İS

ELASTO-PLASTİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Murat YILMAZ

(501011085)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Haziran 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. A. Yalçın AKÖZ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zekai CELEP (İ.T.Ü.)
Prof. Dr. Feridun ÇILI (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2003

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bilgilerini benden esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Yalçın AKÖZ' e teşekkür ederim.

Haziran 2003 Murat YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
KISALTMALAR	**iv**
ŞEKİL LİSTESİ	**v**
SEMBOL LİSTESİ	**vi**
ÖZET	**vii**
SUMMARY	**viii**
1. GİRİŞ	**1**
1.1. Yapı Sistemlerinin Plasto-Dinamik Analizi Hakkında	1
1.2. Hesap Kabulleri	2
2. KOLON DAVRANIŞININ MODELLENMESİ	**3**
2.1. Malzeme Modeli	3
2.2. Elasto-Plastik Bölgede Moment-Eğrilik Bağıntısı	3
2.3. Statik Yüklemede Kolon Davranışı	5
2.4. Çevrimsel Yüklemede Kolon Davranışı	8
3. İNTEGRASYON YÖNTEMİNİN SEÇİMİ	**11**
3.1. Dinamik Denklem Takımının Kurulması	11
3.2. Sayısal İntegrasyon Yöntemleri	13
3.3. Seçilen İntegrasyon Algoritması	13
3.4. İntegrasyon Stabilitesi Hakkında	14
4. OBJE ETKİLEŞİMLİ HESAP MODELİ	**17**
4.1. Sistem Objelerinin Yapıları	17
4.2. Hesap Akışı	18
5. ANALİZ ÖRNEKLERİ	**20**
5.1. Dört Katlı Bir Yapının Elastik Analizi	20
5.1.1. Yapı Özellikleri	20
5.1.2. Çözüm Stabilitesi Hakkında	21
5.1.3. Fourier Analizi ile Frekans Doğrulaması	23
5.2. Dört Katlı Bir Yapının Elasto-Plastik Analizi	24
5.2.1. Deprem Kaydının Özellikleri	24
5.2.2. Yapı Özellikleri ve Boyut Optimizasyonu	25
5.2.3. Elasto-Plastik Çözüm	26
5.2.4. Fourier Analizi ile Frekans Değişiminin İncelenmesi	27
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	**28**
KAYNAKLAR	**30**
EKLER	**32**
ÖZGEÇMİŞ	**35**

KISALTMALAR

OOP **:** Object Oriented Programming
DFT **:** Discrete Fourier Transform
FFT **:** Fast Fourier Transform

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Açıklama	Sayfa No
Şekil 2.1	**:**	Malzeme Plastikleşme Modelleri……..	3
Şekil 2.2	**:**	Elastik Sınır Momenti……...	4
Şekil 2.3	**:**	Tam Plastikleşme Momenti……...	4
Şekil 2.4	**:**	Plastik Bölge Momenti……...	4
Şekil 2.5	**:**	Kolon Dengesi ve Eksen Takımının Seçimi……..	6
Şekil 2.6	**:**	Kolon Plastikleşme Bölgesi……...	6
Şekil 2.7	**:**	Lineerleştirilmiş Plastik Davranış Modeli…….	8
Şekil 2.8	**:**	Çevrimsel Plastik Davranış Modeli……...	9
Şekil 2.9	**:**	Lineerleştirilmiş Çevrimsel Plastik Davranış Modeli...	9
Şekil 3.1	**:**	Çok Katlı Çerçevenin Dinamik Dengesi……...	11
Şekil 3.2	**:**	Kolon Plastik Davranış Parametreleri……...	11
Şekil 4.1	**:**	Sistem Objesi…….	17
Şekil 4.2	**:**	Sistem Alt Objelerinin Özellikleri…….	18
Şekil 4.3	**:**	Ana Program Döngüsü……..	18
Şekil 4.4	**:**	İlerle Rutini……	19
Şekil 5.1	**:**	Örnek Sistem 1……..	20
Şekil 5.2	**:**	Örnek 1. Stabil Olmayan Çözüm (h=Tmin/3.13)……..	21
Şekil 5.3	**:**	Örnek 1 (h=Tmin/3.14)…….	21
Şekil 5.4	**:**	Örnek 1 (h=Tmin/3.2)……...	22
Şekil 5.5	**:**	Örnek 1 (h=Tmin/4)……..	22
Şekil 5.6	**:**	Örnek 1 (h=Tmin/10)……	23
Şekil 5.7	**:**	Örnek 1. Fourier Dönüşümü.(birim:Hertz)……	23
Şekil 5.8	**:**	Elcentro Depremi İvme-Hız-Yer Değiştirme Kayıtları.	24
Şekil 5.9	**:**	Örnek 2. Yapı Özellikleri……..	25
Şekil 5.10	**:**	Örnek 1. Rölatif Kat Deplasmanları.(Elastik Çözüm)...	25
Şekil 5.11	**:**	Örnek 1. Rölatif Kat Deplasmanları.(Plastik Çözüm)...	26
Şekil 5.12	**:**	Örnek 2. Fourier Dönüşümü.(birim:Hertz)……	27

SEMBOL LİSTESİ

$\boldsymbol{M}$: Kesit momenti
$\boldsymbol{M_Y}$: Elastik sınır momenti
$\boldsymbol{M_P}$: Plastik moment
$\boldsymbol{\sigma_Y}$: Akma gerilmesi
$\boldsymbol{\varepsilon_Y}$: Akma genlemesi $\{E\varepsilon_Y=\sigma_Y\}$
$\boldsymbol{\kappa_1}$: Elastik bölge eğriliği
$\boldsymbol{\kappa_2}$: Elasto-Plastik bölge eğriliği
$\boldsymbol{\eta}$: Kesit plastikleşme koordinatı
$\boldsymbol{h}$: Kesit yüksekliği
$\boldsymbol{b}$: Kesit genişliği
$\boldsymbol{E}$: Elastisite modülü
$\boldsymbol{I}$: Kesit atalet momenti
$\boldsymbol{f}$: M_P/M_Y {Kesit Plastikleşme Katsayısı-Dikdörtgen kolonlar için $f=1.5$}
$\boldsymbol{\Delta}$: Kolon deplasmanı
$\boldsymbol{\Delta_Y}$: Kolon akma deplasmanı
P : Kolon deplasmanı
$\mathbf{P_Y}$: Kolon akma deplasmanı
λ : Δ/Δ_Y
$\boldsymbol{\beta}$: M/M_Y
α : P/P_Y
$\boldsymbol{A(\beta)}$: Elasto-Plastik durum eğrilik düzeltme fonksiyonu $\{\kappa_2=\kappa_1 A(\beta)\}$
M : Kütle matrisi
X(t) : Deplasman vektörü
$\mathbf{K_E}$: Elastik rijitlik matrisi
$\mathbf{K_P}$: Plastik rijitlik matrisi
Z(t) : Dış yük vektörü
R : Sabit vektör
Δt : Zaman aralığı
h : Zaman aralığı
[A] : İntegral operatörü
$\mathbf{U_i}$: i. adımdaki konum, hız ve ivme den oluşan vektör
$\boldsymbol{\rho}$: İntegrasyon operatörünün maksimum öz değeri
ω : Açısal frekans
N : Dijital data sayısı
$\mathbf{\Omega_n}$: n. harmonik
$\mathbf{p(t_m)}$: m. data genliği ($t_m = m\Delta t$)
$\mathbf{\overline{p}(\Omega_n)}$: Frekans fonksiyonu

ELASTO-PLASTİK ÇERÇEVE SİSTEMLERİN DİNAMİK ANALİZİ

ÖZET

Depreme dayanıklı yapı tasarımında uygulanan gelişmiş yöntemler yapının elastik ötesi davranışının incelenmesini gerektirmektedir. Yapının plastik karakterinin sağlıklı bir biçimde ortaya konabilmesi için yapı elemanlarının plastik davranış mekanizmalarının gerçekçi bir şekilde modellenmesi ve deprem etkisi altında dinamik analiz yapılarak yapıya gelen deprem kuvvetlerinin ve yapı reaksiyonlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, ilk önce ideal elasto-plastik malzemeden yapılmış ve kayma çerçevesi kabulüne uygun olarak uç dönmeleri engellenmiş kolonların plastik davranışı modellenmiştir. Kesit tesiri olarak momentin etkisi alınmış ve Bernoulli-Navier hipotezi geçerli sayılmıştır. Daha sonra rijit kat kolonunun çevrimsel davranışının Kinematik Pekleşmeli modele uyduğu kabulüne göre dört katlı bir çerçevenin deprem etkisi altında dinamik analizi yapılmıştır.

Üçüncü bölümde plastik analizde uygulanabilecek sayısal yöntemlerden bahsedilerek yapı katlarının anlık etkileşimlerini dikkate alan bir integrasyon algoritması önerilmiş ve bu algoritmanın stabilite şartları incelenmiştir.

Sayısal çözümlerden elde edilen kat deplasman dataları Fourier dönüşümüne tabi tutularak yapı frekanslarının değişimi elastik ve elasto-plastik çözümler için ayrı ayrı belirlenmiştir.

THE DYNAMIC ANALYSIS OF ELASTO-PLASTIC FRAME STRUCTURES

SUMMARY

The improved techniques in eartquake resistant structure design require a detailed investigation of the post-elastic behaviour of the structure. It requires a realistic modelling of the plastic behaviour of the structural elements and performing dynamical analysis with an aim to obtain the true load pattern and the inner reactions of the structure.

In this project, a model is proposed for the plastic behaviour of columns with restrained end rotations, made of an ideal elasto-plastic material. Accepting the Bernoulli-Navier hypothesis valid, the equations for the plastic rigidity of a single column element is constructed by considering only the moment effects. Then, with an assumption that the column elements under cyclic loads behave as proposed in the Kinematic Hardening model, dynamical analysis of a four storey frame under earthquake excitation is performed.

Section three explains the direct integration methods that can be used to solve non-lineer systems, an object oriented algorithm is proposed for the solution and the stability conditions of this algorithm is investigated as well.

The Fourier Transform is to be applied to the displacement data of the structure to investigate the variation of frequencies for the elastic and elasto-plastic analysis.

1. GİRİŞ

1.1 YAPI SİSTEMLERİNİN PLASTO-DİNAMİK ANALİZİ HAKKINDA

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, yapının deprem etkisi altındaki davranışının gerçeğe en uygun şekilde belirlenmesini amaçlayan birçok çalışma yapılmıştır. Deprem, güvenlik ve ekonomi üçlüsü göz önünde bulundurularak yapılan boyutlandırmada, yapının elastik ötesi davranışlarının devreye sokulması kaçınılmaz olmaktadır.

Yapı elemanlarının elastik ötesi davranışlarını belirlerken en önemli adım malzeme davranışının modellenmesidir. Çelik diğer yapısal malzemelerin yanında plastikleşme özelliği en yüksek olanıdır. Bunun yanında betonarme yapı elemanları da çeşitli önlemler alındığı takdirde yüksek plastik şekil değiştirme yapabilmektedirler. Malzemelerin gerçek plastik davranışları oldukça karmaşıktır. Hesapları basitleştirmek üzere çeşitli davranış kabulleri yapılmaktadır. İdeal elasto-plastik, ideal plastik, pekleşmeli elasto-plastik, lineer pekleşen tam plastik ve elastik-eksponansiyel pekleşen plastik modeller bunlardan bazılarıdır. Yapı koşullarına göre uygun bir malzeme modeli kabul etmek gerekmektedir.

Yapı elemanlarının elastik ötesi davranışlarını belirlemek üzere kullanılan en yaygın model noktasal mafsal modelidir. Bunun yanında yapı elemanlarını eşdeğer non-lineer yaylara dönüştüren modellerle de hesap yapmak mümkündür.

Statik yükleme altında geliştirilen eleman modeli ele alınarak, belirli yaklaşımlarla çevrimsel yükleme davranışına geçiş mümkün olmaktadır. Bu geçiş için Bauschinger etkisini basitleştiren kinematik pekleşme modeli yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Yapı sisteminin hareket denklemleri ikinci mertebe ayrık olmayan non-lineer diferansiyel denklem takımlarıdır ve küçük zaman adımlarında doğrudan integrasyon yapılarak çözülebilirler. Ayrıca bu çözüm, dış yüklerin deprem yükleri olması sebebiyle de zorunlu olmaktadır. Sayısal integrasyon tekniklerinden, Merkez Fark Yöntemi, Houbolt, Newmark, Wilson θ ve Newton-Raphson iterasyonlarının yanında dördüncü derece Runge-Kutta ve Kujawski algoritmaları da sıkça kullanılan metotlar arasındadır [5].

