları ile paralellik görülmektedir. Ancak zaman adımının küçük değerlerinde, deneysel analiz sonuçlarında kesin sonuca göre bozulmalar meydana gelmektedir.

Çalışma sonunda eşdeğer dinamik test tekniğinin, yapısal bir sistemin dinamik yükleme altındaki kapasitesini belirlemede gerçekçi bir yöntem olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen incelemeler dışında değişen numune sönüm özelliklerinin eşdeğer dinamik deney algoritmasına yansıtılması, daha kısa sürede deneyler gerçekleştirebilmek için farklı bir integrasyon yönteminin kullanılması, yükleme hızının, α katsayısının, numune başlangıç rijitliğinin eşdeğer dinamik analizlere etkisinin incelenmesi, çalışma yapılacak yeni hedef konular olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Nakashima, M., (1983). "Stability and Accuracy of Integration Techniques in Pseudo Dynamic Testing", Technical Report No. 105, Building Research Institute, Ministry of Construction, Japan, March

[2] Takanashi, K. ve Nakashima, M., (1987). "Japanese Activities on On-line Testing", J Eng Mech 1987; 113: 1014-32.

[3] Nakashima, M., Kato, H. ve Takaoka, E., (1992). "Development of Real Time Pseudo Dynamic Testing", Earthquake Engineering & Structural Dynamics 21(1):79 – 92, January 1992

[4] Shing, P., B., Nakashima, M. ve Bursi, O., S., (1996). "Application of Pseudodynamic Test Method to Structural Research", Earthquake Spectra: February 1996, Vol. 12, No. 1, pp. 29-56.

[5] Nakashima M., Akazawa, T. ve Igarashi, H., (1995). "Pseudo-Dynamic Testing Using Conventional Testing Devices", Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 24 (10):1409-1422

[6] Nakashima, M., (2001). "Development, Potential and Limitations of Real-Time Online (Pseudo-Dynamic) Testing", Philosophical Transactions of the Royal Society of London A. 359:1851-1867

[7] Kabayama, K., Toyoshima, M., Kumazawa, F., Nakano ve Y., Okada, T., (1993). "Online Tests of Frame Structures", Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No:26, March 1993.

[8] Paguette,J. ve Bruneau, M., (2000) "Pseudo-Dynamic Testing of Unreinforced Masonry Buildings With Flexible Diaphragm", 12WCEE, 1367, 2000.

[9] Shing, B., Vannan, M.T. ve Cater, E., (1991). "Implicit Time Integration For Pseudodynamic Tests", Earthquake Eng. Struct. Dyn., Vol. 20, pp. 551-576, 1991.

[10] Nakashima, M. ve Kato, H., (1987). "Experimental Error Growth Behavior and Error Growth Control in On-line Computer Test Control Method", BRI-Report, Japan, 1987.

[11] Combescure, D. ve Pegon, P., (1994). “Alpha-Operator Splittıng Time Integration Technique For Pseudodynamic Testing: Error Propagation Analysis”, Applied Mechanics Unit, Safety Technology Institute Joint Research Centre, European Commission, I-21020 Ispra (VA) Italy JRC-Special Publication No.I.94.65, Ispra, 1994

[12] Ceyhan, A. (2008). Yapısal Elemanların Deprem Etkisindeki Davranışlarının Belirlenmesinde Benzeşik Dinamik Deney Tekniği Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[13] Tako, E. S., (2009). Bölme Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Deprem Davranışlarının Belirlenmesinde Statik Ve Benzeşik Dinamik Deney Karşılaştırmaları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] Mutlu, M. B., (2012). Numerical Simulations of Reinforced Concrete Frames Tested Using Pseudo-Dynamic Method, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[15] T.C. Resmi Gazete, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik 2007. (26454), 06.03.2007.

[16] Bayülke, N., (2005), “Yapı Deprem Davranışı Üzerine”, İMO Teknik Dergi, 126: 12-36.

[17] Celep, Z., Erkan, A., İlki, A. ve Taşkın, B., (2010), “8 Mart 2010 Kovancılar-Elazığ Depremi Ön Mühendislik Raporu”

[18] Darılmaz, K., (2012). Depreme Dayanıklı Betonarme Binaların Tasarımına Giriş, Sage Yayıncılık, Ankara.

[19] Celep, Z., (2014). Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme, Üçüncü Baskı, Beta Basım Yayın, İstanbul

[20] Jamal, H., (2014), Quasi Static Test - What, Why, How http://www.aboutcivil.org/quasi-static-test.html, 15 Mart 2017.

[21] Yüksel, E., Özkaynak, H. ve Sürmeli, M., (2011), “Benzeşik Dinamik Deney Tekniği ve Bir Uygulama” İMO Teknik Dergi, 2011 5463-5469, Yazı 352.

[22] Kuzmin, D., Finite Difference Method, http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture4.pdf, 20 Haziran 2017.

[23] Chopra, A. K., (2007). Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Upper Saddle River, New Jersey.

[24] Bathe, K. J., (1996). Finite Element Procedures, First Edition, Upper Saddle River, New Jersey

[25] Pegon, P. ve Combescure, D., (1997). “α-Operator Splitting Time Integration Technique for Pseudodynamic Testing: Error Propagation Analysis”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 16: 427-443.

[26] Microsoft Excel 2010, Elektronik Tablo Yazılımı Programı, Microsoft.

[27] Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, Peer Strong Motion Database, http://peer.berkeley.edu/smcat/,2006.

[28] Aksoylar, N. D., Elnashai, A. S. ve Öztürk, A. Z., (2013), "Yarı Rijit Birleşimli Çelik Çerçevelerin Kat Öteleme ve Birleşim Dönmelerinin İncelenmesi", İMO Teknik Dergi, 398:6351-6377.

[29] Shore Western Manufacturing, Inc (2011) SC6000 Software Operation Guide, Monrovia, CA.

[30] Yapıcı, O., Karaman, E., Öztürk, S., Aksoylar, N,D. ve Aksoylar, C., (2015). "Düzlem Çubuk Eleman Rijitlik Matrisinin Deneysel Olarak Belirlenmesi" XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, 24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

[31] TS EN ISO 6892-1, 2011, Metalik Malzemeler – Çekme deneyi – bölüm 1: Oda sıcaklığında deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü

[32] Yapıcı, O., (2016). Çelik Çerçeve Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranışın Analitik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sezer ÖZTÜRK

Doğum Tarihi ve Yeri : 25.01.1993 İstanbul

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ozturksezer@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	İnşaat Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise	Matematik-Fen	Eyüp Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2015	Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Yapıcı, O., Karaman, E., Öztürk, S., Aksoylar, N,D., Aksoylar, C., (2015). "Düzlem Çubuk Eleman Rijitlik Matrisinin Deneysel Olarak Belirlenmesi" XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, 24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

2. Öztürk, S., Doran, B., Aksoylar, C., (2017). “An Analytical and Experimental Study of Time Integration Methods in Pseudo Dynamic Analysis” 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, 8-10 Mayıs 2017, Kapadokya, Nevşehir