Gerek yapı sisteminin oluşturulması, gerek sayısal hesapların yürütülmesi için yazılan bilgisayar programlarında, prosedürel programlama tekniklerinin yanı sıra nesne etkileşimli programlama yapılarını da kullanmak mümkündür. Nesne tabanlı programlama yapıları, algoritmada esneklik sağladığı gibi kodun okunmasını kolaylaştırarak programın güncellenmesini hızlandırmaktadır.

Bu çalışmada ilk olarak ideal elasto-plastik malzemeden yapılmış dikdörtgen kesitlerin Bernoulli-Navier hipotezi uyarıca elde edilen moment-eğrilik bağıntısı ele alınarak, uç dönmeleri engellenmiş ideal elasto-plastik malzemeden yapılmış bir kolonun elastik ötesi davranışı incelenmiştir [9,16]. Bu baz model basitleştirilerek, kolonun çevrimsel yükleme altındaki davranışı için Bauschinger etkisini de göz önünde bulunduran kinematik pekleşmeli model oluşturulmuştur. Bu kolonlardan oluşan düzgün çerçeve yapı sistemlerinin deprem yükleri altında dinamik analizi için Bölüm 3.3 de açıklanan direkt integrasyon yöntemi kullanılmıştır.

Örnek olarak seçilen sistemlerin çözümünden elde edilen kat yer değiştirme datalarından Fourier dönüşümü ile sistem frekansları elde edilerek hem sonuçların doğruluğu incelenmiş hem de plastik halde sistem frekanslarının değişimi gözlenmiştir.

Bölüm 5.2 de ele alınan örnek çerçeve sistem, seçilen bir deprem kaydı altında tüm katlarındaki kolonlar plastikleşecek şekilde boyutlandırılarak kesit optimizasyonu yapılmıştır.

1.2 HESAP KABULLERİ

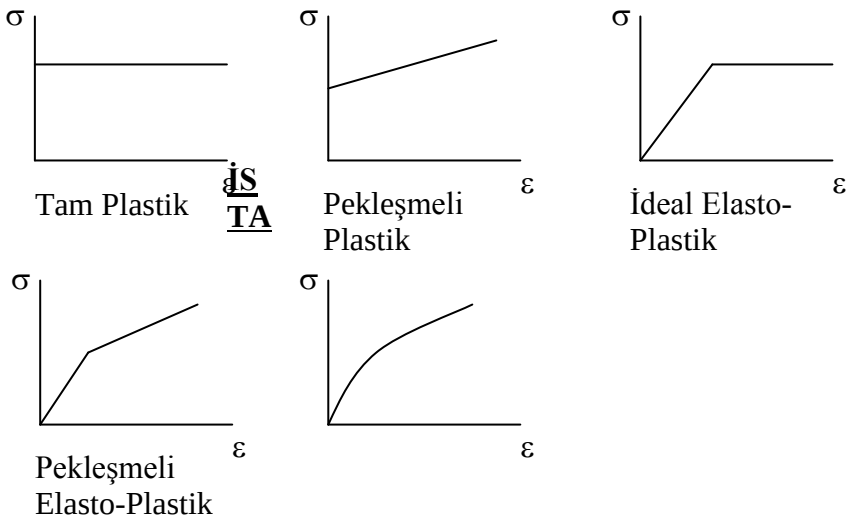
Aşağıda hesaplarda kullanılan temel kabuller sıralanmıştır.

- Malzeme ideal elasto-plastiktir
- Kayma çerçevesi kabulü yapılmıştır
- Bernoulli-Navier hipotezi geçerlidir
- Küçük yer değiştirmeler söz konusudur
- Kolon kesitleri dikdörtgendir
- Sistemde viskoz sönüm yoktur

2. KOLON DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

2.1 MALZEME MODELİ

Yapı elemanlarının elastik ötesi davranışlarını belirlemede ilk adım malzeme davranışının modellenmesidir. Malzemelerin gerçek plastik davranışları oldukça karmaşık olabilir. Bu yüzden teorik hesaplamalar yapabilmek üzere çeşitli davranış modelleri geliştirilmesi zorunludur. İncelenen olayın niteliği ve malzemenin doğal davranışı göz önünde bulundurularak, teorik hesaplarda Şekil 2.1 deki modellerden biri veya birkaçı kullanılabilir.



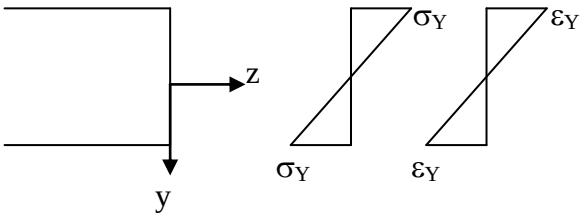
Şekil 2.1 Malzeme Plastikleşme Modelleri

Bu modeller gerçek malzeme davranışlarının idealize edilmiş yaklaşımlarıdır. Bu çalışmada yapılan hesaplarda, özellikle çelik yapı sistemleri için geçerli olan ideal elasto-plastik malzeme kabulü yapılmıştır.

2.2 ELASTO-PLASTİK BÖLGEDE MOMENT-EĞRİLİK BAĞINTISI

Örnek olarak dikdörtgen kolonlar ele alınmıştır. Benoulli-Navier hipotezi uyarınca elasto-plastik bölgede moment-eğrilik bağıntısı aşağıdaki gibi elde edilebilir.

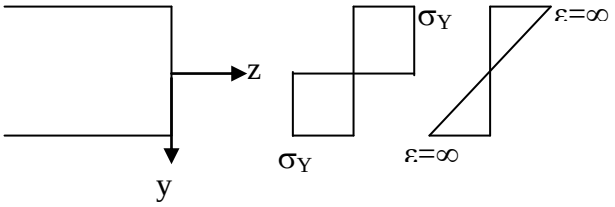
kesitte plastikleşme yaratmayan maksimum moment (2.1) ile verilmiştir;



$$M_Y = \frac{\sigma_Y b h^2}{6} \qquad (2.1)$$

Şekil 2.2 Elastik Sınır Momenti

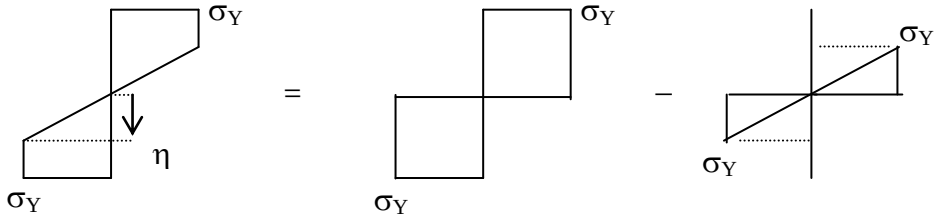
Kesit tamamen plastikleştiği anda oluşan moment (2.2) ile verilmiştir.



$$M_P = \frac{\sigma_Y b h^2}{4} \qquad (2.2)$$

Şekil 2.3 Tam Plastikleşme Momenti

Kısmi plastikleşme durumunda kesitteki moment (2.3) ile hesaplanabilir.



$$M = M_P - \frac{1}{3}\sigma_Y b \eta^2 \qquad (2.3)$$

Şekil 2.4 Plastik Bölge Momenti

Elastik bölgede eğrilik;

$$\kappa_1 = \frac{M}{EI} \qquad (2.4)$$

Elasto-plastik bölgede eğrilik;

$$\kappa_2 = \kappa_1 A(\beta) \qquad (2.5)$$

olduğuna göre *A(β)* yı bulmak için; Benoulli-Navier hipotezi uyarınca plastik bölgede;

$$\kappa_2 \eta = \varepsilon_Y = \frac{\sigma_Y}{E} \tag{2.6}$$

(2.3) M_Y ye bölünürse;

$$\frac{M}{M_Y} = \beta = f - 2\left(\frac{\eta}{h}\right)^2 \tag{2.7}$$

(2.6) ve (2.7) birlikte kullanılarak;

$$\kappa_2 = \frac{\sigma_Y}{Eh} \frac{1}{\sqrt{\frac{(f-\beta)}{2}}} \tag{2.8}$$

Yukarıdaki eşitlikler birlikte dikkate alınarak;

$$A(\beta) = \frac{1}{\beta\sqrt{2(f-\beta)}} \tag{2.9}$$

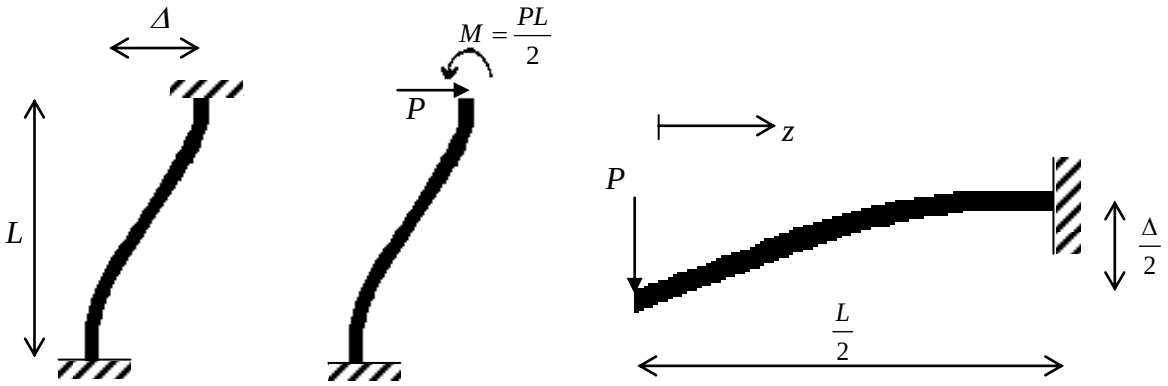
şeklinde elde edilir. Elasto-plastik bölgelerde eğrilik;

$$\kappa_2 = \frac{M}{EI} \frac{1}{\beta\sqrt{2(f-\beta)}} \tag{2.10}$$

şeklinde bulunur.

2.3 STATİK YÜKLEMEDE KOLON DAVRANIŞI

Kayma çerçevesi kabulü uyarınca, sistem simetrisinden faydalanarak eksen takımı Şekil 2.5 deki gibi seçilirse, kesit momenti;



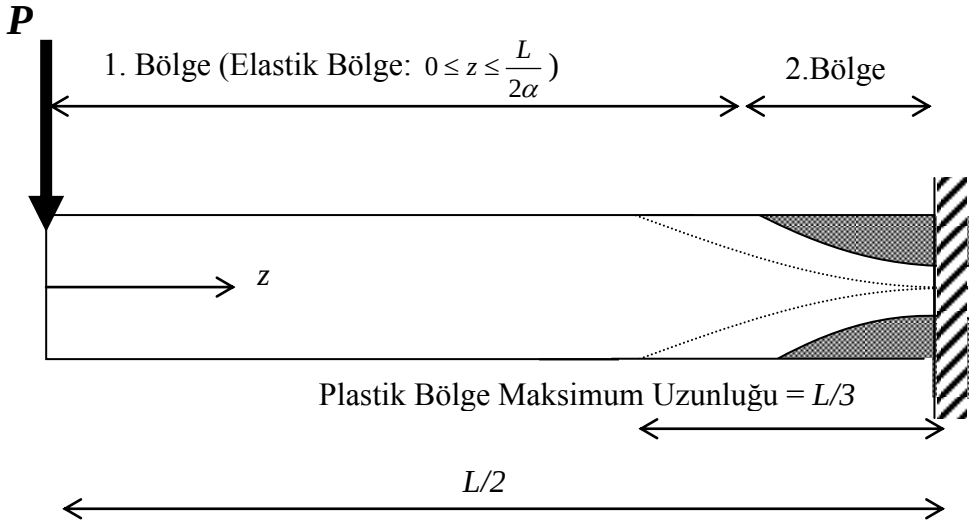
Şekil 2.5 Kolon Dengesi ve Eksen Takımının Seçimi

$$M = Pz \tag{2.11}$$

olur. *P* kuvvetinin büyüklüğüne göre çubuk boyunca oluşan elastik ve elasto-plastik bölgeler Şekil 2.6 da gösterilmiştir.

1. Bölge $0 \le Pz \le M_Y \;\Rightarrow\; 0 \le z \le \frac{M_Y}{P} \;\Rightarrow\; 0 \le z \le \frac{L}{2\alpha}$

2. Bölge $M_Y \le Pz \le \frac{PL}{2} \;\Rightarrow\; \frac{M_Y}{P} \le z \le \frac{L}{2} \;\Rightarrow\; \frac{L}{2\alpha} \le z \le \frac{L}{2}$



Şekil 2.6 Kolon Plastikleşme Bölgesi

Kolon uçlarının plastikleşmesi P nin büyüklüğüne bağlıdır. Kesitte herhangi bir plastik bölge oluşturmayan maksimum P kuvveti P_Y şeklinde tanımlanırsa, α katsayısı;

$$\alpha = \frac{P}{P_Y} \tag{2.12}$$

şeklinde tanımlanabilir. Kayma çerçevesi kolonunda, elastik hal için geçerli bağıntıların;

$$k_Y = \frac{12EI}{L^3} \tag{2.13}$$

$$P_Y = k_Y \Delta_Y \tag{2.14}$$

olduğu hatırlanırsa, elastik bölgenin (1.bölge) eğriliği aşağıdaki gibi bulunur. (Bakınız Şekil 2.6)

$$\kappa_1 = \frac{M}{EI} = \frac{Pz}{EI} = \frac{\alpha P_Y z}{EI} = \frac{\alpha k_Y \Delta_Y z}{EI} = \frac{12\alpha z \Delta_Y}{L^3} \tag{2.15}$$

2. bölge eğriliğini bulmak üzere;

$$P_Y = \frac{2M_Y}{L} = k_Y \Delta_Y \Rightarrow M_Y = \frac{6EI}{L^2}\Delta_Y \tag{2.16}$$

olduğu göz önünde bulundurularak plastik bölgenin (2.bölge) eğriliği aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

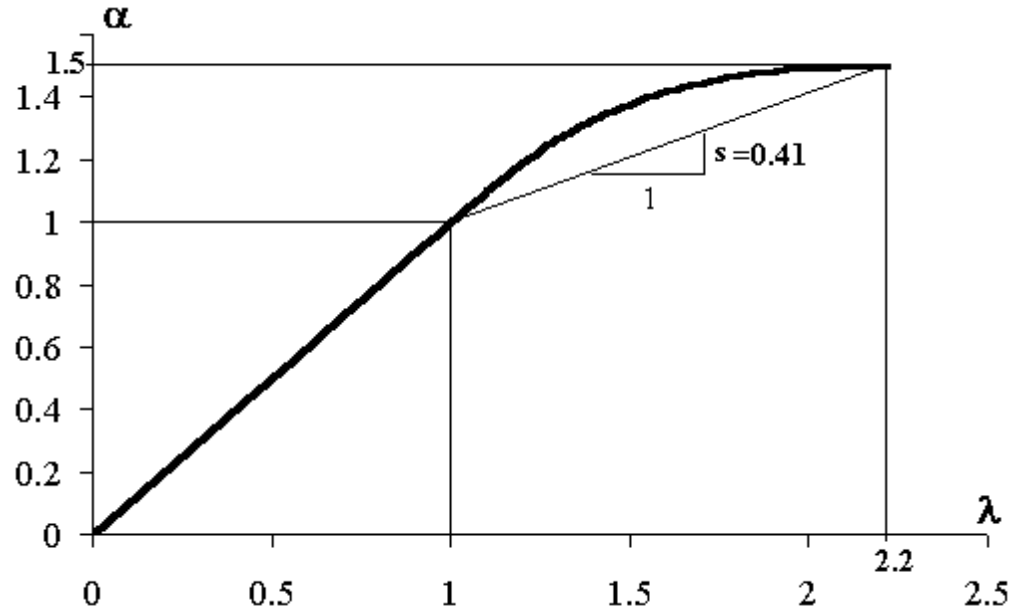
$$\kappa_2 = \frac{6\Delta_Y}{L^2}\frac{1}{\sqrt{2(f - \frac{2\alpha z}{L})}} \tag{2.17}$$

Küçük yer değiştirmeler göz önünde bulundurularak elastik eğri diferansiyel denklemi;

$$\frac{d^2y}{dz^2} = \kappa \qquad \begin{matrix} \kappa = \kappa_1 & 0 \le z \le \frac{L}{2\alpha} \\ \kappa = \kappa_2 & \frac{L}{2\alpha} \le z \le \frac{L}{2} \end{matrix} \tag{2.18}$$

integre edilerek, ideal elasto-plastik malzeme davranışı gösteren, uç dönmeleri engellenmiş dikdörtgen kolonların yük-yer değiştirme ilişkisi (2.19) daki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{\Delta}{\Delta_Y} = \lambda = \frac{5 - \sqrt{2(f-\alpha)}(3+\alpha)}{\alpha^2} \tag{2.19}$$

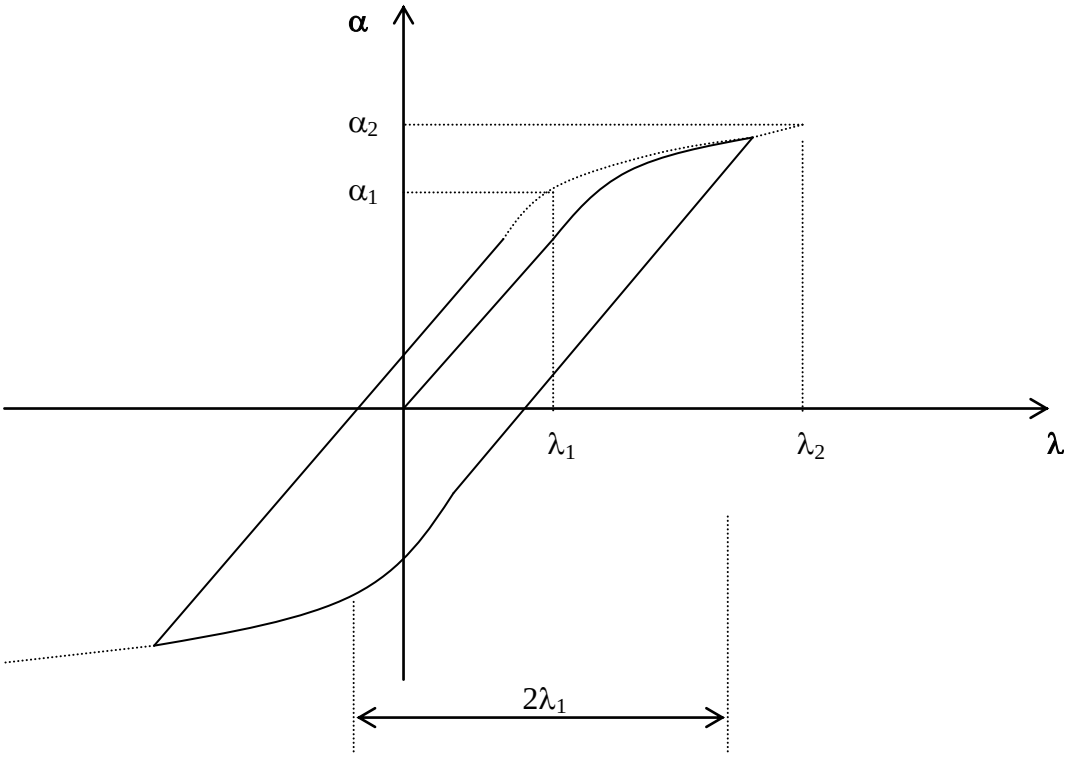


Şekil 2.7 Lineerleştirilmiş Plastik Davranış Modeli

(2.19) fonksiyonu Şekil 2.7 deki gibi lineerleştirmek mümkün gözükmektedir.

2.4 ÇEVRİMSEL YÜKLEMEDE KOLON DAVRANIŞI

Deprem doğası gereği çevrimsel bir zorlamadır. Bu nedenle plastik titreşimler incelerken yapı elemanlarının çevrimsel yükler altındaki davranışlarını modellemek gerekmektedir. Geliştirilen yük-yer değiştirme ilişkileri ele alınarak aşağıdaki genel parametrelerle tanımlanmış pekleşmeli model dinamik analiz için esas alınabilir.

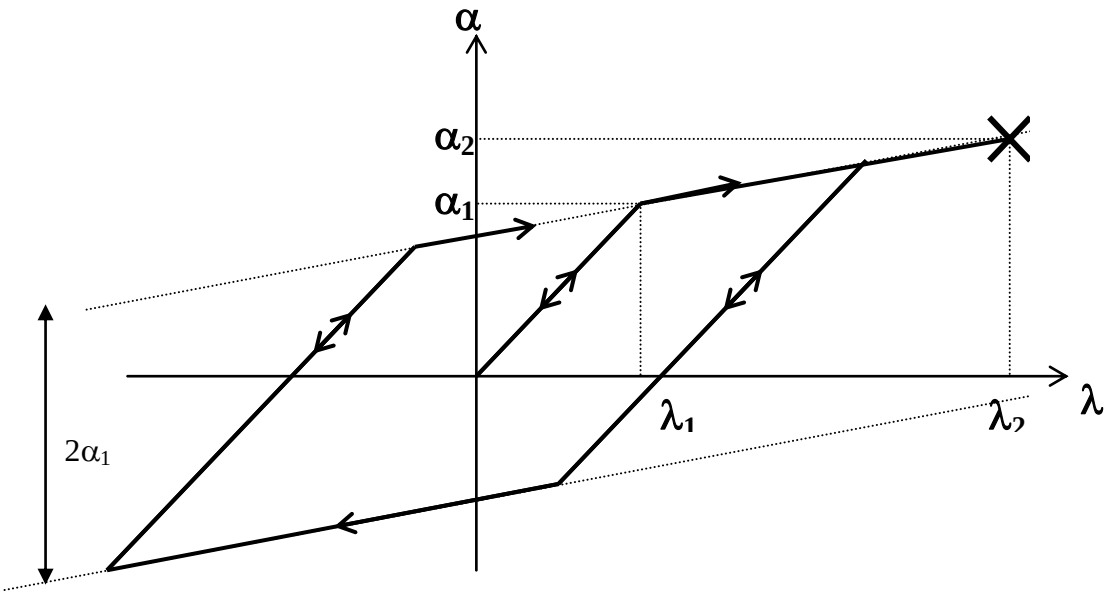


Şekil 2.8 Çevrimsel Plastik Davranış Modeli

Yapılan hesaplara göre;

$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1.5$ $\lambda_1=1$ $\lambda_2=2.222$

olduğu gözlenmektedir.



Şekil 2.9 Lineerleştirilmiş Çevrimsel Plastik Davranış Modeli

Şekil 2.8 ve Şekil 2.9 da ki modellere göre, kolonun plastik bölgeye geçişin ardından geri dönüşlerde davranışı elastik olmaktadır. Ayrıca geri dönüşteki akma başlangıç gerilmesi, başlangıçtaki akma gerilmesinden küçüktür. Bu olaya *Bauschinger etkisi* denir [13].

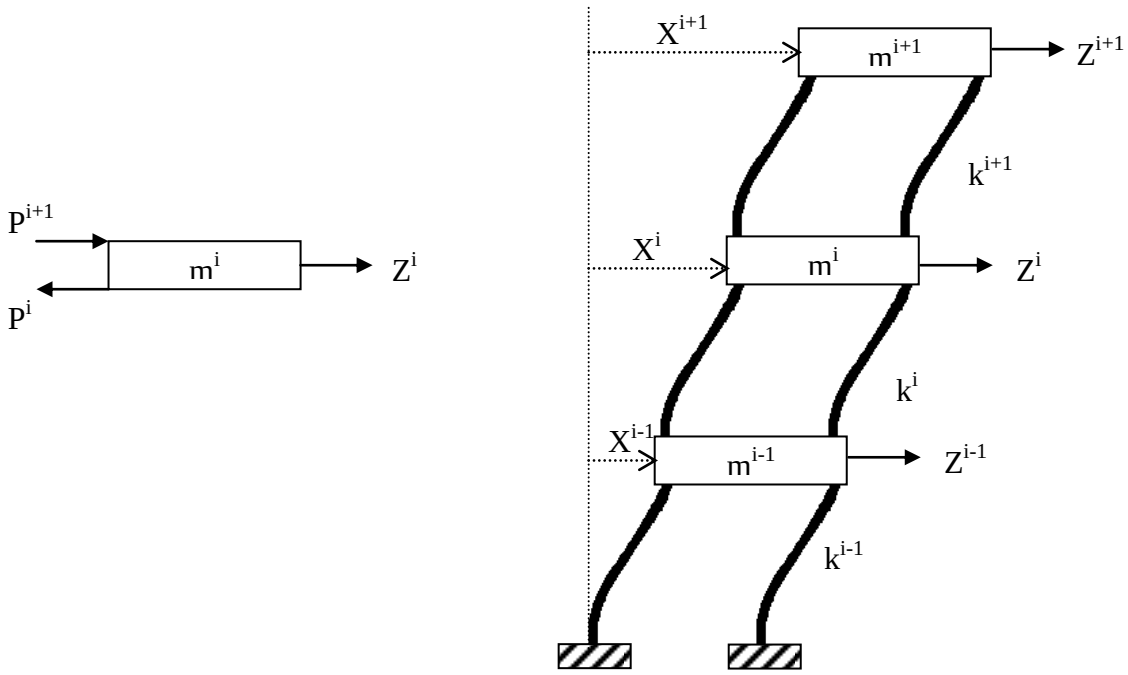
Şekillerde de gösterildiği üzere, elastik bölgede gerilme sınır aralığını $2\alpha_1$ olarak tanımlanmıştır.Böylece geri dönüşlerde akma başlangıçları hesaplanabilmektedir. Bu modele *Kinematik Pekleşmeli Model* denilmektedir.

Sekil 2.9 da **X** sınır nokta olup dinamik analiz esnasında bu noktaya ulaşan kolonlar sistemden kaldırılmaktadırlar.

3. İNTEGRASYON YÖNTEMİNİN SEÇİMİ

3.1 DİNAMİK DENKLEM TAKIMININ KURULMASI

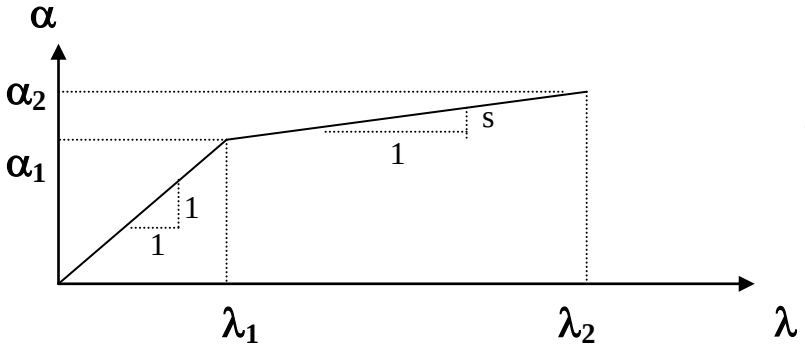
Aşağıdaki çok katlı sistem ele alınarak i. kat için;



Şekil 3.1 Çok Katlı Çerçevenin Dinamik Dengesi

$$m^i \ddot{X}^i + \sum_E (P^i - P^{i+1}) + \sum_P (P^i - P^{i+1}) = Z^i \tag{3.1}$$

denklemi yazılabilir. Kolonların yük-yer değiştirme ilişkisi incelendiğinde;



$$s = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \tag{3.2}$$

Şekil 3.2 Kolon Elasto-Plastik Davranış Parametreleri

Aşağıdaki eşitlikler hatırlanarak;

$$\left.\begin{aligned}
&\lambda^i = (X^i - X^{i-1})/\Delta_Y^i \\
&\lambda^{i+1} = (X^{i+1} - X^i)/\Delta_Y^{i+1} \\
&\alpha_E^i = \lambda^i \\
&\alpha_P^i = \alpha_1^i + s\lambda^i \\
&k_P^i = sk_E^i
\end{aligned}\right\} \qquad (3.3)$$

(3.1) yeniden düzenlenirse;

$$m^i \ddot{X}^i + \sum_E + \sum_P = Z^i + R^i \qquad (3.4)$$

$$\sum_E = \{k_E^i (X^i - X^{i-1}) - k_E^{i+1}(X^{i+1} - X^i)\} \qquad (3.4a)$$

$$\sum_P = \{k_p^i (X^i - X^{i-1}) - k_P^{i+1}(X^{i+1} - X^i)\} \qquad (3.4b)$$

$$R^i = \sum \{-\alpha_1^i P_Y^i + \alpha_1^{i+1} P_Y^{i+1}\} \qquad (3.4c)$$

denklemi elde edilir. R^i dinamik hareket esnasında kolonların lineer bölgeden non-lineer bölgeye geçerken veya non-lineer bölgede ilerlemeleri esnasındaki geri dönüş anlarında (lineer bölgeye geçişlerinde) kata etkittikleri kuvvetler toplamı olmaktadır. Yukarıdaki formülasyon tüm katlar için düşünüldüğünde çok katlı çerçevelerinin plasto-dinamik analizi için aşağıdaki denklem takımı oluşturulur.

$$[M]\underset{\sim}{\ddot{X}}(t) + \{[K_E] + [K_P]\}\underset{\sim}{X}(t) = \underset{\sim}{Z}(t) + \underset{\sim}{R} \qquad (3.5)$$

(3.5) de ki denklem takımı ayrık değildir. Denklemi ayrıklaştırmak üzere modal analiz yapılabilir. Sistemdeki kolonlardan herhangi biri elastik ve plastik bölgeler

arasında geçiş yaptığında veya kırılma noktasına ulaştığında K_P matrisinin ve R vektörünün, dolayısıyla sistem mod ve frekanslarının yeniden hesaplanması gerekmektedir.

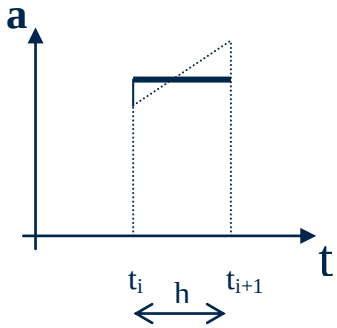
Kolonlarda bölge geçişleri olmadığı durumda sistem lineerdir. Bu bölgelerde modal analiz yapılarak çeşitli yöntemlerle nümerik çözümleme yapılabilir.

3.2 SAYISAL İNTEGRASYON YÖNTEMLERİ

(3.5) in çözümü için aşağıdaki özel halleri verilen doğrudan integrasyon yöntemlerinden biri kullanılabilir. Bu yöntemler plastik sistemlere uygulandığında yapı rijitliği değiştiği üzere her zaman adımında denklem takımı çözmeyi gerektirmektedirler.

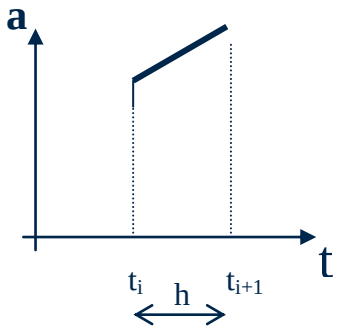
Sabit ortalama ivme yöntemi

$$\left\{\frac{4}{h^2}[M]+[K]\right\}\underset{\sim}{\Delta X_i} = \underset{\sim}{Z_i} + \underset{\sim}{Z_{i+1}} + \frac{4}{h}[M]\underset{\sim}{V_i} - 2[K]\underset{\sim}{X_i}$$



Doğrusal ivme değişimi yöntemi (Wilson θ=1)

$$\left\{\frac{6}{h^2}[M]+[K]\right\}\underset{\sim}{\Delta X_i} = 2\underset{\sim}{Z_i} + \underset{\sim}{Z_{i+1}} + \frac{6}{h}[M]\underset{\sim}{V_i} - 3[K]\underset{\sim}{X_i}$$



Newmark β

$$\left\{\frac{1}{\beta h^2}[M]+[K]\right\}\underset{\sim}{\Delta X_i} = \left(\frac{1}{2\beta}-1\right)\underset{\sim}{Z_i} + \underset{\sim}{Z_{i+1}} + \frac{1}{\beta h}[M]\underset{\sim}{V_i} - [K]\underset{\sim}{X_i}\,\frac{1}{2\beta}$$

3.3 ŞEÇİLEN İNTEGRASYON ALGORİTMASI

Aşağıda alternatif bir integrasyon yöntemi önerilmiştir. Δt aralığı seçilerek herhangi bir anda *i*. kata etkiyen bileşke kuvvet yazılırsa;

$$\left.\begin{aligned} \frac{\Delta V_j^i}{\Delta t} &= \frac{F_j^i}{m^i} \\ V_{j+1}^i &= V_j^i + \Delta V_j^i \\ \frac{\Delta X_j^i}{\Delta t} &= V_{j+1}^i \\ X_{j+1}^i &= X_j^i + \Delta X_j^i \end{aligned}\right\} \qquad (3.6)$$

(3.6) denklemlerinde i kat indisi, j hesap adımı indisidir.

j. adımdaki kat yer değiştirmeleri bilindiğine göre F_j^i bileşke kuvvetini, kolonun daha önce kabul edilen yük-yer değiştirme ilişkisinden okumak mümkündür. (3.6) da ki sayısal integrasyon adımları tüm katlar için takip edilerek (j+1). adımdaki kat yer değiştirmeleri kolaylıkla hesaplanabilir.

Tez kapsamında, kolonların kinematik pekleşmeli modelini göz önünde bulundurularak yukarıda açıklanan yöntem ile çözüm yapan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

Çözüm tekniği uyarınca deprem nümerik verisi olarak yer değiştirme-zaman ilişkisi kullanılmalıdır. Geliştirilen bilgisayar programı ivme ve hız kayıtlarını sayısal integrasyonla yer değiştirme kaydına dönüştürmektedir.

Çözümlerde kat yer değiştirmeleri, sistemin modlarını veya frekanslarını bulmaya gerek kalmadan direkt olarak elde edilmektedir. Çözümlerin doğruluğunu ve plastik halde sistem frekanslarının değişimini incelemek üzere spektral analiz yapmak gerekmektedir. Bu konu ile ilgili olarak Ek-A ve Ek-B de modal analiz ve Fourier analizi incelenmiştir.

3.4 İNTEGRASYON STABİLİTESİ HAKKINDA

Yapının serbest titreşimi göz önüne alındığında, tüm integrasyon metotlarında i. adımda bilinen ivme, hız ve konum değerleri (3.7a) daki gibi bir U_i vektörüyle gösterilirse (i+1). adımdaki büyüklüklere geçiş (3.7b) deki gibi olmaktadır. [A] matrisi kat kütleleri, kolon rijitlikleri ve zaman adımının bir fonksiyonu olup integrasyon operatörü adını almaktadır. (3.7c,d,e) de görüldüğü üzere integrasyonun

her adımında bu operatörün kuvvetleri alınmaktadır. λ operatörün öz değerleri olmak üzere integrasyonun stabil olma koşulu (3.7f,g) ile verilmiştir [3].

$$U_i = \begin{Bmatrix} X_i \\ V_i \\ a_i \end{Bmatrix} \tag{3.7a}$$

$$U_{i+1} = [A]U_i \tag{3.7b}$$

$$U_1 = [A]U_0 \tag{3.7c}$$

$$U_2 = [A]U_1 = [A]^2 U_0 \tag{3.7d}$$

-
-

$$U_n = [A]U_{n-1} = [A]^n U_0 \tag{3.7e}$$

$$\rho = \max |\lambda_A| \tag{3.7f}$$

$$\rho < 1 \longrightarrow stabil \tag{3.7g}$$

Tek serbestlik dereceli sistemin serbest titreşimi göz önüne alındığında (3.6) algoritmasının integral operatörü aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \ddot{X}_{i+1} \\ V_{i+1} \\ X_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega^2 h^2 & -\omega^2 h & -\omega^2 \\ h & 1 & 0 \\ h^2 & h & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_i \\ V_i \\ X_i \end{Bmatrix} \tag{3.8}$$

(3.8) eşitliğinde integral operatörünün öz değerlerine ait karakteristik denklem;

$$\lambda(\lambda^2 - \lambda(2 - \omega^2 h^2) + 1) = 0 \tag{3.9}$$

şeklinde bulunur. Köklerden biri sıfırdır. Diğerleri;

$$wh < 2 \qquad \text{veya bir başka deyişle} \qquad h < \frac{T}{\pi} \tag{3.10}$$

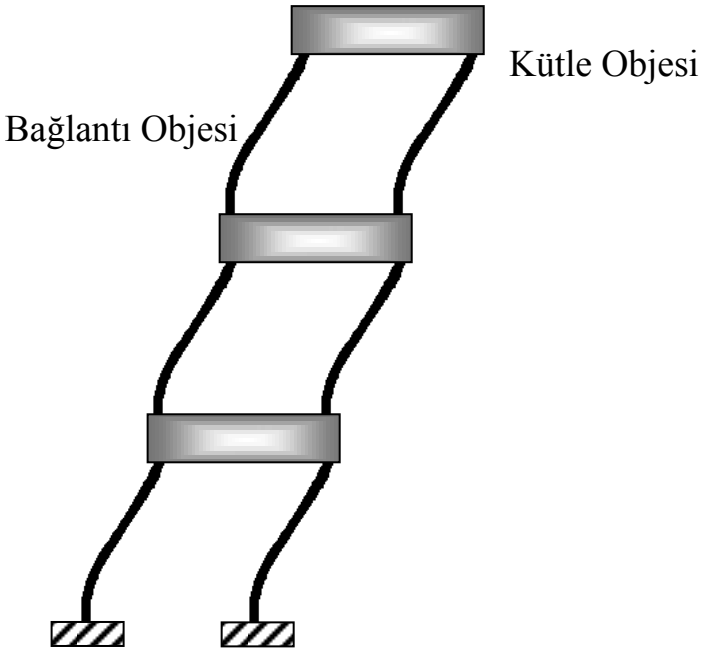
olduğu sürece karmaşık sayılardır. (3.10) şartının sağlanmadığı durumlarda maksimum öz değer mutlak değerce 1 den büyük olmaktadır. Çok katlı sistemler için maksimum h zaman adımının sistemdeki maksimum frekansın yukarıdaki şartı sağlaması ile tespit edilmesi uygun olacaktır. Aksi durumda spektral yarıçap 1 den büyük olmakta ve çözümlerde nümerik büyüme şeklinde stabilite bozukluğu ortaya çıkacaktır. Bu durumda çözümlerde uygulanan yöntemin (3.11) koşullu ile stabil olduğu söylenebilir.

$$h < \frac{T_{\min}}{\pi} \tag{3.11}$$

4. OBJE ETKİLEŞİMLİ HESAP MODELİ

4.1 SİSTEM OBJELERİNİN YAPISI

Yapı katlarının kütle objeleri, kolonların bağlantı objeleri ve yapının kütleler ve bağlantılardan oluşan bir sistem objesi şeklindeki tasarımı Şekil 4.1 de görülmektedir.

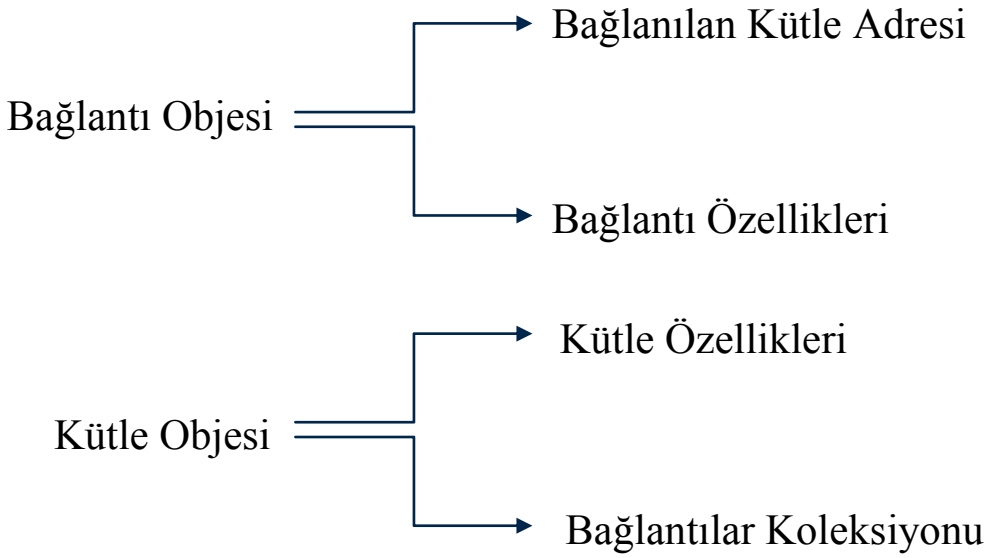


Şekil 4.1 Sistem Objesi

Objeler, bir sınıfın özelliklerini ve metotlarını içinde barındıran ayrık yapılardır. Sınıflar ise çeşitli özellik ve komut rutinlerini barındıran özet yapılardır. Her obje bir sınıfa dahildir. Örneğin "Kütle Sınıfı" bir kata ait bütün bilgilerin yanı sıra hesap süresince katın hareketini sağlayacak rutinleri de içerisinde barındırır. Kütle Sınıfı'nın özellikleri, kat kütlesi, konumu, kata gelen kuvvetler, katın hızı ve kata bağlanan kolonların bilgileri olabilir. Ayrıca bu sınıfın içinde katın hareketini denetleyen "İlerle" adında bir rutin de bulunmaktadır. (Bakınız Şekil 4.4)

Nesnesel programlamanın önemli özelliklerinden birisi de koleksiyon yapılarıdır. Birden çok obje belirli bir koleksiyon yapısı içinde başka bir objenin alt özelliği olabilirler. Örneğin her kata bağlı olan kolonlar "Bağlantılar Kolleksiyonu" adı altında kütle objesinin bir özelliği şeklinde tasarlanabilirler. Böylece her kat

kendisine bağlanan kolonlara ait tüm özellikleri hesap yapmak üzere öğrenebilecektir. (Bakınız Şekil 4.2)



Şekil 4.2 Sistem Alt Objelerinin Özellikleri

Ayrıca yapının tüm objelerini içinde barındıran bir "SistemObjesi" tasarlamak mümkündür. Bu obje sistem hareket zamanını, ve alt objelerle doğrudan ilişkisi olmayan birtakım sistem özelliklerini de (kat sayısı, kaynak verisi vb) içerebilir.

4.2 HESAP AKIŞI

Ana program akışı Şekil 4.3 de görülmektedir. "İlerle" rutininin ayrıntılı yapısı Şekil 4.4 ile verilmiştir. Bu rutin dikkatle incelendiğinde, sistemdeki herhangi bir kütleye verilen ilerle komutunun sistemin diğer kütlelerine otomatik olarak yayıldığını ve tüm sitem hesabının İlerle rutininin kendini tekrar tekrar çağırması (Recursion) ile tamamlandığını görmek mümkündür. Böylece tek bir kütle için tasarlanan hesap tüm sisteme yayılmış olur.

```
Sistem objelerini başlat
Döngü Başlat
{Sistem.Herhangi_Bir_Kütle.İlerle
  Sistem.Tüm_Kütle_Konumlarını_Güncelle
  Sistem.Zaman_İlerle}
Dön
```

Şekil 4.3 Ana Program Döngüsü

Kütle.İlerle

{ Tüm_Bağlantılardan_Gelen_Kuvvetlerin_Bileşkesini_Bul

$\Delta V_i = \frac{F_i}{m} \Delta t$

$V_{i+1} = V_i + \Delta V_i$

$\Delta X_i = V_{i+1} \Delta t$

$X_{i+1} = X_i + \Delta X_i$

Döngü Başlat

{Eğer_Sıradaki_Bağlı_Kütle_Zamanı_Sistem_Zamanından_Küçükse

Sıradaki_Bağlı_Kütle**.**İlerle}

Dön

}

Şekil 4.4 İlerle Rutini

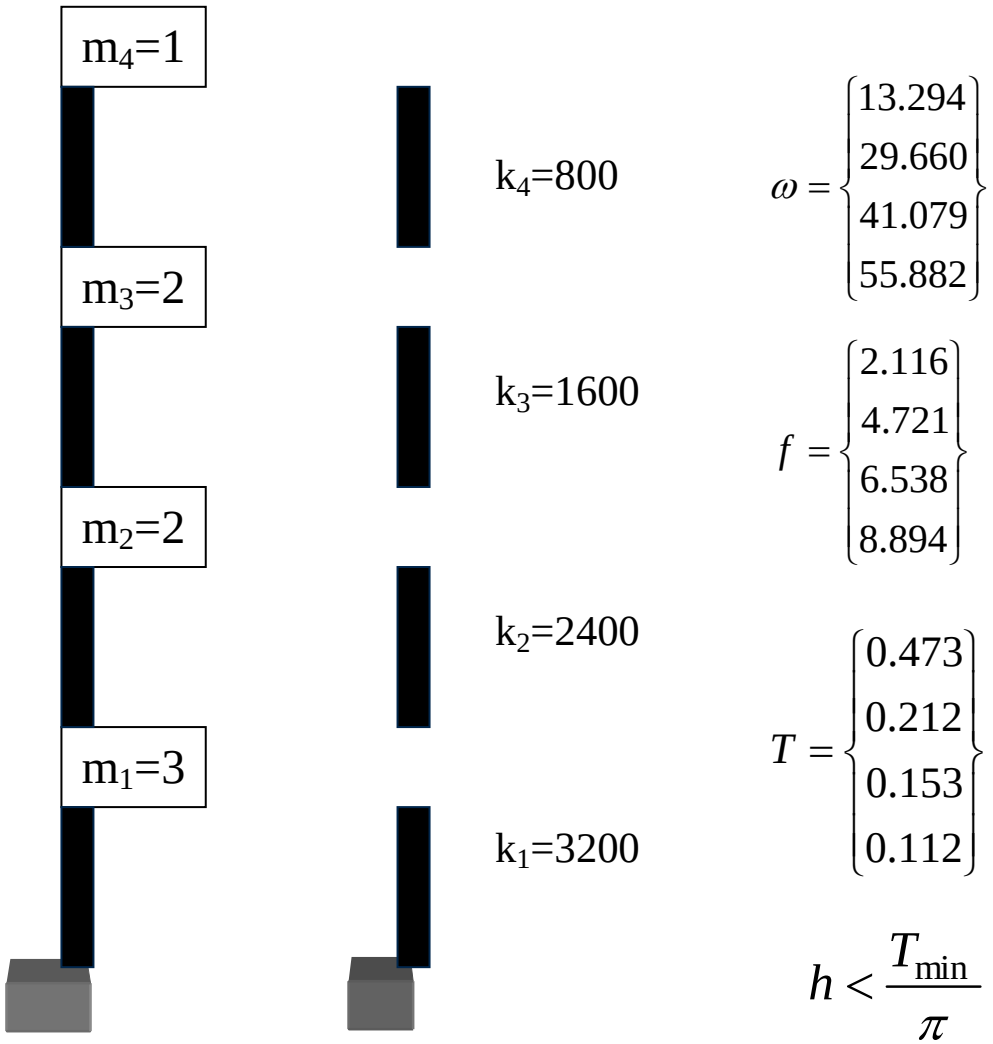
İlerle rutini, kütlenin yeni konumunu bularak hesabı tamamlanan kütlenin zamanını sistem zamanından bir adım ileri geçirir. Böylece belirli bir zaman aralığında hesabı tamamlanan kütle işaretlenmiş olur. Şekil 4.4 deki döngü içersideki şart, hesabı tamamlanan kütlelere tekrar dallanmayı engellemektedir. Sistemdeki tüm kütlelerin yeni konumları bulunduktan sonra, tüm kütleler bu konumlarına taşınmaktadırlar. Son adımda sistem zamanı güncellenerek yeni zaman adımı için hesap tekrar başlatılmaktadır.

5. ANALİZ ÖRNEKLERİ

5.1 DÖRT KATLI BİR YAPININ ELASTİK ANALİZİ

5.1.1 YAPI ÖZELLİKLERİ

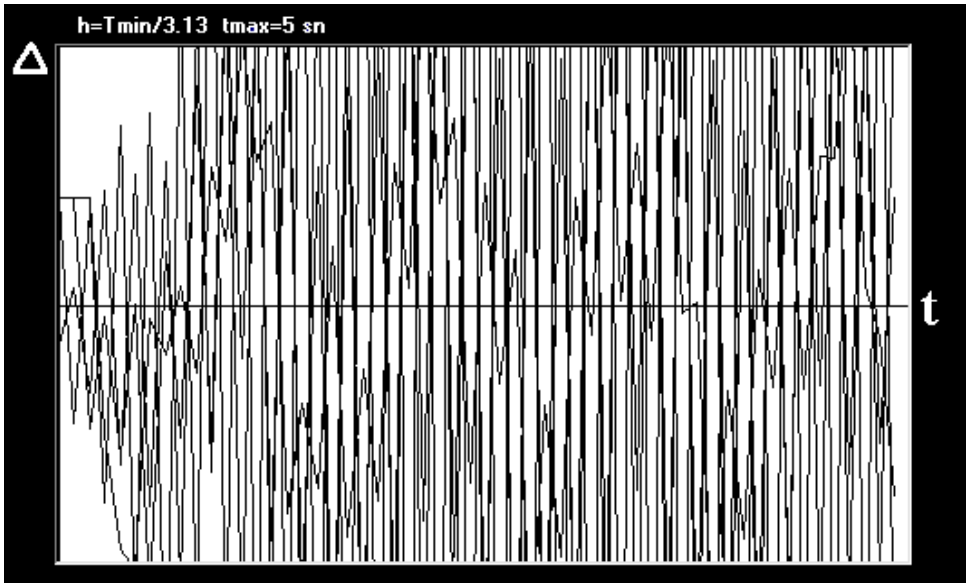
Seçilen sistem özellikleri Şekil 5.1 de görülmektedir.



Şekil 5.1 Örnek Sistem 1

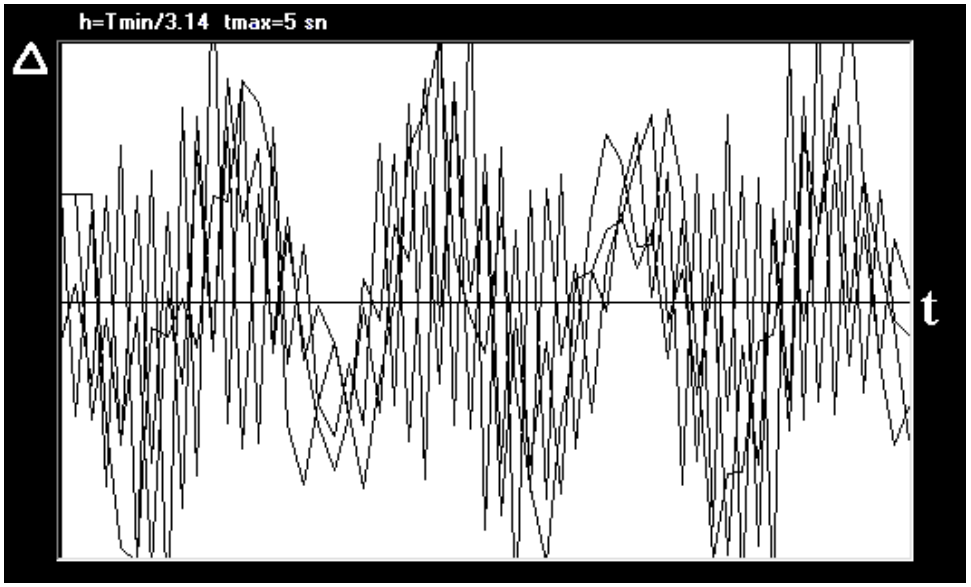
5.1.2 ÇÖZÜM STABİLİTESİ HAKKINDA

Örnek sistemin minimum frekansının π ye bölümü ile elde edilen zaman aralığı stabilite sınırı olup bu değerden daha büyük adımlar için integral stabilitesi Şekil 5.2 görüldüğü üzere yitirilmektedir.

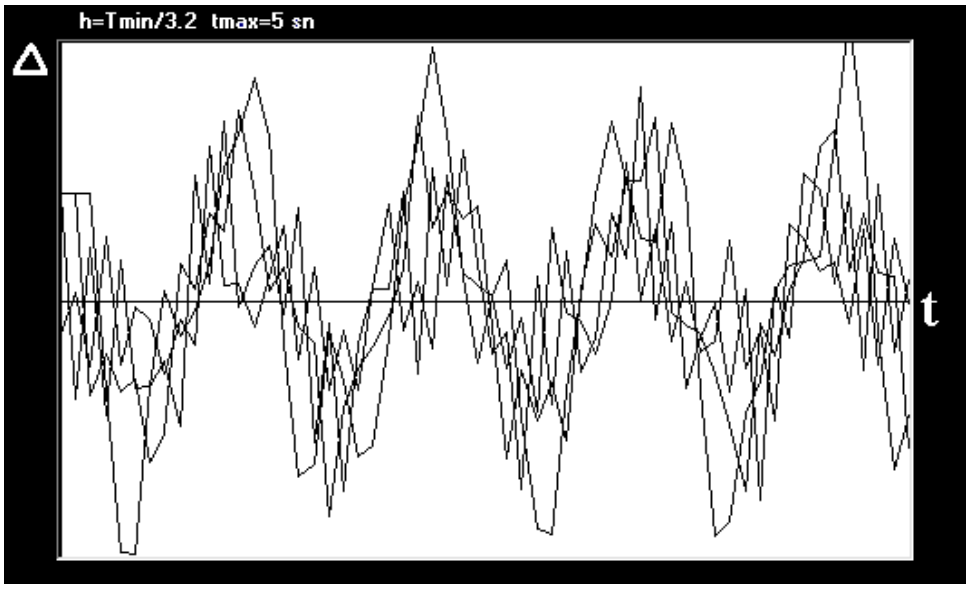


Şekil 5.2 Örnek 1. Stabil Olmayan Çözüm (h=Tmin/3.13)

Grafikler katların yere göre yer değiştirmeleri olup sistemin dört katına verilen eşit başlangıç konumu ile serbest titreşimi incelenmiştir.Zaman aralığının π seçilmesi halinde çözüm Şekil 5.3 de görüldüğü üzere stabil hale gelmektedir.

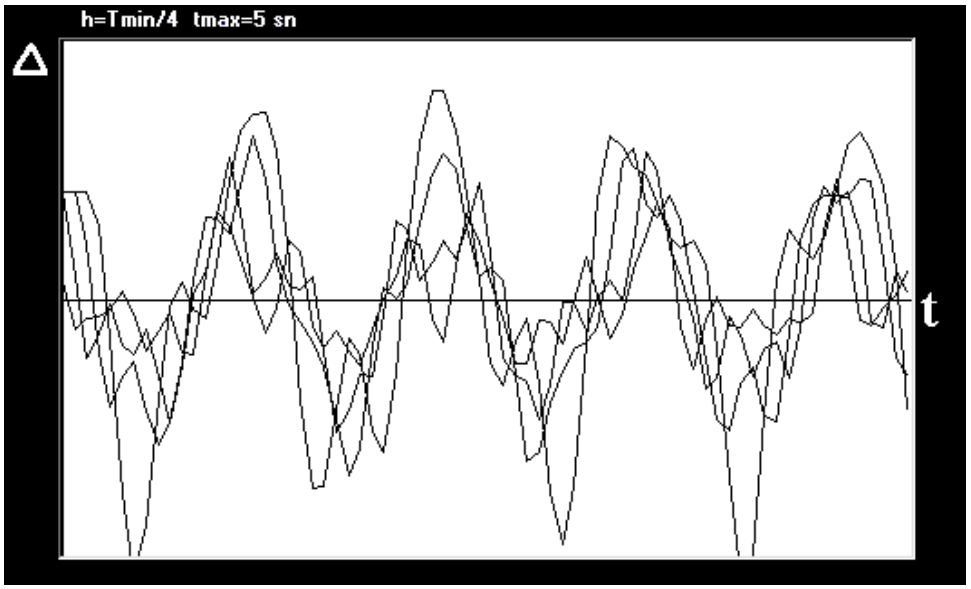


Şekil 5.3 Örnek 1 (h=Tmin/3.14)

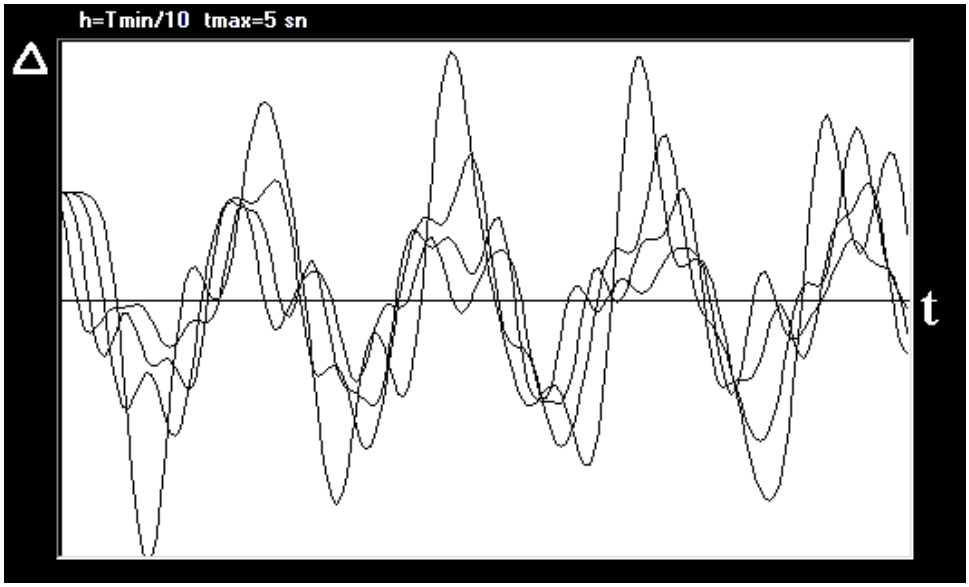


Şekil 5.4 Örnek 1 (h=Tmin/3.2)

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 de çözümün hızla gerçek çözüme yakınsadığı görülmektedir.



Şekil 5.5 Örnek 1 (h=Tmin/4)

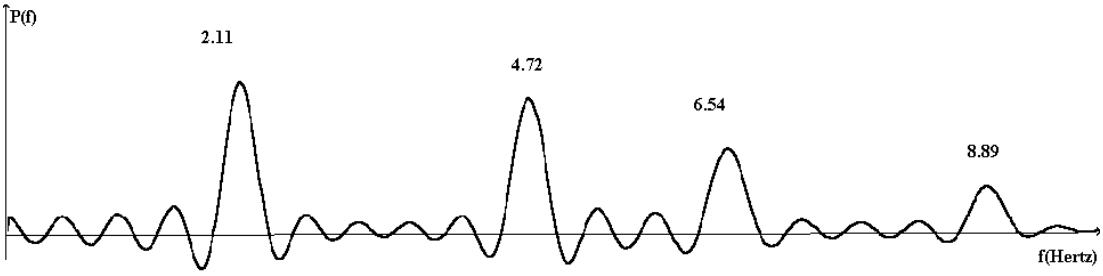


Şekil 5.6 Örnek 1 (h=Tmin/10)

Zaman aralığı yapının minimum periyodunun 0.1 katı seçildiğinde kesin sayılabilecek çözüm elde edilmiştir.

5.1.3 FOURIER ANALİZİ İLE FREKANS DOĞRULAMASI

Birinci katın yer değiştirme dataları zaman uzayından (EK-B) de açıklanan Fourier dönüşüm algoritması uygulanarak frekans uzayına taşındığında, modal çözümden elde edilen sistem frekansları frekans uzayında pik noktalar halinde elde edilmektedirler.

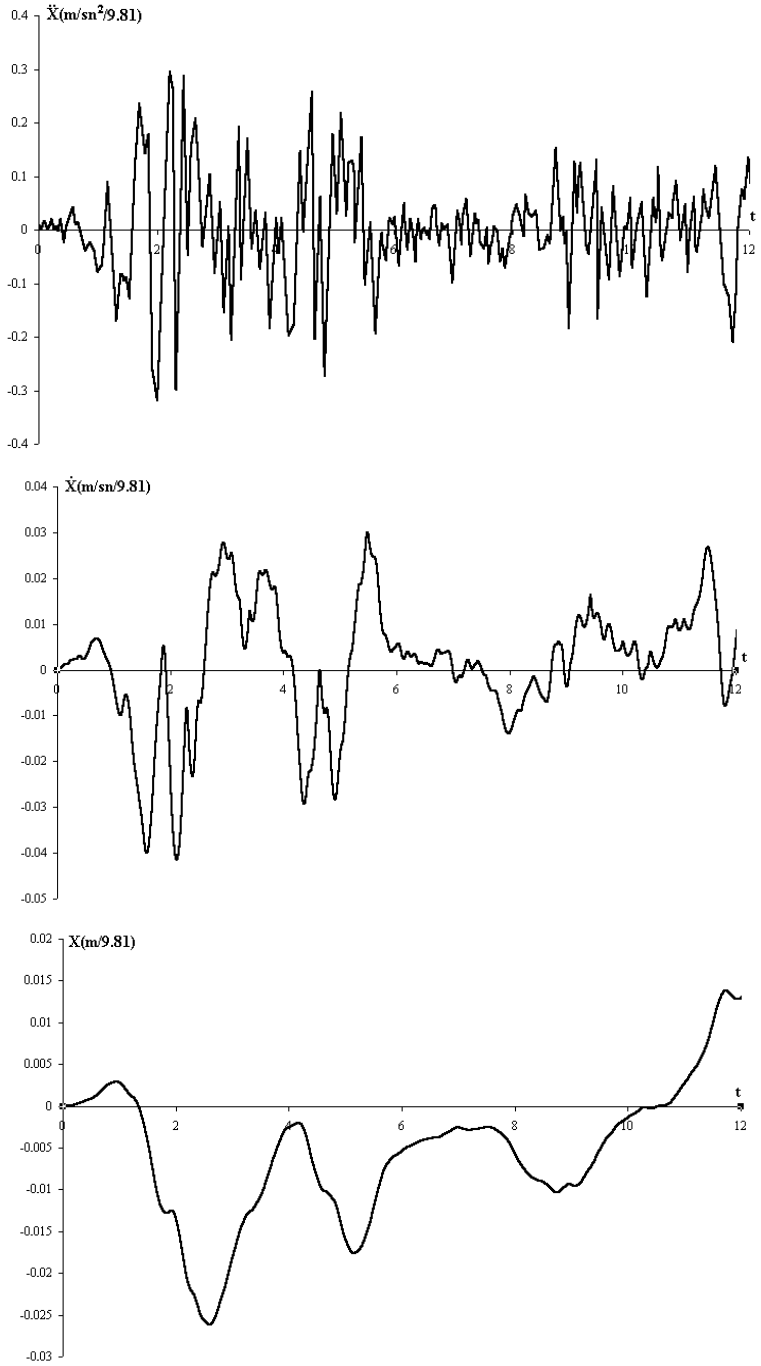


Şekil 5.7 Örnek 1. Fourier Dönüşümü

5.2 DÖRT KATLI BİR YAPININ PLASTİK ANALİZİ

5.2.1 DEPREM KAYDININ ÖZELLİKLERİ

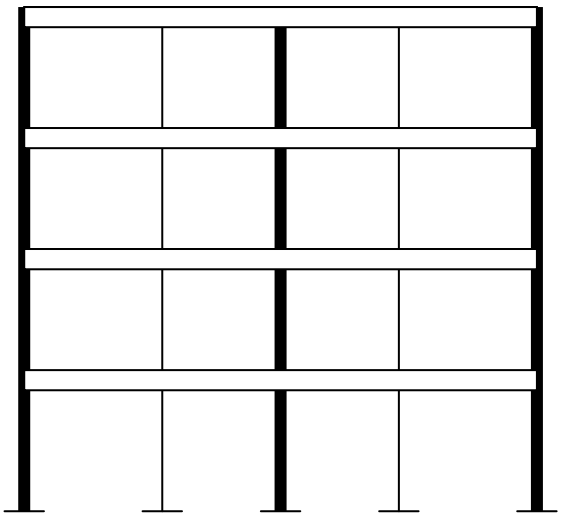
Aşağıda Elcentro depremi olarak da bilinen 1940 Imperial Valley Depremine ait ivme kaydı ve ardışık iki integrali verilmiştir. a_{max}=0.32g ve maksimum yer değiştirme 27 cm dir.



Şekil 5.8 Elcentro Depremi İvme-Hız-Yer Değiştirme Kayıtları.

5.2.2 YAPI ÖZELLİKLERİ VE BOYUT OPTİMİZASYONU

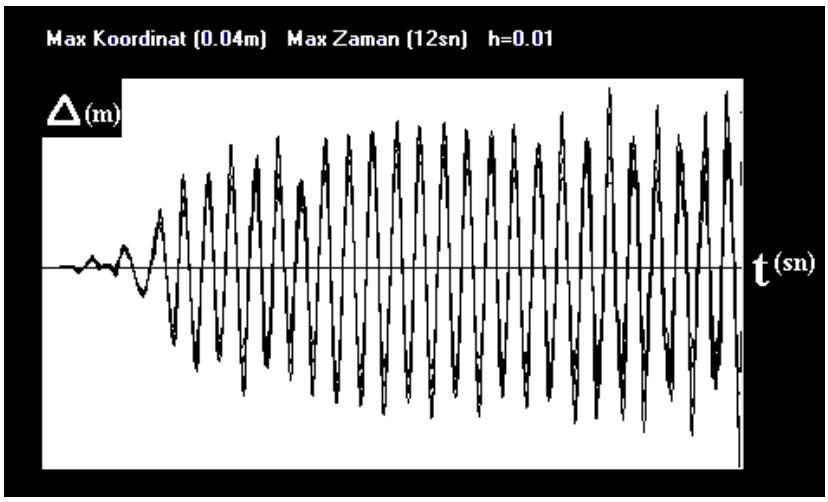
Şekil 5.8 ile özellikleri verilen örnek sistemin Elcentro deprem kaydı altında elastik ve elasto-plastik kolon kabulleri için analizi yapılarak kat rölatif yer değiştirmeleri elde edilmiştir.



Kat	m(kNsn^2/m)	Yükseklik(m)	Kolon(mm)	E(GPa)	σ_Y(MPa)
4	100	2.5	230x150	200	200
3	100	2.5	280x150	200	200
2	100	2.5	320x150	200	200
1	100	2.5	350x150	200	200

Şekil 5.9 Örnek 2. Yapı Özellikleri.

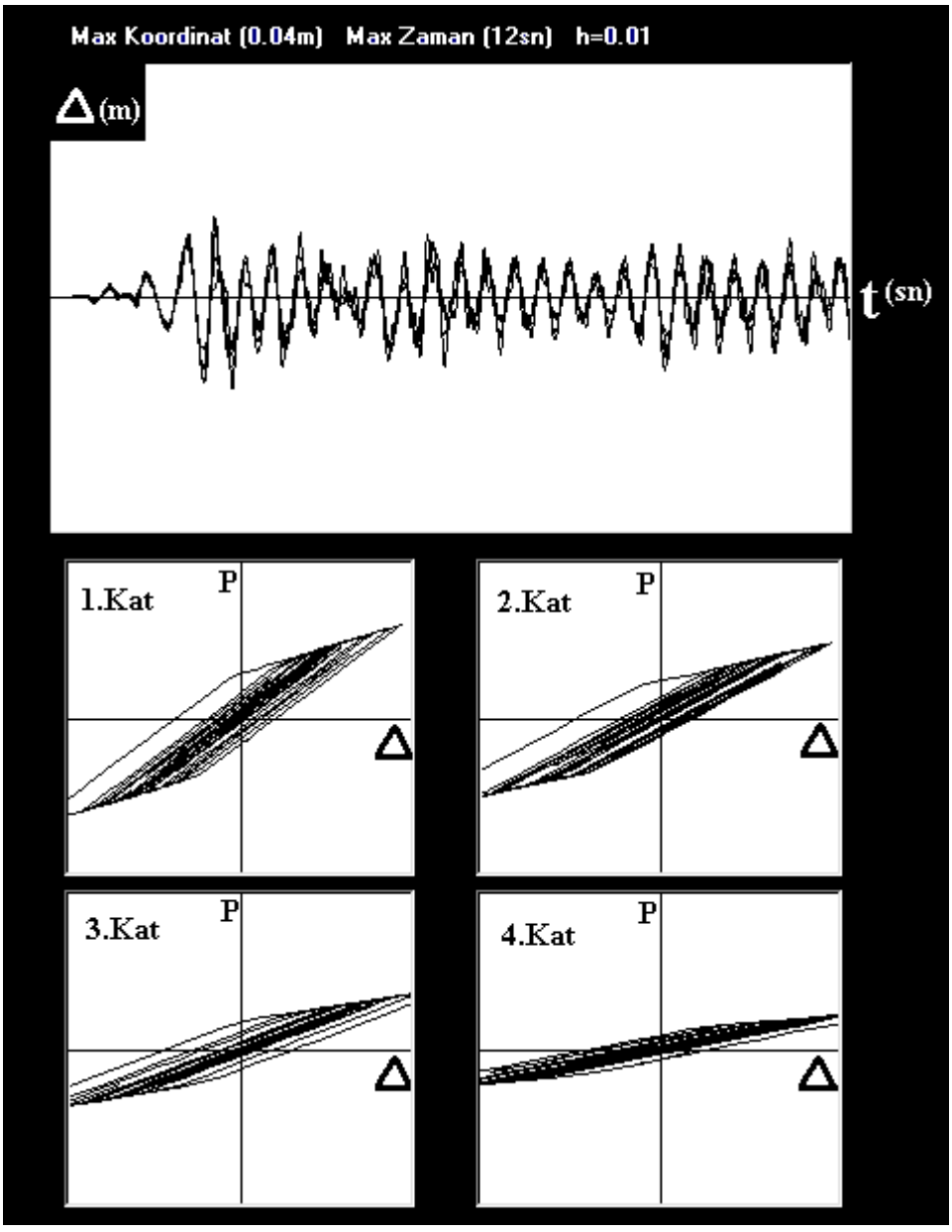
İnce çizgi ile gösterilen kolonlar zayıf doğrultularında çalışmaktadırlar. Kolonlar, plastikleşmenin tüm katlarda oluşması kriteri ile boyutlandırılmıştır.Böylece tüm sistem deprem kuvvetlerini karşılamak üzere birlikte çalışacaktır. Şekil 5.10 da elastik çözüm ile elde edilen kat rölatif yer değiştirmeleri verilmektedir.



Şekil 5.10 Örnek 1. Rölatif Kat Yer Değiştirmeleri (Elastik Çözüm).

5.2.3 ELASTO-PLASTİK ÇÖZÜM

Tüm kolonların Şekil 2.9 da özetlenen elasto-plastik davranışı gösterdiği varsayılarak aşağıdaki çözüm elde edilmiştir.



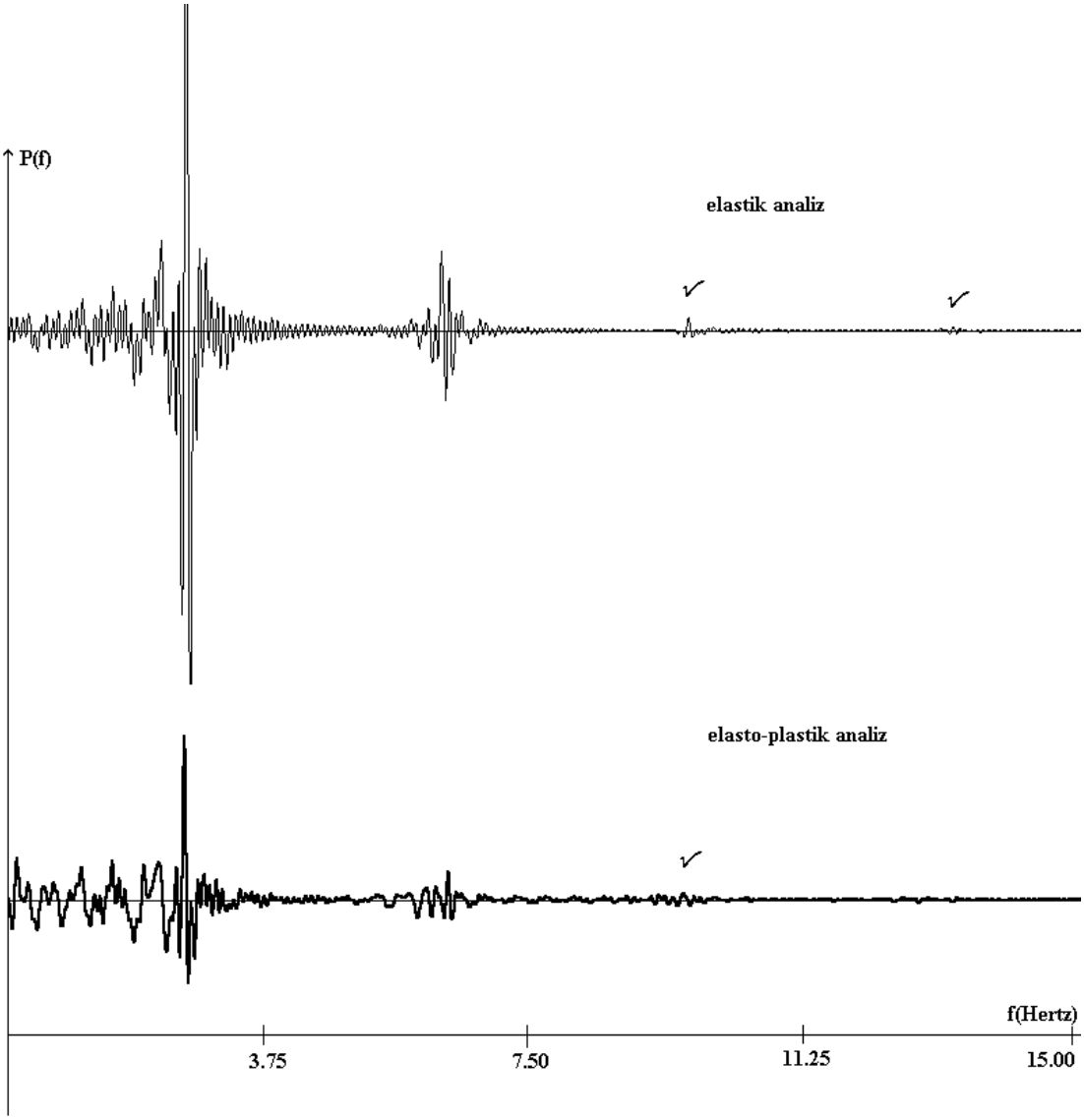
Şekil 5.11 Örnek 1. Rölatif Kat Yer Değiştirmeleri (Elasto-Plastik Çözüm).

Yer değiştirmelerin elastik çözümlerle karşılaştırıldığında belirgin şekilde azaldığı gözlenmektedir. Şekilde kat kolonlarının yük-yer değiştirme ilişkileri de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere deprem esnasında tüm kolonlar plastikleşerek depremin karşılanmasında etkili olmaktadırlar. Ayrıca kolonların plastikleşmesi ile

yapının yüksek frekanslarının sönümlendiği gözlenmektedir. Bu durum Şekil 5.12 de verilen frekans spektrumundan da gözlenebilir.

5.2.4 FOUİER ANALİZİ İLE FREKANS DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Birinci katın yer değiştirme datalarının dönüştürülmüş frekans uzayı, elastik ve elasto-plastik çözümler için Şekil 5.12 de verilmiştir.



Şekil 5.12 Örnek 2. Fourier Dönüşümü.

Maksimum frekansın 15 Hertz olduğu diyagramda plastik halde özellikle yüksek frekanslar başta olmak üzere genliklerinin azaldığı hatta 4. mod titreşiminin sönümlendiği gözlenmektedir. Ayrıca frekanslarda belirgin bir değişim gözlenmemiştir.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

1. Plastik hesap için seçilen ideal elasto-plastik malzeme modelinde pekleşme olmasa da, plastikleşmenin yük arttıkça yayılması ile kolon davranışında pekleşme gözlenmektedir. Ayrıca plastik mafsallar kolon uçlarında sınırlı bir bölgeye yayılabilmektedir.

2. Yapı sisteminde plastikleşme söz konusu olduğunda sayısal çözüm yapmak çoğu zaman zorunlu hale gelmektedir. Çözümlerde kullanılabilecek doğrudan integrasyon yöntemleri temel olarak ikiye ayrılabilirler. Birinci gurup yöntemlerde sistem denkleminin, çözüm zaman aralığının başında ve sonunda sağlanması üzerine ara bölgede kat ivmelerinin değişimi tahmin edilmeye çalışılır (Implicit Integration). Fark yer değiştirmeler arasında yazılan denklem takımının çözümüyle her adımda sonuca ulaşılabilir. Bölüm 3.2 de özetlenen yöntemler bu türdendir. İkinci gurup yöntemlerde integral operatörü dinamik dengenin hesap zamanının başlangıcında sağlanması üzere kurulur (Explicit Integration). Bu çalışmada kullanılan yöntem bu türdendir. Yöntemin temel üstünlüğü adım içerisinde hesapların yapılması için denklem takımı çözümünü gerektirmemesidir.

3. Sayısal integrasyon yaparken dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan birisi de integrasyon stabilitesidir. Seçilen yaklaşımda ortaya çıkan integrasyon operatörü koşulsuz stabil olmayan, koşullu stabil veya koşulsuz stabil olan bir operatör olabilir. Stabilite bozukluğu Bölüm 3.4 de açıklandığı üzere operatorün ardışık çarpımları sonucu sayısal kabarmadan kaynaklanmaktadır. Operatörün öz değerlerinin reel ve mutlak değerce maksimum 1 den büyük olması halinde sistemde sayısal kabarma olmaktadır ve bu durum çözümün stabil olmadığını göstermektedir. Öz değerlerin 1 den küçük olması halinde sayısal sönüm meydana gelmektedir ve çözüm stabildir.

Koşulsuz stabil çözümlerde seçilen zaman aralığına göre yüksek frekanslı modlar sayısal sönüme uğrayarak düşük frekanslı modlar ön plana çıkarlar. Bu durumun tam aksine Bölüm 3.3 de yer alan algoritmanın eşdeğer integral operatörü koşullu stabil olup, zaman adımı sistemdeki minimum periyottan daha küçük seçilmediği taktirde maksimum frekansa sahip olan bu modu kabartarak çözüm stabilitesi bozulmaktadır.

4. Çözümlerin stabil olması doğru olması anlamına gelmemektedir. Zaman adımları yeteri derecede küçük seçilmediği taktirde genlik veya periyot kayması türünden hatalar oluşabilir. Örnek incelemelerde de görüldüğü üzere zaman aralığı minimum sistem periyodunun 0.1 katı seçilerek yapılan analizlerde genlikler ve frekanslar yeterli doğrulukta hesaplanabilmektedir.

5. Deprem esnasında yapı elemanlarının plastik davranışı yapısal bir sönüm etkisi yaratarak yapıyı korumaktadır. Ayrıca yüksek frekanslı modları sönümleyerek katkılarını azaltmaktadır. Bunun yanında, bu tür ayrıntılı çözümlemeler elemanların boyutlandırılmasında minimum kesit optimizasyonu yapılmasına olanak sağladığı gibi, boyutlama yapılırken yapının göçme mekanizmalarının tanımlanmasını da mümkün kılmaktadır. Bu şekilde iyi tasarlanan bir yapı, minimum malzeme ile maksimum performans gösterebilir.

6. Çözümün nesnesel etkileşimler şeklinde tasarlanması, sistem datalarının oluşturmasında ve hesap algoritmasının sisteme yayılmasında oldukça büyük avantajlar sağlamaktadır. Objeler sistemin bütününden haberdar olmadan sadece bağlantıda oldukları yakın çevre objeleri ile etkileşmektedirler. Her obje komşu objelerden aldıkları verilerle kendi hesap rutinlerini yürütmekte ve çevresindeki diğer objeleri ilerlemeleri için uyarmaktadır. Böylece herhangi bir global sistem denklemi oluşturmaya gerek kalmadan lokal hesaplarla çözüm sisteme yayılmaktadır. Ayrıca programın nesnesel tekniklerle yazılması kodun okunmasını ve ekler yapılmasını oldukça kolaylaştırmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] **Arda TS, Aşkar G.,** Plastic Design of Steel Structures,BOGAZICI UNIV. PRESS (Num:413), Istanbul, 1986.

[2] **Aysal SE.,** Kapalı dikdörtgen çelik çerçevelerin elastik-plastik analizi, YTU. FBE, Istanbul, 1992.

[3] **Bathe KJ.,** Finite Element Procedures in Engineering Analysis. PRENTICE-HALL, Englewood Clifffs, New Jersey, 1982.

[4] **Beedle LS.,** Plastic Design of Steel Frames, JOHN WILEY & SONS, New York, 1958.

[5] **Beskos DE, Anagnostopoulos SA.,** Computer Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures : A Handbook. Vol. 3, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, Boston USA, 1997.

[6] **Chen WF.,** Constitutive Equations for Engineering Materials : Plasticity and Modelling. Vol. 2, ELSEVIER, Amsterdam, London, New York, Tokyo 1994.

[7] **Çılı F.,** Yüksek olmayan yapıların deprem yükleri altındaki elastik olmayan davranışı. ITU, Istanbul, 1976.

[8] **Davies JM.,** Second-order elastic-plastic analysis of plane Frames. ELSEVIER, Journal of Constructional Steel Research 58 (2002) 1315–1330.

[9] **Gere JM, Timoshenko SP.,** Mechanics of Materials, Ed. 3, Chapman & Hall, London, Glasgow, New York, Tokyo, Melbourne, Madreas, 1992.

[10] **Hodge PG.,** Plastic Analysis of Structures. McGRAW-HILL, New York, Toronto, London, 1959.

[11] **Jiang XM, Chen Hong, Richard Liew JY.,** Spread-of-plasticity analysis of three-dimensional steel frames. ELSEVIER, Journal of Constructional Steel Research 58 (2002) 193–212.

[12] **Kaliszky S.,** Plasticity: Theory and Engineering Applications. ELSEVIER, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 1989.

[13] **Khan AS, Huang S.,** Continuum Theory of Plasticity. JOHN WILLEY & SONS, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto, 1995.

[14] **McGuire W, Gallagher RH, Ziemian RD.,** Matrix Structural Analysis. 2nd ed. JOHN WILLEY & SONS, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2000.

[15] **Moy SSJ.,** Plastic Methods for Steel and Concrete Structures, Ed. 2, MACMILLAN, London, 1996.

[16] **Özer E, Çakıroğlu A.,** Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler I. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1980.

[17] **Richard Liew JY, Chen H, Shanmugam NE, Chen WF.,** Improved nonlinear plastic hinge analysis of space frame structures. ELSEVIER, Engineering Structures 22 (2000) 1324–1338.

[18] **Richard Liew JY, Chen WF , Chen H.,** Advanced inelastic analysis of frame structures. ELSEVIER, Journal of Constructional Steel Research 55 (2000) 245–265.

[19] **Roth CP, WW Bird, Matin JB.,** Internal variable formulations for the plastic analysis of plane frames. BUTTERWORTH HEINEMANN, Engineering Structures, Vol. 17 , No. 3, pp 214-220, 1995.

[20] **Wilson EL.,** Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures : A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering. Ed. 3, (2000) Berkeley, California, USA.

EK LİSTESİ

EK-A Modal analiz hakkında.

EK-B Fourier analizi hakkında

EK-A

Modal analiz hakkında

Bir t anında sistem rijitliği

$$K = K_E + K_P \tag{A.1}$$

olmaktadır. (A.2) çözüm önerisi ile homojen çözüm;

$$X_h = Qe^{iwt} \tag{A.2}$$

önerisi yapılarak (3.5) de yerine yazılırsa;

$$\{K - w^2 M\} Qe^{iwt} = 0 \tag{A.3}$$

elde edilebilir. (A.3) bir öz değer problemine karşı gelir. Çok serbestlik dereceli sistemde çözümler süperpoze edilerek;

$$X_h = c_1 Q_1 e^{iw_1 t} + c_2 Q_2 e^{iw_2 t} + \ldots + c_n Q_n e^{iw_n t} \tag{A.4}$$

elde edilir.

$$X = \Phi Y \tag{A.5}$$

(A.5) dönüşümü yapılarak;

$$\Phi = [Q_1, Q_2, \ldots, Q_n] \tag{A.6}$$

şeklinde tanımlanan *modal matris*in M ve K ya göre ortagonalliklerinden faydalanarak sistem sayısal çözümleme yapmak üzere ayrıklaştırılır.

$$K^* = \Phi^T K \ \Phi \tag{A.7a}$$

$$M^* = \Phi^T M \ \Phi \tag{A.7b}$$

$$P^* = \Phi^T \{Z(t) + R\} \tag{A.7c}$$

olmak üzere ayrık sistem;

$$M^* \ddot{Y} + K^* Y = P^* \tag{A.8}$$

şeklinde elde edilir. Sayısal çözümlerde kat kütlelerinin hızları, kolonların plastikleşmesi veya kırılmaları göz önünde bulundurarak sistem frekansları yeniden hesaplanarak ayrıklaştırma işlemi tekrarlanmalıdır.

3. bölümde özetlenen doğrudan integrasyon algoritmalarında tüm bu zorluklar aşılmaktadır. Ne var ki bu yöntemle kat deplasmanları, sistem frekansları ve modları bulunmadan direkt olarak elde edildiği için yapının karakteristik dinamik özellikleri gizli kalmaktadır. Bu yüzden sekizinci bölümde özetlenen Fourier analizi ile sistem frekanslarının bulunması yoluna gidilmiştir.

EK-B

Fourier analizi hakkında

Zaman uzayında tanımlı dijital data yığınlarından belirli frekansları ayıklayarak, bu dataların ait olduğu olayı, frekans uzayında gözlemlemek Fourier dönüşümü ile elde edilen kat deplasman dataları, zaman uzayından frekans uzayına aşağıdaki formülasyonla taşınabilir.

$$\bar{P}(\Omega_n) = \Delta t \sum_{m=0}^{N-1} p(t_m) e^{-i(2\pi mn/N)} \qquad \text{(B.1)}$$

olmak üzere (n = 0, 1, 2, … , N-1) alınarak frekans uzayı oluşturulabilir. Bu yönteme Discrete Fourier Transform (DFT) denilmektedir. (B.1) de görüleceği üzere frekans uzayındaki herhangi bir değeri bulmak için N adet çarpım terimini hesaplayıp toplamak gerekmektedir. Bu işlemin N adet frekans için yapılacağı düşünülürse N^2 kez üstel fonksiyonun değerini hesaplamak gerekecektir. Dört işleme göre, üstel işlemler bilgisayar tarafından daha uzun sürede yapılmaktadır. $e^{-i(2\pi mn/N)}$ fonksiyonunun tekrarlı yapısından faydalanarak üstel işlem tekrarlarını ortadan kaldırmak mümkündür. $e^{-i(2\pi/N)}$ üstel terimi karmaşık düzlemi N eşit parçaya böler. Tekrarlayan hesaplara gerek kalmadan "mn" çarpımının aldığı değerlere göre uygun çarpımları seçerek analiz süresini kısaltmak mümkündür. Bu şekilde kurulan algoritmaya Fast Fourier Transforms (FFT) denir.

DFT ve FFT uygulamaları ile $T_1 = N\Delta t$ temel periyoduna tekabül eden $w_1 = \frac{2\pi}{T_1}$ temel frekansının tam katları ayrıştırılabilir. İstenilen frekansa direkt olarak ulaşmak için $T = N\Delta t = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{w}$ eşitliğinden faydalanarak seçilen N değerleri ile frekanslar taranabilir. Örneğin $\Delta t = 0.01sn$ aralıklı zaman uzayından N=2,3,4….500 alınarak 0.02-5.00 saniye arası peryotlar taranabilir. Bu tür bir yaklaşımda her N değeri için karmaşık düzlemi N parçaya ayrılarak bu noktalarda $e^{-i(2\pi/N)}$ değerlerini hesaplamak gerekmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Murat YILMAZ, 1979 yılında Ankara'da doğdu. İlköğrenimini Van Atatürk İlkokulunda, ortaokulu Van Gölü Anadolu Lisesinde, liseyi Bursa Anadolu Lisesinde tamamladı. 2001 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Mekanik Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.